

# تحلیل پی و بدنه سدهای خاکی در حالت استاتیکی و شبه استاتیکی با استفاده از مدل های عددی



فصلنامه علمی تخصصی  
مهندسی و مدیریت ساخت

سال اول، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۵

نویسنده مسئول: مسعود فتاحیان  
آدرس ایمیل:

masuod.fatahian20@gmail.com

مسعود فتاحیان \*

دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشگاه آزاد واحد مهاباد

میکائیل یوسف زاده

استادیار دانشگاه آزاد واحد مهاباد

یوسف کوه زادیان

کارشناس ارشد سازه های هیدرولیکی

## چکیده:

تحلیل استاتیکی و شبه استاتیکی سدهای خاکی در مراحل مختلف ساخت و بهره برداری از اهمیت زیادی برخوردار می باشد در این تحقیق پایداری شیروانی سد ایلام در مراحل نامبرده استاتیکی و شبه استاتیکی در شتاب های افقی زلزله به بزرگی ۰/۱، ۰/۱۲، ۰/۱۳، ۰/۱۴ و ۰/۱۵ شتاب گرانش زمین با استفاده از نرم افزار slope/w بررسی شده است. مقایسه نتایج حاصل از مدل با استاندارد گروه مهندسين ارتش آمریکا مؤید پایداری شیروانی ها در دو حالت استاتیکی و شبه استاتیکی سد ایلام می باشد افت سریع مخزن تأثیر چندانی بر پایداری شیب پایین دست سد. نتایج تحلیل این گونه نشان می دهند که هسته مایل با نفوذپذیری کم به خوبی در مقابل آب تراوش شده به داخل سد مقاومت نموده به طوری که جریان در داخل هسته به شدت افت می کند. بنابراین، قسمت شیب پایین دست سد خاکی همواره خشک باقی می ماند.

کلمات کلیدی: سد خاکی، پایداری شیروانی ها، تحلیل استاتیکی، شبه استاتیکی

## Analysis Of Foundation And Fuselage Of Dams In Static And Quasi-Static By Using Numerical Models

Masoud Fatahian \*

M.Sc. Student, Construction, Azad University of Mahabad, Iran

Michael Yousofzadeh

Assist. Prof, at Azad University of Mahabad, Iran

Yousef Koozhadian

M.Sc. Student, hydraulic structures, Azad University of Mahabad, Iran

V. 01 No. 02 - Summer 2016

Corresponding author:  
Masoud Fatahian

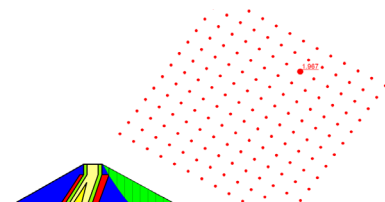
Email address:  
masuod.fatahian20@gmail.com

