

ارزیابی تاثیر گزینه‌های مختلف طراحی در تحلیل تراوش و پایداری سد گلفرج

کیومرث روشنگر*¹، بهزاد روحپرور²، طاهر صداقتی³

تاریخ دریافت: 94/09/09 تاریخ پذیرش: 94/10/05

¹دانشیار گروه آب، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

²دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر

³دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: kroshangar@yahoo.com

چکیده

تراوش در سدهای خاکی یکی از مهم‌ترین مسائلی است که عدم توجه به آن، منجر به ایجاد فرسایش و از بین رفتن پایداری شیروانی‌ها می‌شود. به همین علت ضروری است با محاسبه مقدار دقیق دبی نشت از بدنه و پی سد و در نظر گرفتن مسائل فنی و اقتصادی، اقدام به جلوگیری از خطرات جانی و مالی محتمل شود. در این تحقیق تحلیل تراوش از بدنه و پایداری شیروانی‌های بالادست و پایین‌دست سد گلفرج برای حالت بعد از پایان عملیات ساخت، حالت تراوش پایدار، تخلیه سریع مخزن، زلزله MCE, OBE با روش‌های مختلف حالت حدی از قبیل اسپنسر، بیشاپ، جانبو و مورگنسترن - پرایس با استفاده از مدل Geo-Studio که مبتنی بر روش اجزاء محدود است مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان داد که دبی تراوش در مقطع عمیق بدون دیوار آب‌بند 18/2 مترمکعب بر روز در واحد عرض بوده که در صورت استفاده از دیوار آب‌بند یا پتوی بتنی در بالادست، میزان دبی تراوش به ترتیب در حدود 95% و 10% کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از تحلیل پایداری شیروانی خاکی از پایداری شیروانی در تمامی حالت‌ها و همگرایی روش‌های حالت تعادل حدی است.

واژه‌های کلیدی: اجزاء محدود، تحلیل پایداری، تعادل حدی، دبی تراوش، سد خاکی

Evaluation of Different Design Options Impact on Seepage and Stability Analysis of Golfaraj Dam

K Roushangar^{*1}, B Rouhparvar², T Sedaghati³

Received: 30 November 2015 Accepted: 26 December 2015

¹- Assoc. Prof., Water. Dept., Faculty of Civil Engineering., Univ. of Tabriz, Iran

²- Former M.Sc. Student, Islamic Azad Univ. Ahar branch, Iran

³- M.Sc. Student of Geotechnics, Faculty of Civil Engineering, Univ. of Tabriz, Iran

* Corresponding Author, Email: kroshangar@yahoo.com

Abstract

Seepage in earth fill dams is one of the important factors that may cause the erosion and slope instability if it is ignored. Therefore, it is crucial to calculate the leakage discharge through the body of dam and foundation, to prevent economic and life hazards by considering technical and economical issues. In this research, the seepage analysis of the body and the stability of the upstream and downstream slopes of Golfaraj dam after construction, during steady state seepage, rapid drawdown of reservoir and OBE, MCE earthquakes have been investigated and compared by applying different limit state equilibrium methods including: Spencer, Bishop, Janbu, and Mohergengstren-Price, using built-in Geo studio software. The results showed that seepage discharge in a deep section without dike was $18.2 \text{ m}^3\text{day}^{-1}$ per unit width which was reduced in the case of applying a cutoff or a concrete blanket by 95 and 10 percent, respectively. Data obtained from the slope analysis indicated that the slope was stable under any circumstances and the limit equilibrium methods were convergent.

Keywords: Earth fill dam, Finite element, Limit equilibrium, Seepage discharge, Stability analysis

میزان تراوش از لحاظ نظری مبتنی بر معادلات لاپلاس و تحلیل شبکه‌های جریان بوده و تخمین دبی تراوش و عوامل مؤثر بر آن در شرایط هیدرولیکی متفاوت جهت تحلیل پایداری امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. بدین منظور تاکنون تحقیقات متعددی برای بررسی تراوش و تحلیل پایداری شیروانی سدهای خاکی صورت پذیرفته است. در این زمینه خزائی و همکاران (1392) در تحلیل سه‌بعدی نشت از پی و جناحین سدهای خاکی با در نظر گرفتن توپوگرافی ساختگاه سد گویوی به این نتیجه رسیدند که با افزایش نفوذپذیری، روند افزایش دبی تراوش در حالت عدم اجرای پرده تزریق نسبت به حالت

مقدمه

صنعت سدسازی به‌عنوان یکی از قدیمی‌ترین و پیچیده‌ترین فعالیت‌های ساختمانی همواره مدنظر جوامع مختلف بوده و از نظر اقتصادی نیز یکی از منابع مهم اقتصادی هر کشور و منطقه محسوب می‌شود. بالا بودن هزینه ساخت و نیز شدت خسارات ناشی از شکست سد-ها و همچنین عدم قطعیت در پیش‌بینی رفتار سازه‌های ژئوتکنیکی به‌لحاظ ماهیت خاص مصالح خاکی، لزوم مراقبت و رفتارسنجی سدهای خاکی را بیش از هر چیز آشکار می‌کند.

مطالعه پایداری شیب‌ها برای حالات زیر در نظر گرفته شده است:

- پایان عملیات ساخت
- بهره‌برداری و تراوش دائم (در ترازهای مختلف سد)
- افت سریع آب مخزن
- اعمال ضرایب زلزله مربوط به هر حالت در سطح طراحی

برای کنترل تراوش نیز با استفاده از روش اجزاء محدود برای حالت‌های با آب‌بند، بدون آب‌بند و بتوی بتنی (پوشش نفوذناپذیر) در بالادست سد بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

مشخصات و موقعیت منطقه مورد مطالعه

طرح گلفرج پروژه‌ای جهت انتقال جریان آب به مقدار 6 مترمکعب در ثانیه از آب رودخانه ارس به محدوده جلفا جهت تأمین نیازهای آب شرب و صنعتی منطقه آزاد تجاری صنعتی ارس هست. سد گلفرج یکی از این سدهای ذخیره‌ای طرح پمپاژ گلفرج هست. مطابق شکل 1 این سد در بالادست روستای شاهمار بر روی آبراهه فرعی قرار گرفته است. سد گلفرج یک سد خاکی هست که قسمت اصلی بدنه را پوسته سد که از مصالح آبرفتی درشت دانه پر شده، تشکیل داده است.



شکل 1- موقعیت ساختگاه سد گلفرج.

اجرای پرده تزریق بیشتر هست. نورزاد و محمدی (1388) در ارزیابی تراوش سدهای خاکی با استفاده از اندازه‌گیری دما نشان دادند که در صورت پایین بودن سطح آب میزان تراوش کم شده و به تبع آن میزان تغییرات دما نیز کم خواهد شد. پاکباز و همکاران (2009) با مدل SEEP-3D به ارزیابی ساخت دیوار آب‌بند بتن پلاستیک در تکیه‌گاه راست و چپ سد خاکی کرخه در کاهش مقدار تراوش پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با ساخت دیوار آب‌بند چپ و راست مقدار تراوش به ترتیب 60 و 20 درصد کاهش می‌یابد. اولی پور و همکاران (1387) در بررسی عددی تأثیر سرعت احداث سدهای خاکی بر پایداری شیب‌ها، به این نتیجه رسیدند که با افزایش سرعت احداث سد، ضریب اطمینان در پایان ساخت، کاهش می‌یابد و نرخ این کاهش با افزایش شیب، کم می‌شود. در سدهای با شیب کمتر، با افزایش سرعت خاکریزی از روند نزولی ضریب اطمینان، کاسته می‌شود. وندام و ژو (2013) از روش ذره بنیاد (BMM) که تفریقی از روش جابجایی گوه شکل (Wedge) با روش هیدرودینامیک ذره‌ای است استفاده کردند. این روش ضریب اطمینان را از طریق جابجایی گوه شکل محاسبه می‌کند و در صورتی که مقدار این ضریب کمتر از یک باشد برای دقت بیشتر با استفاده از روش هیدرودینامیک مقادیر جابجایی را تعیین می‌کند. از این طریق پیشروی زمانی ایجاد ناپایداری و خرابی شیروانی‌ها مورد بررسی قرار گرفتند که مدل‌ها تشابه معقولی با نتایج آزمایش‌ها داشته‌اند. طراحی یک سد خاکی عمدتاً با در نظر داشتن خواص مهندسی مصالح محلی قابل دسترس، زمین‌شناسی محل، شرایط آب و هوایی، هیدرولوژیکی، لرزه‌خیزی و ارتباط با سایر عوامل توسعه در بالادست و پایین دست انجام می‌شود. پایداری بدنه و پی تحت زمین‌لرزه، کنترل تراوش و فشار در بدنه و پی از جمله معیارهای طراحی این‌گونه سدها هستند. بنابراین بررسی این موضوع ضرورت خاصی می‌طلبد. با توجه به اهمیت موضوع، در این

