

«یادداشت تحقیقاتی»

بررسی اثر شکل دره و شعاع قوس بر نتایج آنالیز تراوش سدهای خاکی قوسی با مدل سازی عددی سه بعدی

شهراد جهانگیری¹، فواد کیلانه‌ئی^{2*} و محمود حسنلو راد³

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

2- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

3- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

* kilanehei@eng.ikiu.ac.ir

چکیده - گاهی مشاهده می‌شود بنا به دلایلی، شکل سدهای خاکی در پلان به صورت قوسی است. یکی از سوالاتی که در این ارتباط مطرح می‌شود، اثر این قوس بر روی پدیده تراوش است. در این پژوهش به بررسی عددی تراوش در سدهای خاکی قوسی به صورت سه بعدی پرداخته می‌شود. برای این منظور یک سری آنالیز توسط نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC 3D انجام و تأثیر متغیرهای مختلف از جمله شکل دره، ارتفاع سد و شعاع قوس مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد احداث سد در حالت قوسی دبی عبوری از بدنه سد را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ بدین نحو که با افزایش شعاع قوس (انحنا کمتر) دبی خروجی از سد در هر دو دره با شکل مقطع ثابت و تنگ شونده، کمتر می‌گردد و دبی با طول قوس یک رابطه تقریباً خطی دارد. در دره با مقطع ثابت و در یک ارتفاع مشخص، دبی خروجی بیشتری نسبت به دره تنگ شونده مشاهده گردید. همچنین نتایج تحلیل‌ها نشان داد که در سدهای خاکی قوسی، متوسط گرادیان هیدرولیکی بیشتری نسبت به سدهای خاکی تخت در پایین دست ایجاد می‌گردد.

کلیدواژگان: سد خاکی قوسی، تحلیل تراوش، مدل سازی عددی، روش تفاضل محدود، FLAC3D.

1- مقدمه

ناشی از شکست احتمالی سدها، نیاز به توجه ویژه به طراحی و ساخت ایمن آنها را دو چندان کرده است. در میان سدهای مختلف نیز سدهای خاکی و سنگریزه‌ای به واسطه مزیت‌های نسبی که در مقایسه با سایر انواع سدها دارند، دارای جایگاه ویژه‌ای بوده و بخش عمده‌ای از سدهای احداث شده در سطح جهان را به خود اختصاص داده‌اند. یکی از مسائل چالش برانگیز و مهم در طراحی سدهای خاکی موضوع تراوش است. اگر میزان تراوش از

امروزه آب به عنوان یکی از اصلی‌ترین و حیاتی‌ترین بنیان‌های یک کشور در روند توسعه به شمار می‌رود. از میان سازه‌های هیدرولیکی مختلف در یک طرح مدیریت منابع آب، سدها با توجه به ابعاد و حجم سرمایه‌ای که برای احداث آنها صرف می‌شود و همچنین نقش اساسی که در این فرایند ایفا می‌کنند، از اهمیت به سزایی برخوردار هستند. علاوه بر این، عوارض و عواقب فاجعه بار

بعدی نشان داد که نتایج حاصل از مدل‌سازی دو بعدی برای سدهای خاکی واقع در دره V شکل به دور از واقعیت است و سطح آب واقعی، دبی تراوش و گرادبان هیدرولیکی بسیار بالاتر از نتایج به دست آمده از تحلیل دو بعدی است. (Yarahmadi et al. (2015) نیز در کاری مشابه به مقایسه تحلیل دو بعدی و سه بعدی تراوش در دو سد خاکی که در دره‌های با ویژگی‌های مختلف ساخته شده‌اند، پرداختند. این محققین نرم‌افزارهای SEEP2D و SEEP3D را برای شبیه‌سازی مورد استفاده قرار دادند. بررسی مطالعات تراوش سه بعدی انجام شده تاکنون، به این موضوع اشاره دارد که نتایج تجزیه و تحلیل دقیق‌تر نشت برای سد خاکی واقع در دره‌های باریک، نیازمند مدل‌سازی سه بعدی است.

عموماً سدهای خاکی به صورت تخت (مستقیم)، طراحی و اجرا می‌شوند، اما در بعضی شرایط به صورت قوسی در پلان نیز مد نظر قرار گرفته‌اند که از آن جمله می‌توان به سد آغ‌چای واقع در استان آذربایجان غربی که نمایی از آن در شکل 1 ارائه شده است، اشاره نمود.

با توجه به اینکه اغلب پژوهش‌های انجام شده در زمینه تراوش سدهای خاکی معطوف به سدهای خاکی تخت بوده است، نیاز به انجام یک مطالعه جامع در زمینه تراوش سدهای خاکی قوسی به وضوح حس می‌شود. موضوعی که در این پژوهش مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد، تحلیل تراوش سدهای خاکی قوسی به صورت سه بعدی است.



