



## بررسی برازش فشار های آب منفذی حاصل از مدل آزمایشگاهی و نرم افزار PLAXIS در

### سدهای خاکی همگن با استفاده از نرم افزار آماری SAS

نویده نجف پور<sup>1</sup>، محمد شایان نژاد<sup>2</sup> و حسین صمدی<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های آبی، دانشگاه شهر کرد

2- استاد یار گروه مهندسی آب دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان

3- حسین صمدی استاد یار گروه مهندسی آب دانشگاه شهر کرد، دانشگاه شهر کرد

[Navideh.najafpour@yahoo.com](mailto:Navideh.najafpour@yahoo.com)

### خلاصه

از مهمترین ویژگی ها یا کمیت های مورد نیاز در بررسی ها و تحلیل های یک سد خاکی ، اندازه گیری فشار آب منفذی ، میزان نشت و زه خروجی از بدنه و پی آن است که اندازه گیری این کمیت ها از همان شروع ساخت سد آغاز می گردد . در این مقاله مدلی فیزیکی از یک سد خاکی همگن در فلوم آزمایشگاهی اجرا و میزان فشار منفذی با پیژومتر های نصب شده در بدنه ی فلوم و میزان دبی نشت به صورت حجمی اندازه گیری گردید. و در آخر فشار و دبی های اندازه گیری شده در آزمایشگاه با نتایج نرم افزار PLAXIS با استفاده از نرم افزار آماری SAS در سطح اعتماد 95 درصد مقایسه و برازش شد.

کلمات کلیدی: سد خاکی همگن ، نشت ، فشار منفذی ، مدل فیزیکی

### 1. مقدمه

طراحی و ساخت سدهای خاکی از جمله مواردی است که قدمت آن به چندین هزار سال می رسد و در بسیاری از کشورهای خشک و نیمه خشک از جمله کشورمان ایران در این زمینه تجربیات زیادی موجود است. علی رغم تمام تجربیات و پیشرفت در طراحی و ساخت این سدها، بدلیل اثر قابل توجه عوامل و پدیده های مختلف طبیعی بر روی رفتار این سدها از جمله شرایط زمین شناسی و ژئوتکنیک، شرایط هیدرولوژیک و ژئوهیدرولوژیک و شرایط اقلیمی این علم با مشکلات زیادی مواجه است که نادیده گرفتن آن موجب شکست پروژه و خسارات جانی و مالی فراوانی می شود. طراحی و ساخت اولین سد های خاکی مدرن در ایران به اواسط سال های 1320 ، یعنی خاتمه ی جنگ جهانی دوم بر می گردد . در آن سال ها کار های مطالعاتی در زمینه ی ذخیره سازی و انحراف آب جهت استفاده در پروژه های آبیاری مدرن و نیز احداث شبکه های آبیاری مدرن در پایین دست سد های مخزنی مورد توجه قرار گرفت . این مطالعات که در دهه ی 40 - 1330 شدت گرفت و وارد مرحله ی اجرا گردید بدوا " توسط بنگاه مستقل آبیاری و بعد ها توسط وزارت آب و برق و سرانجام وزارت نیروی فعلی پیگیری و هدایت شد . اولین سد خاکی مدرن ساخته شده در ایران ، سد گلپایگان به ارتفاع نهایی 54 متر است . پس از این ، تعداد زیادی سد خاکی مطالعه ، طراحی و اجرا گردید . سیستم های زهکشی در بدنه و پی سد های خاکی ، تمهیداتی هستند که برای جمع آوری و هدایت آب های نشت یافته به نواحی پایین دست طراحی و به اجرا در می آیند . این سیستم ها اصولا شامل قرار دادن یک لایه مصالح درشت دانه با نفوذپذیری خیلی زیاد و ابعاد معین در قسمت خاصی از بدنه و پی سد است ، به گونه ای که لایه ی مذکور در مقابل جریان آب نشتی مقاومت نموده و بتواند کل دبی نشت را جمع آوری و به خارج هدایت کند . بدیهی است که سیستم های زهکشی لازم است علاوه بر قدرت جمع آوری و تخلیه آب نشتی ، در مقابل جریان پایدار بوده و دچار فرسایش یا آب شستگی درونی نشوند . انواع سیستم های زهکش

