



ارزیابی نشست الاستیک و آنالیز تحکیم در سدهای خاکی با اشکال هسته متفاوت / مورد مطالعه ای سد کرخه

محمد کیانی^۱، امیر حسن رضایی فرعی^۲، وحید حاجی امیری^۳، فاطمه بهروزی^۴

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران ژئوتکنیک

۲- دکترای ژئوتکنیک و استادیار دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

۳- کارشناسی ارشد مهندسی عمران ژئوتکنیک

۴- کارشناسی ارشد ریاضیات

خلاصه

مهمترین پارامترها در ارزیابی رفتار سدهای خاکی، مقادیر جابجایی و نشست ها و تغییر شکل ها می باشد. در این مقاله، با استفاده از نرم افزار اجزای محدود PLAXIS، تغییر شکل های افقی یا همان نشست سدهای خاکی و سنگریزه ای با اشکال هندسی متفاوت مورد آنالیز و تحلیل عددی قرار گرفته است. از همین رو، سدهای خاکی با پوسته درشت دانه و اشکال هسته متفاوت تحلیل شده و تأثیرات شکل هسته در بر مقادیر جابجایی و نشست در زمان پایان ساخت، زمان آبدگیری و دوره بهره برداری مورد بررسی قرار می گیرد.

کلمات کلیدی: سدهای خاکی، شکل هسته، تغییر شکل، نشست، تحلیل عددی

۱- مقدمه

قسمت عمده نشست در سدهای خاکی در حین ساخت آن رخ می دهد. تخمین نرخ و مقدار این نشست ها در کنترل پایداری و طراحی بدنه و سازه های وابسته آن اهمیت فوق العاده ای دارد.

سدهای خاکی از جمله ساده ترین سازه ها از نظر شکل و ظاهر می باشند در حالی که مدلسازی و طراحی و تحلیل آنها با مشکلات و پیچیدگی های بسیاری همراه است. علت این امر عبارت است از ریختن لایه- لایه سد خاکی و متراکم نمودن مصالح آن در حالت نیمه اشباع یا رطوبت نزدیک به حد بهینه برای تراکم که در این حالت فضای خالی درون محیط متخلخل خاک از دو فاز مایع و گاز پر شده است. با پیشرفت عملیات اجرای سد خاکی و توسعه فشار آب حفره ای، برخی لایه ها اشباع شده و می توان سیال منفذی را تک فاز گرفت.

نشست جسم سدهای خاکی را می توان به دو مؤلفه نشست حین ساخت سد و نشست بعد از اتمام ساخت سد تفکیک نمود. نشست حین ساخت در واقع نتیجه بارگذاری تدریجی هر لایه خاک توسط لایه های بعدی است که به تدریج اجراء می شوند. در اجرای هسته سد سعی می شود رطوبت خاک در حوالی اپتیمم و درصد تراکم بیشتر از ۹۸٪ تراکم پروکتور باشد. در مواقع تراکم درجه اشباع لایه های خاک به حدود ۹۰ الی ۹۵ درصد می رسد و خاک شدیداً پیش تحکیم یافته شده و فشار آب حفره ای منفی در آن بوجود می آید (Fell, et al. 1992). بار ناشی از اجرای لایه های بعدی فشار آب حفره ای منفی را خنثی نموده و حتی موجب توسعه فشار آب حفره ای مثبت نیز می شود. بنابراین با پیشروی اجرای بدنه سد فشار آب حفره ای از یک سو توسعه یافته و از سوی دیگر با گذشت زمان مستهلک شده و موجب نشست تحکیمی می گردد. این فرآیند، در هر حال به خواص مهندسی خاک، رطوبت و نحوه تراکم آن و سرعت اجرای هسته بستگی دارد.

^۱ کارشناس پروژه های سدسازی و تونلسازی

^۲ عضو هیئت علمی دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

^۳ کارشناس پروژه های سدسازی و تونلسازی

^۴ مدرس

مارشال (Marsal, 1958) تغییرات نشست در امتداد محور قائم Z سد به ارتفاع h را به صورت یک سهمی به معادله $Sz=a(H-Z)^2$ ارائه داده است که در آن حداکثر نشست سد در میانه ارتفاع سد رخ می دهد. بر اساس ادبیات فنی موجود حداکثر نشست پایان ساخت سد بر حسب مورد ممکن است در بالا و یا زیر میانه ارتفاع سد رخ دهد (Pagano, 1998). برای تعیین مقدار نشست در انتهای ساخت (Speedie, 1970) رابطه $S=0.035(H-13)$ را ارائه داده است که در آن H و S به ترتیب مقدار نشست و ارتفاع سد بر حسب متر می باشند. مطالعات قبلی نشانگر آن است که اثر شکل هسته سد بر مقادیر نشست مورد مطالعه و ارزیابی قرار نگرفته است. بدین منظور، اثر شکل هسته بر روی مقادیر نشست ها و تغییر شکل ها با در نظر گرفتن سه نوع شکل هسته متفاوت برای سدهای خاکی با ارتفاع یکسان با انجام تحلیل های عددی مطالعه می شود. در نهایت، ارزیابی و پیشنهادات لازم در این مورد ارائه می گردد.

