رفتارنگاری تنش‌های ایجادشده در بدنه سد تبارک در دوران اولین آبگیری

آسیه خادم قائینی[1]، جعفر بلوری بزاز[2]، کسری خواجوی[3]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد خاک وپی، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

2- استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

3- دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

As_khadem@yahoo.com

چکیده

کنترل پایداری سدها در دوران ساخت، اولین آبگیری و بهره برداری بسیار حائز اهمیت می‌باشد. استفاده از ابزاردقیق در سدهای خاکی به منظور رفتارنگاری آن‌ها، نقش مهمی در کنترل پایداری سد دارد. تحقیق حاضر به رفتارنگاری سد تبارک واقع در شمال شرقی ایران می‌پردازد. با استفاده از اطلاعات بدست آمده از ابزاردقیق مورد استفاده در سد، تنش‌های ایجاد شده با نتایج بدست آمده از تحلیل سد به روش اجزاء محدود، مقایسه شده‌اند. پس از تحلیل نتایج بدست امده از ابزاردقیق و نرم افزار این نتیجه حاصل شد که انطباق خوبی میان مقادیر وجود دارد که نشان دهنده پایداری سد در دوران اولین آبگیری می‌باشد.

کلمات کلیدی: ابزار دقیق، رفتارنگاری، سد تبارک، اولین آبگیری

1. مقدمه

تامین آب مورد نیاز انسان امروزه یکی از مشکلات جوامع انسانی به شمار می‌رود. انسان برای رفع این مشکل از راهکارهای زیادی سود می‌جوید. یکی از این راهکارها احداث سد می‌باشد. سدها محلی برای ذخیره و استفاده بهینه از آب می‌باشند. سد به دو نوع اصلی بتنی و خاکی تقسیم می‌شود که هر کدام از این دو نوع دارای تنوع خاصی می‌باشند. سدهای بتنی به سدهای وزنی و قوسی و سدهای خاکی به سدهای سنگریزه‌ای و سدهای خاکی با هسته رسی، تقسیم می‌شوند. سدهای خاکی بعلت رفتار مناسب در مقابل زلزله و در دسترس بودن مصالح ساخت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. عدم قطعیت در مشخصات و رفتار ژئوتکنیکی سد وتاسیسات وابسته به آن باعث تغییر در فرضیات اولیه مربوط به طراحی سد می‌شود. از این رو ابزاربندی و رفتارنگاری به منظور کنترل ساخت و تضمین ایمنی، بخشی ضروری از طراحی سدها می‌باشد. رفتارنگاری سدها در دوران ساخت، آبگیری و دوران بهره برداری در راستای کنترل پایداری سد ضروری می‌باشد. خصوصا در سدهای خاکی با توجه به رفتار ویژه خاک که از سه عنصر خاک، آب و هوا تشکیل شده است رفتارنگاری بسیار حائز اهمیت است.

ابزاردقیق بهترین وسیله برای بدست آوردن رفتار واقعی سد می‌باشد. از این رو بررسی نتایج بدست آمده از ابزاردقیق به کار رفته در سد و مقایسه نتایج بدست آمده از آن با فرضیات اولیه مربوط به طراحی سد، روش مناسبی برای رفتارنگاری سد می‌باشد. به طور کلی رفتارنگاری سدها دارای اهداف زیر می‌باشد(Duncliff, 1993):

1- ارزیابی فرضیات طراحی.

2- پیش بینی عملکرد سد در حین ساخت، اولین آبگیری و دوران بهره برداری.

3- آگاهی از گسترش رویدادهای غیر ایمن در سد، در دوران بهره برداری و در زمان عمر مفید سد.

4- بهبود روش‌های طراحی به منظور ساخت سدهایی با ایمنی بالاتر و در شرایط اقتصادی‌تر.