<sup>1</sup> - دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های آبی دانشگاه شهر کرد

<sup>2</sup> - عضو هیئت علمی گروه آب دانشگاه صنعتی اصفهان

<sup>3</sup> - عضو هیئت علمی گروه آب دانشگاه شهر کرد



قابل کاربرد در بدنه سدهای خاکی همگن عبارتند از، زهکش پنجه، زهکش افقی و زهکش دود کشی؛ که زهکش های پنجه معمولاً در سد های با ارتفاع کمتر از 20 متر به کار می رود.

ابعاد و نفوذپذیری مصالح سیستم های زهکش باید به گونه ای انتخاب شود که سیستم قادر به تخلیه ی مطمئن کلیه ی آبهای ورودی بر اثر پدیده ی نشست از بدنه و پی باشد، در ضمن قادر به تخلیه ی زه آب های پیش بینی نشده نیز باشد. مدل فیزیکی یک سد خاکی همگن رو پی نفوذ ناپذیر یک نمونه آزمایشگاهی بوده که ارتفاع، عرض و شیب بدنه آن مشخص و مصالح ساخت آن به خاطر همگن بودن، دارای دانه بندی و جنس یکنواخت است.

برای حل جریان نشست از بدنه سد های خاکی از معادله لاپلاس استفاده شده و از آن جا که حل معادله لاپلاس از طریق رسم شبکه جریان به روش ترسیمی و یا حل عددی دستی فرآیندی پیچیده و وقت گیر است، طی دهه های اخیر تلاش های زیادی برای تهیه نرم افزارهای رایانه ای مناسب برای محاسبه و رسم شبکه های جریان صورت گرفته است. پس از گسترش رایانه های با قدرت پردازش و حافظه بالا تحقیقات زیادی برای استفاده از شیوه های محاسباتی برای رسم شبکه های جریان در سدهای خاکی انجام گرفته است. اساس کار بیشتر این نرم افزارها استفاده از روش های مختلف مانند تفاضلات محدود (Finite differences) یا اجزاء محدود (Finite elements) و یا روش های جدیدتری مانند المان های مرزی است. امروزه برنامه های متعددی متناسب با نیازها و شرایط مختلف به بازار ارائه شده است. بدیهی است که استفاده از این نوع نرم افزارها بدلیل توانایی و سرعت بسیار زیاد قدرت تحلیل یک مهندس طراح را افزایش می دهد ولی یک طراح باید اصول اولیه را که بعنوان مبنای علمی مسئله است به خوبی بشناسد تا بتواند نکات مهم و خطاهای احتمالی ایجاد شده را تشخیص داده و برطرف نماید.

## 2. بررسی منابع:

قانون حرکت آب در محیط های متخلخل در حالت اشباع توسط داری بصورت روبرو بیان شده است:

$$Q = k.i.A \quad (1)$$

که در آن  $Q$  دبی آب عبوری،  $k$  هدایت هیدرولیکی خاک،  $A$  سطح مقطع جریان و  $i$  شیب هیدرولیکی است که از رابطه زیر به دست می آید:  
 $i = \frac{\partial h}{\partial s}$  که در آن  $s$  طول مسیر حرکت آب درون محیط متخلخل است. بر همین اساس معادله حرکت آب در خاک بوسیله فرمول لاپلاس بصورت زیر ارائه شد:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

که در آن  $h$  کل بار هیدرولیکی در نقطه مورد نظر است. این معادله برای شرایط خاک ناهمگن ارائه شده است. که در شرایط خاک همگن  $K_x = K_y = K_z$  بوده و معادله لاپلاس به شکل زیر است:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

حل ترسیمی این معادله در حالت دو بعدی منتهی به رسم دو سری خطوط عمود بر هم می گردد که خطوط جریان و هم پتانسیل نام دارند. این خطوط شبکه جریان را تشکیل می دهند. روش دیگر حل معادله لاپلاس حل عددی آن است. امروزه بسته های نرم افزاری قدرتمندی برای تحلیل شرایط محیط متخلخل ارائه شده است که مبنای کار آن ها استفاده از روش های عددی مختلف مانند تفاضلات محدود (Finite difference) و اجزاء محدود (Finite element) است.