در رابطه فوق H بار آبی کل $[m]$ ، K_x نفوذپذیری در راستای محور x $[m s^{-1}]$ ، K_y نفوذپذیری در راستای محور y $[m s^{-1}]$ ، Q فلاکس مرزی اعمال شده $[m s^{-1}]$ ، t : زمان $[s]$ ، و θ مقدار آب حجمی $[m^3]$ ، را نشان می‌دهد. این معادله تفاوت بین جریان ورودی و خروجی از یک جزء حجمی در یک نقطه در زمان مشخص را بیان می‌کند که همان برابر مقدار آب حجمی است. در حالت کلی این معادله مجموع میزان تغییرات جریان در راستای x و y به علاوه جریان‌های خارجی وارده را نشان می‌دهد که برابر میزان تغییر در مقدار آب حجمی نسبت به زمان هست. تحت شرایط پایدار جریان، سیال ورودی و خروجی از یک جزء حجمی در هر زمان یکسان هست. لذا طرف دوم معادله 1 به صفر تبدیل می‌شود و معادله به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = 0 \quad [2]$$

تغییرات در مقدار آب حجمی به تغییر در حالت تنش و خصوصیات خاک بستگی دارد. حالت تنش برای هر دو شرایط اشباع و غیراشباع با دو متغیر حالت می‌تواند تشریح شود. متغیرهای حالت تنش عبارت‌اند از:

$$(\sigma - u_a) \quad [3]$$

$$(u_a - u_w) \quad [4]$$

که در آن σ تنش کلی، u_a فشار هوای حفره‌ای و u_w فشار آب حفره‌ای را توصیف می‌کنند. نرم‌افزار SEEP/W برای شرایط تنش کل فرمول‌بندی شده است که هیچ‌گونه بارگذاری یا باربرداری بر روی خاک انجام نمی‌شود. فرض مهم این است که مقدار فشار حفره‌ای هوا به فشار اتمسفر در فرآیند گذر آب ثابت باقی می‌ماند. این بدان معنی است که رابطه 3 ثابت باقی می‌ماند و تأثیری در تغییر مقدار آب حجمی ندارد. در نتیجه تغییر در مقدار آب حجمی تنها در اثر تغییر در متغیر تنش رابطه 4 هست و با ثابت ماندن u_a ، تغییر در مقدار آب حجمی

در وسط بدنه سد یک هسته رسی به‌عنوان اجزاء آب‌بند و در دو طرف هسته فیلتر برای جلوگیری از شسته‌شدن هسته رسی به‌داخل مصالح درشت‌دانه پوسته سد کار گذاشته شده است. عرض تاج سد 7 متر و شیب شیروانی‌های بالادست و پایین‌دست 1 قائم به 3 افقی هست و در ارتفاع 8 متری از کف یک پله به عرض 8 متر در نظر گرفته شده است.

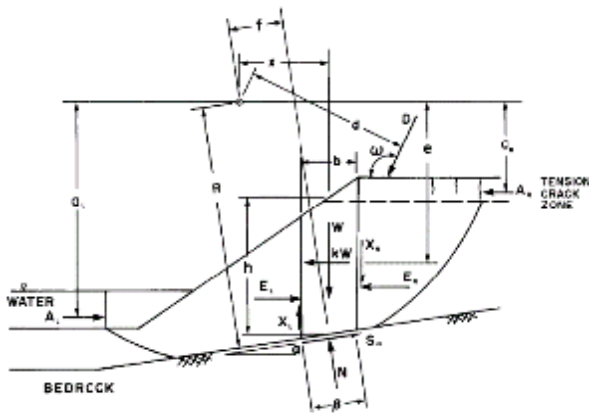
مدل Geo-Studio

نرم‌افزار Geo Studio از جمله برنامه‌های ژئوتکنیکی مبتنی بر اجزاء محدود بوده و از طریق آن می‌توان تحلیل‌هایی از قبیل تنش-کرنش، جریان، تراوش، پایداری شیب‌ها، تحلیل دینامیکی و همچنین شرایط افت سریع را بررسی کرد. این بسته نرم‌افزاری شامل نرم‌افزارهای SIGMA/W برای تحلیل تنش-کرنش، SEEP/W برای تحلیل جریان و تراوش، SLOPE/W برای تحلیل پایداری شیب، QUAKE/W برای تحلیل دینامیکی، TEMP/W برای تحلیل توزیع دما در خاک، CTRAN/W برای تحلیل توزیع آلاینده‌ها در خاک و VADOSE/W برای تحلیل اثر شرایط محیطی (از قبیل خورشید، گیاهان، بارش و...) بر خاک است. در این تحقیق از بخش SEEP/W و SLOPE/W این مدل استفاده شده است.

نظریه SEEP/W

نرم‌افزار SEEP/W بر اساس رابطه دارسی که عبور جریان آب از خاک را در دو حالت اشباع و غیراشباع بیان می‌کند، فرمول‌بندی شده است (بی‌نام 2008). یکی از بزرگ‌ترین تفاوت‌هایی که در دو حالت اشباع و غیراشباع وجود دارد ضریب نفوذپذیری هست که در حالت غیراشباع برخلاف حالت اشباع ثابت نبوده و تابعی از درجه اشباع و مکش موجود در خاک غیراشباع است. نرم‌افزار SEEP/W از معادلات زیر برای فرمول‌بندی تحلیل تراوش به صورت دوبعدی استفاده می‌کند (بی‌نام 2008، محرمی و همکاران 2014):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial q}{\partial t} \quad [1]$$



شکل 2- نیروهای وارد بر یک قطعه (بی‌نام 2008).

شکل 3 یک تابع نیمه‌سینوسی را نشان می‌دهد. منحنی بالا مقدار واقعی تابع و منحنی پایین تابع مورد استفاده قرار گرفته را نشان می‌دهد. نسبت بین دو منحنی نشان‌دهنده ضریب لامبدا است. ضریب اطمینان معادله حالت تعادل حدی با توجه به تعادل لنگرها به صورت زیر است:

$$F_m = \frac{\dot{a} (c\phi R + (N - ub)R \tan \phi)}{\dot{a} W_x - \dot{a} N_f \pm \dot{a} D_d} \quad [8]$$

ضریب اطمینان معادله حالت تعادل حدی با توجه به تعادل نیروهای افقی به صورت زیر است:

$$F_f = \frac{\dot{a} (c\phi R \cos \alpha + (N - ub) \cos \alpha \tan \phi)}{\dot{a} N \sin \alpha - \dot{a} D \cos \alpha} \quad [9]$$

که در آن $c\phi$ چسبندگی مؤثر، ϕ زاویه اصطکاک مؤثر، D بار نقطه متمرکز، a شیب پایه قطعه، W وزن قطعه، N نیروی نرمال قطعه، u فشار آب حفره‌ای و β ، d ، R ، w ، X پارامترهای هندسی می‌باشند.

تابعی از تغییر در فشار حفره‌ای آب می‌شود (بی‌نام 2008).

حل معادله فوق به روش اجزاء محدود و باقیمانده‌های وزن‌دار به شکل زیر خواهد بود:

$$\int_A ([B]^T [C] [B] R) dA (H) - q \int_L (< N >^T R) dL \quad [5]$$

که در آن ماتریس گرادیان (B) به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$B = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} \dot{e}(y_2 - y_3) & (y_3 - y_1) & (y_1 - y_2) \\ \dot{e}(x_2 - x_3) & (x_3 - x_1) & (x_1 - x_2) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{Bmatrix} \quad [6]$$

در رابطه فوق C ماتریس هدایت هیدرولیکی اجزاء، H بردار بارهای گرهی، N بردار توابع انتروپولاسیون، q فلاکس واحد عبوری از اجزاء، t زمان و A و L به ترتیب سطح و طول اجزاء هستند که در راستای آن انتگرال‌گیری می‌کنیم.

