

## بررسی عوامل موثر در طراحی سرریز خاکی

ابوالفضل شمسایی<sup>۱</sup>، محمد مهدی جباری<sup>۲</sup> و مهدی غفوری<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۸۷/۱۰/۱۴ تاریخ پذیرش: ۸۸/۳/۲۶

### چکیده

با توجه به اهمیت سرریز خاکی (fuse plug) به عنوان یکی از سازه های خاکی مورد استفاده در طرح های آبرسانی و آبیاری، تا کنون پژوهش های گوناگونی به صورت تجربی و فراسنجی به منظور بررسی این نوع سازه ها انجام شده، ولی استفاده از شبیه های عددی در این زمینه، کم تر مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله سعی خواهد شد تا با استفاده از شبیه عددی BREACH که با روش finite difference، به حل معادله های هیدرولیک و انتقال رسوب پرداخته شده و زمان شستشوی سرریزهای خاکی متشکل از بدنه ی خاکی با هسته ی رسی قائم و مایل محاسبه گردد. در این بررسی نمودارهای مورد نیاز برای محاسبه ی زمان شستشوی سرریز خاکی با هسته ی رسی قائم و مایل ترسیم شده و بهترین نوع سرریز خاکی به صورت سرریزی باشیب هسته ی ۱۲۰ درجه و نسبت  $m/H$  برابر با ۴ درصد ( m ضخامت هسته و H ارتفاع خاکریز )، انتخاب شده است. به کمک شبیه های عددی BREACH، SEEPW، و شبیه STABL، درصد تراکم بهینه برای بدنه سرریز خاکی برابر با ۸۴ درصد بدست آمده است. همچنین، ضمن بررسی تأثیر جنس و دانه بندی مصالح مصرفی در بدنه ی سرریزهای خاکی در میزان شسته شدگی و خرابی با گذشت زمان، محدوده ی دانه بندی مناسب برای سرریز خاکی همگن و نا همگن نیز ارایه شده است. گفتنی است که با تحلیل و بررسی تأثیر انواع پوشش شیروانی بدنه ی سرریزهای خاکی، مشخص شده است که انتخاب پوشش سنگچین در دامنه ی پایین دست چین سرریز، نسبت به پوشش گیاهی از وضعیت بهتری برخوردار بوده است.

واژه های کلیدی: سرریز خاکی، شبیه عددی، شستشو، پوشش سنگچین.

<sup>۱</sup> - استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

<sup>۲</sup> - عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات فارس

<sup>۳</sup> - کارشناس ارشد سازه های هیدرولیکی

\* نویسنده ی مسؤول مقاله Email: jabbari @ fsriau.ac.ir

## پیشگفتار

درباره ی طراحی سرریز خاکی تاکنون پژوهش های تجربی زیادی صورت گرفته است. تینی و هاس (۱۹۶۱) در زمینه ی خاکریز های شسته شونده و دارای هسته ی رسی پژوهش هایی را انجام داده اند. آن ها به منظور روشن شدن نحوه ی شسته شدن این سرریزها، سرعت شسته شدن و نقش نهر راهنما، آزمایش هایی را در مورد شبیه های ۱:۲۰ و ۱:۴۰ و شبیه بزرگ مقیاس ۱:۲ انجام داده اند که نتایج بسیار مفیدی را فراروی طراحان قرارداده است (تینی و هاس، ۱۹۶۱). آزمایش های چی (۱۹۸۴) در دانشگاه ویندسور کانادا نیز در طرح خاکریزهای همگن و خاکریزهای دارای هسته ی رسی برای استفاده در سرریز های خاکی مرجع ارزشمندی است. در این پژوهش مراحل شسته شدن خاکریزها به دقت بررسی شده اند (چی، ۱۹۸۴). پژوهش اداره ی عمران آمریکا (۱۹۸۴ و ۱۹۹۸) درباره ی شرایط حاکم بر این سرریزها نتایجی بسیار روشن و مهم را ارائه کرده است (تونی، ۱۹۹۸ و کلی فورد ۱۹۸۵). آقایان انگلز و چیس (۱۹۸۵) طراحی و عملکرد سرریزهای شسته شونده ی سوازیلند را بررسی کردند و آلتینیگر و بروشین (۱۹۸۴) نحوه ی شبیه سازی این سرریزها را بررسی و پیشنهادهایی را برای بهبود شبیه سازی این گونه سرریزها ارائه کرده اند. پژوهش اداره ی محیط زیست چین در مورد شکست شبیه بزرگ مقیاس سد یاهکو نمونه ای بسیار مناسب برای اطمینان از درستی شبیه های عددی فراهم آورده است (لوکولا، ۱۹۹۳).

از جمله شبیه های عددی بررسی شده نیز می توان به گروهی شبیه های عددی ویرانی سد که به وسیله ی ریتز ماشیون و سرانگلو، لوکولا، پان، ریتز و شن و سینگ تعریف شده اند و دارای اشکالاتی هستند، اشاره کرد. آن ها جریان آب بر روی سرریز با وجود ناپایداری، پایدار فرض کرده اند (میکو، ۲۰۰۱).

شبیه عددی Dave F [۱۰] که با روش حجم (های) محدود  $f^1$  کار می کند، به وسیله ی فرولیچ توسعه داده شد. با این شبیه شکست دو سرریز خاکی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج آن با دستاوردهای آزمایش های تجربی

نزدیک بودند. این نرم افزار به صورت گسترده در اختیار پژوهشگران قرار نگرفته است (فروهلش، ۲۰۰۲).

افزون بر موردهای ذکر شده، شبیه های عددی دیگری به وسیله ی مراجع معتبر توسعه داده شده است. شبیه BREACH، که به وسیله ی اداره ی هواشناسی آمریکا ارائه شده است، از آن جمله است. در این مقاله از کارهای فیزیکی چی که در دانشگاه ویندسور کانادا انجام شده، برای واسنجی کردن شبیه عددی BREACH استفاده شده است.