سینگ (2008) روند نشست در یک سد خاکی همگن دارای فیلتر پاشنه ای افقی را با استفاده از روش اجزاء محدود مورد بررسی قرار داد. برای آسان سازی مسئله او سد را ایزوتروپیک و واقع شده بر روی یک پی نفوذناپذیر و شرایط نشست را پایدار فرض نمود. برای حل مسئله با روش عددی از برنامه های ANSYS، PLAXIS و SEEP-W استفاده شد. آنالیز عددی فشار پیزومتریک در درون فیلتر یک روند کاهشی را در آن نشان داد در حالیکه مدل تحلیلی یک خط هم پتانسیل صفر را در درون فیلتر نمایش می داد، که البته این نتیجه صحیح نبود چون خط هم پتانسیل صفر به معنای عدم وجود جریان در درون فیلتر است اما همان گونه که مشخص است آب نشستی از بدنه سد خاکی از درون فیلتر به بیرون جریان می یابد و جریان نشست ناشی از وجود یک گرادیان هیدرولیکی و عدم تساوی هد پیزومتریک در فیلتر است. بنابراین نتیجه حاصله از آنالیز اجزاء محدود جواب صحیح تری را بدست داد.

عطایی آشتیانی و شریفی (1383) یک مدل عددی را براساس روش المان های مرزی جهت تحلیل تراوش در سدهای خاکی همراه با پی لایه ای و سپری ارائه دادند. برای تعیین صحت نتایج بدست آمده از مدل دو مثال برای دو حالت پی لایه ای (پی شامل دو لایه با نفوذپذیری متفاوت) و پی همگن همراه با پی سپری بتنی حل نموده و نتایج حاصل را با نتایج بدست آمده از نرم افزار MSEEP که از روش اجزاء محدود برای رسم شبکه جریان استفاده می نماید مقایسه نمودند که نتایج حاصله صحت مدل ارائه شده را تأیید نمود.

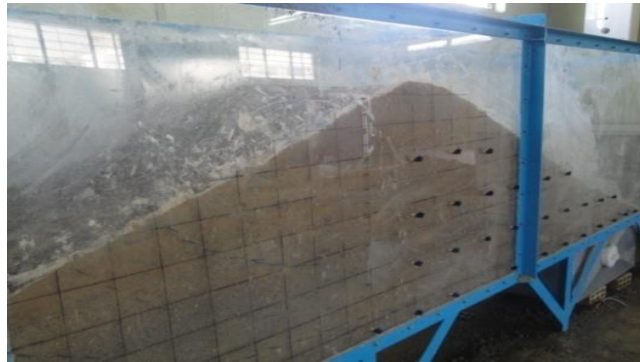
نورانی و باباخانی (1388) با استفاده از روش بدون شبکه RBF میزان تراوش سد خاکی ستارخان را مورد بررسی قرار دادند و در این مطالعه برآورد میزان تراوش از طریق محاسبه پتانسیل آبی نقاط مختلف صورت گرفته است. نتایج مدل سازی با روش RBF حاکی از آن است که در مقایسه با روش تفاضلات محدود، این روش از درصد دقت خوبی برخوردار بوده و حجم محاسبات کمتر خواهد بود.

ارومیهی و برزگر (2007) میزان نشت را برای سد خاکی چپرآباد قبل از ساخت پیش بینی کرده و مناسب ترین راه را برای کنترل نشت ارائه کردند. در این طرح با استفاده از نرم افزار PLAXIS شرایط پی و بدنه مدل شد و در نهایت با توجه به نتایج حاصله، روش تزریق برای آب بندی پی آبرفتی سد پیشنهاد شد.