شکل 1 سد قوسی آغ‌چای در شهرستان چایپاره (تاتلاری و همکاران، 1395)

حدود مجاز طراحی تجاوز نماید، باعث بروز مشکلات فراوانی از قبیل مشکلات اقتصادی ناشی از فرار آب و در نتیجه کاهش بازده سد، گرادبان هیدرولیکی بالا که منجر به پدیده‌هایی مانند رگاب یا جوشش می‌گردد و افزایش فشار آب حفره‌ای و کاهش تنش موثر و در نتیجه بروز مشکلاتی مانند پایداری شیب‌ها می‌گردد. تاکنون مطالعات بسیاری توسط محققان مختلف در خصوص مدل‌سازی پدیده تراوش در سدهای خاکی به صورت دو بعدی انجام شده است که از آن جمله می‌توان به Papagianakis and Jun-feng and sheng، Lam (1988)، Fredlund (1984) (2009)، Al Jairy (2010)، Fakhari and Ghanbari (2013) و Salmasi and Jafari (2013) اشاره کرد. در سال‌های اخیر با پیشرفت تکنولوژی و توسعه مدل‌های عددی، امکان شبیه‌سازی‌های سه بعدی نیز فراهم شده است.

Jafarzadeh and Shafipour (2003) به تحلیل تراوش سه بعدی سدهای خاکی با در نظر گرفتن شکل دره و مقایسه آن با نتایج حالت دو بعدی پرداختند. آنالیز سه بعدی نفوذ آب به داخل سد سنگریزه‌ای گوهر با استفاده از تئوری تراوش اشباع- غیر اشباع بوسیله Chen and Zhang (2006) انجام شد. این محققان نشان دادند که افزایش ضریب نفوذپذیری افقی باعث افزایش سرعت نفوذ شده و در آنالیز سه بعدی شیب فشار آب حفره‌ای در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها بالاتر از قسمت میانی سد است.

Rakhshanderoo and Bagherieh (2006) پدیده تراوش در سد خاکی 15 خرداد را پس از آنگیری با استفاده از مدل Seep3D به صورت سه بعدی شبیه‌سازی نمودند. ایشان آنالیزهای فشار آب حفره‌ای را در دو حالت گذرا و دائمی انجام داده و نتایج را با داده‌های ابزار دقیق سد مقایسه نمودند. (Jafarzadeh et al. (2009) به مقایسه نتایج تحلیل دو بعدی و سه بعدی تراوش در سدهای سنگریزه‌ای واقع در دره‌های تنگ (V شکل) پرداختند. آنها سد مسجد سلیمان را به عنوان مطالعه موردی انتخاب نموده و چندین آنالیز دو بعدی و سه بعدی را در شرایط تراوش دائمی و غیر دائمی انجام دادند. مقایسه داده‌های ابزار دقیق سد با آنالیز تراوش مدل‌های دو بعدی و سه

یکسان و برابر با 22 درجه نسبت به خط افقی (2/5) افقی به 1 قائم) در نظر گرفته شده است. از آنجایی که به لحاظ فنی و اقتصادی ارتفاع سدهای خاکی همگن محدود به 30 تا 35 متر است، بنابراین ارتفاع‌های سدهای مدل شده 15، 20، 25، 30 و 35 متر انتخاب شده است.

3- ارزیابی مدل عددی

در این بخش ابتدا آنالیز حساسیت شبکه و در ادامه اعتبارسنجی مدل عددی ارائه می‌گردد. آنالیز شبکه برای تمامی مدل‌های عددی انجام شده است که به عنوان نمونه نتایج برای سد خاکی به ارتفاع 25 متر و طول تاج 1 متر (معادل مدل دو بعدی) شامل فشار آب حفره‌ای (در وسط سد و کف آن) و دبی عبوری از بدنه سد در جدول شماره 1 آمده است.

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول فوق با ریز نمودن ابعاد شبکه و افزایش تعداد المانها از 225 به 900 عدد، دبی تراوش و فشار آب حفره‌ای به ترتیب 0/57 و 1/41 درصد تغییرات داشته است. بررسی همین موضوع در حالت افزایش تعداد المانها از 900 به 3600، به ترتیب 0/54 و 0/55 درصد تغییر را نشان می‌دهد. با توجه به درصدهای یاد شده و همچنین به لحاظ افزایش کارایی اجرای مدل‌های عددی که به صورت سه بعدی می‌باشند، تعداد 30 المان در هر راستا (در مجموع 900 المان) برای سد خاکی به ارتفاع 25 متر مد نظر قرار گرفته است.

بررسی صحت نتایج مدل عددی بسته به نوع تحقیق و در دسترس بودن نتایج مطالعات قبلی به صورت‌های مختلفی انجام می‌پذیرد.

جدول 1 نتایج آنالیز حساسیت شبکه

ردیف	فشار آب حفره‌ای (Pa)	دبی (L/s)	تعداد المان		
			کل المانها	z	y
1	181763	$3/23 \times 10^{-5}$	225	15	15
2	184371	$3/21 \times 10^{-5}$	900	30	30
3	185391	$3/19 \times 10^{-5}$	3600	60	60

در این پژوهش با انجام تحلیل‌های مورد نظر و مقایسه نتایج به بررسی آثار ایجاد قوس در پلان سد بر مقدار دبی خروجی و گرادیان هیدرولیکی در بدنه سد پرداخته می‌شود.

2- مدل سازی عددی

در این مطالعه برای مدل‌سازی پدیده تراوش در سدهای خاکی نرم‌افزار FLAC3D مورد استفاده قرار گرفته است. روش حل عددی معادلات حاکم بر پدیده‌های فیزیکی مختلف در FLAC3D مبتنی بر روش تفاضل محدود است و تحلیل‌های آن نیز بر اساس محاسبات لاگرانژی استوار است. فلک سه بعدی قابلیت مدل‌سازی مسائل مختلف ژئومکانیک و ژئوتکنیک، از جمله شبیه‌سازی جریان آب و توزیع فشار آن در محیط‌های متخلخل را داراست. روش کلی فلک برای تحلیل شامل تقسیم‌بندی هندسه محیط به اجزا کوچکتر و با خصوصیات عددی یکسان و حل معادله دیفرانسیل مربوط به هر جزء تا رسیدن به تعادل نسبی است.