پس از واسنجی شبیه یاد شده و با استفاده از شبیه عددی SEEPW و نیز شبیه تعادل حدی STABL، پژوهش های تکمیلی در مورد سرریز خاکی صورت گرفته است. در این پژوهش به عواملی از جمله تأثیر ضخامت هسته بر سرعت شسته شدن سرریز خاکی قائم، تأثیر شیب بالادست و پایین دست بر سرعت شسته شدن سرریز خاکی قائم، تأثیر ضخامت هسته بر سرعت شسته شدن سرریز خاکی مایل، تأثیر شیب هسته بر سرعت شسته شدن سرریز خاکی مایل، تعیین بهترین ترکیب شیب و ضخامت هسته در سرریز خاکی، تعیین تراکم کمینه (بهینه) در بدنه ی سرریز خاکی، دستیابی به پیشنهادهایی در مورد بهبود کارهای فیزیکی با توجه به نتایج شبیه های عددی، تعیین محدوده ی مناسب دانه بندی برای خاکریزهای همگن و نا همگن و بررسی تأثیر پوششی دامنه ی پایین دست بر ساز و کار شکست سرریز خاکی، پرداخته شده است.

از لحاظ نظری، مسأله ی فرسایش سرریز خاکی از دو جنبه ی هیدرولیکی برخوردار است. نخست مسأله ی جریان روی سرریز که با معادله های پیوستگی و اندازه ی حرکت حل می شود و دوم مسأله ی انتقال رسوب که با معادله های میر - پیتر و مولر که به وسیله ی اسمارت برای شیب های تند اصلاح گردیده است، حل می شود.

اساس شبیه BREACH نیز متکی بر مطالب بالاست. بدین صورت که ابتدا معادله های سنت ونانت راحل کرده، سپس با حل معادله های انتقال رسوب، شرایط هندسی جدیدی را برای حل معادله های سنت و نانت تعریف می کند.

<sup>1</sup> - finite volume

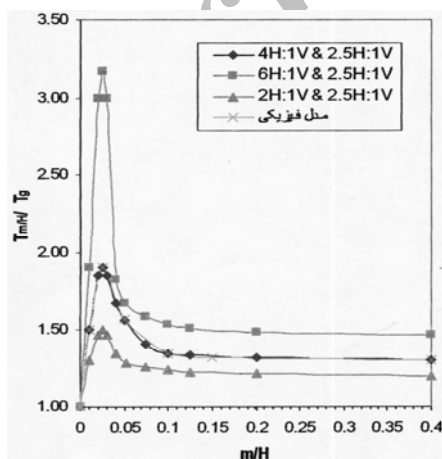
- حالت چهارم عبارت است از خاکریزی با شیب پایین دست 4H:1V و بالا دست 4H:1V

- حالت پنجم عبارت است از خاکریزی با شیب پایین دست 1.5H:1V و بالا دست 4H:1V

نتایجی که برای دو حالت بالادست و پایین دست به گونه ی جداگانه تجزیه و تحلیل شده اند، در شکل های ۲ و ۱ آمده اند.

از آنجا که نتایج بدست آمده از شبیه BREACH با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی دارند، از این رو از شبیه مزبور برای تحلیل چهار حالت دیگر شیب بدنه ( که در بالا توضیح داده شد) نیز استفاده شده است .

شکسته شدن سر ریز خاکی بر اثر برش هسته در شبیه فیزیکی، همان گونه که در شکل های ۱ و ۲ مشخص است، در  $m/H > 0.025$  ضخامت هسته و H ارتفاع خاک ریز است ( رخ می دهد که این مقدار به ازای شیب های گوناگون پایین دست ثابت نیست بلکه با کاهش شیب افزایش یافته و به اندازه ی  $m/H > 0.05$  می رسد. با افزایش شیب اندازه ی  $m/H$  کاهش می یابد و به مقدار  $m/H > 0.015$  می رسد، به این دلیل که با کاهش شیب در واقع ضخامت بدنه و ضخامت هسته ی مورد نیاز جهت برش افزایش می یابد؛ بنابراین،  $m/H$  افزایش می یابد و بالعکس .



شکل ۲. نمودار نشان دهنده ی تغییرات  $m/H$  به  $T_mH/T_g$  بدست آمده از شبیه BREACH در بالا دست.

## ابعاد بهینه ی سرریز خاکی

### سرریز خاکی با هسته ی قائم

برای محاسبه های مربوط به شستشوی سرریز خاکی با هسته ی قائم از مصالحی با ویژگی های زیر استفاده شده است .

پوسته ی ماسه ای :

$$C = 60 \frac{lb}{ft^2}, D_{50} = 0.1, \frac{D_{90}}{D_{30}} = 1, \phi = 40^\circ$$

$$\gamma_{sat} = 120 \frac{lb}{ft^3}, e = 0.45, n = 0.31$$

هسته ی رسی :

$$C = 750 \frac{lb}{ft^2}, D_{50} = 0.002, \frac{D_{90}}{D_{30}} = 1, \phi = 22^\circ$$

$$\gamma_{sat} = 108 \frac{lb}{ft^3}, e = 0.55, n = 0.36$$

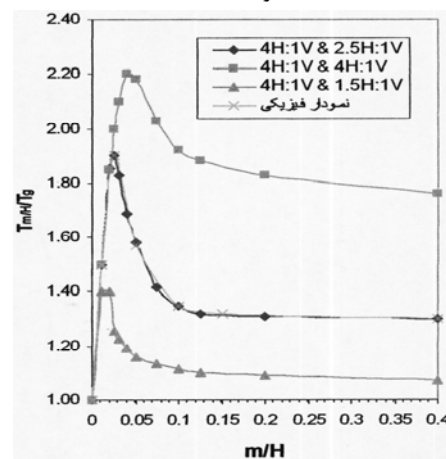
آبنمای سیل ورودی =  $Q^{in} = 3531 \text{ cfs}$  ، مساحت مخزن =  $100 \text{ acre ft}$  ، حجم مخزن =  $100 \text{ acre ft}$

برای بررسی فرسایش سرریز خاکی با هسته ی قائم پنج حالت به شرح زیر در نظر گرفته شده است :

- حالت نخست همان حالتی است که در آزمایشگاه (چی، ۱۹۸۴) برای رسم نمودار شکل ۱ و ۲ آزمایش شده است 2.5H:1V ، 4H:1V

- حالت دوم عبارت است از خاکریزی با شیب پایین دست 2.5H:1V و بالادست 6H:1V

- حالت سوم عبارت است از خاکریزی با شیب پایین دست 2.5H:1V و بالا دست 2.H:1V



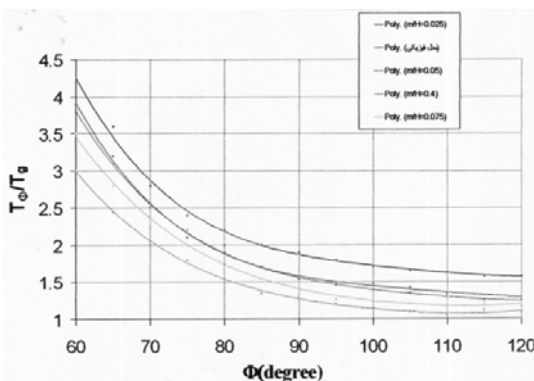
شکل ۱. نمودار نشان دهنده ی تغییرات  $m/H$  به  $T_mH/T_g$  بدست آمده از شبیه BREACH در پایین دست.