## ۱- مقدمه

به طور کلی میتوان گفت سد خاکی، ساختمان یا تأسیساتی است که بر روی رودخانه یا مسیل با استفاده از مصالح بدون ملات به منظور ذخیره و بالا آوردن سطح آب در پشت آن ساخته می شود. به عبارت دیگر یک سد خاکی نیز مانند سد بتنی هم باید بتواند سطح آب را در پشت خود بالا بیاورد و در مقابل فشار آب مقاومت کند و هم قادر به ذخیره آب باشد، یعنی در مقابل، آب غیر قابل نفوذ باشد. مهندسی سد را میتوان مجموعه ای از علوم فنی و پایه مهمی دانست که در کنار یکدیگر طراحی و اجرای سد را ممکن می سازد و سازه سد را از نظر بارگذاری های وارده و مقاومت در برابر عوامل مخرب مورد بررسی قرار می دهند [۴]. یکی از عوامل مؤثر و بسیار مهم در پایداری سدهای خاکی، مقاومت برشی مصالح خاکی در بدنه و پی سد است. مقاومت برشی خاک ها تابع اندازه ذرات، دانه بندی، تراکم، ساختمان، رطوبت و شرایط زهکشی در حین برش، سرعت برش و در مورد خاک های چسپنده، تاریخچه بارگذاری است. مقاومت برشی توده خاک، مقاومت داخلی واحد سطح آن خاک است که می تواند برای مقابله با گسیختگی یا لغزش در امتداد هر صفحه داخلی، بروز دهد پایداری شیروانی ها از مباحث مهم مورد توجه مهندسی می باشد. یکی از دلایل اهمیت این موضوع خسارات ناشی از لغزش شیروانی های خاکی است بطوریکه که لغزش یک شیب باعث از بین رفتن جان انسان ها و یا به طور مثال باعث خرابی جبران ناپذیر یک سد خاکی می شود. لذا با توجه به اهمیت شیروانیهای خاکی تأثیر نیروهای استاتیکی و زلزله در پایداری آن از اهمیت فوق العاده ای برخوردار است. از دیدگاه اقتصاد مهندسی همچنین بدست آوردن ضریب اطمینان و سطح لغزش بهینه باعث کاهش حجم خاکبرداری و یا خاکریزی با تغییر اندک شیب شیروانی در سازه های بزرگ می شود و برای بررسی پایداری شیروانی ها روش های مختلفی ارائه شده است که می توان روش تحلیل استاتیکی و پایداری لرزه ای شیروانی ها به سه روش بلوک لغزان، تحلیل دینامیکی و روش های شبه استاتیکی تقسیم بندی کرد [۲]. در تحقیقی تحت عنوان تأثیر زهکش های افقی در پایداری شیب های خاکی در برابر گسیختگی های شیب تحت شرایط بارندگی را در مناطق گرمسیری بررسی کردند. نتایج حاصل نشان داد که گذاشتن زهکش های افقی در قسمت تحتانی شیب تأثیر در پایداری شیب بوجود می آورد و گذاشتن زهکش ها در مناطق فوقانی شیب تأثیر ناچیزی بر پایداری شیب در طی مدت زمان طولانی ایجاد می کند و باعث افزایش نشست می شود [۵]. در تحقیقی به بررسی آنالیز پایداری شیب سد خاکی مندی در عراق در حالت افت سریع مخزن و در شرایط زلزله پرداختند. یکی از خطرناک ترین شرایط برای لغزش شیب بالادست سد خاکی هنگام افت سریع مخزن مخزن، زمانی است که فشار آب در پائین دست از بین می رود. در این تحقیق با بکار بردن روش مورگان پراس با استفاده از نرم افزار slide برای محاسبه ضریب اطمینان استفاده شده است. نتایج نشان می دهد که ضریب اطمینان شیب بالا دست سد مندی بطور فاحشی کاهش می یابد. اما هنوز تحت شرایط افت سریع ایمن است [۶].

## ۲- مواد و روش ها

سد مخزنی ایلام بر روی رودخانه کنجان چم در استان ایلام و در فاصله ۲۲ کیلومتری جنوب شهر ایلام و حوزه جنوبی کبیرکوه احداث شده است. سد مخزنی ایلام یک سد خاکی سنگریزه ای به صورت طبقه بندی شده با هسته نفوذ ناپذیر است که هسته مرکزی سد به سمت بالادست متمایل بوده و این هسته به وسیله فیلتر در دو طرف سراب و پایاب حفاظت می گردد. قسمت خارجی پوسته بالادست به صورت سنگریزه ساخته شده که به وسیله یک لایه سنگ چین محافظت می شود [۵].



شکل ۱: مقطع عرضی و مشخصات فنی سد ایلام [۴].