### 3. مواد و روش ها :

آزمایشات در یک فلوم (Flume) آزمایشگاهی به طول 6 متر، عرض 60 سانتی متر و ارتفاع 1/2 متر واقع در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه شهرکرد، انجام گرفت. برای ساخت مدل سد خاکی از مصالح ماسه و رس به طور یکنواخت خاکریزی با شیب بالادست و پایین دست 2H:1V، ارتفاع 1 متر، عرض 60 سانتی متر و عرض بالا دست 20 سانتی متر استفاده شد (شکل 1). برای اندازه گیری فشار آب منفذی در داخل بدنه ی سد از 30 عدد پیزومتر به صورت شبکه بندی شده، روی دیواره ی پلکسی گلاس فلوم که از وسط به سمت انتهای فلوم تعبیه و آب بندی شده بود، استفاده شد (شکل 2).

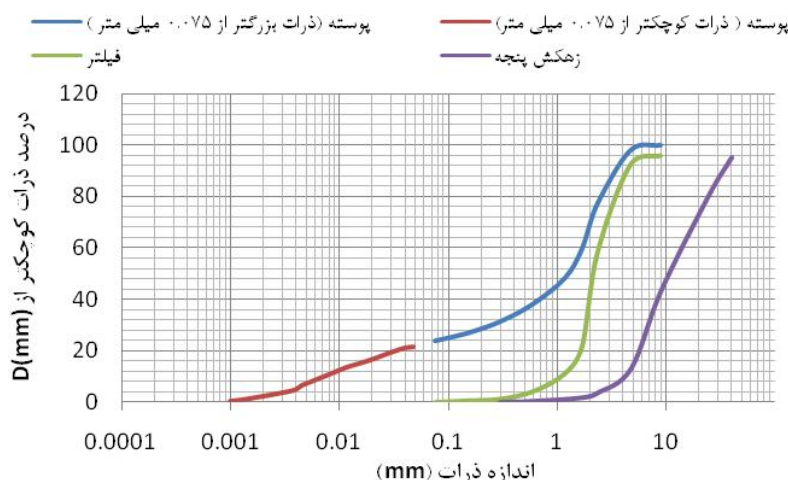
دانه بندی خاک مورد استفاده برای پوسته سد از نوع SC (ماسه و رس) بود و منحنی دانه بندی پوسته، فیلتر و زهکش با استفاده از الگ های استاندارد و هیدرومتری انجام شد که در شکل 3 نتایج آن قابل مشاهده است. قابل ذکر است که این نوع دانه بندی بر اساس منابع برای ساخت سد های خاکی همگن مناسب است.



شکل 1: مدل آزمایشگاهی سد خاکی همگن در فلوم آزمایشگاهی



شکل 2: پیزومترها نصب شده روی بدنه فلوم برای اندازه گیری فشار

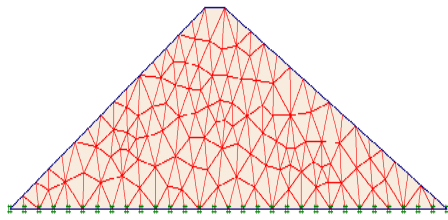


شکل 3: منحنی دانه بندی پوسته، فیلتر و زهکش در مدل آزمایشگاهی

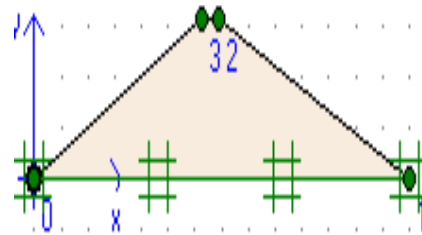
برای تراکم مدل آزمایشات تراکم آزمایشگاهی (پراکتور استاندارد) و تراکم صحرائی انجام شد و بر اساس نتایج آن، لایه های 5 سانتی متری خاک با 20 دور رفت و برگشت غلطک دستی 30 کیلوگرمی به تراکم بالای 90 درصد رسید. برای اندازه گیری زه آب رده شده از زهکش پنجه ای از شیر کنترلی که در زیر فلوم نصب شده بود استفاده شد.