خمش می شکنند و سریع تر شسته می شود. بهترین نسبت  $m/H$ ، 0.4 است زیرا در این حالت هسته ی رسی بر اثر برش، سریع تر گسیخته می شود.

با توجه به نتایج ذکر شده تا کنون، می توان ابعاد بهینه را برای سر ریز خاکی به صورت زیر در نظر گرفت :

- نخست حالتی است که کیفیت مصالح موجود نامناسب باشد. در این شرایط با توجه به کاهش شیب های بالادست و پایین دست ، باید از سر ریز خاکی با مصالح همگن استفاده شود. ابعاد سر ریز خاکی باید به گونه ای انتخاب شوند که پس از انجام محاسبات پایداری حداقل ضرایب خاکی بدست آید.

- در حالت دوم، مصالح موجود از کیفیت خوبی برخوردارند. در این شرایط با توجه به تند بودن شیب های سر ریز خاکی می توان از هر دو نوع همگن و ناهمگن استفاده کرد. در نوع ناهمگن، ضخامت مناسب برای هسته از ضرب ارتفاع سر ریز خاکی در مقدار ۴ درصد بدست آمده و زاویه ی مناسب تمایل هسته ، ۱۲۰ درجه است.



شکل ۳. نمودار بدست آمده از شبیه BREACH.

### تعیین تراکم بهینه

برای ساختن سر ریز خاکی روند کار بدین صورت است که ابتدا کامیون محموله ی مصالح را تخلیه، سپس گریدر آن پخش می کند تا شرایط برای کوبیدن با غلطک ها مهیا گردد. در این شرایط خاک تراکمی در حدود ۸۰ درصد دارد (لوکولا، ۱۹۹۳ و وال، ۱۹۹۸). سپس با عبور غلطک ها به گونه ی متوالی از روی خاک پخش شده،

با توجه به بررسی های انجام شده درباره ی سر ریز خاکی با هسته ی قائم، چنانچه کیفیت نامناسب مصالح باعث کم شدن شیب های سر ریز خاکی گردد، بهتر است که در این حالت از مصالح همگن استفاده شود، چه سر ریز خاکی از نوع ناهمگن (باهسته ی رسی قائم) نسبت به نوع همگن سرعت شسته شدن را تا ۳/۲ برابر کاهش می دهد (شکل ۲ و ۳)، ولی اگر کیفیت مناسب مصالح باعث کند شدن شیب های سر ریز خاکی شوند، در مصالح همگن مشکل زیادی را ایجاد نمی کنند زیرا سرعت شسته شدن را فقط به میزان ۱/۵ برابر کاهش می دهد.

گفتنی است که تغییر شیب بالادست سر ریز خاکی بر نسبت  $m/H$  مورد نیاز برای برش خوردن هسته تأثیری نداشته و اندازه ی آن به صورت  $m/H > 0.025$  ثابت است. دلیل این مطلب آن است که کاهش یا افزایش شیب بالا دست بر برش خوردن و تشکیل گوه ی لغزش پایین دست تأثیری ندارد.

### سر ریز خاکی با هسته ی رسی قائم

در این حالت به ازای  $m/H$  های گوناگون، شبیه BREACH اجرا شده است. در این راستا زمان شسته شدن سر ریز خاکی به ازای  $\phi$  از ۶۰ تا ۱۲۰ درجه محاسبه گردیده (  $\phi$  زاویه ی تمایل هسته) و نتایج آن در شکل ۳ آمده اند. منحنی مربوط به  $m/H > 0.05$ ، با نمونه بدست آمده از شبیه فیزیکی مطابقت خوبی دارد. در دیگر نمودارها میزان تغییرات  $T_\phi/T_g$  زمان شکستن سر ریز خاکی با هسته ی مایل،  $T_g$  زمان شکستن سر ریز خاکی با مصالح همگن تقریباً بین ۱ تا ۴/۵ می باشد.

علت این که در  $m/H > 0.025$  نسبت زمان مقدار بزرگتری دارد (همانند هسته قائم)، این است که تا مقدار  $m/H = 0.025$ ، هسته ی رسی همانند قشری مقاوم از فرسایش پایین دست خود جلوگیری می کند و در مقادیر بالاتر با زیاد شدن ضخامت لایه ی رسی ( کم شدن مقاومت برشی به علت مقدار کم زاویه ی ایستایی مصالح رسی  $\phi$ ) مسأله ی برش گوه پیش آمده و سر ریز خاکی زودتر ویران می گردد. بهترین زاویه ی تمایل هسته ۱۲۰ درجه است زیرا در این حالت هسته ی رسی تحت لنگر

- کم ترین درصد تراکم مورد نیاز برای جلوگیری از رخدادن پدیده ی رگاب در بدنه.

### زمان لازم برای شسته شدن سرریز خاکی در درصد تراکم های گوناگون

این مساله با نرم افزارهای BREACH آزمون شده و به ازای درصد تراکم های گوناگون، ویژگی های مصالح به شبیه معرفی گردیده است (جدول ۱). با توجه به موردهای بالا، خاکریز با شیب بالادست ۴ و پایین دست ۲/۵ مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۴، زمان لازم را برای شسته شدن خاکریز به ازای درصد تراکم های گوناگون نشان می دهد. همان گونه که در این شکل مشاهده می شود، هرچه درصد تراکم کم تر شود، به دلیل کم شدن فراسنج های مقاومتی خاک، خاکریز در زمان کم تری شسته می شود.

### ضریب ایمنی پایداری شیروانی ها در درصد تراکم های گوناگون

در این حالت بادر نظر گرفتن ویژگی های ارایه شده در جدول ۱، به کمک شبیه رایانه ای STABL، پایداری شیروانی ها بررسی شده است. براساس بررسی های انجام گرفته، حتی در تراکم کمینه ۸۰ درصد نیز مشکلی را از لحاظ پایداری شیب های سرریز خاکی ایجاد نمی کند.