سدهای خاکی دارای قسمت‌های مختلفی از جمله هسته، پوسته، فیلتر، زهکش، پوشش سنگی (Rap Rip) و ... می‌باشند. در این نوع سدها آب بندی بوسیله هسته انجام می‌شود. هسته سد از مصالحی با نفوذ پذیری کم مانند خاک رس و بتن ساخته می‌شود که به خاطر انعطاف پذیری مناسب خاک رس و اقتصادی بودن آن، در بیشتر سدهای خاکی از خاک رس استفاده شده است. به دلیل پدیده قوس زدگی در هسته رسی تنش قائم کل در هسته کاهش می‌یابد. کاهش تنش قائم در هسته منجر به ایجاد شکست هیدرولیکی در سد می‌شود. از این رو کنترل پدیده قوس زدگی و تنش های ایجاد شده در هسته از اهمیت زیادی برخوردار است.

از جمله سدهای خاکی بزرگ دنیا که به منظور کنترل پایداری هیدرولیکی در دوران ساخت، اولین آبگیری و بهره‌برداری رفتارنگاری شده است، سد خاکی LG-4 واقع در شمال شهر Quebec در کشور کانادا می‌باشد. ارتفاع این سد 125 متر و طول تاج آن 3800 متر می‌باشد. ابزاردقیق به کار رفته در سد عبارتند از انحراف سنج، نشست سنج، تنش سنج، پیزومتر و کشیدگی سنج که از جمله ابزارهای مهم در کنترل رفتار سد می‌باشند و در اکثر سدهای خاکی دنیا مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Szostak and Massiera, 2004). سد خاکی کرخه با ۳۰۳۰ متر طول و ۱۲۸ متر ارتفاع، که در جنوب غربی ایران واقع شده است، پس از بررسی های انجام شده بر روی نتایج رفتار نگاری سد در دوران ساخت، اولین آبگیری و بهره‌برداری این نتیجه حاصل شد که تنش-های وارده به سد با مقادیر پیش بینی شده در طراحی اولیه سد هماهنگ بوده و نشست اتفاق افتاده در سد نیز در حد استاندارد بوده و سد داری پایداری هیدرولیکی می‌باشد (نیرومند و همکاران، 1383). سد خاکی Darwin در کشور استرالیا از جمله سدهای خاکی کم ارتفاع با طول 400 متر و ارتفاع 21 متر می‌باشد. این سد در سال 1990 بهره‌برداری شده است و با توجه به نتایج بدست آمده از رفتارنگاری مشخص شده است که سد در دوران ساخت، اولین آبگیری و دوران بهره‌برداری دچار شکست هیدرولیکی نشده است (Rajabalinejad, 2002). در تحقیق حاضر به بررسی تنش‌های بوجود آمده در بدنه سد سنگریزه‌ای تبارک واقع در شمال استان خراسان رضوی، در دوران اولین آبگیری پرداخته شده است. به منظور اندازه‌گیری تنش‌های کل ایجاد شده در خاک از ابزار تنش‌سنج استفاده شده است. در این تحقیق با بررسی نتایج بدست آمده از ابزاردقیق و مقایسه آن‌ها با نتایج تحلیل عددی سد در دوران اولین آبگیری، که مبنای طراحی اولیه سد بوده است، رفتار سد در دوران اولین آبگیری کنترل شده است. برای تحلیل عددی سد از نرم افزار Plaxis نسخه 8.2 استفاده شده است. همچنین به منظور نشان دادن رفتار مصالح بدنه سد از دو مدل رفتاری سخت شونده و موهر- کلمب استفاده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل عددی و مقایسه آن‌ها با داده‌های ابزاردقیق مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از تحلیل و داده‌های ابزاردقیق دارای انطباق خوبی می‌باشند و در بیش از 90 درصد نتایج، اختلاف میان مقادیر ابزاردقیق و تحلیل کمتر از 10 درصد می‌باشد. همچنین با بررسی نتایج، مشاهده می‌شود که پدیده قوس‌زدگی اتفاق افتاده در سد با مقادیر پیش‌بینی شده در زمان طراحی انطباق دارد و مقدار آن با ضریب قوس زدگی سدهای دیگر دنیا نیز مطابقت دارد، از این رو سد در دوران اولین آبگیری پایداری می‌باشد.