از طریق روش عددی در نقاط گوس انتگرال‌گیری انجام شده و مقادیر مورد نظر محاسبه می‌شود (بی‌نام 2008، لام و همکاران 1987).

نظریه Slope/W

روش‌های تعیین پایداری شیب‌ها در Slope/W

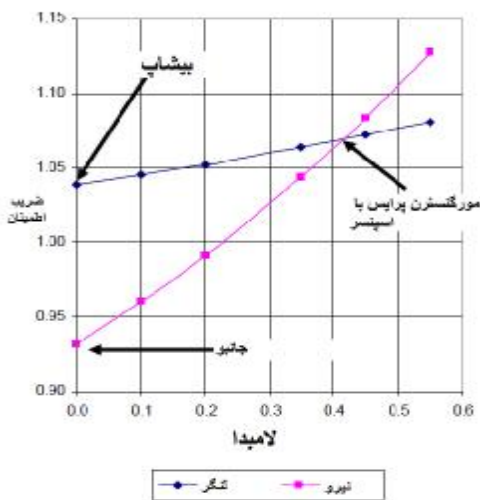
روش تعادل حدی

حالت تعادل حدی توسط فردلاند در دانشگاه ساسکاچوان توسعه یافت (فردلاند و کراهن 1977، فردلاند و همکاران 1981). حالت تعادل حدی بر اساس دو ضریب اطمینان معادلات شکل گرفته و طیف وسیعی از نیروهای برشی و نرمال بین مقاطع را در بردارد (شکل 2). معادلات ضریب اطمینان شامل معادله تعادل لنگرها (F_m) و معادله تعادل نیروها (F_f) است.

نیروهای برشی موجود بین قطعات در روش تعادل حدی توسط مورگنسترن و پرایس (1965) به صورت زیر ارائه شد:

$$X = E I f(x) \quad [Y]$$

که در آن $f(x)$ یک تابع، I ضریب لامبدا مورد استفاده در تابع، E نیروی نرمال بین قطعات و X نیروی برشی بین قطعات را نشان می‌دهد.

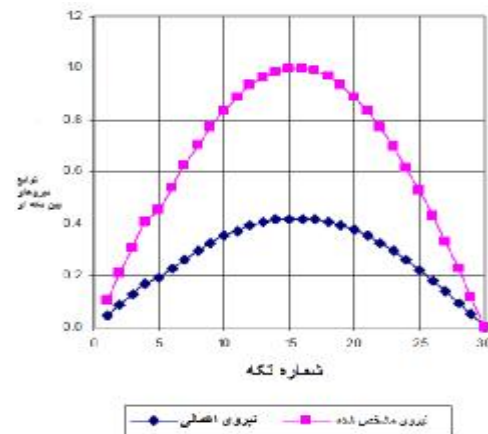


شکل 4- شکل ضریب اطمینان در برابر لامبدا (بی نام 2008).

نتایج و بحث

تحلیل تراوش سد گلفرج

به طور کلی برای مدل سازی مسئله فرضیات زیر در نظر گرفته شده است: ذرات خاک و آب غیرقابل تراکم فرض شده اند. فرض شده است که حرکت آب در بدنه سد، پی و تکیه گاه ها از قانون داری تبعت می کند. مصالح سد ایزوتروپ فرض شده و در کلیه تحلیل ها جریان حالت پایا در نظر گرفته شده است. بر اساس آزمایش ها صحرایی انجام شده توسط مهندسین مشاور طرح، پی سد در سه ناحیه با نفوذپذیری های مختلف تقسیم بندی شده است که در جدول 1 نفوذپذیری طبقات پی، هسته و بدنه سد ارائه شده است. نرم افزار Geostudio برای تعریف شرایط مرزی در بالادست و پایین دست سد خاکی از سطح مبنای تعریف شده برای مسئله استفاده می کند. به طوری که برای سطوح بالادست سد که در تماس با آب مخزن می باشند ارتفاع آب از سطح مبنا به عنوان شرط مرزی بالادست تعریف می شود. یعنی تمامی این سطوح ارتفاع یکسان سطح آب را دارا خواهند بود. برای سطوح پایین دست نیز قسمت هایی که در تماس با آب خواهند بود به عنوان ارتفاع آب در پایین دست لحاظ می شود. البته نرم افزار قابلیت تعریف سطوح دارای



شکل 3- تابع نیمه سینوسی نیروی بین قطعات (بی نام 2008).

در روش تعادل حدی F_m و F_f برای طیف وسیعی از لامبدا محاسبه می شود. با مقادیر محاسبه شده یک طرح مشابه شکل 4 را می توان کشید که نشان می دهد که چگونه F_m و F_f با لامبدا تغییر می کند.

روش بیشاپ ساده شده (بیشاپ 1960) نیروهای برشی بین مقاطع را نادیده گرفته و فقط تعادل لنگرها را در نظر گرفته است. در واقع در این روش لامبدا برابر صفر هست. در نتیجه ضریب اطمینان این روش روی منحنی لنگر، محلی است که لامبدا برابر صفر است (شکل 4). روش جانبو ساده شده نیز نیروهای برشی بین مقاطع را نادیده می گیرد، و تنها تعادل نیروها را در نظر می گیرد (جانبو 1954). در نتیجه ضریب اطمینان این روش نیز روی منحنی نیرو، محلی است که لامبدا برابر صفر است (شکل 4). اسپنسر و مورگنسترن - پرایس ضریب اطمینان را در نقطه تقاطع دو منحنی مشخص کرده اند (شکل 4).

در این نقطه ضریب اطمینان هم در تعادل لنگر و هم در تعادل نیرو ارضا می شود. این که آیا این نقطه متقاطع ضریب اطمینان اسپنسر می باشد یا مورگنسترن - پرایس، بستگی به عملکرد نیروی بین مقاطع دارد. اسپنسر نسبت نیروهای افقی به نرمال بین قطعات را برای همه برش ها ثابت در نظر گرفته، که در حالت تعادل حدی مربوط به تابع نیروی بین مقاطع ثابت (افقی) است (اسپنسر 1967).

جدول 1- مقادیر نفوذپذیری مصالح در تحلیل نشت (بی‌نام 1388).

مصالح	نفوذپذیری ($m s^{-1}$)
هسته	8×10^{-9}
بستر لایه بالایی	$5/6 \times 10^{-6}$
بستر لایه میانی	10^{-4}
بستر لایه پایینی	$1/3 \times 10^{-7}$
پوسته	10^{-5}
فیلتر	10^{-6}
پرده آب‌بند	8×10^{-8}

جدول 2- دبی عبوری از مقطع قائم ($m^3 d^{-1}$).

دبی عبوری از مقطع عمیق بدون دیوار آب‌بند	18/2
دبی عبوری از مقطع عمیق با دیوار آب‌بند	0/9

تحلیل پایداری شیروانی سد گلفرج

تحلیل سد در مرحله پایان ساخت

در حالت پایان ساخت، از آنجایی که سد آگیری نشده و آب در خاک وجود ندارد و در نتیجه فشار آب حفره‌ای در خاک پدیدار نشده، خاک نه تحکیم یافته و نه زهکشی شده است. بنابراین دارای شرایط تحکیم نیافته زهکشی نشده است. جدول 3 نتایج مربوط به پایداری شیروانی بالادست و پایین دست سد گلفرج را نشان می‌دهد که با کمینه ضریب اطمینان، مورد ارزیابی قرار گرفته است (بی‌نام 1392). بررسی جدول 3 نشان می‌دهد که هر دو شیروانی از ضریب اطمینان قابل قبولی برخوردارند. شکل‌های 8 و 9 سطوح لغزش را برای شیب بالادست و پایین دست سد را نشان می‌دهد.

پتانسیل تراوش را نیز دارا هست که می‌توان برای سطوح پی و قسمت‌های دارای پتانسیل تراوش تخصیص داد. نرم‌افزار به‌طور پیش‌فرض، سطوحی را که شرایط مرزی خاصی تعریف نشده باشد به‌عنوان سطوح غیرقابل تراوش در نظر خواهد گرفت. در مدل‌سازی سد گلفرج تراز آب در بالادست 1 متر بالاتر از تراز نرمال و در پایین دست منطبق بر کف فیلتر پایین دست در نظر گرفته شده است.