درصد تراکم افزایش می یابد. مسأله ی تراکم در سرریز خاکی با سدهای خاکی فرق داشته و شامل مورد های زیر است:

- بر خلاف سدهای خاکی، می بایست بر اثر روگذری، سرریز خاکی در کم ترین زمان ممکن شسته شود تا نگرانی در مورد تأخیر در شستشوی آن وجود نداشته و امنیت سد به خطر نیفتد؛ لذا، این مسأله مارا به سوی کاهش درصد تراکم هدایت می کند.
- از سوی دیگر، برخلاف نکته ی قبل، کم کردن درصد تراکم باعث تراوش آب در جلوی سرریز خاکی و در نتیجه کاهش پایداری شیروانی ها و احتمال وقوع پدیده ی رگاب در بدنه (piping) را در پی خواهد داشت.

این دو موضوع باعث می شود تا تراکم بهینه در بدنه ی سرریز خاکی منظور شود. در این راستا، تراکم بهینه ی بدنه ی سرریز خاکی با توجه به سه موضوع زیر مورد توجه قرار می گیرد:

- زمان لازم برای شسته شدن سرریز خاکی در درصد تراکم های گوناگون،
- ضریب ایمنی پایداری شیروانی ها در درصد تراکم های گوناگون،

جدول ۱. ویژگی های مصالح بکار رفته در شبیه با درصد تراکم های گوناگون.

| درصد تراکم R(%) | $\gamma_d$ (KN/m <sup>3</sup> ) | $\gamma_{sat}$ (KN/m <sup>3</sup> ) | نسبت تخلخل e | زاویه ی ایستایی $\phi$ | چسبندگی C(t/m <sup>2</sup> ) |
|-----------------|---------------------------------|-------------------------------------|--------------|------------------------|------------------------------|
| 100             | 20.8                            | 23.3                                | 0.32         | 37                     | 2.5                          |
| 96              | 20.0                            | 22.4                                | 0.38         | 36.4                   | 2.06                         |
| 92              | 19.1                            | 21.4                                | 0.44         | 35.8                   | 1.62                         |
| 88              | 18.3                            | 20.5                                | 0.50         | 35.2                   | 1.18                         |
| 84              | 17.5                            | 19.6                                | 0.57         | 34.6                   | 0.74                         |
| 80              | 16.6                            | 18.6                                | 0.56         | 34                     | 0.3                          |

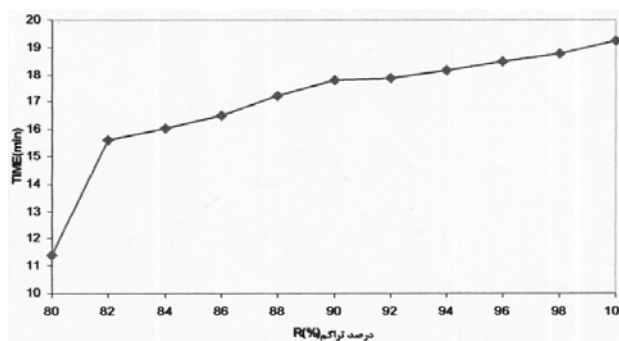
### کمترین درصد تراکم مورد نیاز برای جلوگیری از رخ دادن پدیده ی رگاب (piping) در بدنه ی سرریز خاکی

همان گونه که می دانیم، عاملی که پدیده ی رگاب را در بدنه ی سرریز خاکی تحت تاثیر خود قرار می دهد، سرعت تراوش آب در محیط متخلخل است. با کاهش تراکم، اندازه ی حفره های بین ذرات خاک و به تبع آن سرعت آب افزایش یافته و پدیده ی رگاب در بدنه بروز می کند.

در این مرحله ابتدا به کمک شبیه عددی SEEPW، سرعت آب در درصد تراکم های گوناگون بدست آمده است (جدول ۲). گفتنی است که  $K$  ضریب هدایت آبی در درصد تراکم های گوناگون از رابطه ی تریاقی محاسبه شده است (انگلس و همکاران، ۱۹۸۵):

$$K_d = 200e^2 D_{10}^2 \quad (1)$$

در این رابطه،  $e$  نسبت تخلخل، و  $D_{10}$  قطری است که ۱۰ درصد ذرات از آن کوچک تر باشند.



شکل ۴. زمان لازم برای شسته شدن خاکریز به ازای درصد تراکم های گوناگون.

جدول ۲. نتایج تجزیه و تحلیل به کمک شبیه SEEPW.

| R (%) | e    | n    | $\square$ | C(t/m <sup>2</sup> ) | K(ft/s) | V(ft/s)  |
|-------|------|------|-----------|----------------------|---------|----------|
| 100   | 0.32 | 0.24 | 37        | 2.5                  | 2.0E-06 | 1.10E-06 |
| 96    | 0.38 | 0.27 | 36.4      | 2.06                 | 2.7E-06 | 1.50E-06 |
| 92    | 0.44 | 0.30 | 35.8      | 1.62                 | 3.6E-06 | 2.10E-06 |
| 88    | 0.50 | 0.33 | 35.2      | 1.18                 | 4.8E-06 | 2.82E-06 |
| 84    | 0.57 | 0.36 | 34.6      | 0.74                 | 6.2E-06 | 3.55E-06 |
| 80    | 0.65 | 0.39 | 34        | 0.3                  | 8.1E-06 | 4.70E-06 |

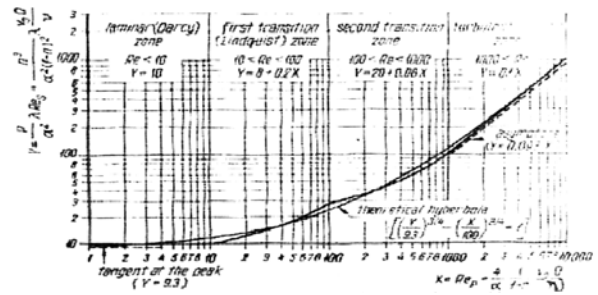
با توجه به سرعت های بدست آمده در جدول ۲ و با استفاده از نتایج کار ورونز (۱۹۲۷)، زامارین (۱۹۲۸) و لیندکوئیست (۱۹۳۳)، در شکل ۵، مسأله ی حمل ذرات بررسی شده است. نحوه ی استفاده از این نمودار بدین ترتیب است که محورهای  $x$  و  $y$  تعیین شده و محل تلاقی آن ها مشخص می گردد. در این حالت چنانچه نقطه ی یاد شده بالای نمودار باشد، ذرات ثابت خواهند بود. نتایج این بررسی در جدول ۳، آرایه شده اند.