2. معرفی سد سنگریزه‌ای تبارک و سیستم ابزار بندی آن

سد تبارک در 25 کیلومتری شهر قوچان واقع در شمال استان خراسان رضوی، بر روی رودخانه تبارک قرار دارد. این سد دارای هسته رسی قائم به ارتفاع 74 متر از بستر سنگی می باشد. عرض تاج سد 10 متر و طول تاج 198 متر می باشد. سرریز سد تبارک از نوع سرریز آزاد با تبدیل نوع بادبزنی است. تراز تاج سرریز برابر 1513/5 متر از سطح دریا و طول تاج سرریز برابر 45 متر و عرض شوت برابر 15 متر می‌باشد. اهداف احداث سد تبارک تامین قسمتی از نیاز آب شرب شهر قوچان و همچنین تامین آب مورد نیاز اراضی پایاب سد، کنترل سیلاب و توسعه دامپروری از طریق کشت علوفه و ایجاد اشتغال برای اهالی منطقه و همچنین پرورش ماهی می‌باشد.

پروژه احداث این سد در سال 1372 آغاز و در سال 1383 به پایان رسیده و آبگیری سد از مهر ماه 1383 آغاز شده است. ابزارگذاری در بدنه سد تبارک در سه مقطع 6-6 و 9-9 و 12-12 انجام شده است. در هر سه مقطع 8 مجموعه ابزارگذاری وجود دارد. هر مجموعه شامل پنج عدد سلول تنش کل (TPC) و یک پیزومتر الکتریکی (EP) می‌باشد. به دلیل اینکه ابزارهای موجود در مجموعه‌های 7 و 8 به طور منظم قرائت نشده‌اند به بررسی آن‌ها پرداخته نشده است.

3 – بررسی نتایج تحلیل

برای تحلیل تنش و کرنش سدهای خاکی و خاکریزها معمولا از روش اجزای محدود به صورت دو بعدی در شرایط کرنش صفحه‌ای که منجر به ساده شدن محاسبات می‌شود، استفاده می‌گردد. تحقیقات نشان داده است که تحلیل دو بعدی سدهای خاکی که نسبت طول تاج به ارتفاع بزرگی دارند، تقریب خوبی از رفتار واقعی سد می‌باشد. تنها در مورد سدهایی که در دره‌های تنگ با احتمال پدیده قوسی شدن، ساخته شده‌اند استفاده از تحلیل سه بعدی توصیه می‌شود (Potts and Zdravcovic, 2001). تحلیل و طراحی سد تبارک بوسیله نرم افزار Plaxis نسخه 8.2 انجام شده است. با استفاده از این نرم افزار مدل‌های مختلف رفتاری خاک نظیر مدل موهر کلمب، مدل نرم شونده، مدل سخت شونده و مدل نرم شونده خزشی قابل بررسی می‌باشند. در مقاله حاضر به منظور مدلسازی رفتار خاک از دو مدل موهر کلمب و سخت شونده استفاده شده است. مدل موهر کلمب به دلیل عدم نیاز به پارامترهای متعدد و وجود پارامترهای اساسی خاک در تمام حالات رفتاری، اعم ازخمیری و کشسان، برای مدلسازی سد خاکی توصیه شده است (Plaxis Manual Version 8,2000). مدل نرم شونده و نرم شونده خزشی به بررسی رفتار خاک‌های رس عادی تحکیم یافته و خاک‌های نرم می‌پردازند(Vermeer and Neher,2000). این مدل‌ها برای بررسی رفتار هسته رسی در سدهای خاکی چندان مناسب نمی‌باشد، زیرا هسته رسی در سدهای خاکی دارای خاکی پیش تحکیم یافته و با تراکم بالا می باشد. مدل سخت شونده برای نشان دادن رفتار خاک رس بسیار پیش تحکیم یافته و شن و ماسه‌های متراکم که بخشی از مصالح به کار رفته در سدهای خاکی می‌باشند، کاربرد دارد(Schanz et al., 2001).

پارامترهای ژئوتکنیکی به کار رفته در مدل نرم‌افزاری سد تبارک در جداول 1 و 2 ذکر شده‌اند. جدول 1 مربوط به پارامترهای مشترک دو مدل رفتاری موهرکلمب و سخت شونده می‌باشد و جدول 2 به پارامترهای تکمیلی مدل سخت شونده اختصاص دارد.