2-1- فرضیات و مشخصات مصالح

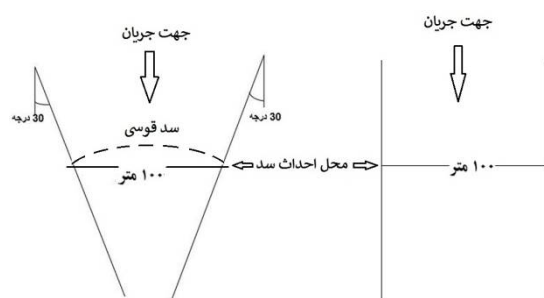
به منظور ساده‌سازی و بررسی مناسب اثرات قوس بر نتایج آنالیز تراوش، فرضیاتی در نظر گرفته شد که در ادامه به آن اشاره می‌شود. در تمامی مدل‌ها، سد خاکی به صورت همگن که بر روی بستر نفوذ ناپذیر قرار دارد، مورد تحلیل قرار گرفته است. مشخصات مصالح سد نیز در حالات مختلف یکسان و تراوش در حالت دائمی لحاظ شده است. در حل مسائل تراوش مهمترین پارامتر، ضریب نفوذپذیری و تخلخل مصالح است که در تحقیق حاضر با توجه به همگنی سد خاکی به ترتیب برابر با 1×10^{-8} متر بر ثانیه و 0/3 در نظر گرفته شده است. در بالادست سد، تراز آب موجود در مخزن 3 متر پایین تر از تاج سد می‌باشد که به صورت γh در مرز بالادست اعمال گردیده است. تراز آب در پایین‌دست برابر با صفر در نظر گرفته شده و شرط مرزی تراوش آزاد بر آن اعمال شده است. عرض و طول تاج سدهای خاکی مدل شده در این پژوهش به ترتیب 8 و 100 متر می‌باشد. شیب پایین‌دست و بالادست سد نیز

ارتفاع حاصل از مدل عددی (جدول 1) که برابر با 18/9 متر می‌باشد در حدود 2 درصد خطا دارد.

4- کاربرد مدل و بررسی نتایج

به منظور بررسی اثرات شکل دره بر نتایج آنالیز تراوش، دو نوع دره مورد بررسی قرار گرفته است. نوع اول، دره با مقطع ثابت در امتداد آن است که در محل احداث سد هیچ گونه تنگ شدگی رخ نداده است و عرض دره با طول سد یکسان و برابر با 100 متر می‌باشد (شکل 2- الف). نوع دوم، دره تنگ شونده می‌باشد، بگونه‌ای که در محل احداث سد، دره با زاویه راس 30 درجه از بالادست به سمت پایین دست به صورت تدریجی کاهش عرض دارد. طول تاج سد در محل خط مرکزی آن نیز برابر با 100 متر می‌باشد (شکل 2- ب).

در شکل‌های 3- الف و ب به ترتیب سدهای خاکی قوسی مدل شده در دره با مقطع ثابت و دره تنگ شونده به همراه شرایط مرزی بالادست و پایین دست نشان داده شده است. در ادامه نتایج مدل سازی عددی در خصوص دبی تراوش و گرادیان هیدرولیکی در حالت‌های مختلف ارائه شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد.



الف- دره با مقطع ثابت ب- دره با مقطع تنگ شونده

شکل 2 اشکال دره‌های مدل سازی شده

در تحقیق حاضر نتایج بدست آمده از مدل عددی با استفاده از روابط تحلیلی ارائه شده توسط دوپویی (رابطه 1)، اسشافرناک (رابطه 2) و کاساگرانده (رابطه 3) مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است.

$$Q = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2d} \quad (1)$$

$$Q = kl \sin \beta \tan \beta \quad (2- الف)$$

$$l = \frac{d}{\cos \beta} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2 \beta} - \frac{H^2}{\sin^2 \beta}} \quad (2- ب)$$

$$Q = kl \sin^2 \beta \quad (3- الف)$$

$$l = \sqrt{d^2 + H^2} - \sqrt{d^2 - (H \cot \beta)^2} \quad (3- ب)$$

در روابط فوق $K(m/s)$ نفوذپذیری، $h_1(m)$ و $H(m)$ ارتفاع آب در بالادست سد، $h_2(m)$ ارتفاع آب در پایین دست سد، $Q(m^3/s)$ دبی خروجی، $d(m)$ نماینده عرض سد و $\beta(deg)$ نشان دهنده شیب پایین دست سد می‌باشد. در جدول 2 مقادیر دبی خروجی حاصل از مدل عددی و روابط تحلیلی ذکر شده برای سدهای خاکی با ارتفاع‌های مختلف آمده است.