جدول ۳. نتایج نهایی وضعیت حرکت ذرات.

| R (%) | V (ft/s) | y    | x     | وضعیت |
|-------|----------|------|-------|-------|
| 100   | 1.10E-06 | 0.15 | 1.97  | ساکن  |
| 96    | 1.50E-06 | 0.21 | 3.03  | ساکن  |
| 92    | 2.10E-06 | 0.31 | 4.52  | ساکن  |
| 88    | 2.82E-06 | 0.43 | 6.56  | ساکن  |
| 84    | 3.55E-06 | 0.57 | 9.34  | ساکن  |
| 80    | 4.70E-06 | 0.79 | 13.08 | متحرک |

از لحاظ نظری ۸۴ درصد، کمترین درصد تراکمی است که پدیده ی رگاب در بدنه رخ نمی دهد. با توجه به دقت و تجربه ی پیمانکار و کیفیت مصالح و دیگر عامل های موثر، می توان در صورت لزوم این مقدار را افزایش داد.

کناری با امتداد قائم،  $20^\circ$  است. این در حالی است که خاک شماره ی ۲ (با مصالح ریز دانه ی بیش تر)، بر اثر فرسایش مقطعی مستطیلی می سازد، یعنی دیواره های جانبی مقطع فرسایش قائم اند. در شکل ۷ نمودارهای مربوطه به حجم مصالح شسته شده در واحد زمان ارایه شده اند. همان گونه که مشخص است، لحظه ی شکست سرریز خاکی مربوط به زمانی است که به گونه ی ناگهانی، حجم مصالح انتقال یافته فزونی می یابد، لذا با توجه به شکل های بالا آشکار می گردد که خاکریز با دانه بندی ریزتر (شماره ی ۲)، به علت کم بودن زاویه ی ایستایی خاک و در نتیجه کم بودن مقاومت برشی آن زودتر شسته شده و بیش ترین بده مصالح حمل شده در حدود  $160 \text{ ft}^3/\text{s}$  می باشد. این در حالی است که خاکریز با دانه بندی درشت تر (شماره ی ۱)، به علت بالا بودن مقاومت برشی مصالح و وزن بیش تر آن ها، دیرتر شسته می شود. بیش ترین بده ی مصالح حمل شده در واحد زمان برای این نوع خاک بیشتر و در حدود  $230 \text{ ft}^3/\text{s}$  است. خاکریز شماره ی ۱ به علت کم بودن چسبندگی بین ذرات آن، به گونه ی مداوم شسته می شود به نحوی که شکاف ایجاد شده در این خاکریز پس از ۱۱ دقیقه (زمانی که فرسایش خاکریز ۲ متوقف می شود)، دارای عرض  $9 \text{ ft}$  در پایین شکاف و  $12.1 \text{ ft}$  در بالای شکاف می باشد. این ارقام به طور مداوم زیاد می شوند، به گونه ای که پس از ۱۰ ساعت عرض شکاف در کف  $55 \text{ ft}$  و در بالا  $63 \text{ ft}$ ، می گردد. این در حالی است که خاکریز شماره ی ۲ پس از ۱۱ دقیقه از شروع فرسایش دارای عرض شکاف  $13.4 \text{ ft}$  می گردد؛ گفتنی است که این مقدار افزایش نیافته و در همین حد باقی می ماند.



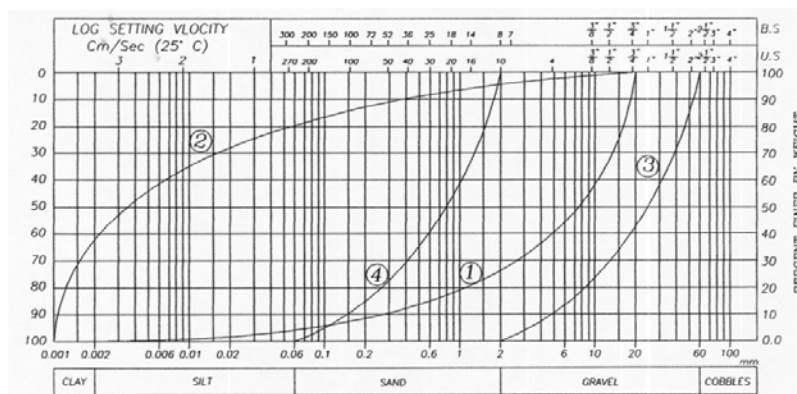
شکل ۵. نمودار حرکت ذرات خاک بر اثر رخدادن پدیده ی رگاب در بدنه [11].

## تأثیر دانه بندی در نحوه ی فرسایش خاکریز های

### سرریز های خاکی

### خاکریز های همگن

همان گونه که می دانیم، به علت کوچک بودن ابعاد سرریز خاکی، برای سهولت کار بهتر است که از یک نوع مصالح برای ساختن آن استفاده شود. این مصالح که در بدنه ی سدهای خاکی همگن نیز بکار می روند، معمولاً GC می باشد. نشانه های ۱ و ۲ در شکل ۶ منحنی های دانه بندی ممکن را برای مصالح GC نشان می دهند. در جدول ۴ نیز ویژگی های دو نوع خاک بالا آمده است. شیب های پایین دست و بالادست سرریز خاکی برابر با  $4H:1V$ ،  $2.5H:1V$  و عرض تاج و ارتفاع سرریز نیز به ترتیب برابر با  $15 \text{ ft}$  و  $10 \text{ ft}$  می باشند. برای بررسی و انتخاب منحنی دانه بندی مناسب (۱ یا ۲)، باید دو معیار سرعت شسته شدن و حجم مصالح شسته شده را در واحد سرریز یاد شده به وسیله ی شبیه BREACH مورد بررسی قرار گرفته است. خاک شماره ی ۱ (با مصالح درشت دانه بیش تر) بر اثر فرسایش، مقطعی دوزنقه ای را در جهت عمود بر جریان می سازد. زاویه ی دیواره های



شکل ۶. نمودار دانه بندی مصالح مصرفی در سرریز خاکی.