تأثیر دیوار آب‌بند بر دبی عبوری

برای این کار دبی خروجی از سد برای مقطع قائمی که از مرکز سد می‌گذرد برای دو حالت با دیوار آب‌بند و بدون دیوار آب‌بند محاسبه شده است. نتایج تحلیل در جدول 2 و شکل‌های 5 و 6 نشان داده شده است.

نتایج تحلیل نشان می‌دهد که برای حالت بدون دیوار آب‌بند، دبی تراوش یافته از واحد عرض 18/2 مترمکعب بر روز بوده در صورتی که با احداث دیوار آب‌بند با نفوذپذیری 8×10^{-8} متر بر ثانیه به میانگین عمق 16/25 متر و ضخامتی در حدود 1 متر کل دبی تراوش در عرض واحد مقطع عمیق 0/9 مترمکعب بر روز هست که حاکی از این است که با احداث دیوار آب‌بند دبی تراوش در عرض واحد مقطع عمیق در حدود 95 درصد کاهش یافته است. با مقایسه شکل‌های 5 و 6 می‌توان دریافت که خطوط هم پتانسیل از زیر دیوار آب‌بند عبور می‌کند.

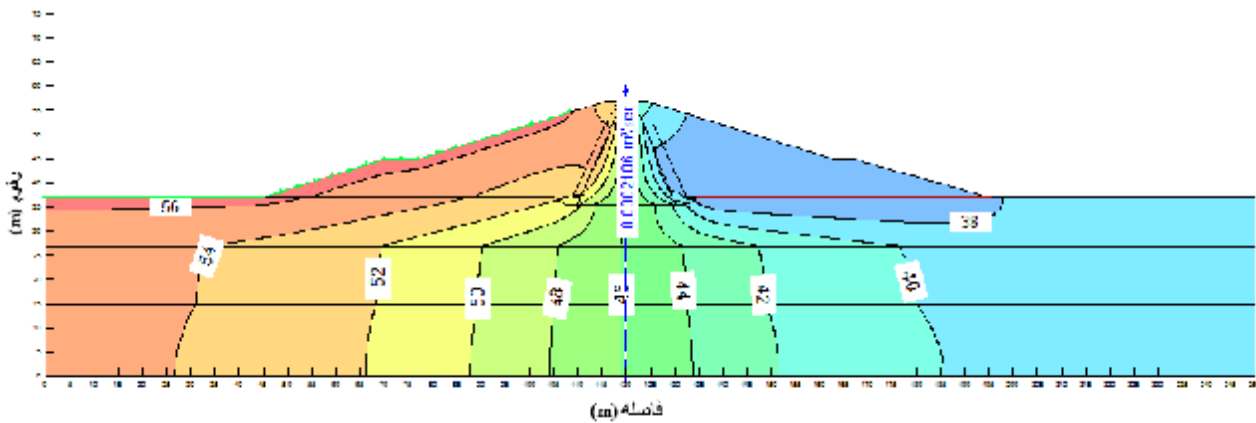
تأثیر پتوی بتنی در دبی آب عبوری

برای افزایش طول تراوش در داخل پی، از یک پوشش نفوذناپذیر به ضخامت 50 سانتی‌متر و طول 50 متر استفاده شد.

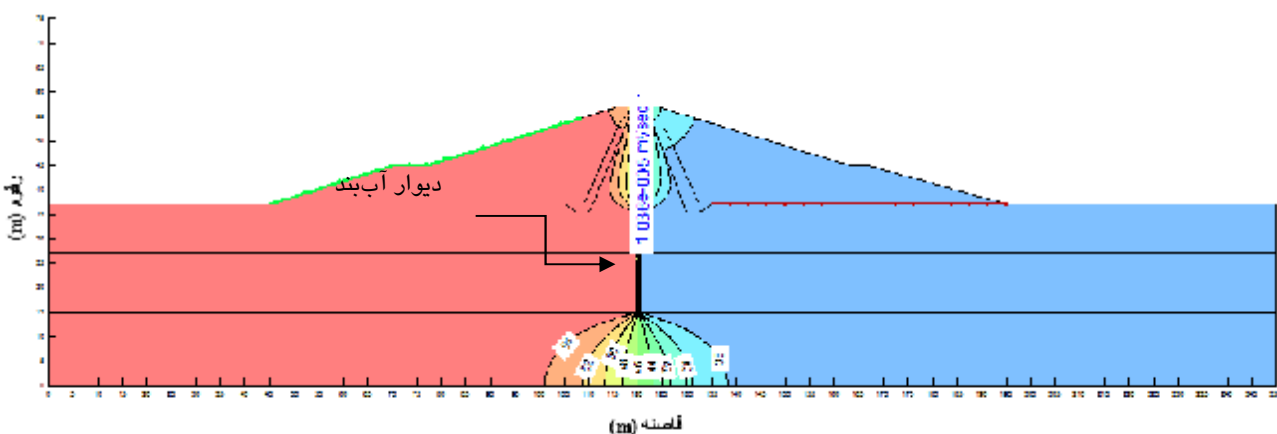
نتایج تحلیل نشان می‌دهد که در شرایط اجرای پوشش نفوذناپذیر در بالادست سد دبی عبوری از واحد عرض 16/45 مترمکعب بر روز محاسبه شده که نسبت به حالت بدون دیوار آب‌بند در حدود 10 درصد کاهش یافته است (شکل 7).

جدول 3- نتایج تحلیل پایداری پس از پایان عملیات ساخت.

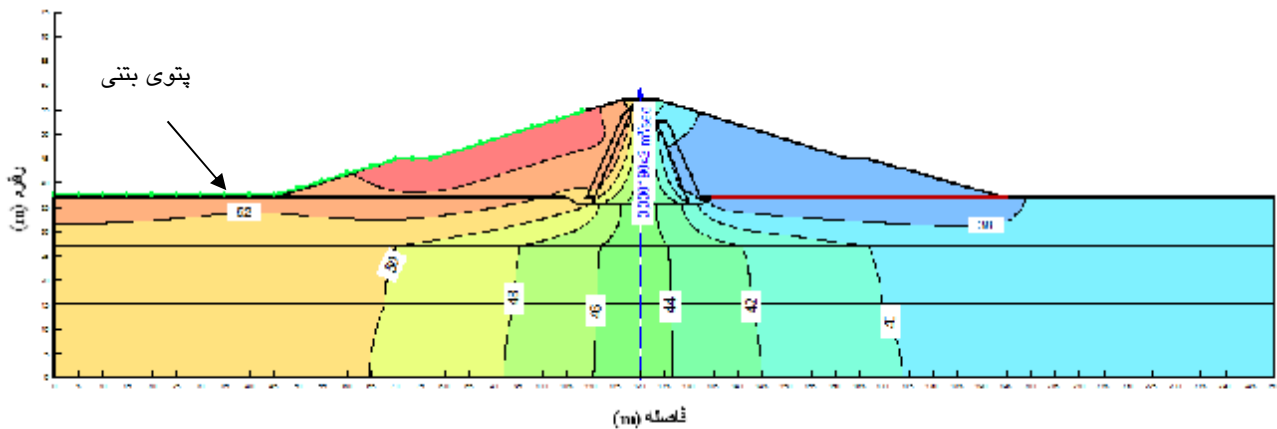
پایین دست		بالادست		روش تحلیل
ضریب	کمینه	ضریب	کمینه	
اطمینان موجود	قابل قبول	اطمینان موجود	قابل قبول	Bishop
2/425	1/300	2/251	1/300	Janbu
2/197	1/300	2/045	1/300	Morgenstren price
2/398	1/300	2/229	1/300	Spencer



شکل 5- دبی عبوری از مقطع عمیق و خطوط همپتانسیل برای حالت بدون دیوار آب‌بند.



شکل 6- دبی عبوری از مقطع عمیق و خطوط همپتانسیل برای حالت با دیوار آب‌بند.

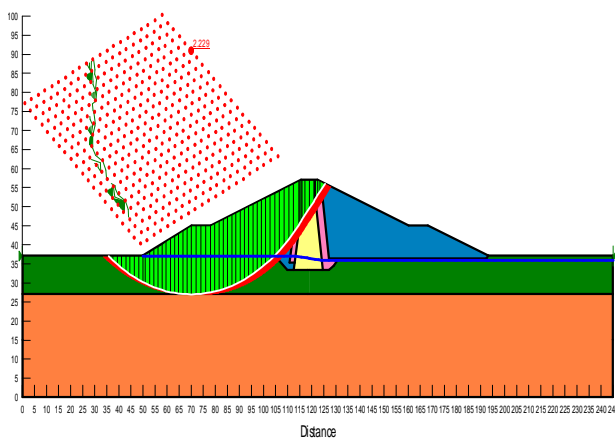


شکل 7- مدل سازی پوشش نفوذناپذیر برای بالادست و تعیین دبی عبوری.