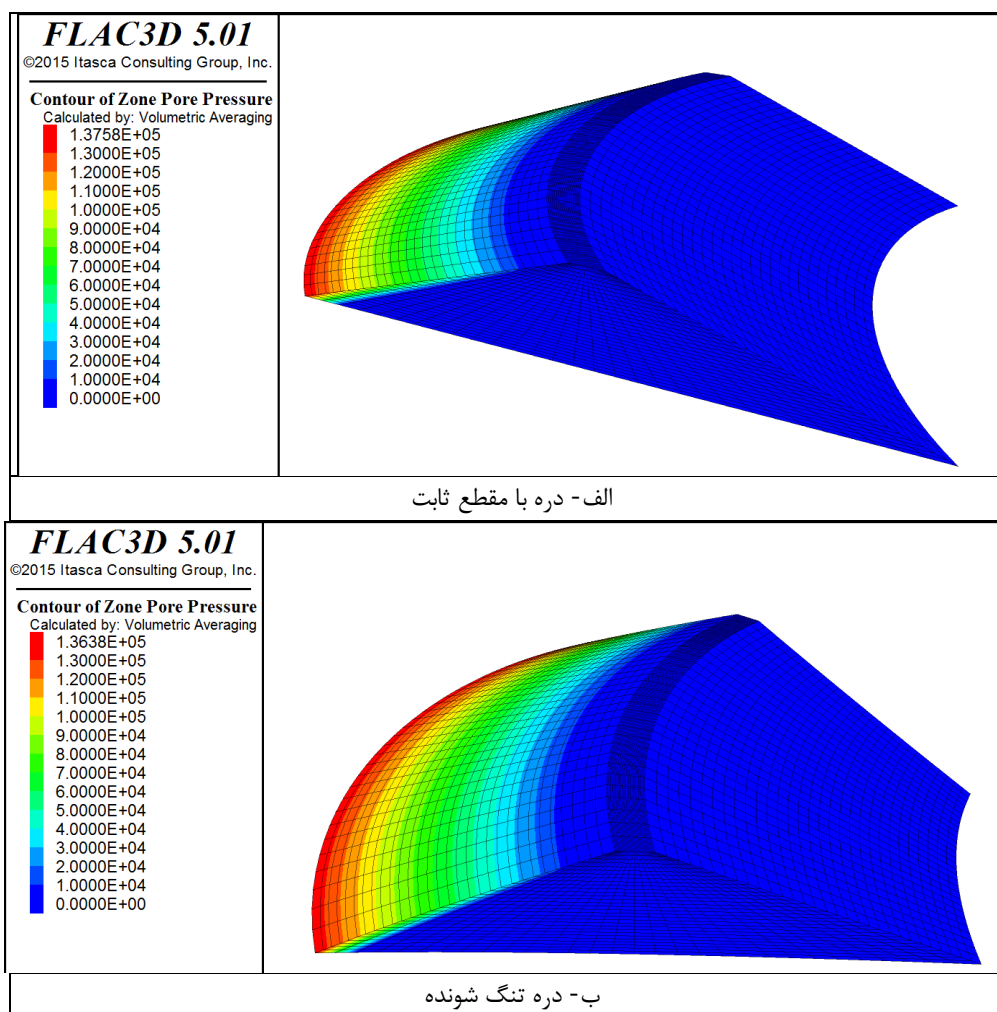
به منظور ارزیابی کمی نتایج حل عددی با روابط تحلیلی، مقدار خطا با استفاده از رابطه (4) تعیین می‌گردد.

$$\text{خطا} = \frac{\sqrt{\sum (Q_i^{nu} - Q_i^{an})^2}}{\sum Q_i^{an}} \cdot 100 \quad (4)$$

در رابطه فوق بالانویس‌های an و nu به ترتیب بیانگر حل عددی و حل تحلیلی است. با استفاده از رابطه (4)، جذر متوسط مربع خطاها بدست آمده از نرم افزار FLAC 3D با رابطه دوپویی، اسشافرناک و کاساگرانده به ترتیب در حدود 1/5%، 6/9% و 7% است که نشان دهنده نزدیک بودن آنالیز عددی و حل تحلیلی و دقت مناسب مدل سازی می‌باشد. لازم به ذکر است ارتفاع سطح آزاد آب (فریاتیک) برای سد خاکی به ارتفاع 25 متر با استفاده از روش اسشافرناک برابر با 19/3 متر محاسبه گردید که با

جدول 2 مقادیر دبی خروجی از نرم افزار با روابط دوپویی، اسشافرناک و کاساگرانده (لیتر بر ثانیه)

ارتفاع سد (m)	روش دوپویی	روش اسشافرناک	روش کاساگرانده	FLAC3D
15	0/00137009	0/001486	0/0012367	0/00134386
20	0/00222561	0/002526	0/0019995	0/0022265
25	0/00313057	0/00366	0/002808	0/00318297
30	0/00406458	0/004876	0/0036445	0/00418432
35	0/0050170009	0/006153	0/0044996	0/00521868



شکل 3 سد خاکی قوسی مدل شده به همراه شرایط مرزی

4-1-1-4 دبی تراوش

این بخش به تحلیل نتایج آنالیز تراوش در خصوص دبی عبوری از بدنه سد برای سدهای خاکی تخت و قوسی در دو دره مورد بررسی اختصاص دارد. در ابتدا سدهای خاکی تخت (بدون قوس) در ارتفاعهای 15 تا 35 متر با افزایش گام 5 متر مورد تحلیل قرار گرفتند و در ادامه سدهای خاکی قوسی به ازای شعاع قوسهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است.