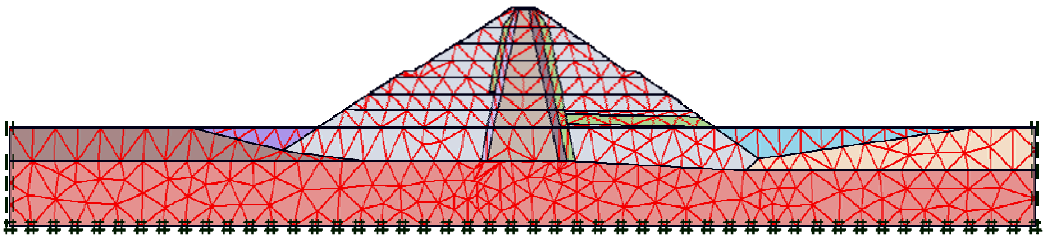
جدول 1- پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح، مدل موهرکلمب و سخت شونده

k_y (m/day)	k_x (m/day)	n	F	C (KN/m^2)	E_{ref} (KN/m^2)	g_{sat} (KN/m^2)	g_{wet} (KN/m^2)	مشخصات مصالح
8E-04	0.0008	0.35	29	25	2181	19.5	19	هسته رسی زهکشی شده
39	39	0.35	43	0.3	30000	22	21	فیلتر پایین دست
27.5	27.5	0.3	41	0.3	4000	22	21	فیلتر بالادست
7.5	7.5	0.35	39	0.3	4000	22	21	فیلتر پایین دست
30	30	0.35	41	1	4000	22	21	زهکش
0.1	0.1	0.3	20	0.3	3000	20	18.5	خاکریز پرکننده بالادست
1	1	0.3	43	20	3000	22	21	خاکریز پرکننده پایین دست
3E-08	3E-08	0.3	27	150	2E+07	23	22	پی سنگی
0.02	0.02	35	18	0.3	3000	19.2	18.8	پی آبرفتی بالا دست
0.02	0.02	0.3	24	30	2800	21	19	پی آبرفتی پایین دست

جدول 3- پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح، مدل سخت شونده

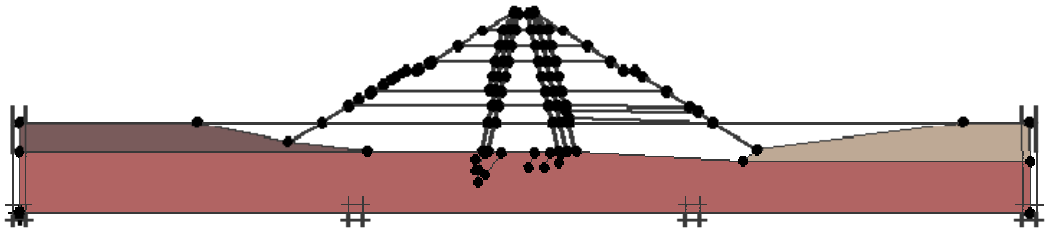
E_{50}^{ref} (KN/m^2)	E_{oed}^{ref} (KN/m^2)	E_{ur}^{ref} (KN/m^2)	مشخصات مصالح
2400	2800	7500	هسته رسی
5000	5300	12000	فیلتر بالادست
4600	5000	12000	فیلتر پایین
10000	10500	30000	زهکش
8300	8700	25000	پوسته

مدل مش بندی شده سد تبارک به صورت شکل 1 می‌باشد.



شکل 1- مدل مش بندی شده سد تبارک در نرم افزار Plaxis

تحلیل سد در 19 فاز محاسباتی انجام شده است. فاز اول (شکل 2) و دوم خاکبرداری پی آبرفتی را مدل می‌کنند. فاز سوم تا نهم مربوط به خاکریزی مرحله به مرحله سد و فاز دهم تا نوزدهم مربوط به آبگیری سد از مهر 83 تا شهریور 84 (دوران اولین آبگیری سد) می‌باشند.