برای شروع آزمایشات آب در مخزن در سه ارتفاع 30، 50 و 80 سانتی متر به صورت تدریجی پر و در این ارتفاع ها ثابت شد. بعد از یک روز با اشباع شدن محیط متخلخل خاک، ارتفاع آب در پیزومترها و دبی زه آب خروجی از مدل سد خاکی اندازه گیری شد.

پس از برداشت و بررسی داده های حاصل از آزمایشات نوبت به مدل سازی مسئله در نرم افزار PLAXIS می رسد. در ابتدا باید یک مدل هندسی از مقطع سد ایجاد گردد. برای این کار بر اساس مقطع اجرایی مدل آزمایشگاهی در فلوم، مدل هندسی در برنامه PLAXIS ایجاد شد. در مرحله دوم نیاز به داده های مربوط به مصالح به کار رفته در بدنه سد می باشد. بدلیل عدم اندازه گیری چنین داده هایی از داده های موجود در مقالات معتبر که قبلا پژوهش هایی بر روی سدهای خاکی انجام داده بودند استفاده شد. چون در طی آنالیز بازگشتی مقادیر این داده ها دچار تغییر خواهند شد مقادیر بسیار دقیق برای داده ها مورد نیاز نیست و تنها این داده ها باید در محدوده قابل قبول برای شروع آنالیزها باشند. لازم به ذکر است که تنها پارامترهای  $\gamma$ ،  $\gamma'$  و  $\gamma''$  در محاسبات نشست از بدنه سد خاکی موثرند و باید به صورت دقیق وارد شوند که میزان وزن مخصوص خشک و اشباع در آزمایشگاه تعیین و محاسبه و میزان نفوذ پذیری با توجه به نتایج نرم افزار و اندازه گیری های آزمایشگاهی مقادیر دبی نشست و سطح فریاتیکی، در PLAXIS کالیبره شد. لازم به ذکر است که دلیل اهمیت پارامتر  $k$  در محاسبات نشست، مقدار آن با محاسبات دستی و ترسیم شبکه جریان در داخل بدنه ی سد کنترل شد. نمونه ای مدل ایجاد شده و مش بندی مدل در نرم افزار PLAXIS در شکل 5 و 6 قابل رؤیت است.



شکل 6: مش بندی ایجاد شده در نرم افزار PLAXIS



شکل 5: مدل ایجاد شده در نرم افزار PLAXIS

#### 4. بحث و نتایج :

با مدل کردن نمونه ی آزمایشگاهی در نرم افزار PLAXIS و انجام آنالیز نشت، به منظور مقایسه و تعیین برازش داده های فشار آب منفذی حاصل از آزمایشگاه (فشار آب در پیزومتر های نصب شده در بدنه فلوم) و داده های فشار آب منفذی حاصل از آنالیز نشت با نرم افزار PLAXIS در سطح اعتماد 95 درصد از نرم افزار آماری SAS استفاده شد.

در این نرم افزار با نوشتن برنامه مربوط به آزمون T-test و وارد کردن داده های فشار آب منفذی حاصل از آزمایشگاه و PLAXIS، مقدار P-value که با توجه به آن سطح اعتماد تعیین می گردد، برای هر سری آزمایشات بدست آمد. نمونه ای از نتایج آنالیز در SAS در ذیل آورده شده و همچنین مقدار P-value برای حالات مختلف آزمایش در جدول 1 قابل رؤیت است.