4-1-1-4 سدهای خاکی تخت

دبی خروجی از بدنه سدهای خاکی تخت با ارتفاعهای 15، 20، 25، 30 و 35 متر در دره با مقطع ثابت و دره تنگ شونده در جدول 3 و نمودار تغییرات آن در شکل 4 نشان

داده شده است. نتایج حاصل از تحلیل سدهای خاکی تخت گواه این مطلب است که با افزایش ارتفاع در هر دو دره، دبی خروجی افزایش می‌یابد و همچنین در یک ارتفاع خاص سد خاکی تخت در دره با مقطع ثابت، دبی بیشتری نسبت به سد خاکی تخت در دره تنگ شونده دارد.

همان‌طور که از شکل 4 پیداست رابطه ارتفاع و دبی در سدهای بدون قوس یک رابطه خطی می‌باشد که طبق روابط (5) و (6) که به ترتیب برای دره تنگ شونده و دره با مقطع ثابت است به دست می‌آید. در رابطه‌های یاد شده ارتفاع سد برحسب متر و Q دبی خروجی از سد بدون قوس برحسب لیتر بر ثانیه می‌باشد. توضیح اینکه محدود این روابط برای ارتفاع بین 15 تا 35 متر می‌باشد.

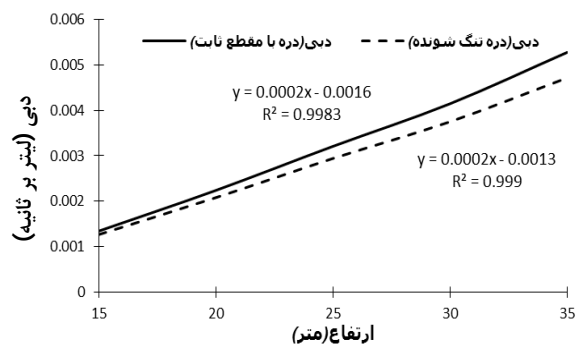
$$Q = 0.0002H - 0.0013 \quad (5)$$

$$Q = 0.0002H - 0.0016 \quad (6)$$

جدول 3 دبی خروجی از بدنه سد خاکی تخت (l/s)

ارتفاع (m)	دبی در دره با مقطع ثابت	دبی در دره تنگ شونده	اختلاف (%)
15	0/00134386	0/00126727	6
20	0/00223977	0/0020807	7/6
25	0/00320987	0/00294215	9/1
30	0/00414729	0/00375083	10/6
35	0/00527728	0/00471596	11/9

دره می‌باشد. به بیان دیگر هر چقدر انحنا سد کمتر باشد، دبی خروجی از سد کمتر خواهد شد و در شعاع قوس‌های بیشتر نمودار به دبی سد تخت نزدیک‌تر می‌شود. این موضوع نشان‌دهنده اثر منفی قوس بر روی دبی آب عبوری از بدنه سد است. لازم به یادآوری است که ایجاد قوس در پلان سد منجر به افزایش سطح ورودی آب (بالادست) و کاهش سطح خروجی آب (پایین دست) می‌گردد، لذا به نظر می‌رسد اثر افزایشی سطح ورودی بیشتر از اثر کاهش سطح خروجی می‌باشد که دبی افزایش یافته است. همچنین ملاحظه می‌گردد که به ازای یک شعاع قوس مشخص با افزایش ارتفاع، دبی خروجی نیز افزایش می‌یابد. به منظور بررسی بیشتر رابطه بین مقدار دبی با سطح تراوش، نمودار تغییرات دبی با طول قوس خط مرکزی سد (برای ارتفاع 15 متر) در شکل 7 نشان داده شده است. با توجه به شکل مذکور رابطه بین دبی و طول قوس در سدهای خاکی قوسی واقع در هر دو دره، یک رابطه خطی است که با افزایش طول قوس، دبی نیز افزایش می‌یابد. برای سایر ارتفاع‌ها نیز این رابطه وجود دارد.



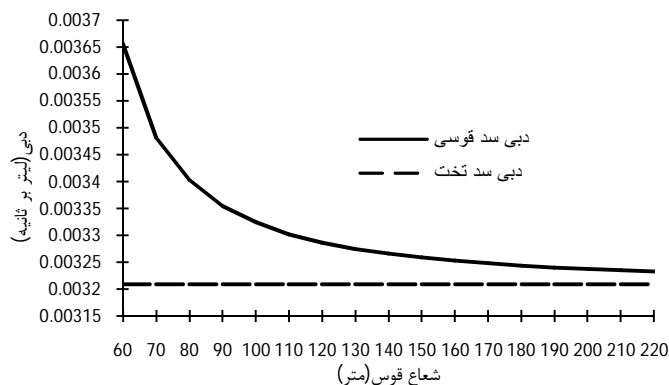
شکل 4 نمودار دبی خروجی از سد خاکی تخت

در ادامه، دبی خروجی از سدهای خاکی قوسی واقع در دره تنگ شونده و دره با مقطع ثابت مورد مقایسه قرار می‌گیرند. بدین منظور تغییرات دبی با شعاع قوس سد خاکی قوسی به ارتفاع 25 متر در دو دره با مقطع ثابت و دره تنگ شونده در شکل 8 ارائه شده است. نتایج حاصل از تحلیل و مقایسه این دو نوع دره در یک ارتفاع، نشان دهنده این است که در شعاع قوس‌های مختلف، سد قوسی در دره با مقطع ثابت، دبی خروجی بیشتری نسبت به دره تنگ شونده دارد. ذکر این نکته نیز حائز اهمیت است که نرخ تغییرات دبی سد قوسی با شعاع قوس در دو دره مذکور متفاوت از هم می‌باشد بدین نحو که در دره با مقطع ثابت اثر قوس نسبت به دره با مقطع تنگ شونده کمتر است. در شکل 9 تفاوت دبی خروجی در دره تنگ شونده و دره با مقطع ثابت به ازای ارتفاع 25 متر نشان داده شده است. با توجه به شکل یاد شده، اختلاف دبی خروجی بین دو دره با افزایش شعاع قوس بیشتر می‌گردد.

