

# بررسی اعتبار روش آیین نامه ای اعمال بار برکنش برای سدهای وزنی

محمد یعقوبی سریشه<sup>۱</sup>، محمد تقی احمدی<sup>۲\*</sup>

- ۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران سازه های هیدرولیکی، دانشگاه تربیت مدرس
- ۲- استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

mahamdi@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [توسط مجله تکمیل میشود]

تاریخ دریافت: [توسط مجله تکمیل میشود]

## چکیده

یکی از عوامل مهم و تاثیرگذار در پایداری سدهای وزنی و طراحی آن، میزان بار برکنش<sup>۱</sup> و چگونگی توزیع آن در زیر این نوع از سدها است. آیین نامه های مختلف با توجه به پارامترهایی مانند میزان ارتفاع آب در مخزن و نیز پایین دست سد، یک توزیع چند خطی را برای بار برکنش در زیر سد در نظر می گیرند. در این پژوهش، مدل سازی از چند سد وزنی از نوع پایین فلت<sup>۲</sup> به همراه پی و با ارتفاع های مختلف، با استفاده از روش اجزای محدود در محیط توامان تراوش و تنش، به منظور حساسیت سنجی اینگونه توزیع ها نسبت به ارتفاع سد صورت گرفت. در کلیه تحلیل ها، بدنه سد کاملاً نفوذ ناپذیر در نظر گرفته شده است. همچنین توده سنگ پی به صورت یک محیط همگن و همسان فرض شده و متناسباً به آن نفوذ پذیری های مناسب اختصاص داده شده تا مسأله تراوش آب در محیط پی، به طور کامل مدلسازی شده و میزان فشار منفذی در هر نقطه از آن در حالت های حضور و عدم حضور پرده تزریق به صورت دقیق با در نظر گرفتن اندر کنش هیدرومکانیکی دو میدان تراوش و تنش محاسبه شود. از مقایسه بین تنش های ایجاد شده در محل اتصال سد و پی در این مدل ها، با تنش های حاصل از اعمال توزیع بار برکنش در زیر سد مطابق آیین نامه اداره مهندسی ارتش آمریکا<sup>۳</sup> که یکی از پیشروترین مراجع در این امر است، مشخص شد که میزان خطای این گونه الگوهای رایج با ارتفاع سد رابطه مستقیم دارد. به گونه ای که با افزایش ارتفاع سد میزان خطای مربوط به تنش در بخش حساس شالوده سد حتی تا حدود ۴۰ درصد رشد می کند. در این گروه از سدها این خطا به ۱۲ برابر خطای قابل انتظار در سدهای کوتاه تر نیز افزایش پیدا می کند. این مسأله در برخی موارد می تواند ایمنی سد را کاملاً تهدید کند. این پژوهش الگوی پیشنهادی دیگری برای اعمال بار برکنش در زیر سدهای وزنی معرفی کرده و ضرورت استفاده از روش های دقیق تر در برآورد میزان بار برکنش در زیر سدهای وزنی بلند را نشان می دهد.

**واژگان کلیدی:** بار برکنش، سد وزنی، آیین نامه، اجزای محدود

1 Uplift

2 Pine Flat

3 United States Army Corps of Engineers (USACE)

## ۱- مقدمه

پیشنهادی توزیع برکنش در آیین نامه‌های اداره مهندسی ارتش آمریکا، کمیته آبادانی<sup>۱</sup> و کمیسیون فدرال سیاستگذاری انرژی<sup>۲</sup>، از رایج‌ترین روش‌های تخمین بار برکنش است. آیین‌نامه اداره مهندسی ارتش آمریکا [5] یکی از پیشروترین مراجع در این امر است که با توجه به میزان هد هیدرولیکی و حضور یا عدم حضور پرده زهکشی و پرده تزریق درون پی توزیعی چند خطی را برای میزان بار برکنش در زیر سد پیشنهاد می‌کند. در این پژوهش بر آن شدیم تا با استفاده از روش مدل‌سازی با رعایت اثر متقابل میدان‌های تنش و فشار در پی، الگوی مناسبی از توزیع بار برکنش را برای کاربرد در روش متداول و کاربردی اجزای محدود، بکار گرفته و بر اساس آن، حساسیت آنرا در مقایسه با الگوهای آیین‌نامه‌ای برکنش نسبت به ارتفاع سد مورد ارزیابی قرار دهیم.

## ۲- تئوری حاکم بر پدیده اندرکنش هیدرومکانیکی

### ۲-۱- معادله حاکم بر پدیده تراوش

معادله تراوش دوبعدی در حالت کلی به صورت زیر برحسب فشار منفذی و یا هد هیدرولیکی درون محیط متخلخل قابل ارائه است [6]:

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

که در آن  $h$  مقدار هد هیدرولیکی،  $k_x$  و  $k_y$  ضرایب نفوذپذیری در جهات  $x$  و  $y$ ،  $S_s$  ضریب ذخیره ویژه است.

### ۲-۲- اندرکنش هیدرومکانیکی

بررسی نقش درزه‌ها در پی‌های سنگی سدهای بتنی به منزله تنها مجاری جریان روی رفتار هیدرولیکی و ناپایداری‌های احتمالی در پی بسیار اهمیت دارد [7]. وجود مخزن سد و حجم عظیم آب در تماس با پی در کنار هد