جدول 4- نتایج تحلیل پایداری در حالت تراوش پایدار برای

مخزن پر.

پایین دست		بالادست		روش تحلیل	
ضریب	کمینه	ضریب	کمینه		
موجود	قابل قبول	موجود	قابل قبول		
اطمینان	اطمینان	اطمینان	اطمینان		
2/233	1/500	1/824	1/500	Bishop	
2/231	1/500	1/822	1/500	Janbu	
2/233	1/500	1/826	1/500	Morgenstren price	
2/232	1/500	1/826	1/500	Spencer	



شکل 8- سطح لغزش برای شیب بالادست بعد از پایان

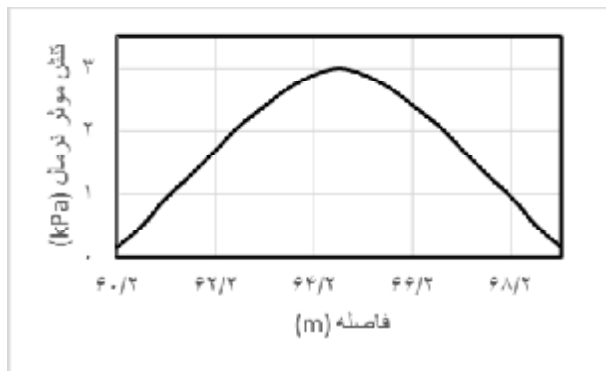
عملیات ساخت.

تحلیل سد در حالت تراوش پایدار برای مخزن پر

پس از به وجود آمدن تراوش پایدار، گذر آب از درون هسته، نحوه بارگذاری دیگری بر سد اعمال می‌نماید. در این حالت خاک به علت وجود فشار آب حفره‌ای هم تحکیم یافته و هم زهکشی می‌شود پس خاک حالت تحکیم یافته زهکشی شده را دارد. جدول 4 نتایج حاصل از تحلیل، برای شیب بالادست و پایین دست را نشان می‌دهد. ضرایب اطمینان به دست آمده با مقدار توصیه شده مورد بررسی قرار گرفته است (بی نام 1392). نتایج حاصل حاکی از پایداری هر دو شیب است. همچنین همگرایی روش‌های تحلیل به کار گرفته شده کاملاً مشهود است.

شکل 10 فشار آب حفره‌ای و شکل 11 و 12 به ترتیب تنش نرمال و تنش مؤثر، برای سطح لغزش بحرانی بالادست را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که فشار آب حفره‌ای به تنش نرمال نزدیک شده و سبب پایین آمدن تنش مؤثر گردیده ولی مقدار آن به صفر نرسیده است و احتمال روان‌گرایی در حالت ایستایی وجود ندارد زیرا شیب نمودارها به شکلی است که تنش نرمال ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. همچنین تا نقطه میانی سطح لغزش اختلاف تنش نرمال و فشار آب حفره‌ای زیاد بوده و سپس رفته رفته کاهش یافته است.

تراوش پایدار رسیده است. جدول 5 نتایج حاصل از تحلیل، برای شیب بالادست را نشان می‌دهد. نتایج بیانگر پایداری شیب در هر چهار روش تحلیل به کار گرفته شده است.



شکل 12- تنش مؤثر برای سطح لغزش بالادست برای مخزن پر.

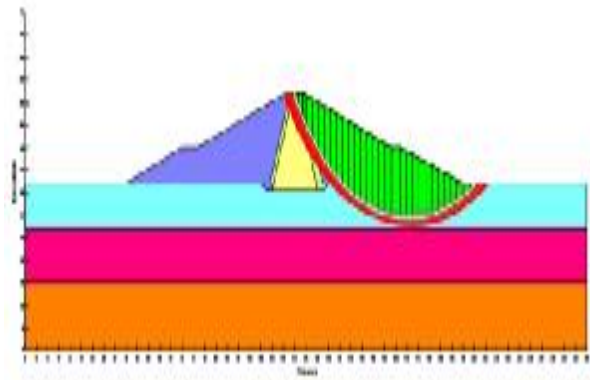
جدول 5- نتایج تحلیل پایداری در حالت تراوش پایدار برای مخزن نیمه‌پر (شیروانی بالادست).

روش تحلیل	کمیته ضریب اطمینان قابل قبول	ضریب اطمینان موجود
Bishop	1/500	2/067
Janbu	1/500	1/932
Morgenestren price	1/500	2/068
Spencer	1/500	2/067

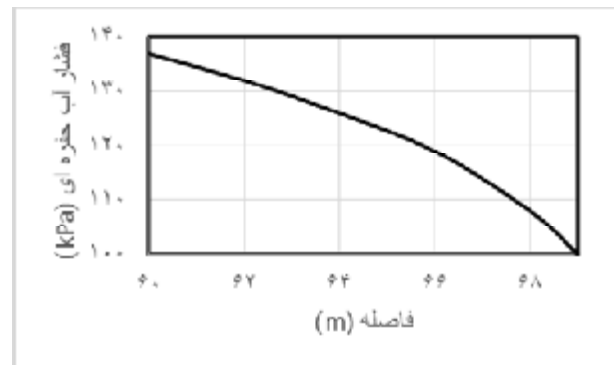
تحلیل سد در حالت تخلیه سریع مخزن

اگر تخلیه مخزن با سرعتی انجام شود که در هنگام افت سطح آب فشار آب منفذی داخل بدنه تغییر نکند و خط فریاتیک در موقعیت پیشین خود باقی بماند اصطلاحاً به آن تخلیه سریع گفته می‌شود. نحوه بارگذاری برای تخلیه سریع در یک سد خاکی به شکلی است که سه اثر مختلف در نتیجه آن حاصل می‌گردد که باید در تحلیل مورد مطالعه واقع گردند.

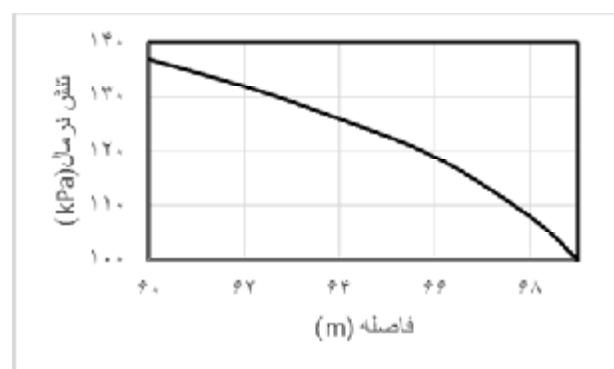
الف) از بین رفتن نیروی شناوری در پوسته بالادست که باعث افزایش وزن اجزای موجود در



شکل 9- سطح لغزش برای شیب پایین دست بعد از پایان عملیات ساخت.



شکل 10- فشار آب حفره ای برای سطح لغزش بالادست برای مخزن پر.



شکل 11- تنش نرمال برای سطح لغزش بالادست برای مخزن پر.