نتایج آنالیز در نرم افزار SAS بین داده های آزمایشگاهی و PLAXIS در حالت بدون زهکش، ارتفاع آب در مخزن 80 سانتی متر است :

#### The TTEST Procedure Statistics

Lower CL Difference	N	Upper CL Mean	Lower CL Mean	Upper CL Mean	Upper CL Std Dev	Upper CL Std Dev
measure - plaxis	30	-0.038	0.1652	0.3685	0.4336	0.5445
		0.7319	0.0994			

#### T-Tests

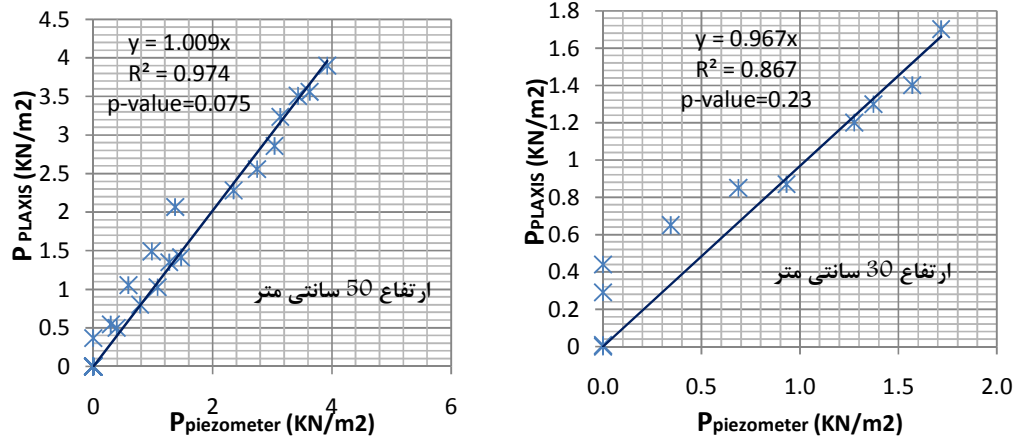
Difference	DF	t Value	Pr >  t
measure - plaxis	29	1.66	0.1074

جدول 1: نتایج آزمون T-test و مقدار P-value برای سه ارتفاع آب در مخزن

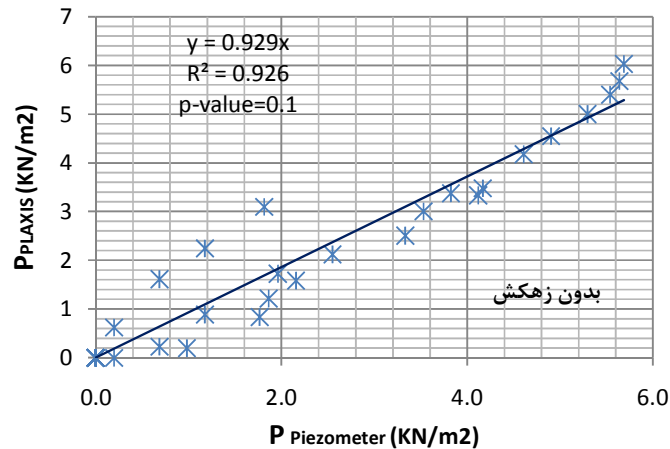
ارتفاع آب در مخزن (cm)	80	50	30
T-value	1.66	-1.85	-1.23
P-value	0.1	50.07	0.23
سطح اعتماد (%)	09	29	80
RMSE	0.570	0.209	0.124

لازم به ذکر است که برنامه در نرم افزار SAS برای اختلاف بین داده ها نوشته شد و اگر مقدار P-Value کمتر از 0.05 شود یعنی داده ها در سطح اعتماد 95 درصد دارای اختلاف معنی دارند. همچنین مقداری خطای ریشه ی میانگین مربعات RMSE، برای همه ی حالات محاسبه شد که نتایج آن در جدول 1 آورده شده است.