سد یک سازه بسیار مهم و حساس است. از اینرو طراحی و ارزیابی پایداری آن در برابر پدیده‌های مخرب از اهمیت خاصی برخوردار است. یکی از نیروهایی که در جهت ناپایداری سد عمل می‌کند نیروی برکنش است. این نیرو در اثر اختلاف هد هیدرولیکی بین دو سمت سد و جریان یافتن آب درون پی ایجاد می‌شود. این فشار بر زیر بدنه سد نیروی بزرگی به سمت بالا اعمال می‌کند که می‌تواند موجب کاهش تنش موثر نرمال و حتی جدا شدن سد از پی و در نتیجه لغزش آن شد [1]. بنابراین برآورد این نیرو و کنترل آن، یک پدیده تاثیرگذار در طراحی سد به ویژه سدهای وزنی به شمار می‌رود. روش‌های مختلفی برای تخمین و محاسبه برکنش تدوین یافته است. مانند روش‌های آزمایشگاهی از جمله روش تحلیل الکتریکی و روش مدل ماسه‌ای [2]، روش‌های ترسیمی مانند روش‌های ارائه شده توسط دوپویی (Dupuit's solution)، کاساگرانده (Casagrande's solution) و پاولوسکی (Pavlovsky's solution) [2, 3]، روش‌های نظری-تجربی مانند روش بلائی (Bligh) و روش لین (Lane) [2, 3]، روش‌های تحلیلی مانند روش پتانسیل مرکب یا روش خوسلا (Khosla) [2, 3] و روش‌های شبیه‌سازی عددی مثل روش‌های تفاضل محدود، حجم محدود، اجزای محدود و روش المان‌های مرزی. در میان پژوهشگران داخلی می‌توان به کار خندان [4] اشاره کرد که با مدل کردن توده سنگ درزه‌دار با استفاده از مدل چندلایه برای بیان رفتار مکانیکی و در نظر گرفتن جریان لایه‌ای در درزه سنگ‌ها و استفاده از قانون مکعب برای توضیح رفتار هیدرولیکی توده سنگ درزه‌دار، پدیده اندرکنش هیدرومکانیکی را مدل کرده و اثر این پدیده را بر بازتوزیع تنش‌ها، تغییرات خطوط هم پتانسیل و... مورد مطالعه و بررسی قرار داد. وی برای نوع سدهای بتنی وزنی و قوسی به نتایجی رسید که بطور کلی در تمام حالات مدل‌سازی پژوهش، عدم مطالعه و بررسی اندرکنش فوق باعث تخمین ناصحیح و خلاف برای اطمینان تنش‌ها شده و برآورد دست‌پایینی از تنش‌ها ارائه می‌دهد. اما می‌توان گفت الگوهای

1 Bureau of Reclamation

2 Federal Energy Regulatory Commission

گرفته است استفاده شده که در آن با روش عددی حجم محدود، اقدام به گسسته سازی و حل معادلات حاکم بر تراوش در پی یک بند انحرافی نموده و نتایج را با نرم افزار WinMSeep مقایسه کرده است [9]. بند انحرافی به طول ۱۶ متر، غیر قابل نفوذ بوده و دارای ارتفاع آب ۲۰ متر در قسمت سراب و ۱۰ متر در پایاب است. پی از نوع خاک ماسه‌ای و با نفوذپذیری  $0/0001$  متر بر ثانیه است. دیگر مشخصات مدل نیز مشابه با فرضیه‌های مقاله مذکور در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی جریان درون پی در نرم افزار آباکوس از المان‌های کوپله با خاصیت Pore Fluid استفاده شده و فشار منفذی ناشی از ارتفاع آب در قسمت بالادست و پایین دست سازه به عنوان شرایط مرزی هیدرولیکی به مدل اعمال می‌شود. همچنین فرض شده است که دو ناحیه زیر سد و سطح بتن به یکدیگر متصل است به گونه‌ای که هیچ گونه حرکتی بین آنها وجود ندارد. بدین منظور در نرم افزار آباکوس، بدنه سازه و محیط پی با استفاده از قید Tie به هم متصل شد. در شکل (۱) مدل ایجاد شده از بند انحرافی ساخته شده در آباکوس، و در شکل (۲) مقایسه خروجی‌های هد هیدرولیکی در زیر آن با روش‌های ارائه شده در مقاله آورده شده است.

شکل ۱. توزیع فشار منفذی درون پی مدل ساخته شده از بند انحرافی با اعمال اندرکنش هیدرو مکانیکی در آباکوس

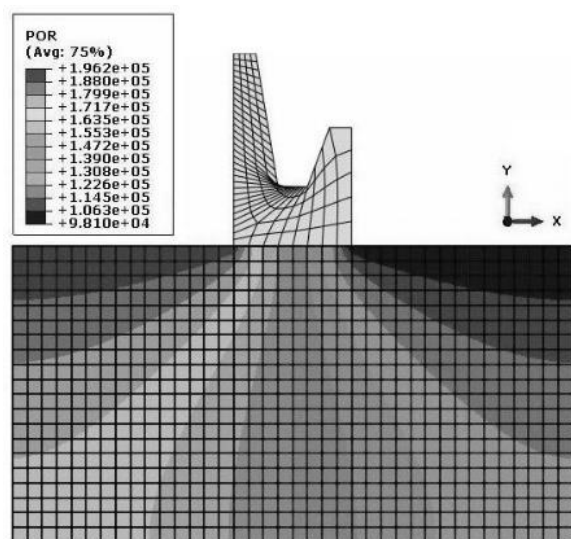


Fig. 1. Distribution of pore pressure inside the base of model generated from a diversion dam with a hydromechanical interaction in Abaqus

هیدرولیکی زیاد آن، نشت جریان درون محیط توده سنگی پی را به همراه دارد. حرکت آب در توده سنگ علاوه بر آثار به سزایی که در پایداری آن دارد، سازوکارهای گسیختگی این محیط را نیز بسیار پیچیده می‌کند. در بحث هیدرولیکی توده سنگ، جریان سیال عبوری از درزه‌ها به صورت تابعی از بازشدگی آنها تعریف می‌شود. درزه‌ها نیز در اثر سیستم تنش اعمالی از سوی سازه‌های متکی بر توده سنگ، باز یا بسته می‌شوند. باز و بسته شدن دهانه ناپیوستگی‌ها با توجه به اینکه مجرای جریان محسوب می‌شوند، باعث به وجود آمدن تغییراتی در نفوذپذیری می‌شود که خود توزیع خطوط هم پتانسیل و در نتیجه نیروهای حاصل از تراوش را دستخوش تغییر می‌سازد. از طرفی نیروهای جدید حاصل از تراوش باعث بازتوزیع مجدد تنش‌های مؤثر می‌شود که آن هم به نوبه خود عامل تغییر در بازشدگی درزه‌ها است. این فرآیند تا رسیدن به همگرایی ادامه پیدا خواهد کرد [4]. در واقع تحلیل هیدرومکانیکی کامل آن است که نفوذپذیری درزه‌ها بستگی به تغییر شکل مکانیکی آن‌ها داشته و به عکس، فشار آب درزه بر رفتار مکانیکی آن مؤثر باشد. جزئیات معادلات و روش‌های حل عددی اجزای مجزا و اجزای محدود آن نیز پیش از این مورد بررسی قرار گرفته است [4, 6]. پس به منظور بررسی دقیق‌تر مقادیر فشار منفذی درون پی و زیر سد، در نظر گرفتن این اندرکنش در مدلسازی‌های عددی نقش مهمی را ایفا می‌کند.