تحلیل سد در حالت تراوش پایدار برای مخزن نیمه‌پر در این تحلیل فرض بر این گرفته شده که سطح آب در بالادست به تراز 10 متری سطح زمین در حالت

تحلیل سد با وجود زلزله

تحلیل سد برای سطح لرزه‌ای بیشینه

قابل‌تصور (MCE)

در بیشینه زلزله قابل‌تصور، آسیب‌های سازه‌ای و حتی غیرقابل ترمیم برای سد متصور بوده اما در هر حال این آسیب‌ها نباید باعث تخریب کامل سد و رخداد فاجعه شود. وقتی هندسه و فعالیت گسل‌های منطقه معلوم باشد، لازم است تا از روش قطعی جهت تخمین زلزله MCE استفاده شود. اما در صورتی که فعالیت لرزه‌زایی منطقه نامشخص باشد بسته به میزان پتانسیل خطر می‌توان از تحلیل احتمالاتی با دوره بازگشت 3000 تا 10000 سال استفاده نمود. در صورتی که پروژه مورد نظر از اهمیت زیادی برخوردار بوده و دارای پتانسیل خطر بالایی باشد، استفاده از دوره بازگشت 10000 ساله جهت تخمین MCE توصیه شده است. معمولاً شتاب نگاشت زلزله در دو جهت متعامد افقی و یک جهت قائم ثبت می‌گردد. با این حال در تحلیل‌های شبه استاتیک غالباً شتاب افقی مورد توجه بیشتری واقع شده و طراحی سدها تنها برای تحمل بارهای ناشی از این مؤلفه زلزله صورت می‌پذیرد. بررسی‌ها نیز نشان‌دهنده آن است که در شرایط متعارف مؤلفه قائم زلزله تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر پایداری شیروانی‌ها ندارد (بی‌نام 1392). لذا در حالت کلی نیازی به اعمال این ضریب در تحلیل پایداری شیب سدها در حالت شبه‌استاتیک نخواهد بود. در این تحقیق نیز با توجه به تحلیل شبه‌استاتیکی، شتاب افقی زلزله عملکرد پایه برای سد گلفرج 0/1g و شتاب قائم صفر در نظر گرفته شده است. طبق توصیه استاندارد ارتش آمریکا ضریب اطمینان قابل‌قبول در این حالت 1/1 هست. جدول‌های 7، 8 و 9 نتایج حاصل از تحلیل، به ترتیب برای شرایط بعد از عملیات پایان ساخت، مخزن پر و نیمه‌پر را نشان می‌دهند. نتایج بیان‌گر پایدار بودن شیب‌های بالادست و پایین‌دست در همه شرایط هست. شکل 13 سطح لغزش پایین‌دست بعد از پایان عملیات ساخت و

منطقه تخلیه شده، می‌گردد.

ب) برداشته شدن فشار آب از روی هسته که در این حالت می‌تواند به صورت نیروهای گرهی در امتداد سطح بالادست هسته در نظر گرفته شود.

ج) تأثیر کاهش فشار آب بر روی پی، که در این حالت نیز مانند هسته به صورت نیروهای گرهی در نظر گرفته می‌شود. با این شرط که بتوان پی را در حالت زهکشی نشده فرض نمود.

با توجه به اینکه در شرایط افت سریع آب مخزن به علت وجود آب در خاک، عمل تحکیم صورت می‌گیرد اما به خاطر شرایط افت سریع، فشار آب حفره‌ای زایل نشده و خاک زهکشی نمی‌شود بنابراین شرایط تحکیم یافته زهکشی نشده در نظر گرفته شده است. در این تحلیل فرض بر این گرفته شده که سطح آب در بالادست به تراز 6 متری سطح زمین رسیده است. با توجه به تحلیل پایدار تراوش، به دلیل اینکه آب در تخلیه سریع مخزن فرصت لازم برای زهکشی را ندارد بنابراین خط فریاتیکی از تراز 6 متری تا تراز نرمال سد در بالادست و از آنجا به طرف هسته و زهکش پایین‌دست در نظر گرفته شده است. جدول 6 نتایج حاصل از تحلیل، برای شیب بالادست را نشان می‌دهد. نتایج حاصل نشان‌گر پایداری شیب در هر چهار روش مورد بررسی هست.

جدول 6- نتایج تحلیل پایداری در حالت تخلیه سریع

مخزن (شیروانی بالادست).

روش تحلیل	کمینه ضریب اطمینان قابل‌قبول	ضریب اطمینان موجود
Bishop	1/200	1/725
Janbu	1/200	1/712
Morgenstren price	1/200	1/725
Spencer	1/200	1/725

بیان‌گر پایدار بودن شیب‌های بالادست و پایین‌دست در همه شرایط برای هر چهار روش مورد تحلیل قرار گرفته، هست.

جدول 8- نتایج تحلیل پایداری برای زلزله OBE برای مخزن پر.

روش تحلیل	بالادست		پایین‌دست	
	کمینه ضریب اطمینان قابل قبول	ضریب اطمینان موجود	کمینه ضریب اطمینان قابل قبول	ضریب اطمینان موجود
Bishop	1/100	1/248	1/100	1/399
Janbu	1/100	1/160	1/100	1/267
Morgenstren price	1/100	1/261	1/100	1/390
Spencer	1/100	1/259	1/100	1/391

جدول 9- نتایج تحلیل پایداری برای زلزله MCE برای مخزن نیمه‌پر.

روش تحلیل	بالادست		پایین‌دست	
	کمینه ضریب اطمینان قابل قبول	ضریب اطمینان موجود	کمینه ضریب اطمینان قابل قبول	ضریب اطمینان موجود
Bishop	1/100	1/287	1/100	1/402
Janbu	1/100	1/153	1/100	1/266
Morgenstren price	1/100	1/277	1/100	1/392
Spencer	1/100	1/281	1/100	1/394

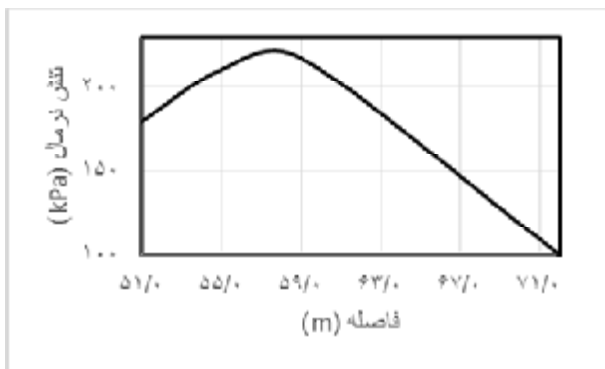
شکل 14 سطح لغزش بالادست برای مخزن نیمه‌پر را نشان می‌دهد. شکل 15 و 16 به ترتیب نیروی قائم زلزله و تنش نرمال را برای سطح لغزش بالادست برای مخزن پر را نشان می‌دهد. مقایسه شکل 15 و 16 حاکی از افزایش تنش نرمال با افزایش نیروی قائم زلزله است. همچنین مقایسه شکل 12 و 16 بیان‌گر این است که با اعمال زلزله عملکرد پایه، تنش نرمال در شیب افزایش یافته است زیرا بستگی به وزن دانه‌ها دارد که با اعمال شتاب قائم زلزله وزن دانه‌ها افزایش می‌یابد.

جدول 7- نتایج تحلیل پایداری برای زلزله MCE بعد از پایان عملیات ساخت.

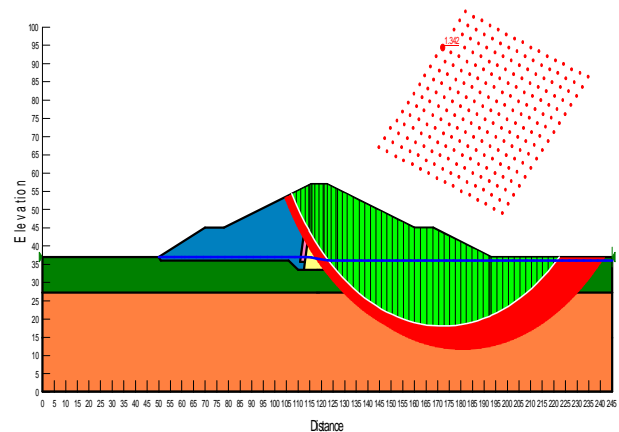
روش تحلیل	بالادست		پایین‌دست	
	کمینه ضریب اطمینان قابل قبول	ضریب اطمینان موجود	کمینه ضریب اطمینان قابل قبول	ضریب اطمینان موجود
Bishop	1/100	1/296	1/100	1/320
Janbu	1/100	1/134	1/100	1/153
Morgene stren	1/100	1/3	1/100	1/342
Spencer	1/100	1/298	1/100	1/337

تحلیل سد برای زلزله سطح بهره‌برداری (OBE)

سطح لرزه‌ای مبنای طرح سطحی از زلزله است که احتمال وقوع آن در طول عمر سد زیاد (به‌عنوان مثال 50%) باشد. از این رو در این سطح از زلزله لازم است تا آسیب‌ها به‌گونه‌ای باشد که سد، سازه‌های جنبی و تجهیزات وابسته، عملکرد خود را پس از زلزله به‌طور کامل حفظ نموده، ترمیم آسیب‌های احتمالی به‌سادگی میسر و سد بدون بروز وقفه قابل بهره‌برداری باشد. شتاب افقی زلزله سطح بهره‌برداری $0/1g$ در نظر گرفته شده است. جدول‌های 10، 11 و 12 نتایج حاصل از تحلیل، به ترتیب برای شرایط بعد از عملیات پایان ساخت، مخزن پر و نیمه‌پر را نشان می‌دهند. نتایج



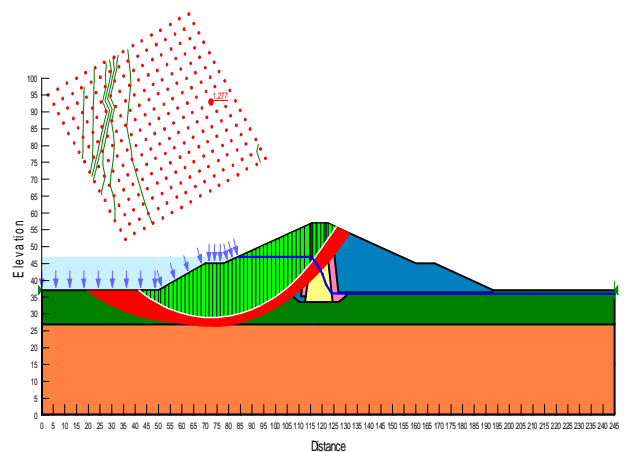
شکل 16- تنش نرمال پس از زلزله MCE برای حالت مخزن پر.