شکل 2- فاز اول محاسباتی سد تبارک، خاکبرداری از پی آبرفتی

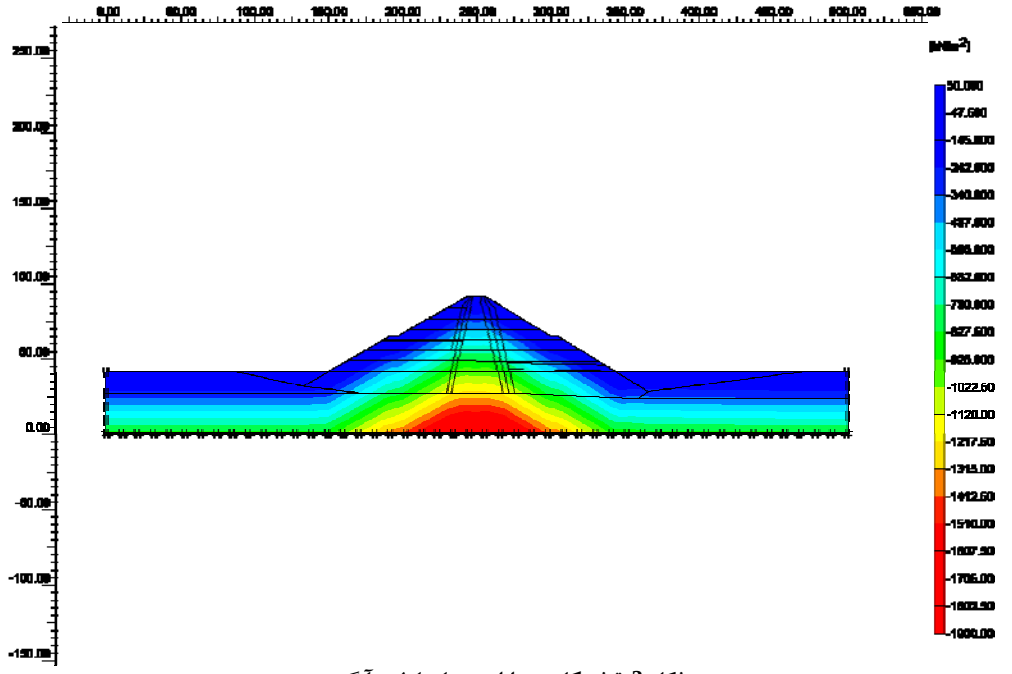
در مدل حاضر برای فاز اول و دوم نوع محاسبه Plastic و برای دیگر فازها به جز فاز آخر Consolidation فرض می‌شود. تنها در فاز آخر که به تعیین ضریب اطمینان در برابر پایداری می‌پردازد، نوع محاسبه phi/c reduction می‌باشد. نوع phi/c reduction برای محاسبه ضریب اطمینان سد برای پایداری می‌باشد. در این روش پارامترهای مقاومتی خاک (c و tanf) به طور مرتب کم می‌شوند تا اینکه خاک گسیخته شود. با استفاده از پارامترهای مقاومتی خاک در لحظه گسیختگی می‌توان ضریب پایداری سازه را به صورت زیر بدست آورد.

$$\sum Msf = \frac{\tan \varphi_{input}}{\tan \varphi_{reduced}} = \frac{c_{input}}{c_{reduced}} \qquad (1)$$

پس از اینکه سد تبارک بوسیله نرم افزار plaxis مدل شد و در طی نوزده مرحله تحلیل شد، با استفاده از نتایج بدست آمده از تحلیل و مقایسه آنها با داده‌های ابزاردقیق به بررسی پایداری سد در دوران اولین آبگیری می‌پردازیم.

3-1- تنش کل

همانگونه که ذکر شد تنش سنج‌های نصب شده در سد تبارک، به صورت شش مجموعه پنج‌تایی در سه مقطع مختلف می‌باشند. تنش سنج‌های موجود در هر مجموعه به صورت افقی، مایل با زاویه 45 درجه و 135 درجه نسبت به بالا دست، درراستای محور سد و عمود بر محور سد، در بخش مرکزی هسته رسی قرار دارند. به دلیل حجم بالای نمودارها در این تحقیق به بررسی نتایج بدست آمده در تنش‌سنج‌های اولین مجموعه مربوط به مقطع 6-6 می‌پردازیم. شکل 3 نشان دهنده تنش کل ایجاد شده در مقطع 6-6 با مدل سخت شونده می‌باشد.