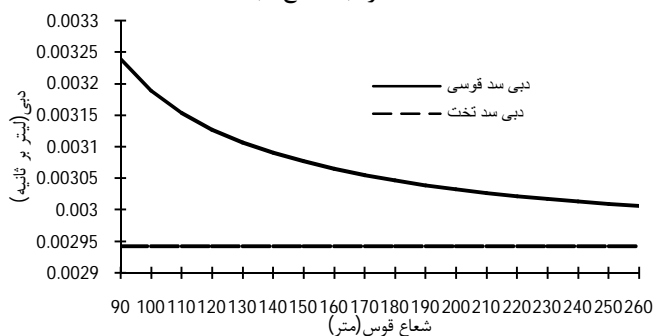
در جدول 3 درصد اختلاف دبی در دو حالت دره، به صورت اختلاف دبی سد در دره با مقطع ثابت و دره تنگ شونده تقسیم بر دبی سد در حالت دره تنگ شونده نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که با افزایش ارتفاع سد از 15 متر تا 35 متر، اختلاف دبی از 6 درصد تا حدود 12 درصد رسیده است.

4-1-2- سدهای خاکی قوسی

در این قسمت سدهای خاکی قوسی مورد بررسی قرار می‌گیرند. تغییرات شعاع قوس در دره با مقطع ثابت از 60 الی 230 متر و در دره تنگ شونده از 90 الی 260 متر با افزایش گام 10 متر لحاظ شده است. در شکل 5 تغییرات دبی تراوش با شعاع قوس در سد خاکی به ارتفاع 25 متر و در شکل 6 برای سایر ارتفاع‌ها ارائه شده است. نتایج نشان دهنده کاهش دبی با افزایش شعاع قوس در هر دو