## ۲-۱- تحلیل های شبه استاتیکی و استاتیکی پایداری

### لرزه ای شیروانی های خاکی

تحلیل های شبه استاتیکی در معمول ترین شکل خود اثرات ارتعاشات زلزله را بوسیله شتاب های شبه استاتیکی که نیرو های اینرسی (Fh و Fv) موثر بر روی مرکز توده لغزش ایجاد می نماید منظور می کنند مقادیر نیرو های شبه استاتیکی به قرار زیر است:

$$1) F_h = \frac{a_h * W}{g} = k_h * W$$

$$2) F_v = \frac{a_v * W}{g} = k_v * W$$

که در آن روابط  $a_n$  و  $a_v$  به ترتیب شتابهای شبه استاتیکی افقی و قائم می باشند و W وزن بالای سطح لغزش، g شتاب زمین و k مقدار ضریب زلزله شبه استاتیکی در دو جهت افق و قائم می باشد. نیروی شبه استاتیکی قائم تأثیر کمتری بر ضریب اطمینان دارد در تحلیل های شبه استاتیکی معمولاً از اثرات شتاب های قائم صرف نظر می شود.

روشهای تحلیل استاتیکی شیروانی های خاکی

در روشهای تحلیل استاتیکی شیروانی های خاکی در شرایطی که تنشهای برشی ایجاد شده در روی بعضی صفحات مساوی و یا بزرگتر از مقاومت برشی بالقوه در روی آن صفحات گردند شیروانی ها دچار ناپایداری خواهند شد. تحلیل تعادل حدی، تعادل نیروها با گشتاور توده ای از خاک روی یک سطح گسیختگی بالقوه مورد بررسی قرار می گیرد و در نتیجه ضریب اطمینان بر روی تمام نقاط سطح شکست ثابت خواهد بود.

## ۳- نتایج و بحث

صحت و کفایت مشخصات سد خاکی مورد مطالعه می بایست توسط آنالیزهای مختلف تأیید گردد. آنالیز پایداری شیب ها برای حالت استاتیکی و شبه استاتیکی در سه حالت کلی توسط نرم افزار Slope/W انجام می گیرد..

(۱) پس از پایان ساخت.

(۲) در حالت نشست دائم.

(۳) در حالت افت ناگهانی آب مخزن.

برای آنالیز در حالت پس از پایان ساخت، هم شیب بالادست و هم شیب پایین دست تحت آنالیز پایداری شیب استاتیکی قرار خواهند گرفت. در حالت نشست مداوم نیز شیب پایین دست و بالادست سد تحت آنالیز پایداری قرار خواهد گرفت. حالت سوم که حالت افت ناگهانی سطح آب مخزن می باشد، با معرفی لایه های مختلف خاک و معرفی تراز پیژومتریک آب که به طور تقریبی معادل با نتایج آنالیز تراوش به نرم افزار داده می شود انجام می گیرد.

## ۳-۱- کلیات آنالیز تعادل

پایداری شیب های پوسته بالا دست و پائین دست سد ایلام آنچنانکه در طراحی در نظر گرفته شده بر اساس تعادل حدی بررسی و نتیجه گیری می شود. بررسی پایداری شیب های بالادست و پائین دست دو حالت استاتیک و شبه استاتیک با استفاده از نرم افزار slope/w صورت گرفته است. نرم افزار slope/w بر اساس روش اصلاح شده بیشاپ و مورگان پراس ... می باشد.

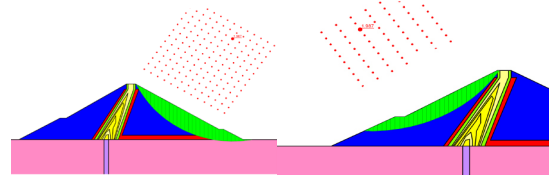
## ۲-۳- نتایج آنالیزهای پایداری در مرحله پایان ساخت، تراوش