جدول ۴. ویژگی های خاک های مورد استفاده.

| مقادیر                 |                        |                        |                        | ویژگی خاک ها                     |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------------|
| نمودار ۴               | نمودار ۳               | نمودار ۲               | نمودار ۱               |                                  |
| 0.8 mm                 | 25 mm                  | 0.0035 mm              | 8 mm                   | D <sub>50</sub>                  |
| 3.75                   | 4.2                    | 50                     | 7.2                    | D <sub>90</sub> /D <sub>30</sub> |
| 120 lb/ft <sup>3</sup> | 140 lb/ft <sup>3</sup> | 110 lb/ft <sup>3</sup> | 130 lb/ft <sup>3</sup> | γ <sub>sat</sub>                 |
| 40°                    | 55°                    | 20°                    | 50°                    | زاویه ی اصطکاک داخلی             |
| 60 lb/ft <sup>2</sup>  | 0 lb/ft <sup>2</sup>   | 650 lb/ft <sup>2</sup> | 50 lb/ft <sup>2</sup>  | چسبندگی                          |

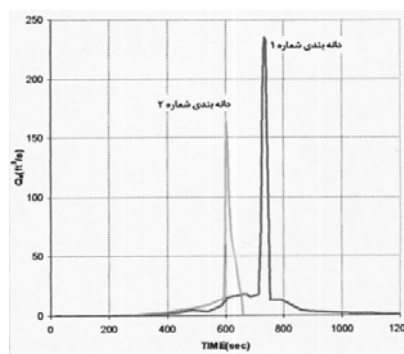
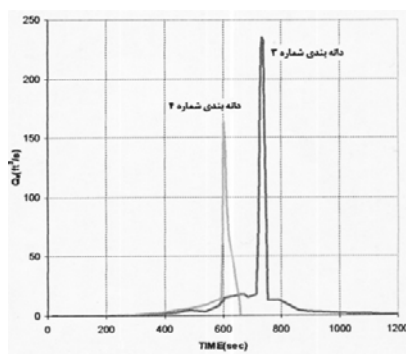
و در مصالح شنی با توجه به بالا بودن زاویه ی اصطکاک داخلی آن 17.5° می باشد. نرخ فرسایش مصالح در هر دو سرریز خاکی با توجه به غیر چسبنده بودن آن ها هیچ گاه متوقف نمی شود، به گونه ای که مصالح شنی پس از حدود ۱۲ دقیقه (زمان شکستن سرریز خاکی شنی)، شکافی به عرض 11.4<sup>ft</sup> در کف و 11.9<sup>ft</sup> در بالا ایجاد می کند و حال آن که این مقادیر در سرریز خاکی ماسه ای به ترتیب 9.9<sup>ft</sup> و 14.4<sup>ft</sup> می باشند. پس از گذشتن ۱۰ ساعت از شروع فرسایش، عرض شکاف ها در پایین و بالای سرریز خاکی (شنی) برابر با 62.5<sup>ft</sup> و 68.8<sup>ft</sup> و در سرریز خاکی (ماسه ای) برابر با 37.6<sup>ft</sup> و 46.9<sup>ft</sup> می گردد. همان گونه که در شکل ۸ مشخص است، سرریز خاکی (با مصالح شنی) به علت نداشتن چسبندگی بین ذرات آن زودتر می شکند. تفاوت زمانی ما بین شکسته شدن سرریز خاکی شنی با سرریز خاکی ماسه ای در حدود ۳۰ ثانیه است. بیشینه ی بده ی مصالح شسته شده در سرریز خاکی شنی 190<sup>ft<sup>3</sup>/s</sup> و در سرریز خاکی ماسه ای 220<sup>ft<sup>3</sup>/s</sup> است.

### خاکریز های نا همگن

در این حالت دو نوع مصالح شنی و ماسه ای برای پوسته ی سرریز خاکی در نظر گرفته می شوند. منحنی شماره ۳ مصالح شنی و منحنی شماره ۴ مصالح ماسه ای را در شکل ۶ نشان می دهد. در جدول ۴، ویژگی های مربوط به این دو گروه مصالح پوسته نیز آمده است. با توجه به جدول ذکر شده، خاکریزی همانند خاکریز بخش ۴- الف مورد بررسی قرار می گیرد، با این تفاوت که در آن از هسته ای مایل با شیب 1H:1V و پوسته هایی با شرایط جدول ۴ استفاده می شود. ضخامت هسته نیز 2<sup>ft</sup>، منظور می گردد. این دو نوع سرریز خاکی با کاربرد شبیه BREACH مورد بررسی قرار می گیرند.

دیواره های جانبی مقطع فرسایش، با توجه به غیر چسبنده بودن مصالح شن و ماسه به صورت غیر قائم می باشند، به گونه ای که زاویه ی این صفحه با امتداد قائم در مصالح ماسه ای (دانه بندی شماره ۴)، 25.0°





شکل ۸. بده مواد رسوبی بر اثر شکسته شدن سرریز خاکی ناهمگن.

شکل ۷. بده ی مواد رسوبی بر اثر شکسته شدن سرریز خاکی همگن.

می دهد، به گونه ای که این مقدار برابر با  $150 \text{ ft}^3/\text{s}$  می باشد، در حالی که برای سرریز بدون پوشش گیاهی این مقدار برابر با  $160 \text{ ft}^3/\text{s}$  است (شکل ۹). در ضمن شکاف در هر دو مورد یکسان و برابر با  $13.4 \text{ ft}$  می باشد.

#### استفاده از پوشش سنگی

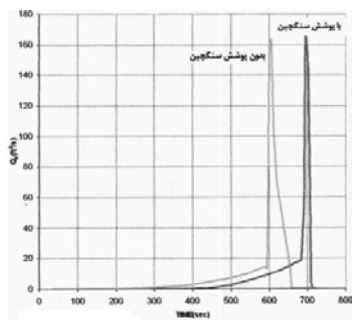
یکی دیگر از روش های حفاظت دامنه ی پایین دست، استفاده از پوشش سنگچین است. در این حالت نیز همانند بخش قبل دو سرریز خاکی با مصالح همگن، یکی با پوشش سنگچین و دیگری بدون پوشش سنگچین در نظر گرفته می شود. جهت بررسی یک پوشش سنگی به ضخامت  $1 \text{ ft}$  با ویژگی های زیر در نظر گرفته می شود:

$$D_{50}=100 \text{ mm}, D_{90}/D_{30}=2$$

شکستن سرریز خاکی با پوشش سنگچین  $1/5$  دقیقه پس از شکستن سرریز خاکی بدون آن صورت می گیرد. بیش ترین بده ی رسوبات حمل شده در هر دو مورد مساوی است (شکل ۱۰).