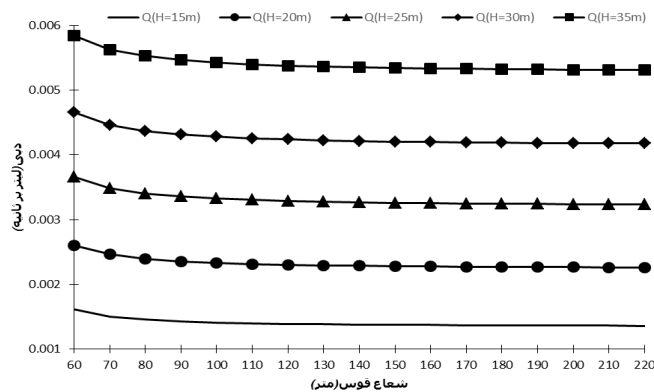


الف - دره با مقطع ثابت

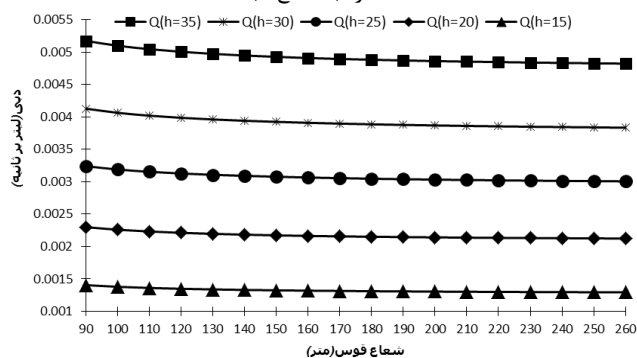


ب - دره تنگ شونده

شکل 5 رابطه بین دبی و شعاع قوس در سد خاکی قوسی به ارتفاع 25 متر

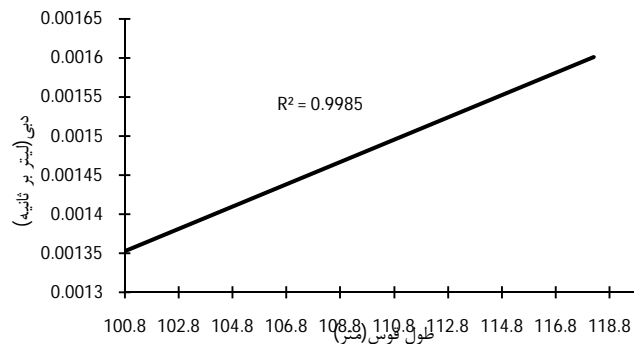


الف - دره با مقطع ثابت

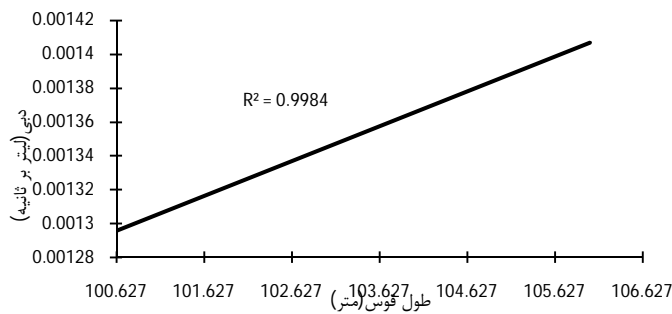


ب - دره تنگ شونده

شکل 6 رابطه بین دبی، شعاع قوس و ارتفاع سدهای خاکی قوسی

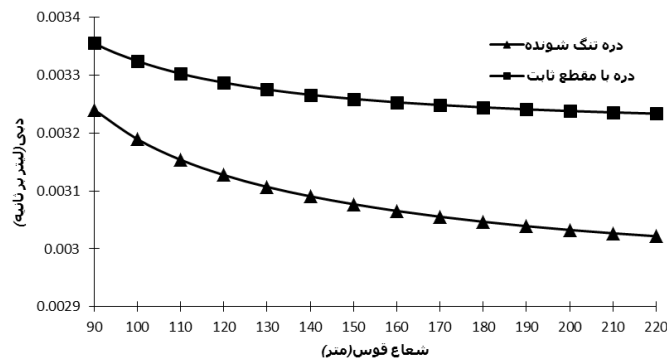


الف - دره با مقطع ثابت

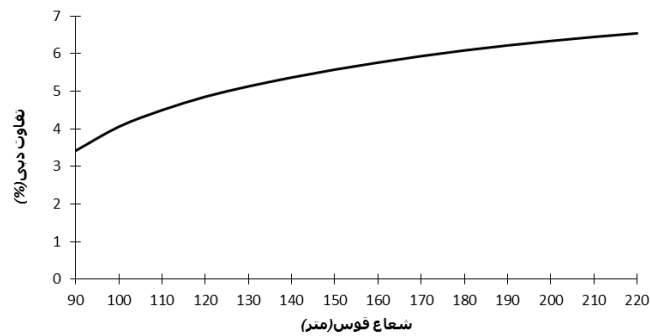


ب - دره تنگ شونده

شکل 7 رابطه طول قوس و دبی در سد خاکی به ارتفاع 15 متر



شکل 8 مقایسه دبی خروجی سدهای خاکی قوسی به ارتفاع 25 متر



شکل 9 نمودار اختلاف دبی در سد خاکی قوسی بین دو دره تنگ شونده و مقطع ثابت با ارتفاع 25 متر

4-2- گرادیان هیدرولیکی

پارامتر بسیار مهم در بحث پایداری داخلی سدهای خاکی، گرادیان هیدرولیکی در مقاطع مختلف آن است. در این قسمت متوسط گرادیان هیدرولیکی در مقطع عبوری از خط مرکزی دره محاسبه و مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آنالیز تراوش در خصوص گرادیان هیدرولیکی مقطع یاد شده در دره تنگ شونده و ثابت به ترتیب در جدول- های 4 و 5 و نمودار تغییرات آن در شکل 10 نشان داده شده است. نتایج نشان دهنده این موضوع است که در

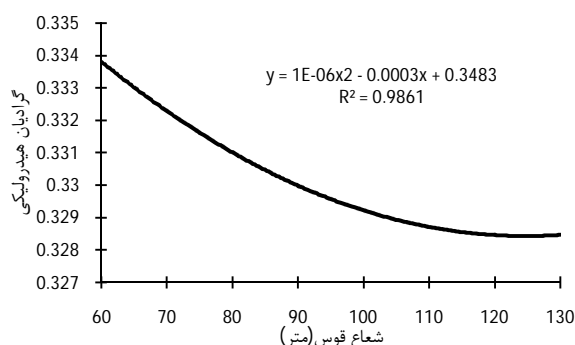
مقطع عبوری از میانه سد خاکی، با افزایش شعاع قوس، گرادیان هیدرولیکی کاهش می‌یابد و از یک شعاع قوس به بعد تقریباً ثابت می‌ماند. واضح است که این موضوع با اثر قوس بر روی دبی سد نیز سازگار است، چرا که با افزایش قوس، دبی عبوری از بدنه سد نیز کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش شعاع قوس، گرادیان هیدرولیکی و سپس سرعت نشت کاهش یافته و لذا دبی عبوری نیز کاهش می‌یابد.

جدول 4 متوسط گرادیان هیدرولیکی در مقطع میانه سدهای خاکی در دره با مقطع ثابت

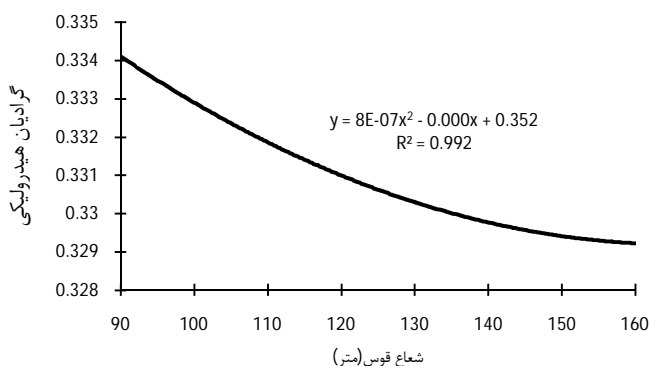
شعاع قوس (متر)	60	70	80	90	100	110	120	130	سد تخت
گرادیان هیدرولیکی	0/334	0/332	0/331	0/330	0/329	0/3289	0/3288	0/3282	0/329