### پایدار و افت سریع مخزن در حالت استاتیکی

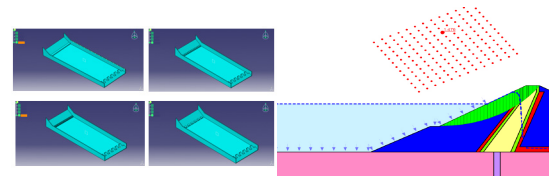
تحلیل های پایداری برای مقطع بحرانی در شیب بالا دست و پائین دست با در نظر گرفتن آب در سطح زمین طبیعی و ملحوظ نمودن صفحات گسیختگی دایره ای انجام گرفت و حداقل ضریب اطمینان درحالات پایان ساخت، تراوش پایدار و در حالت افت سریع آب مخزن برای افت سطح آب به مقدار ۲۰٪ ارتفاع آب پشت سد که معادل ۱۲ متر می باشد مطابق جدول زیر می باشد.

جدول ۱: نتایج تحلیلهای پایداری شیب بالا دست و پایین دست در حالت استاتیکی

شرایط تحلیل	شیب پوسته	صفحه گسیختگی	حداقل ضریب اطمینان
پایان ساخت	بالا دست	دایره ای	۱/۹۸۷
پایان ساخت	پائین دست	دایره ای	۱/۹۶۷
تراوش پایدار	بالا دست	دایره ای	۸۵۷/۱
تراوش پایدار	پائین دست	دایره ای	۱/۸۷
تخلیه سریع	بالا دست	دایره ای	۱/۴۷۶
تخلیه سریع	پائین دست	دایره ای	۱/۸۸۱

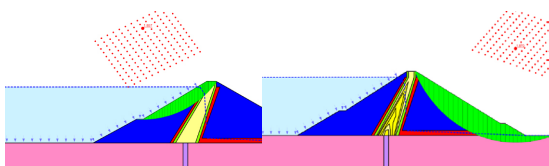


شکل ۲: ضریب اطمینان استاتیکی برای مقطع بحرانی در شیب بالا دست و پایین دست در پایان ساختمان



شکل ۳: ضریب اطمینان استاتیکی برای مقطع بحرانی در شیب بالا دست و پایین دست در افت سریع آب

آب در (Phreatic Surface) آنالیزهای پایداری شیب بالادست برای مقطع بحرانی در حالت تراوش پایدار با فرض (محاظه کارانه) وجود سطح آزاد رقوم حداکثر در هسته رسی و با استفاده از صفحه گسیختگی دایره-ای انجام یافته است.



شکل ۴: ضریب اطمینان پیشیب پائین و بالا دست سد در مرحله تراوش پایدار در حالت استاتیکی

### ۳-۳- آنالیزهای تعادل حدی در حالت شبه استاتیکی (PSEUDO-STATIC)

در این قسمت نتایج آنالیز نتایج آنالیزهای پایداری شیب های بالادست و پائین دست در مقاطع بحرانی با احتساب نیروی زلزله و صفحه شکست دایره ای بر اساس مفروضات و پارامترهای ژئوتکنیکی که ذیلا توضیح داده شده است، ارائه شده است. بررسی پایداری شیبهای سد در شرایط شبه استاتیکی (وقوع زلزله) در حالات پایان ساختمان سد، تراوش پایدار و مخزن نیمه پر در نظر گرفته شده است. نیروهائی که در آنالیزهای شبه استاتیکی در نظر گرفته شده است بشرح ذیل می باشد:

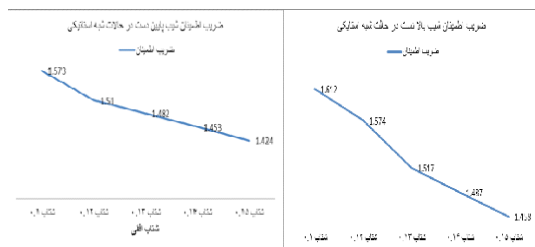
- نیروهای خاک اعم از نیروهای رانش و نیروهای مقاومتی
- نیروی آب
- نیروی زلزله