#### تأثیر استفاده از پوشش در دامنه ی پایین دست سرریز خاکی استفاده از پوشش گیاهی

در بخش ۴- الف مشخص شد که بهتر است در ساختن سرریز های خاکی همگن از مصالح GC ریز دانه تر استفاده شود. یکی از روش های محافظت دامنه ی پایین دست، استفاده از پوشش گیاهی می باشد. برای بررسی این موضوع، پوشش گیاهی با بلندی  $6 \text{ in}$  و مقاومت در برابر فرسایش تا سرعت  $6 \text{ ft/s}$ ، در نظر گرفته می شود. سرریز خاکی با پوشش گیاهی تا دقیقه ۱۲ پس از روگذری در مقابل فرسایش مقاومت کرده و ویرانی سرریز پس از آن آغاز می گردد. پس از شروع فرسایش، سرریز در عرض  $2/5$  دقیقه دچار شکست می شود و این در حالی است که سرریز بدون پوشش گیاهی،  $10$  دقیقه پس از شروع فرسایش شکسته شده، در کل سرریز با پوشش گیاهی  $4/5$  دقیقه شکست را به تأخیر می اندازد. سرریز با پوشش گیاهی افزون بر ایجاد تأخیر در زمان شکست، اندازه ی بیش ترین بده ی فرسایش مصالح را نیز کاهش



شکل ۱۰. بده ی مواد رسوبی بر اثر شکسته شدن سرریز

### خاکی.

شود، استفاده از نوع نا همگن مشکل زیادی را ایجاد نمی کند، چرا که سرعت شسته شدن را فقط به میزان  $1/5$  برابر می کاهد.

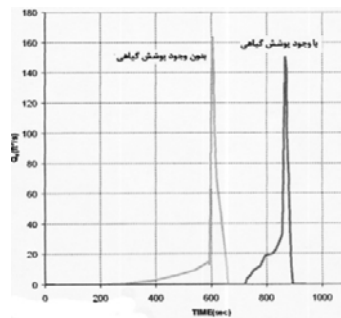
۴- تغییر شیب بالادست سرریز خاکی بر نسبت  $m/H$  مورد نیاز برای برش خوردن هسته تأثیری ندارد و میزان آن به صورت  $m/H > 0.025$  ثابت است. این مطلب بدان دلیل است که کاهش یا افزایش شیب بالادست بر برش خوردن و تشکیل گوه ی لغزش پایین دست تأثیری ندارد.

۵- علت این که در  $m/H = 0.025$ ، نسبت زمان  $(T\phi/Tg)$  مقدار بزرگ تری دارد ( همانند هسته ی قائم ) این است که تا مقدار  $m/H = 0.025$  هسته ی رسی، همانند قشری مقاوم، از فرسایش پایین دست خود جلوگیری می کند و در مقادیر بالاتر با زیاد شدن ضخامت لایه ی رسی ( کم شدن مقاومت برشی به علت مقدار کم زاویه ی ایستایی مصالح رسی،  $\phi$  )، مشکل برش گوه پیش آمده و سرریز خاکی زودتر ویران می گردد.

۶- بهترین زاویه ی تمایل هسته  $120^\circ$  درجه است زیرا در این حالت هسته ی رسی تحت لنگر خمشی می شکند و سریع تر شسته می شود.

۷- بهترین نسبت  $m/H$ ،  $0.4$  است زیرا در این حالت هسته ی رسی بر اثر برش سریع تر گسیخته می شود. با توجه به نتایج ذکر شده تا این جا می توان ابعاد بهینه را برای سرریز خاکی به صورت زیر در نظر گرفت:

الف- در صورتی که کیفیت مصالح موجود نامناسب باشد، با توجه به کاهش شیب های بالادست و پایین دست،



شکل ۹. بده ی مواد رسوبی بر اثر شکسته شدن سرریز خاکی.

### نتایج

۱- این که بین نمودار بدست آمده از شبیه عددی BREACH و نمودار بدست آمده از شبیه فیزیکی ( شکل های ۱، ۲ و ۳)، تفاوتی اندک وجود دارد به دلیل وجود فراسنج هایی نظیر  $f(C)$  و  $f(D_{90}/D_{30})$  است که در رابطه ی شبیه فیزیکی در نظر گرفته نشده اند و حال آن که این فراسنج ها در شبیه BREACH منظور شده اند.

۲- شکسته شدن سرریز خاکی بر اثر برش هسته در شبیه فیزیکی، همان گونه که در شکل های ۱ و ۲ مشخص است، در  $m/H > 0.025$  ( ضخامت هسته و  $H$  ارتفاع خاکریز است) اتفاق می افتد که این مقدار به ازای شیب های گوناگون پایین دست ثابت نبوده بلکه با کاهش شیب افزایش می یابد و به  $m/H > 0.05$  می رسد. با افزایش شیب این مقدار نیز افزایش می یابد و به  $m/H > 0.015$  می رسد. این مطلب به دلیل آن است که با کاهش شیب، در واقع ضخامت بدنه و ضخامت هسته ی مورد نیاز جهت برش افزایش می یابد؛ بنابراین،  $m/H$  افزایش می یابد و بالعکس.

۳- با توجه به بررسی های انجام شده درباره ی سرریز خاکی با هسته ی قائم، چنانچه کیفیت نامناسب مصالح باعث کم شدن شیب های سرریز خاکی گردد، بهتر است که در این حالت از مصالح همگن استفاده شود، چه، سرریز خاکی از نوع نا همگن ( با هسته ی رسی قائم) نسبت به نوع همگن، سرعت شسته شدن را تا  $3/2$  برابر کاهش می دهد ( شکل های ۱ و ۲)، ولی اگر کیفیت مناسب مصالح باعث تند شدن شیب های سرریز خاکی

مطالب ذکر شده، مصالح با دانه بندی شماره ی ۲ برای بدنه ی سرریز خاکی مناسب تر است. در مورد سدهای خاکی همگن نیز مصالح شماره ی ۲ ارجحیت دارند، چه، در صورت شکسته شدن سرریز خاکی شدت فرسایش آن پس از مدتی متوقف گردیده، آب کمتری از آن خارج شده و زیان های وارده به پایین دست کاهش می یابد.