جدول 5 متوسط گرادیان هیدرولیکی در مقطع میانه سدهای خاکی در دره تنگ شونده

شعاع قوس (متر)	90	100	110	120	130	140	150	160
گرادیان هیدرولیکی	0/334	0/333	0/332	0/331	0/33	0/3299	0/3295	0/3292



الف - دره با مقطع ثابت



ب - دره تنگ شونده

شکل 10 تغییرات گرادیان هیدرولیکی برای سدهای قوسی

5- نتیجه گیری

در این تحقیق با مدل سازی عددی سه بعدی اثر شکل مقطع دره و شعاع قوس (میزان انحنا سد) بر مقدار گرادیان هیدرولیکی و دبی خروجی سدهای خاکی تخت و قوسی مورد بررسی قرار گرفت. پس از انجام آنالیزها و تحلیل خروجی های مدل عددی، نتایج زیر به دست آمد.

- رابطه بین دبی تراوش و ارتفاع در سدهای خاکی تخت یک رابطه خطی است، به گونه ای که با افزایش ارتفاع، دبی خروجی نیز بیشتر می گردد. همچنین در یک ارتفاع خاص، سدهای تخت در دره با مقطع ثابت، دبی خروجی بیشتری نسبت به سدهای تخت در دره تنگ شونده دارند.

- با افزایش شعاع قوس (انحنا کمتر)، دبی خروجی در هر دو دره ثابت و تنگ شونده کمتر می شود. به عبارت دیگر سدهای تخت دبی خروجی کمتری نسبت به سدهای قوسی دارند. لذا از این نظر، ایجاد قوس در پلان، اثر منفی بر سد خاکی خواهد داشت.

- رابطه طول قوس مرکزی (عبوری از وسط تاج) و دبی در هر دو نوع دره یک رابطه تقریباً خطی است و با افزایش طول قوس، دبی خروجی بیشتر می شود.

- در یک ارتفاع خاص، سدهای قوسی در دره با مقطع ثابت دارای دبی خروجی بیشتری نسبت به سدهای قوسی در دره تنگ شونده می باشند.

- گرادیان هیدرولیکی متوسط در سدهای خاکی قوسی نسبت به سدهای خاکی تخت بیشتر است. این موضوع با دبی عبوری از بدنه سد سازگار است.

6- فهرست علائم

an	حل تحلیلی
d	نمایندۀ عرض سد
H و h_1	ارتفاع آب بالادست
h_2	ارتفاع آب پایین دست
K	نفوذپذیری
Q	دبی خروجی
nu	حل عددی
β	شیب پایین دست

7- منابع

- Al Jairy, H. (2010). "2D-Flow analysis through zoned earth using finite element approach". Eng. and Tech. Journal, Vol. 28, No. 21: 6315-6324.
- Chen, Q. and Zhang, L.M. (2006). "Three-dimensional analysis of water infiltration into Gouhou rockfill Dam using saturated-unsaturated seepage theory". Canadian Geotechnical Journal, 43(5):449-461.
- Fakhari, A. and Ghanbari, A. (2013). "A simple method for calculating the seepage from earth dams with clay core". Journal of GeoEngineering, 8(1): 27-32.
- FLAC3D. (2012). Finite Difference Analysis Program. Version 5.01 User's Manual.
- Jafarzadeh F. Ferdos, F. and Soleimanbeigi A. (2009). "Comparison between two and three dimensional seepage analysis of rock-fill dams constructed in narrow valleys, a case study". Commission internationale des grands barrages, Vingt Troisième Congres, Des grands barrages, At Brasilia, Brazil.
- Jafarzadeh, F. and Shafipour, R. (2003). "Three dimensional seepage analysis of earth dam considering valley shape effects". Proceeding of 6th International Conference of Civil Engineering, Isfahan, Iran.
- Jun-feng, Fu and Sheng, J. (2009). "A study on unsteady seepage flow through dam". Journal of Hydrodynamics, 21(4):499-504.
- Lam, L. Fredlund, DG. and Barbour, SL. (1988). "Transient seepage model for saturated-unsaturated systems: A geotechnical engineering approach". Canadian Geotechnical Journal, 24(4): 565-580.
- Papagianakis, AT. and Fredlund, DG. (1984). "A steady state model for flow in saturated-unsaturated soils". Canadian Geotechnical Journal, 21(3): 419-430.
- Rafiezadeh, k. and Ataei-Ashtiani, B. (2014). "Transient free-surface seepage in three dimensional general anisotropic media by BEM". Engineering Analysis with Boundary Elements, 46: 51-56
- Rakshshanderoo, G. and Bagherieh, A. (2006). "Three dimensional analysis of seepage in 15-Khordaddam after impoundment". Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B, Engineering, 30(B1): 55-68.
- Salmasi, F. and Jafari, F. (2013). "Validity of Schaffernak's and Casagrande's analytical

dimensional seepage analysis results in earth dams using SEEP/W and SEEP/3D (Case study: Shian and Khaan-Abad Dams)". Ecology, Environment and Conservation, 21(1): 509-516.

solutions for Seepage through a homogeneous earth dam". International Journal of Pure Scientific Researches, 1(1): 5-11.

Yarahmadi, N. Khodashenas, S.R. and Ansari, S. (2015). "A comparison between two and three