شکل 13- سطح لغزش پایین دست پس از زلزله MCE بعد از پایان عملیات ساخت.

جدول 10- نتایج تحلیل پایداری برای زلزله OBE بعد از پایان عملیات ساخت.

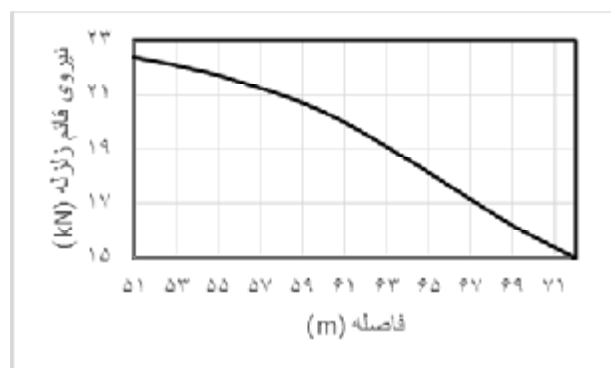
پایین دست		بالادست		روش تحلیل
ضریب	کمینه	ضریب	کمینه	
اطمینان	ضریب	اطمینان	ضریب	Bishop
موجود	اطمینان	موجود	اطمینان	
1/452	1/100	1/404	1/100	
1/276	1/100	1/247	1/100	Janbu
1/472	1/100	1/392	1/100	Morgenstren price
1/468	1/100	1/395	1/100	Spencer



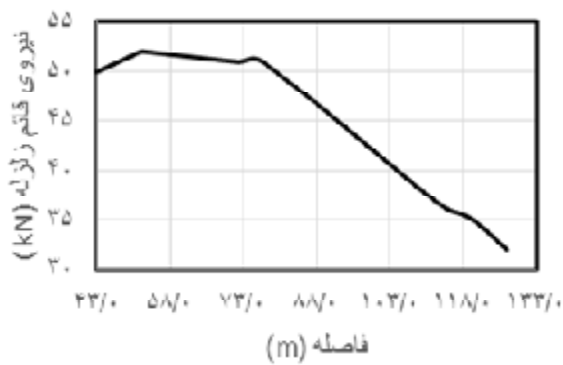
شکل 14- سطح لغزش بالادست پس از زلزله MCE برای مخزن نیمه پر.

جدول 11- نتایج تحلیل پایداری برای زلزله OBE برای مخزن پر.

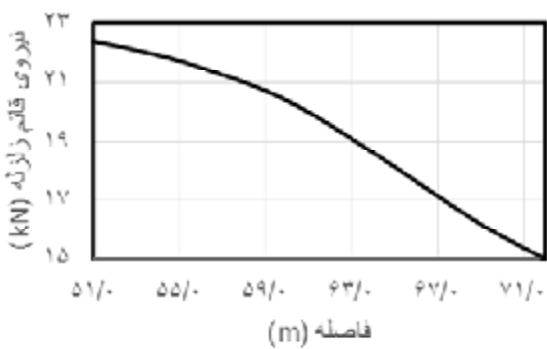
پایین دست		بالادست		روش تحلیل
ضریب	کمینه	ضریب	کمینه	
اطمینان	ضریب	اطمینان	ضریب	Bishop
موجود	اطمینان	موجود	اطمینان	
1/539	1/100	1/400	1/100	
1/396	1/100	1/304	1/100	Janbu
1/527	1/100	1/408	1/100	Morgenstren price
1/528	1/100	1/407	1/100	Spencer



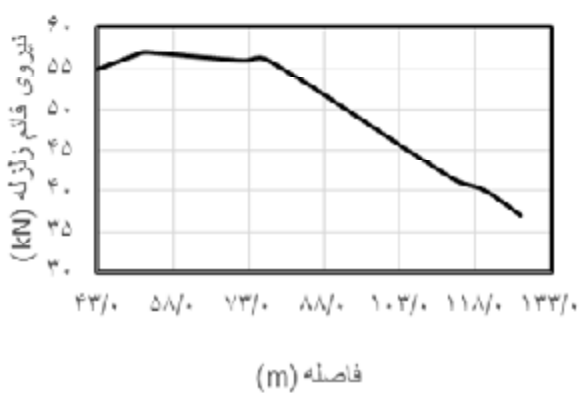
شکل 15- نیروی قائم زلزله پس از زلزله MCE برای حالت مخزن پر.



شکل 17- نیروی قائم زلزله برای سطح لغزش بالادست پس از زلزله OBE بعد از پایان عملیات ساخت.



شکل 18- نیروی قائم زلزله برای سطح لغزش بالادست پس از زلزله OBE برای مخزن پر.

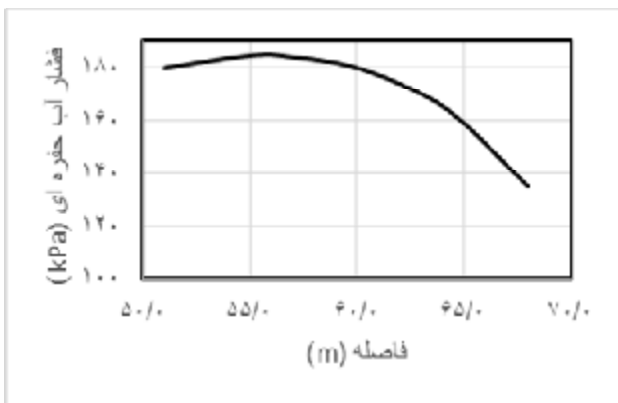


شکل 19- نیروی قائم زلزله برای سطح لغزش بالادست پس از زلزله OBE برای مخزن نیمه پر.

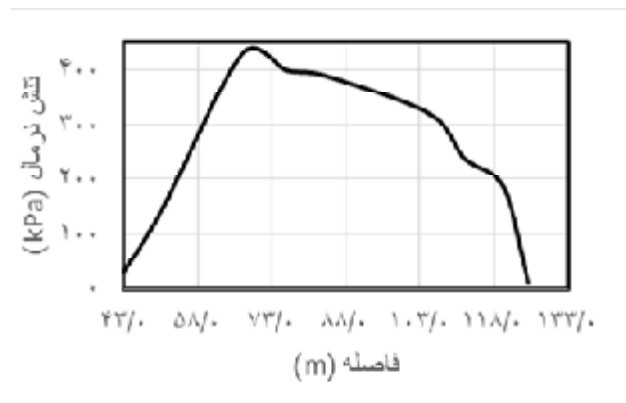
شکل‌های 17، 18 و 19 نیروی قائم زلزله و شکل‌های 20، 21 و 22 تنش نرمال را برای سطح لغزش بالادست پس از زلزله OBE به ترتیب برای بعد از پایان عملیات ساخت، مخزن پر و نیمه پر را نشان می‌دهند. مقایسه بین نتایج این شکل‌ها نشان‌گر بالا بودن نیروی قائم زلزله و بالا بودن تنش نرمال برای بعد از پایان عملیات ساخت و مخزن نیمه پر نسبت به مخزن پر است. شکل 23 فشار آب حفره‌ای برای سطح لغزش بالادست پس از زلزله OBE برای مخزن پر را نشان می‌دهد. مقایسه نتایج این شکل‌ها با شکل 10 حاکی از این است که با اعمال نیروی زلزله فشار آب حفره‌ای افزایش یافته است. زیرا با اعمال نیروی زلزله خاک تمایل به تراکم و کاهش حجم خواهد داشت. اگر امکان زهکشی سریع این نهشته وجود نداشته باشد، امکان کاهش حجم فوری خاک وجود ندارد و در نتیجه فشار آب حفره‌ای افزایش خواهد یافت.