### ۳- مدلسازی عددی پدیده اندرکنش هیدرومکانیکی و صحت سنجی آن

به منظور مدلسازی مناسب بار برکنش به روش اجزای محدود در این پژوهش از نرم افزار Abaqus 6.11 بهره گرفته شده است. این نرم‌افزار تا حد مطلوبی قابلیت تحلیل اندرکنش هیدرومکانیکی در محیط تحت تراوش را نیز دارد [8]. برای بررسی درستی چگونگی مدلسازی تراوش درون پی، از پژوهشی که به منظور بررسی تأثیر دیواره آب‌بند و زهکش بر نیروی برکنش و گرا دیان خروجی زیر سازه‌های آبی انجام

تعمیر و نگهداری آنها بستگی دارد. شکل (۴) توزیع فشار برکنش زیر سد با فرض کارایی چاهک‌های زهکش را نشان می‌دهد.

شکل ۳. توزیع فشار برکنش در زیر سد بدون وجود زهکشی و پرده تزریق مطابق آیین‌نامه USACE

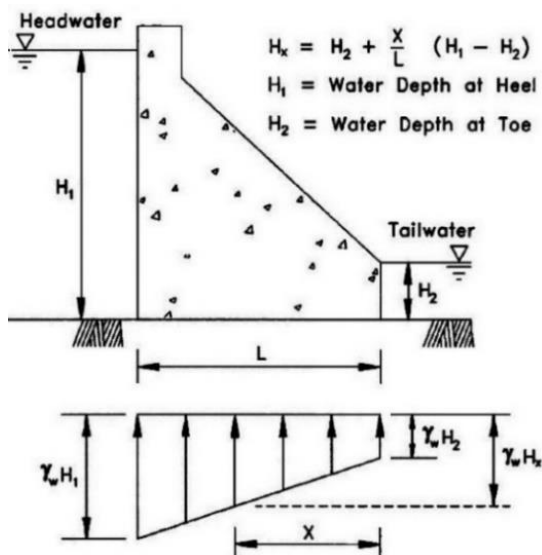


Fig. 3. The distribution of uplift load below dam in absence of according to the USACE code grout curtain

شکل ۴. توزیع فشار برکنش در زیر سد در حضور زهکشی و پرده تزریق

مطابق آیین‌نامه USACE

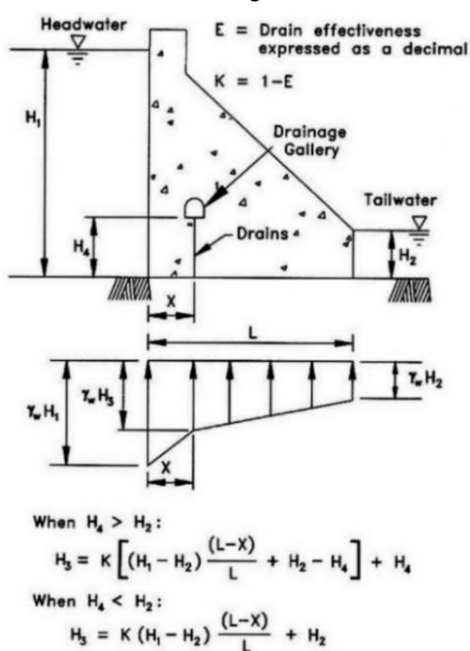


Fig. 4. The distribution of uplift load below dam in presence of according to the USACE code grout curtain

شکل ۲. مقادیر هد هیدرولیکی محاسبه شده در زیر بند انحرافی

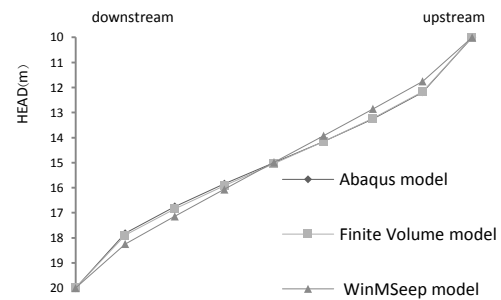


Fig. 2. The calculated values of the head water level below the diversion dam

همان‌گونه که در شکل (۲) قابل مشاهده است، مدل ساخته شده در محیط آباکوس جواب‌های مناسب و قابل اعتمادی را برای مقادیر فشار منفذی درون پی ارائه داده است.

#### ۴- توزیع بار برکنش سدهای بتنی مطابق آیین‌نامه USACE [5]

فشار برکنش یک نیروی فعال است که باید در مطالعات مربوط به تحلیل تنش و پایداری مد نظر قرار گیرد. این فشار با زمان تغییر می‌کند و وابسته به شرایط مرزی و نفوذپذیری مصالح است. فرض می‌شود که فشار برکنش روی ۱۰۰ درصد پایه ی سد اثر می‌گذارد. توزیع فشار برکنش در زیر سد بستگی به کارایی پرده تزریق و چاهک‌های زهکش (در صورت استفاده) و ویژگی‌های زمین شناسی مانند نفوذپذیری سنگ، درزه‌ها، ناپیوستگی‌ها و گسل‌ها دارد. در جایی که هیچ‌گونه تدبیری برای کاهش برکنش صورت نگرفته است فرض می‌شود گرادیان هیدرولیکی به صورت خطی از پاشنه تا پنجه سد تغییر می‌کند (شکل ۳).