شکل 3 تنش کل در پایان دوران اولین آبگیری

شکل 4 مربوط به مقایسه نتایج بدست آمده از تحلیل و تنش سنجها در اولین مجموعه مقطع 6-6 می‌باشد. همچنانکه در شکل 6 مشاهده می‌شود میان نتایج ابزاردقیق و نرم افزار انطباق خوبی وجود دارد. خصوصا مدل سخت شونده دارای انطباق بسیار خوبی با ابزاردقیق است. از آنجایی که در دوران اولین آبگیری سد، تراز آب مخزن رو به افزایش می‌باشد و بر مقدار فشار موجود در بدنه سد به طور مداوم افزوده می‌شود، نمودارهای تنش کل نسبت به زمان نیز که بوسیله تحلیل و ابزاردقیق بدست آمده‌اند، دارای روند افزایشی می‌باشند. البته در ماه‌های مرداد و شهریور مقدار بسیار کمی تراز آب مخزن کاهش می‌یابد که این مسئله باعث کاهش فشار آب موجود در بدنه سد می‌شود. با توجه به شکل‌ها نیز در انتهای نمودار کاهش اندکی به چشم می‌خورد.

الف: تنش مایل با زاویه 45 درجه

ب: تنش افقی

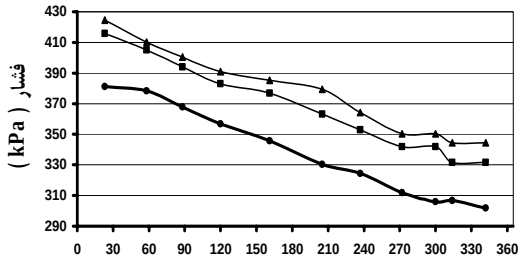
ج: تنش قائم، عمود بر محور سد

شکل 6- مقایسه تنش کل میان ابزار دقیق و نرم افزار، اولین مجموعه در مقطع 6-6

3–2– تنش موثر

اصولا تنش سنج‌هایی که در سدهای خاکی نصب می‌شوند، تنها تنش کل را اندازه می‌گیرند و قادر به اندازه‌گیری تنش موثر نیستند. بنابراین برای بدست آوردن تنش موثر، مقدار تنش کل اندازه‌گیری شده در تنش سنج از مقدار فشار آب منفذی اندازه‌گیری شده توسط پیزومتر الکتریکی موجود در مجموعه مربوطه، کاسته می‌شود. شکل 7 به مقایسه تنش موثر در ابزار دقیق و نرم افزار می‌پردازد. در این شکل به دلیل افزایش فشار آب منفذی بدنه سد در دوران اولین آبگیری، تنش موثر به طور مداوم کاهش می‌یابد. از آنجایی که محل قرارگیری پیزومتر و تنش سنج‌ها در مجموعه مربوطه متفاوت است، مقدار فشار آب منفذی بدست آمده در پیزومتر با مقدار فشار آب منفذی موجود در محل تنش سنج‌ها متفاوت می باشد. از این رو تنش موثر ابزار با مقدار واقعی تنش موثر در محل قرارگیری تنش‌سنج اندکی متفاوت می‌باشد. با این وجود انطباق خوبی میان نتایج ابزار دقیق و نرم افزار به خصوص در مدل سخت شونده، مشاهده می شود.

الف: تنش مایل با زاویه 45 درجه



ب: تنش افقی

ج: تنش قائم، عمود بر محور سد

شکل 7- مقایسه تنش‌های موثر در ابزار دقیق و نرم افزار، اولین مجموعه در مقطع 6-6

4- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در تحقیق حاضر سعی شده است که نتایج حاصل از قرائت ابزاردقیق به کار رفته در سد تبارک در دوران اولین آبگیری، با نتایج حاصل از مدلسازی تحلیلی سد بوسیله نرم‌افزار Plaxis، به منظور کنترل پایداری سد، بررسی و مقایسه شوند. تحقیق حاضر نشان می‌دهد که نتایج حاصل از مدلسازی تحلیلی و داده‌های ابزاردقیق دارای انطباق خوبی بوده و سد در دوران اولین آبگیری دارای پایداری هیدرولیکی می‌باشد.