برای اعمال نیروی زلزله در آنالیزهای پایداری، شتاب مؤثر ناشی از شتاب حداکثر (MAXIMUM CREDIBLE EARTHQUAKE) در شکست مربوطه، از روش توصیه شده توسط آقای پرفسور سید (H.B.SEED) (که روش توصیه شده در بولتن آنالیزهای پایداری (دینامیکی) کمیسیون بین المللی سد سازی (ICOLD) نیز می باشد) این روش در مقاله RANKIN (LECTURE) ارائه گردیده است [۴]. در این روش آقای پرفسور سید اظهار نموده اند که اگر ضریب شتاب زلزله را برابر  $a = 0.15g$  یا  $a = 0.1g$  (که با توجه به بزرگی و خصوصیات زلزله تعیین می گردد) در تحلیلهای پایداری شبه استاتیکی در نظر گرفته شود و حداقل ضریب اطمینان برابر  $Fs = 1.15$  باشد پایداری تأمین بوده و تغییر مکانهای تاج سد در حد قابل قبولی کوچک خواهند بود. لذا با توجه به موارد فوق الذکر در تحلیلهای پایداری شبه استاتیکی سد ایلام ضریب شتاب را برابر  $a = 0.15g$  (با توجه به خصوصیات ریسک زلزله سد ایلام) بکار گرفته شده است [۴].

### ۳-۴- نتایج آنالیزهای پایداری شبه استاتیکی در مرحله پایان ساختمان سد و پیش از آبیگری در زمان وقوع زلزله

آنالیزهای پایداری شیب بالا دست و پایین دست در حالت پایان ساختمان با در نظر گرفتن شتاب زلزله و سطح آب در رقوم بستر طبیعی با ملفوظ نمودن صفحه گسیختگی دایره ای انجام گردید. حداقل ضرایب اطمینان در شتابهای ۰/۱،

۰/۱۳، ۰/۱۴، ۰/۱۵ و  $\frac{m}{s^2}$  افقی مطابق شکل زیر می باشد.

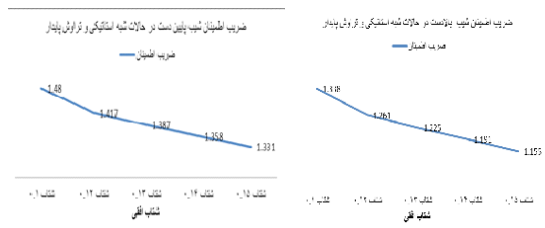


شکل ۵: ضریب اطمینان شیب پایین و بالا دست در حالت شبه استاتیکی در شتابهای مختلف در حالت پایان ساخت

### ۳-۵- نتایج آنالیزهای پایداری شبه استاتیکی شیب بالا و پائین دست در مرحله تراوش پایدار در زمان وقوع زلزله

در این قسمت آنالیزهای پایداری شیب پائین دست در حالت تراوش پایدار با فرض محاظ کارانه وجود سطح آزاد آب در رقوم حداکثر در هسته رسی با استفاده از صفحات گسیختگی دایره ای برای مقطع بحرانی و ملحوظ نمودن شتاب زلزله مربوطه انجام گردید. حداقل ضرایب اطمینان شیب بالادست در حالت تراوش پایدار و با شتابهای افقی ۰/۱، ۰/۱۲، ۰/۱۳، ۰/۱۴، ۰/۱۵ و

$\frac{m}{s^2}$  مطابق شکل (۶) می باشد.



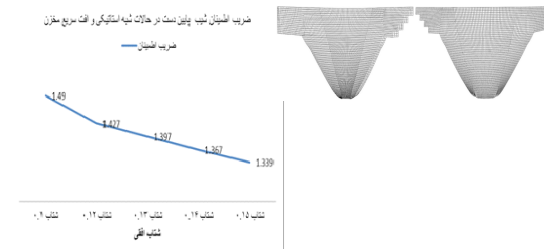
شکل ۶: ضریب اطمینان شیب پایین و بالا دست در حالت شبه استاتیکی در شتاب های مختلف در حالت تراوش پایدار

stability during rapid drawdown, In: Proceedings of the H, Bolton seed memorial symposium, Vol. 2. 253-272.  
[6] Rahardjo, H. et al., (2003), Effectiveness of horizontal drains for slope stability, Engineering Geology, 69. 295-308.