فشار برکنش در زیر سد می‌تواند به وسیله احداث چاهک‌های زهکش کاهش پیدا کند. کارایی چاهک‌های زهکش وابسته به عمق، اندازه، و فاصله آنها و نیز ویژگی‌های پی است. اگر با انجام آزمایش و در صورتی که با تحلیل جریان به بررسی کارایی این چاهک‌ها به صورت موردی پرداخته نشود، میزان این تأثیر می‌تواند برابر ۶۷ درصد انتخاب شود. این محدوده طراحی به بررسی و ارزیابی مناسب کارایی چاهک‌ها و برنامه

## ۶- حساسیت سنجی الگوی آیین نامه ای

در این بخش حساسیت الگوهای پیشنهادی برکنش در زیر سدهای وزنی توسط USACE نسبت به ارتفاع سد مورد ارزیابی قرار گرفته است. از آنجا که ارتفاع و شکل سد بر توزیع تنش در طول قاعده آن تاثیرگذار بوده و به نوبه خود از طریق اندرکنش هیدرومکانیکی روی توزیع فشار منغذی تغییر قابل توجه ایجاد میکنند، سدهایی که برای نمونه در این بخش استفاده شده و مورد بررسی قرار گرفتند، همگی از نوع شکل بدنه سد پایین فلت بوده و دارای ارتفاعهای ۴۰، ۱۲۲ و ۲۵۰ متر و با طول قاعده به ترتیب ۳۲، ۹۶/۸ و ۱۹۸ متر است. مقطع عرضی هندسه بدنه این سد در ابعاد حقیقی آن در شکل (۵) آورده شده است.

شکل ۵. مشخصات هندسه مقطع عرضی بدنه سد پایین فلت [۹]

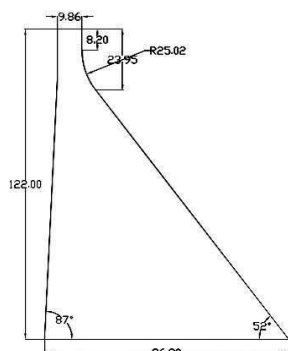


Fig. 5. Cross section of the Pine Flat dam body

بدنه سد روی یک پی مشخص با ویژگیهای همگن و همسان که ویژگیهای آن در تمامی نقاط و جهات یکسان فرض شده قرار داده شده است. پارامترها و مشخصات مصالح مطابق جدول (۱) که مقادیر مربوط به ساختگاه سد پایین فلت، انتخاب شده است. مدل‌های ساخته شده نیز طبق فرضیه بیان شده در بخش ۵ ایجاد شده‌اند. میزان تنش‌های موثر قائم درون پی در محل تماس سد و پی در همه مدل‌های ایجاد شده با استفاده از هر دو روش مدلسازی پیشرفته و استاندارد، با یکدیگر مقایسه شدند. منظور از تنش موثر، تنش بوجود آمده در ذرات جامد جسم پی است که در محل مقابل ذرات جامد به یکدیگر منتقل می‌شوند. شکل‌های (۶ تا ۸) این مقادیر را در سدهای نمونه ساخته شده با هر دو روش نشان می‌دهد.

## ۵- پیش فرض‌های اصلی در این مطالعه

مهمترین ویژگی‌های و پیش فرض‌هایی که در مدلسازی‌های پیشرفته (با احتساب اندرکنش هیدرومکانیکی) و استاندارد (با توزیع بار گسترده در مدل اجزای محدود عادی) در این پژوهش در نظر گرفته شده اند از قرار زیر است.

### ۵-۱- پیش فرض‌های مدل پیشرفته

- خطی بودن رفتار مصالح بدنه سد و پی
- نفوذ ناپذیری کامل بدنه سد
- همسازی کامل المان‌های کف سد با المان‌های سطح پی (بدون جدایی)
- طول (عمق) پرده تزریق برابر  $0.7$  عمق آب در مخزن و ضخامت آن برابر یک دوازدهم طول قاعده سد
- مدلسازی پرده تزریق با فرض زاویه  $15$  درجه نسبت به قائم به سمت سراب و نفوذپذیری برابر یک هزارم نفوذپذیری مصالح پی
- شرایط مرزی هیدرولیکی مطابق با عمق آب در سراب و پایاب
- در نظر گرفتن عمق آب در مخزن سد برابر  $0.9$  ارتفاع سد و صفر در مخزن پایاب
- کارایی چاهک‌های زهکش برابر  $67$  درصد
- حالت پایدار جریان<sup>۱</sup> حاکم است.

### ۵-۲- پیش فرض‌های مدل استاندارد

- خطی بودن رفتار مصالح بدنه سد و پی
- نفوذ ناپذیری کامل بدنه سد
- همسازی کامل المان‌های کف سد با المان‌های سطح پی
- اعمال بار برکنش زیر بدنه سد بر اساس الگوی آیین‌نامه USACE (شکل‌های ۳ و ۴)
- کارایی چاهک‌های زهکش برابر  $67$  درصد
- همچنین شکل سد صرف نظر از ارتفاع آن، مشابه سد پایین فلت که یک الگوی کلاسیک و رایج در بسیاری از سدهای وزنی در سطح جهان بوده انتخاب شده است.