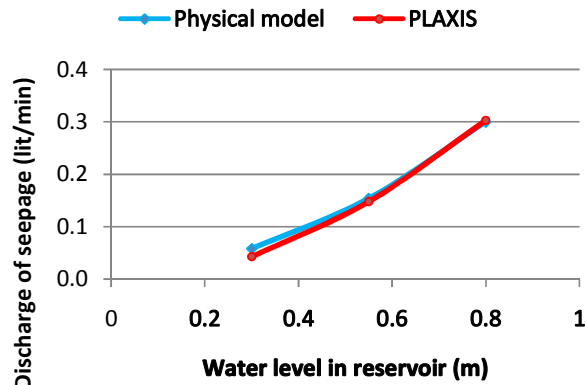
همان طور که از جداول فوق معلوم است داده های آزمایشگاهی و نتایج حاصل از نرم افزار PLAXIS در همه ی موارد در سطح اعتماد 95 درصد دارای اختلاف معنی دار نیستند، که این نتایج برازش داده های آزمایشگاهی و PLAXIS را در سطح اعتماد 95 درصد، اثبات کرده است. در شکل 7، 8 و 9 نتایج این برازش برای سه زاویه ی زهکش پنجه ای قابل مشاهده است.



شکل 7 و 8: مقادیر فشار آب منفذی پیزومتر و PLAXIS برای ارتفاع 30 و 55 سانتی متر آب در مخزن



شکل 8: مقادیر فشار آب منفذی پیزومتر و PLAXIS برای ارتفاع 80 سانتی متر آب در مخزن



شکل 9: نتایج دبی نشت حاصل از مدل فیزیکی و نرم افزار PLAXIS

## 5. نتیجه گیری :

با آنالیز داده های حاصل از آزمایشگاه و نرم افزار PLAXIS نتایج زیر حاصل شد:

- 1- نتایج برازش داده های فشار آب منفذی در آزمایشگاه و PLAXIS با نرم افزار آماری SAS نشان داد که داده ها در سطح اعتماد 95 درصد با یکدیگر در ارتفاع 80، 50 و 30 درصدی آب در مخزن، برازش داشته و دارای اختلاف معنی دار نبوده است.
- 2- برازش خوب داده های آزمایشگاهی فشار با داده های بدست آمده از آنالیز نرم افزار PLAXIS در این تحقیق و همچنین تطابق نتایج این نرم افزار با داده های مربوط به بعضی از مدل های اصلی، نشان از کارایی وسیع این نرم افزار دارد.
- 3- فرض همگنی مصالح در نرم افزار PAXIS نشانگر توانایی بیشتری این نرم افزار را در آنالیز نشت از سد های خاکی همگن و پیش بینی مسائل مربوط به آن نسبت به سد های غیر همگن است.

## مراجع :

1. رحیمی ح. 1382. سدهای خاکی. انتشارات دانشگاه تهران
2. عطایی آشتیانی، ب.، شریفی، ا.، 1383. مدل المان مرزی در تحلیل تراوش در بدنه سد خاکی به همراه پی لایه ای و سپری، اولین کنگره ملی مهندسی عمران.
3. وفاییان م. 1377. سدهای خاکی. انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان.
4. Gikas.V., and M.Sakellariou5. Gikas.V., and M.Sakellariou, 2008(b): **Horizontal deflection analysis of a large earth dam by means of geodetic and geotechnical methods. Symposium on deformation measurement and analysis.** 13<sup>th</sup> FIG.
5. Sherard.J.L., 1963: **Earth and Earth Dams.** John Wiley & Sons inc., New York. N. Y.
6. Uromeihy A. and Barzegari G. 2007: **Evaluation and treatment of seepage problem at Chapar-Abad dam,** Iran. Engineering Geology 91:219-228.
7. G. C. Mishra, M.ASCE,1 and A. K. Singh2, 2005 : **Seepage through a Levee , INTERNATIONAL JOURNAL OF GEOMECHANICS**
8. Plaxis Version8. 2006. General information. <http://www.plaxis.nl>.
9. Plaxis Version8. 2006. Tutorial manual. <http://www.plaxis.nl>.



نهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان  
19-21 اردیبهشت ماه 1391



**pdfMachine**

**Is a pdf writer that produces quality PDF files with ease!**

Produce quality PDF files in seconds and preserve the integrity of your original documents. Compatible across nearly all Windows platforms, if you can print from a windows application you can use pdfMachine.

Get yours now!