جدول 12- نتایج تحلیل پایداری برای زلزله OBE برای مخزن نیمه پر.

روش تحلیل	بالادست		پایین دست	
	کمینه	ضریب	کمینه	ضریب
Bishop	1/100	1/434	1/100	1/541
Janbu	1/100	1/287	1/100	1/394
Morgenstren price	1/100	1/420	1/100	1/530
Spencer	1/100	1/423	1/100	1/530



شکل 23- فشار آب حفره‌ای سطح لغزش بالادست پس از زلزله OBE برای مخزن پر.



شکل 20- تنش نرمال سطح لغزش بالادست پس از زلزله OBE بعد از پایان عملیات ساخت.

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق دبی تراوش و پایداری شیروانی‌های سد گلفرج مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده به شرح زیر هست:

- دبی تراوش در مقطع عمیق بدون دیوار آب‌بند برای سد گلفرج 18/2 مترمکعب بر روز محاسبه شد.

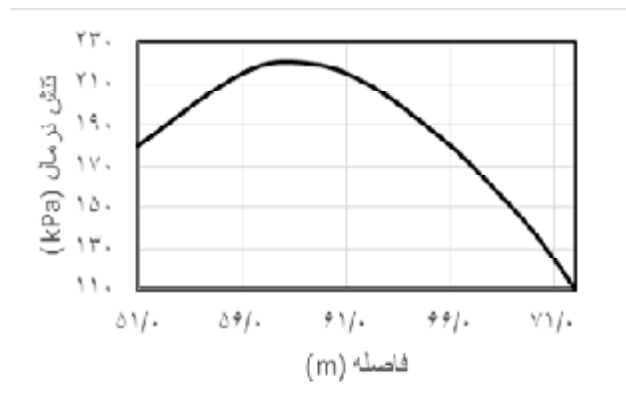
- دبی تراوش در مقطع عمیق با دیوار آب‌بند 0/9 مترمکعب بر روز محاسبه شده که در مقایسه با بدون دیواره آب‌بند 95% کاهش یافت.

- با اجرای 30 سانتی‌متر پتوی بتنی به طول 50 متر در بالادست سد دبی تراوش در مقطع عمیق 16/42 مترمکعب بر روز محاسبه شده که در مقایسه با بدون دیواره آب‌بند 10 کاهش یافت.

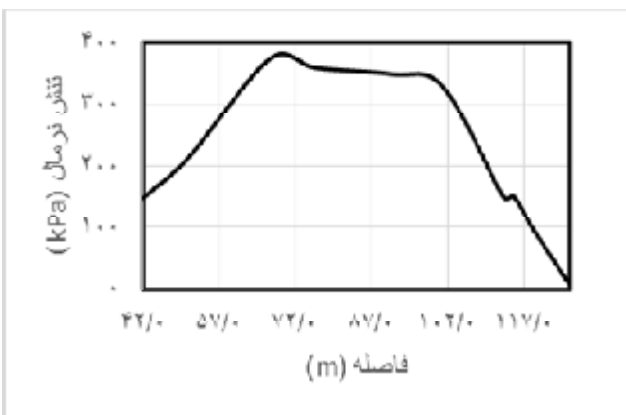
- در تحلیل دینامیکی روش Bishop منجر به ضریب اطمینان بالاتری نسبت به سایر روش‌ها شده است.

- شیروانی‌های بالادست و پایین‌دست سد بعد از پایان عملیات ساخت، مخزن پر، نیمه‌پر و تخلیه سریع مخزن با هر چهار روش مورد تحلیل قرار گرفته پایدار می‌باشند.

- شیروانی‌های بالادست و پایین‌دست سد بعد از پایان عملیات ساخت، مخزن پر و نیمه‌پر و پس از اعمال زلزله OBE و MCE با هر چهار روش مورد تحلیل قرار گرفته پایدار می‌باشند.



شکل 21- تنش نرمال سطح لغزش بالادست پس از زلزله OBE برای مخزن پر.



شکل 22- تنش نرمال سطح لغزش بالادست پس از زلزله OBE برای مخزن نیمه‌پر.

- هر چهار روش Bishop, Janbu, Morgenstern price و Spencer در تحلیل پایدار شیروانی سد گلفرج دارای همگرایی بوده و روش Janbu ضریب اطمینان پایینی نسبت به سایر روش‌ها دارد.
- افزایش تنش نرمال از میزان 138 kpa به 220 kpa برای مخزن پر و 440 kpa برای مخزن نیمه‌پر، با افزایش فشار آب حفره‌ای برای سطوح لغزش بالادست مشاهده شد.
- با اعمال شتاب افقی زلزله افزایش فشار آب حفره‌ای برای مخزن پر و نیمه‌پر مشاهده شد که مقدار افزایش از 138 kpa به 180 kpa در بالادست بوده است.

منابع مورد استفاده

- اولی پور م، کرباسچی س م و قیّم ع، 1387. بررسی عددی تأثیر سرعت احداث سدهای خاکی بر پایداری شیبهای آنها. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، 17-19 اردیبهشت‌ماه، دانشگاه تهران.
- بی‌نام، 1388. طرح سد و تأسیسات وابسته گلفرج، مهندسین مشاور فراز آب.
- بی‌نام، 1392. راهنمای تحلیل و طراحی لرزه‌ای سدهای خاکی و سنگریز، نشریه شماره 624. تهران، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی.
- خزائی ج، شرفی ح، ستاری د و هدایتی ج، 1392. تحلیل سه‌بعدی نشست از پی و جناحین سدهای خاکی با در نظر گرفتن توپوگرافی ساختگاه (مطالعه موردی سد گیوی). هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران 17-18 اردیبهشت، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، زاهدان.
- نورزاد ع و محمدی آ، 1388. ارزیابی تراوش در سدهای خاکی با استفاده از اندازه‌گیری دما- مطالعه موردی: سد خاکی شمیل واقع در استان هرمزگان. مجله مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی، جلد 2، شماره 1، صفحه‌های 33 تا 40.

- Anonymous, 2008. Stability Modeling with SLOPE/W 2007 Version, Third Edition, GEO-SLOPE International Ltd Calgary, Alberta, Canada T2P 2Y5.
- Bishop AW and Morgenstern N, 1960. Stability coefficients for earth slopes. *Geotechnique* 10(4):164-169.
- Fredlund DG and Krahn J, 1977. Comparison of slope stability methods of analysis. *Canadian Geotechnics Journal* 14(3): 429-439.
- Fredlund DG, Krahn J and Pufahl DE, 1981. The relationship between Limit Equilibrium Slope Stability Methods. Pp 409-416. In *Proceeding of The international Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Pp 409-416. Stockholm, Sweden.
- Janbu N, 1954. Applications of composite slip surfaces for stability analysis. Pp. 39-43. In *Proceedings of the European Conference on the Stability of Earth Slopes*, Stockholm.
- Lam L, Fredlund DG, and Barbour SL, 1987. Transient seepage model for saturated-unsaturated soil systems: a geotechnical engineering approach. *Canadian Geotechnics Journal* 24: 565-580.
- Moharrami A, Hassanzadeh Y, Salmasi F, Moradi Gh, Moharrami Gh, 2014. Performance of the horizontal drains in upstream shell of earth dams on the upstream slope stability during rapid drawdown conditions. *Arabian Journal of Geoscience* 7:1957-1964.
- Morgenstern NR and Price VE, 1965. The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique* 15: 79-93.
- Pakbaz MS, Dardaei A and Salahshoor J, 2009. Evaluation of performance of plastic concrete cutoff wall in Karkheh dam using 3-D Seepage analysis and measurement. *Journal of Applied Sciences* 9(4): 724-730.
- Spencer E, 1967. A Method of analysis of embankments assuming parallel interslice forces. *Geotechnique* 17(1):11-26.
- Vandamme J and Zou Q, 2013. Investigation of slope instability induced by seepage and erosion by a particle method. *Computers and Geotechnics* 48: 9-20.