1 Steady State

شکل ۸. توزیع تنش موثر قائم درون پی در محل تماس با سد پایین فلت ۲۵۰ متری در حالت حضور و عدم حضور پرده تزریق

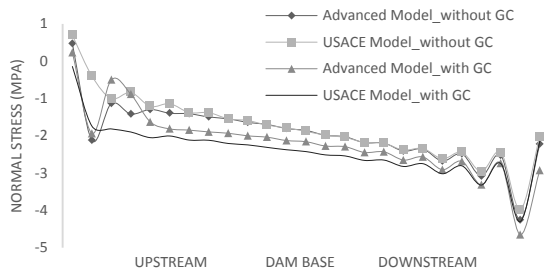


Fig. 8. The distribution of normal effective stresses in rock interface of 250 meters Pine Flat dam in absence and presence of grout curtain

شکل ۹. توزیع تنش قائم بدنه سد پایین فلت ۱۲۲ متری در حالت عدم حضور پرده تزریق در مدل USACE

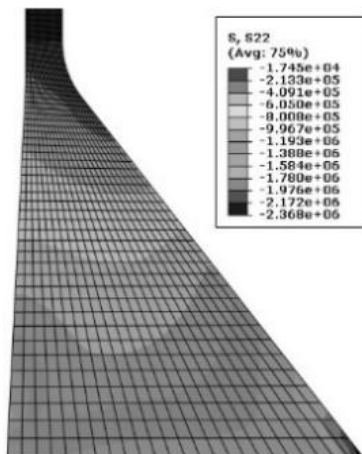


Fig. 9. The distribution of normal stresses in 122 meters Pine Flat dam body in absence of grout curtain in USACE model

شکل ۱۰. توزیع تنش قائم بدنه سد پایین فلت ۱۲۲ متری در حالت عدم حضور پرده تزریق در مدل پیشرفته

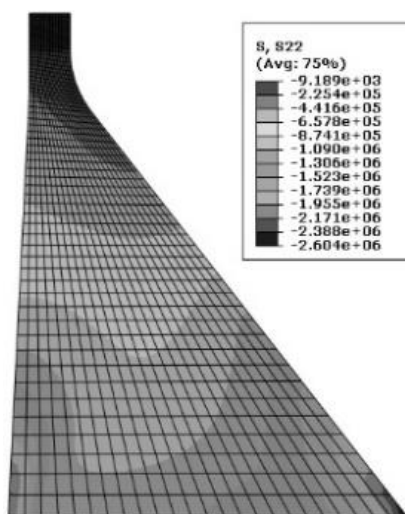


Fig. 10. The distribution of normal stresses in 122 meters Pine Flat dam body in absence of grout curtain in Advanced model

همچنین برای نمونه، توزیع تنش نرمال در بدنه سد با ارتفاع ۱۲۲ متری برای مدل آیین نامه‌ای و پیشرفته در حالت بدون پرده تزریق در شکل های (۹ و ۱۰) قابل مشاهده است.

جدول ۱. مقادیر پارامترهای مصالح برای مدلسازی سد های نمونه

Parameter	Value
density of concrete	2482 kg/m <sup>3</sup>
poisson's ratio of concrete	0.2
elasticity of modulus concrete	22.4 GPa
of elasticity of modulus foundation	9.333 GPa
density of foundation	2642 kg/m <sup>3</sup>
poisson's ratio of foundation	0.33
permeability of material foundation in all directions	0.0003 m/s

Table.1. Parameter values for modeling parameters values for modelling materials of the sample dams

شکل ۶. توزیع تنش موثر قائم درون پی در محل تماس با سد پایین فلت ۴۰ متری در حالت حضور و عدم حضور پرده تزریق

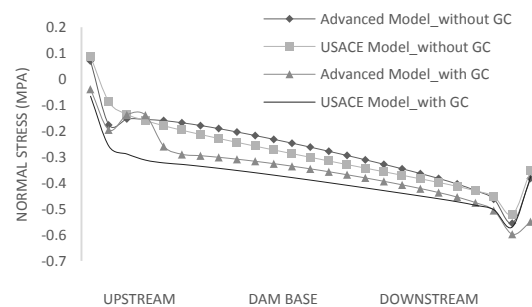


Fig. 6. The distribution of normal effective stresses in rock interface of 40 meters Pine Flat dam in absence and presence of grout curtain

شکل ۷. توزیع تنش موثر قائم درون پی در محل تماس با سد پایین فلت ۱۲۲ متری در حالت حضور و عدم حضور پرده تزریق

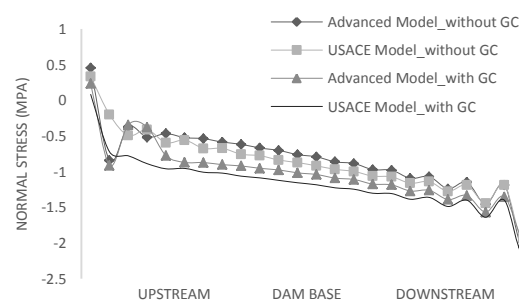


Fig. 7. The distribution of normal effective stresses in rock interface of 122 meters Pine Flat dam in absence and presence of grout curtain

حال به منظور ارزیابی حساسیت الگوی آیین نامه ای برکنش نسبت به ارتفاع سد، برآورد خطای این الگوها در خروجی تنش های موثر قائم پی در محل تماس سد و پی (که در تامین پایداری سد نقش اساسی دارد) نسبت به مدل پیشرفته انجام شده است. جدول (۲) مقادیر خطاهای برآورد شده تنش های موثر قائم محاسبه شده به روش استاندارد براساس آیین نامه USACE را با استفاده از روش RMSE برای ارتفاع های مختلف سد پائین فلت نشان می دهد.

همان گونه که در جدول (۲) نیز مشاهده می شود، به طور کلی مقادیر خطای الگوی آیین نامه ای با افزایش ارتفاع سد سیر صعودی به خود می گیرد. تا جایی که این میزان خطا در سد نمونه با ارتفاع ۲۵۰ متری نسبت به سد مشابه ۴۰ متری، در حالت عدم حضور پرده تزریق، حتی تا بیش از ۱۲ برابر افزایش یافته است. در واقع با توجه به شیب افزایشی مقادیر RMSE در ارتفاع های مختلف سد، می توان گفت بطور میانگین، به ازای هر ۱۰ متر افزایش ارتفاع سد، مقدار خطای RMSE در محاسبه تنش های موثر قائم پی، ۳۰ درصد افزایش می یابد. به بیان ساده تر، به ازای هر متر افزایش ارتفاع سد، از دقت الگوی آیین نامه ای حدود ۳ درصد کاسته می شود.