### ۳-۶- نتایج آنالیزهای پایداری شبه استاتیکی شیب بالا و پائین دست در مرحله افت سریع مخزن در زمان وقوع زلزله

آنالیزهای پایداری شبه استاتیکی شیب بالادست در حالت افت سریع مخزن

با در نظر گرفتن شتابهای افقی ۰/۱، ۰/۱۳/۱۲، ۰/۰، ۰/۱۴، ۰/۱۵ و  $\frac{m}{s^2}$  مربوطه و با ملحوظ نمودن صفحه گسیختگی دایره ای انجام گرفت و حداقل ضریب اطمینان به دست آمده مطابق شکل زیر می باشد.



شکل ۷: ضریب اطمینان شیب پایین و بالا دست در حالت شبه استاتیکی در شتابهای مختلف در حالت تراوش پایدار

### ۵- نتایج

نرم افزار Geostudio توانایی بسیار ارزشمند و دقیقی در بررسی پایداری سد های خاکی و به عبارت عمومی تر سازه های ژئوتکنیکی دارد. پایداری شیبهای سد خاکی ایلام به وسیله این نرم افزار مورد تحلیل قرار گرفت و نتیجه به دست آمده با معیارها و دستور عملهای بین المللی مورد مقایسه قرار گرفت.

۱. شیب پائین دست و بالادست در حالت های پایان ساخت، تراوش پایدار و تخلیه سریع در شرایط تحلیل استاتیکی و شبه استاتیکی پایدار می باشد.
۲. شیب پائین دست و بالادست در حالت های پایان ساخت، تراوش پایدار و تخلیه سریع در شرایط تحلیل شبه استاتیکی پایدار می باشد.
۳. افت سریع مخزن تأثیر چندانی بر پایداری شیب پائین دست سد ندارد بعبارت دیگر ضرایب اطمینان شیب پائین دست در حالت افت سریع و تراوش پایدار تقریباً برابر می باشند.
۴. تنها در مرحله افت سریع مخزن شیب بالا دست ضریب اطمینان نزدیک ناپایداری می شود.
۵. هر چه سرعت افت ارتفاع مخزن سد زیادتر باشد سد ناپایدارتر می باشد.
۶. نتایج تحلیل این گونه نشان می دهند که هسته مایل با نفوذ پذیری کم به خوبی در مقابل آب تراوش شده به داخل سد مقاومت نموده به طوری که جریان در داخل هسته به شدت افت می کند. بنابراین، قسمت شیب پائین دست سد خاکی همواره خشک باقی می ماند.

### مراجع

- [۱] جمال، ع. (۱۳۹۰). بررسی اثر شیب هسته رسی بر پدیده تراوش ناپایدار در سد های خاکی، همایش منطقه ای مدیریت منابع آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ابرکوه
- [۲] ملکپور، ج.، (۱۳۹۰)، بررسی آزمایشگاهی تأثیر طول و ضخامت زهکش های افقی بر نشست ماندگار از بدنه سد خاکی همگن، مجله دانش آب و خاک، جلد ۲۱، شماره ۲، صفحه های ۵۱-۶۳
- [۳] وفائیان، م. (۱۳۸۸). سد های خاکی، انتشارات جهاد دانشگاهی اصفهان، دانشگاه اصفهان، جلد اول، چاپ پنجم.
- [4] Jesung, J., Jongwook, L., Donghoon, s., Hangyu, P., (2009), Development of dam safety management system., Department of Construction Information Engineering, Induk Institute of Technology, Republic of Korea & bKorea Institute of Water and Environment Republic of Korea.
- [5] Duncan J. M., Wright S. G., Wong, K. S., (1990), Slope