با توجه به نتایج بدست امده از تحلیل عددی و ابزاردقیق و مقایسه آن‌ها با هم، مشاهده می‌شود که تنش‌های ایجاد شده در سد با مقادیر پیش‌بینی شده در زمان طراحی مطابقت خوبی دارد و سد پایدار می‌باشد.

تجربه سد سازی در جهان نشان می‌دهد که اگر یک سد خاکی یا سنگریزه‌ای در هنگام ساخت و اولین آبگیری پایدار بماند، در طول مدت بهره برداری از سد نیز به احتمال زیاد دچار اشکال نخواهد شد (جعفرزاده، 1380). بنابراین با توجه به داده‌های بدست آمده از ابزاردقیق و مطابقت آن با مدلسازی تحلیلی می‌توان از پایداری سد تبارک اطمینان حاصل نمود.

با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق موارد زیر جهت ادامه این مطالعه پیشنهاد می‌گردند:

1- استفاده از نرم افزارهای دیگری که قابلیت مدل کردن سدهای خاکی را دارا می‌باشند (مانند نرم افزارFlac و نرم‌افزار Z-Soil) و مقایسه نتایج بدست آمده از تحلیل نرم افزاری با نتایج ابزار دقیق به منظور رفتارنگاری سد.

2- استفاده از تحلیل در شرایط سه بعدی و مقایسه نتایج بدست آمده از تحلیل سه بعدی با تحلیل دو بعدی در راستای رفتارنگاری سد.

3- مطالعه اثر زلزله و بارهای دینامیکی بر روی فشارهای آب منفذی هسته از موارد مهم در بررسی پایداری سدها می‌باشد. از این رو پیشنهاد می‌شود که مدل سد تبارک به صورت دینامیکی تحلیل شده و اثر زلزله بر فشارهای آب منفذی داخل هسته بررسی شود.

5- مراجع

1- Dunnicliff, J., “Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance”, 1993.

2- Szostak, A. and Massiera, M., “Modelling of Deformations during Construction of a Large Earth Dam in the La Grande Complex, Canada”, Technical Sciences, Abbrev: Techn. Sc., No 7, Y. 2004.

3- Rajabalinejad, m., “Darwin Dam”, www.tudelft.nl/live/binaries/770f886f-7dbf.../Darwin_Dam.pdf, 2002.

4- Potts, D. M. and Zdravcovic, L, “Finite Element, Analysis in Geotechnical Engineering Theory”, Thomas Telford
Publishe.

5- Plaxis Manual Version 8, “Material-Models-Manual-V8”, 2000.

6- Motamedi, M. and Hosseini, M., “Arching and Optimum Mixture Percentage of Materials in Karkheh Dam, Iran”, www.engopt.org/nukleo/pdfs/0204_full_paper.pdf, 2006.

7- Khong, C.D., “Soil Models in Geotecnical Engineering**”,** PhD thesis, University of Nottingham, 2004.

8- Pelton, F. and Reston, c., “Guidelines for Instrumentation and Measurements for Monitoring Dam Performance”, ASCE Task Committee on Instrumentation and Monitoring Dam Performance, ASCE, 0-7844- 0531-X, 715 PP, 2000.

9- Schanz, T.; Vermeer, P. and Bonnier, P., “The Hardening Soil Model: Formulation and Verification”, Beyond 2000 in Computational Geotechnics - 10 Years of Plaxis International, Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 040 X, 1999.

10- Vermeer, P. and Neher, H., “The Soft Soil Model that Aaccounts for Creep”, Beyond 2000 in Computational Geotechnics - 10 Years of Plaxis International, Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 040 X, 1999.

1- نیرومند، ح.؛ میرقاسمی، ع.ا. و پاکزاد، م.، "رفتارنگاری سد کرخه در دوران ساخت با استفاده از نتایج ابزاردقیق"، چهارمین کنفرانس سد سازی تهران، ایران، 1383.
2- جعفرزاده، ف. و طالبی، م.، "ارزیابی رفتار سدهای سنگریزه‌ای با هسته رسی غیر اشباع در حین ساخت"، سومین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران، 1381.