## ۲- روش مدلسازی پیشنهادی

با توجه به کاهش دقت الگوی آیین نامه ای مذکور هم زمان با افزایش ارتفاع سد و همچنین حساسیت سدهای با ارتفاع بلند، لزوم استفاده از روش های دقیق و مناسب تر به ویژه در سدهای بلندتر احساس می شود. در این بخش به بررسی یک الگوی پیشنهادی که در آن یک الگوی بار گسترده سطحی برای مدلسازی بار برکنش زیر سد در مدل اجزای محدود خطی ارائه شده است پرداخته می شود [12] برای رسیدن به این الگو، ابتدا به بررسی یک سد نمونه برای ارائه یک الگوی مناسب پرداخته شده است. برای اینکار تنش های قائم سطح پی در مدل عددی پیشرفته ایجاد شده در نرم افزار آباکوس که جریان آب درون پی را با استفاده از المان های کوپله با خاصیت Pore Fluid مدل می کند، تحت اعمال بارهای وزن سد و فشار هیدرواستاتیک مخزن، در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن جریان درون پی

در شکل های فوق خطای عمومی توزیع تنش های موثر قائم در زیر سد دیده می شود که برای سدهای بلندتر تشدید می شود. در ادامه میزان این تغییرات برآورد و برای خطای کلی ارائه خواهد شد. تفاوت هایی نیز در میزان تنش قائم محاسبه شده در بدنه سد برای دو مدل نیز مشاهده می شود. لیکن نکته بسیار مهم این است که بیشترین خطاها در محل پاشنه و پنجه سد رخ داده که از نظر استعداد آغاز ناپایداری مناطق بسیار حساسی هستند. بدین ترتیب، اگرچه انتظار می رود در نتیجه خطای برآورد تنش های برشی و قائم، ضریب اطمینان کلی دچار خطای قابل توجهی شود، لیکن این میزان خطا برای ضریب اطمینان لغزشی محلی به مراتب بیشتر خواهد بود.

به منظور برآورد کمی خطای کلی توزیع تنش در قاعده هر مدل نسبت به مدل پیشرفته، ریشه میانگین مربعات خطا را محاسبه می کنیم، که تفاوت میان مقدار پیش بینی شده توسط مدل و مقدار واقعی است. مقدار RMSE همواره مثبت و حداکثر برابر واحد (نمایانگر بیشترین خطا) بوده و با نزدیک شدن آن به صفر، عملکرد مدل مورد بررسی افزایش می یابد [11].

جدول ۲. مقادیر خطای الگوی آیین نامه ای برکنش در محاسبه تنش

موثر قائم پی در محل تماس با سد برای سدهای با ارتفاع مختلف در شرایط حضور و عدم حضور پرده تزریق

Sample dam height (m)	Modeling approach	RMSE in absence of Grout Curtain	RMSE in presence of Grout Curtain
40	USACE Model	0.03	0.07
122	USACE Model	0.16	0.23
250	USACE Model	0.38	0.43

**Table 2.** Error rate of USACE model in calculating of normal effective stresses in rock interface dam with different heights in the presence and absence of grout curtain

1 Root Mean Square Error (RMSE)

مقایسه شدند. شکل‌های (۱۳ تا ۱۵) این مقادیر را در سدهای نمونه ساخته شده با هر دو روش نشان می‌دهد.

شکل ۱۲. توزیع پیشنهادی بار برکنش زیر سد در حضور زهکشی و پرده تزریق

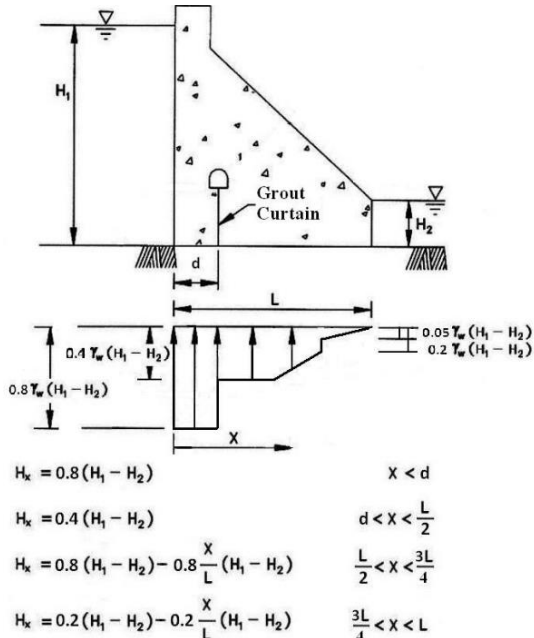


Fig. 12. The proposed distribution of uplift load below dam in presence of grout curtain

شکل ۱۳. توزیع تنش موثر قائم درون پی در محل تماس با سد پایین فلت

۴۰ متری در حالت حضور و عدم حضور پرده تزریق

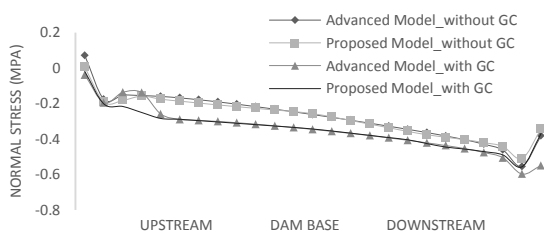


Fig. 13. The distribution of normal effective stresses in rock interface of 40 meters Pine Flat dam in absence and presence of grout curtain

شکل ۱۴. توزیع تنش موثر قائم درون پی در محل تماس با سد پایین فلت

۱۲۲ متری در حالت حضور و عدم حضور پرده تزریق

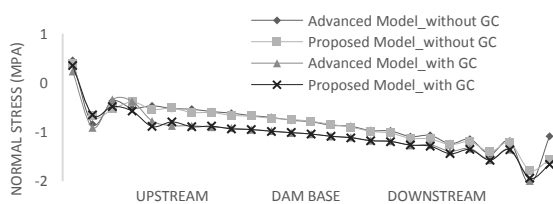


Fig. 14. The distribution of normal effective stresses in rock interface of 122 meters Pine Flat dam in absence and presence of grout curtain