۱۰- بین ساز و کار شکستن سرریزهای با پوسته ی شنی و ماسه ای تفاوت زیادی وجود ندارد، ولی به دلیل این که مصالح با پوسته ی ماسه ای در هنگام زلزله احتمال روانگرایی دارند و نیز به علت این که استفاده از ماسه به عنوان مصالح پوسته مرسوم نیست، استفاده از ماسه به عنوان مصالح پوسته توصیه نمی شود. از سوی دیگر از لحاظ اجرایی نیز تراکم مصالح درشت دانه با سهولت بیش تری صورت می گیرد. لذا، با توجه به مطالب بالا، مصالح درشت دانه تر برای پوسته ی سرریز خاکی مناسب ترند (منحنی شماره ی ۳ در شکل ۶).

۱۱- سرریز خاکی با پوشش گیاهی در حدود ۴/۵ دقیقه دیرتر از سرریز بدون پوشش دچار شکست می شود (شکل ۹). از سوی دیگر، استفاده از پوشش سنگچین در دامنه ی پایین دست سرریز خاکی باعث تأخیر ۹۰ ثانیه ای در شکستن آن می شود. ساز و کار شکستن سرریزهای بدون پوشش با ساز و کار شکستن سرریزهای دارای پوشش نزدیک تر نسبت به سرریزهای با پوشش گیاهی است؛ بنابراین، به لحاظ فنی، استفاده از پوشش سنگچین بهتر از پوشش گیاهی است، چه، افزون بر مسأله ی سرعت شسته شدن، پوشش گیاهی اجازه ی فرسایش خاک زیر خود را از ابتدای روگذری نمی دهد، ولی در پوشش سنگچین از همان ابتدای روگذری با نفوذ آب به زیر سنگچین، فرسایش شروع می شود. با توجه به این موضوع مشخص می شود که بر خلاف سرریزهای خاکی، در بدنه ی سدهای خاکی، استفاده از پوشش گیاهی بهتر از پوشش سنگچین در دامنه ی پایین دست آن است، چه، این امر شکستن سرریز خاکی را (در صورت روگذری) اندکی به تأخیر می اندازد؛ لذا، توصیه می شود که سدهای خاکی را تا آنجا که امکان دارد، با گیاه بپوشانند.

باید از سرریز خاکی با مصالح همگن استفاده شود. ابعاد سرریز باید به گونه ای انتخاب شوند که پس از انجام محاسبات کم ترین پایداری ضرایب خاکی بدست آید. دانه بندی مناسب برای این نوع سرریز خاکی در بند ۹ ارایه شده است.

ب- در صورتی که مصالح موجود از کیفیت خوبی برخوردار باشند، با توجه به تند بودن شیب های سرریز خاکی می توان از هر دو نوع همگن و نا همگن استفاده کرد. در نوع نا همگن، ضخامت مناسب برای هسته از ضرب ارتفاع سرریز خاکی در مقدار ۰.۴ بدست آمده و زاویه ی مناسب تماسی هسته، ۱۲۰ درجه می باشد.

۸- مسأله رخدادن پدیده ی رگاب در بدنه ی (piping) بر اساس رهنمودی همانند نمودار شیلدز بررسی می شود. این نمودار حاصل کار ورونز، زامارین و لیند کوئیسست است. بر اساس نمودار یاد شده در مصالح با درصد تراکم کم تر از ۸۴ درصد، احتمال وقوع پدیده ی رگاب در بدنه وجود دارد، لذا لازم است تا تراکم بهینه ی مصالح با توجه به تجربه و مهارت پیمانکار در اجرای سرریز خاکی، کیفیت مصالح و غیره، دست کم ۸۴ درصد در نظر گرفته شود.

۹- سرریز خاکی با مصالح شماره ی ۱ (شکل ۶) با  $D_{50}=8^{mm}$ ، پس از ۱۱ دقیقه دارای شکافی به پهنای  $10^{ft}$  شده است و این مقدار به طور مداوم افزایش می یابد به گونه ای که پس از مدت زمانی در حدود ۱۰ ساعت، عرض شکاف به حدود  $59^{ft}$  می رسد؛ لذا، استفاده از مصالح شماره ی ۱ به عنوان مصالح سرریز، از جنبه ی اقتصادی توجیه ناپذیر می باشد. در حالی که فرسایش سرریز با مصالح شماره ی ۲ (شکل ۶) با  $D_{50}=0.0035^{mm}$  پس از ۱۱ دقیقه متوقف می شود و در این هنگام سرریز دارای شکافی به پهنای  $13.4^{ft}$  است؛ بنابراین، چنانچه از مصالح شماره ی ۲ برای بدنه ی سرریز خاکی استفاده شود، می توان به گونه ای برنامه ریزی کرد که بقیه ی طول تاج سرریز از مصالحی نسبتاً خوب و مقاوم بنا گردد. از سوی دیگر، با توجه به شکل ۷ زمان شکسته شدن سرریز خاکی با مصالح شماره ی ۲ در حدود ۲ دقیقه زودتر از سرریز اطمینان با مصالح شماره ی ۱ صورت می گیرد، لذا با توجه به

## منابع

1. Altinakar. M , bruschin, J. 1984. Fuse spillway. modeling symposium on scale effect in Modeling Hydraulic Structure, Germany.
2. Chee S. P. April 1984. wash out of spill way dams, proceeding of the 1<sup>st</sup> International Conference Southampton, England.
3. chee S.P.1988. Models and scales effects related to erosion of Granular dam, Proceeding of Modeling Soil Water Structure Interaction, Kolkman etal.(eds) , Balkema, Rotter dam.
4. Engels ,E.T. Chase Sh. June 1985. A Design and operation of fuze-plug spilling in Swaziland, Water Power and Dam Construction.
5. Froehlich, David C. 2002. impact project field tests 1 and 2: 'Blind' simulation by DaveF, Foster Wheeler Environmental Corporation, USA.
6. Huokuna Mikko. 30<sup>th</sup> june 2001.  
A numerical erosion model for embankment dam failure, Helsinki.
7. Kovacs G. 1981. Developments in water science, seepage hydraulics London.
8. Loukola E, Mikko H, wang L, 1993. Yahekou Dam Breach Test Case.
9. Pugh s, Clifford A. 1985. Hydraulic model studies of fuse-plug embankments, RED-ERC-85-7, December.
10. Tinney, E.R Hus, H.Y. May 1961. Mechanics of washout of an erodible Fuse-Plug, ASCE Journal of Hydraulics Division ,vol 87, No Hy3.
11. Wahl T, L. July 1998. United States Bureau of Reclamation, prediction of embankment dam breach parameters.

Archive