و بار برکنش با یکدیگر مقایسه شدند. سپس در یک مدل اجزای محدود خطی که المان‌های پی را به صورت Plane Strain در نظر گرفته و از جریان آب درون پی صرف‌نظر می‌نماید، بار برکنش به صورت یک نیروی گسترده سطحی به گونه‌ای به کف سد اعمال شده که بتواند توزیع تنش‌های قائم سطح پی را در مدل اجزای محدود خطی، مطابق با حالت مدلسازی بار برکنش توسط روش پیشرفته ارائه دهد. پس از رسیدن به این هدف، دقت الگوی بدست آمده روی چندین سد دیگر با مشخصات هندسی بدنه سد، مشخصات مصالح و شرایط مرزی هیدرولیکی متفاوت بررسی و مورد اصلاح واقع شده تا بتواند گستره وسیع‌تری از سدها را تحت پوشش قرار دهد. در نهایت یک الگوی اصلاحی برای توزیع بار برکنش در حالت کلی و برای انواع سد ارائه شده است [12].

شکل ۱۱. توزیع پیشنهادی بار برکنش زیر سد در غیاب زهکشی و پرده تزریق

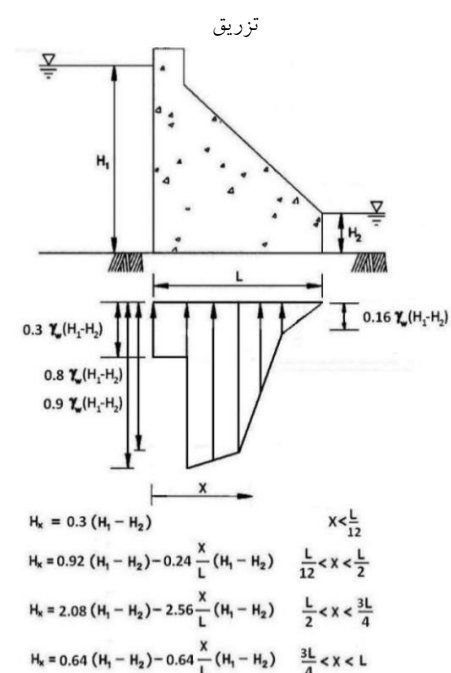


Fig. 11. The proposed distribution of uplift load below dam in absence of grout curtain

این الگو برای دو حالت با و بدون حضور پرده تزریق در شکل‌های (۱۱ و ۱۲) آورده شده است. همچنین مانند بخش ۶، میزان تنش‌های موثر قائم درون پی در محل تماس آن با سد در همه مدل‌های ایجاد شده با استفاده از هر دو روش مدلسازی پیشرفته و الگوی پیشنهادی این پژوهش، با یکدیگر



### ۸- جمع بندی و نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از روش متداول و کاربردی اجزای محدود، یک روش مدل سازی دقیق برای برآورد میزان بار برکنش درون پی سد مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از این روش پیشرفته، بررسی حساسیت الگوی آیین نامه ای برکنش مطابق آیین نامه USACE نسبت به ارتفاع سد صورت گرفت و مشاهده شد که میزان خطای الگوهای رایج با ارتفاع سد رابطه مستقیم داشته و با افزایش ارتفاع سد از دقت و اطمینان پذیری این الگوها کاسته می شود. این افزایش خطا همزمان با افزایش ۶ برابری ارتفاع سد، به طور نسبی حتی تا ۱۲ برابر نیز مشاهده شد. پس این پژوهش، ضرورت استفاده از روش های دقیق تر در برآورد میزان بار برکنش در زیر سدها، به ویژه سدهای با ارتفاع بلند را نشان می دهد. روش هایی مانند الگوی پیشنهادی یاد شده [12] که در آن یک الگوی بار گسترده سطحی برای مدل سازی بار برکنش زیر سد در مدل اجزای محدود خطی ارائه شده است. بررسی های این پژوهش نشان داد که این الگو می تواند میزان خطای الگوی آیین نامه ای را بسته به شرایط مختلف بین ۳۰ تا ۵۰ درصد کاهش دهد. هر چند که در سدهای با ارتفاع بسیار بلند، با توجه به حساسیت های بالای موجود، بهتر است برای دوری از کمترین میزان خطا در برآورد برکنش، از یک روش پیشرفته با مدل سازی دقیق اندرکنش هیدرومکانیکی در پی سدهای وزنی بلند، مانند آنچه که در این پژوهش تحت عنوان مدل پیشرفته عنوان شد، استفاده شود.

### References

[1] Da Silva, J.F.; Da Gama, E.M. 2003. "A Three-Dimensional Model for Seepage Analysis of Concrete Dams Foundations". 4th International Workshop on Applications of Computational Mechanics in Geotechnical Engineering, pp 337-357, Ouro Preto, Brazil

[2] Shamsaei, A. 2012. "Hydraulics of flow in porous media". Volume 1&2. Amir Kabir University of Technology Publications. In Persian

[3] Abedi koupai, J. 1991. "Analysis of effective factors on uplift pressure in stability of diverdion dam by finite difference method". Master's Thesis. Tarbiat Modarres University Faculty of Agriculture. In Persian

### ۹- مراجع

شکل ۱۵. توزیع تنش موثر قائم درون پی در محل تماس با سد پایین فلت ۲۵۰ متری در حالت حضور و عدم حضور پرده تزریق

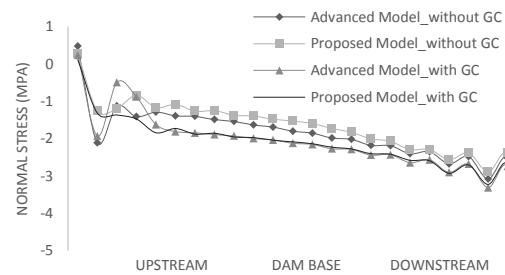


Fig. 15. The distribution of normal effective stresses in rock interface of 250 meters Pine Flat dam in absence and presence of grout curtain

همان گونه که در این شکل ها مشاهده می شود، مدل پیشنهادی از نظر میزان و توزیع تنش های محاسباتی، جواب های مناسب تری نسبت به الگوی آیین نامه ای ارائه داده است. با توجه به جدول (۳)، به سادگی ملاحظه می شود که در روش مدل سازی پیشنهادی نسبت به مدل آیین نامه ای مذکور، هم از مقدار خطاها کاسته شده و هم شیب افزایشی میزان خطاها نسبت به افزایش ارتفاع سد، کاهش قابل توجهی داشته است. این کاهش خطا همان گونه که جدول (۳) نیز نشان می دهد، به طور نسبی بین ۳۰ تا ۵۰ درصد است.

جدول ۳. تخمین خطا در محاسبه تنش عمودی با استفاده از دو روش مدل سازی

Sample dam height (m)	Modeling approach	RMSE in absence of Grout Curtain	RMSE in presence of Grout Curtain
40	USACE Model	0.03	0.07
	Proposed Model	0.02	0.05
122	USACE Model	0.16	0.23
	Proposed Model	0.13	0.14
250	USACE Model	0.38	0.43
	Proposed Model	0.28	0.23

Table 3. Estimation of errors in computing the vertical stresses using two modeling approaches

Ghobadian,R; Khodaie.K; 2009. " Effects of cutoff wall and drain on uplift pressure and exit gradient under hydraulic structure by numerical solution of general equation of fluid flow in soil using finite volume method". Journal of Water and Soil; Vol.23, No.4. In Persian

[9] Fenves.G; Chopra.AK;1985."Reservoir Bottom Absorption Effects in Earthquake Response of Concrete Gravity Dams".Journal of Structural Engineering.Vol.111,No.3

[10] Root-mean-square deviation,2015.Wikipedia, the free encyclopedia Online, available from URL:[https://en.wikipedia.org/wiki/Root-mean-square\\_deviation](https://en.wikipedia.org/wiki/Root-mean-square_deviation), Accessed Dec 14,

[11] Yaghobi Sarbisheh,M; Ahmadi,M.T; 2014. "Investigation of appropriate uplift load modeling under gravity dams". 8<sup>th</sup> national congress on civil engineering, Babol Noshirvani university of technology. In Persian

[4] Khandan Bakavoli,M. 2005. "Seepage effect on stability of jointed rock mass in arch dam foundation and abutments". Master's Thesis. Tarbiat Modarres University Faculty of Engineering. In Persian

[5] Robert M,Ebeling; Larry,K.2000."Evaluation and Comparison of Stability Analysis and Uplift Criteria for Concrete Dams by Three Federal Agencies".U.S.A.C.E;

[6] Stefano,U;Zhenyu,Y;Mingjing,J.2008."Influence of Hydraulic Uplift Pressures on Stability of Gravity Dam".Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering; Vol.27; No.8;

[7] Yazdani,S;Yazdani,M.2009." Investigation of the Hydromechanical Effect of Joint Tensile on the Safety of Arched Concrete Dams" Jurnal of sharif civil engineering.Vol.26-2;No.2. In Persian

[8] Abaqus 6.11-1. 2011.User's Manual

## Validation of Regulation Method of Uplift Load Modeling For Gravity Dams

M. Yaghoobi Sarbisheh<sup>1</sup>, M. T. Ahmadi<sup>2</sup>

1- M.Sc. of Hydraulic Structures Eng., Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

2- Prof., Hydraulic Structures Eng. Dept., Faculty of Civil and Environmental Eng., Tarbiat Modares University

mahamdi@modares.ac.ir

### Abstract:

Gravity dams are vital structures whose proper design and evaluation for stability are quite important. One of the effective forces on stability of concrete dams is the uplift force and its distribution below the dam base. Uplift pressure resulting from headwater and tail-water not only exists through dam cross sections and the dam base, but also within the foundation below the dam base. In many gravity dams uplift pressure is the major active force that must be included in the stability and stress analysis to ensure structural adequacy. There have been different methods employed since past to the present to assess and calculate the uplift load. In each of these methods, depending on the degree of simplification, the accuracy of the answers will be reduced. Due to the limitations of each of these methods, available numerical methods may be used nowadays to estimate the values of pore pressure within the porous medium. As far as seepage forces have a great effect on stability of gravity dams, understanding the seepage in rock masses has a great importance, because the gravity dams are generally built on rock foundations. The actual influential phenomenon encountered in saturated jointed rock media is the joints hydro-mechanical interaction effect. Finite element method as a general and systematic method is one of the most common numerical methods for solving engineering problems. Also, this method has significant application in hydraulic and hydrodynamic problems. In addition, the uplift load pattern and distribution according to common codes are influenced by some factors such as head and tail water, assuming a segmented linear load distribution below the dam. In this research, to investigate the sensitivity of the load pattern to dam height, a number of gravity dams of Pine Flat type with different heights and their foundations are modeled. An enhanced modeling approach is employed to estimate the equivalent uplift load distribution at the dam base for application in the standard finite element modeling procedures. Coupled p-u finite element analysis is performed accounting for the seepage and stress field simultaneously. Dam body is considered to be completely impervious. The foundation rock is assumed as homogeneous and uniform, in terms of elasticity and permeability. The stresses generated in the dam interface for each case of the coupled hydro-mechanical analysis is compared against that of the conventional load pattern according to the U.S. Army Corps of Engineers regulation for the same dam model. It was found that the error magnitude due to the conventional pattern has a direct relationship with the dam height. As the dam height increases, the amount of error of calculated stress increases. In particular, the error at the critical zones of the foundation such as at the dam heel, may raise even up to 40%. In the group of dams studied, the error increases even up to 12 times in respect to the expected error in the shorter dams. The deficiency could in some cases completely affect the safety of the dam. This research indicates the necessity of using more accurate methods of estimating uplift load under high gravity dams.

**Keywords:** Uplift, Gravity Dam, USACE, Finite Element