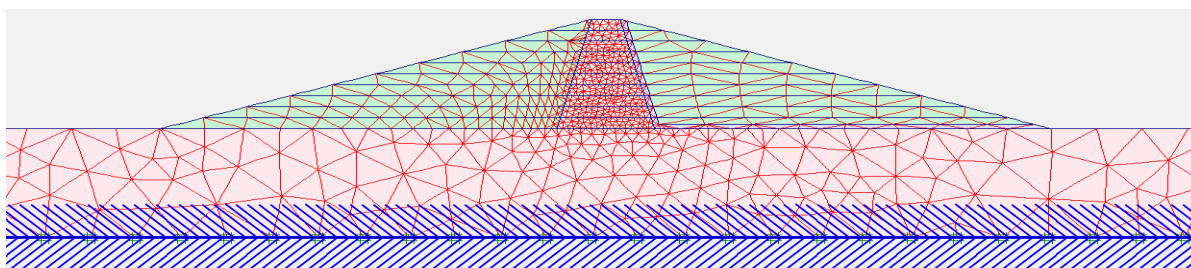
۲- تحلیل های عددی

۲-۱ هندسه سدهای تحلیل شده

برای انجام تحلیل های عددی سدهای خاکی در این تحقیق از نرم افزار المان های محدود Plaxis استفاده شده است. این نرم افزار برای تحلیل تنش ها، تغییر شکل ها، و ارزیابی پایداری در سازه های خاکی کاربرد دارد. با این نرم افزار می توان فرآیند ساخت و حفاری را توسط فعال کردن و غیر فعال کردن المان ها در مرحله محاسبات مدل کرد. در این نرم افزار مدل های رفتاری موهر-کولمب، مدل سخت شونده گی هزلولی، مدل نرم شونده گی و مدل نرم شونده گی خزشی قابل به کار گیری است. در این تحقیق سه سد خاکی با ارتفاع یکسان و با شکل هسته متفاوت آنالیز شده است. ضخامت پی آبرفتی و شیب پوسته برای هر سه سد یکسان فرض گردیده. مقدار این شیب ثابت ۱ قائم به ۳ افقی انتخاب گردید تا اثر پی و پوسته در تمامی سدها نیز یکسان در نظر گرفته شود. عمق پی در تمامی حالت ۵۰ متر و ارتفاع هر سه سد ۵۰ متر می باشد. در جدول ۱ حالات و مشخصات سدهای خاکی آنالیز شده ارائه گردیده است و نمونه ای از شبکه المانهای بدنه سد و پی آن در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱) مشخصات هندسه سد

| نام و شکل هسته | عرض فیلتز (متر) | عرض تاج هسته (متر) | شیب هسته (قائم به افق) | ضخامت پی (متر) | ارتفاع سد (متر) | حالت |
|-----------------|-----------------|--------------------|------------------------|----------------|-----------------|------|
| قائم (Vertical) | 2 | 10 | 1 به 0/25 | 50 | 50 | 1 |
| مایل ۱ (Inc.1) | 2 | 10 | 1 به 0/15 و 0/5 | 50 | 50 | 2 |
| مایل ۲ (Inc.2) | 2 | 10 | 1 به 0/5 و 1 به 1 | 50 | 50 | 3 |



شکل ۱) نمونه ای از شبکه المان های ۱۵ گرهی سد با ارتفاع ۵۰ متر برای هسته قائم

۲-۲- نحوه مدلسازی و تحلیل

جهت انجام تحلیل واقعی از شرایط موجود سد مراحل مختلف ساخت و آبیگری سد باید بر اساس برنامه زمان بندی واقعی مدلسازی شود تا اینکه میزان تغییر شکل های واقعی در دوران ساخت و بهره برداری قابل تعیین باشد. مدل رفتاری مصالح استفاده شده در این تحلیل ها مدل رفتاری موهر - کولمب می باشد. برای مش بندی سد های تحلیل شده از المان های مثلثی ۱۵ گرهی استفاده شده است. فاصله المان ها در داخل هسته به دلیل بالا بردن دقت، کمتر از پوسته و پی در نظر گرفته شده است.

تحلیل عددی بدنه سد همراه با پی آن به صورت تحلیل تنش مؤثر همراه با آنالیز تحکیم صورت گرفت. مدل سازی دوران ساخت بدنه سد به صورت لایه های ۵ متری انجام گرفته و پس از ساخت هر لایه، آنالیز تحکیم لایه های زیرین صورت گرفته و در نهایت در انتهای ساخت فشار آب حفره ای ایجاد شده ناشی از تحکیم به صفر رسانده شد. در دوره اولین آبیگری مخزن سد پس از ساخت، با فرض اینکه حداکثر تراز آب ۵ متر پایین تر از تاج سد می باشد، تحلیل انجام گرفت.

۲-۳- مصالح بدنه

برای بررسی رفتار سد در دوران ساخت، آبیگری و تراوش پایدار، شرایط هسته در زمان ساخت و اولین آبیگری زهکشی نشده و در حالت تراوش پایدار شرایط زهکشی شده در نظر گرفته شده است. مشخصات مصالح بدنه سد به منظور ارائه نتایج منطقی، در تحلیل ها نزدیک به مشخصات مصالح سد کرخه انتخاب شدند که به طور خلاصه در جدول ۲ ارائه شده اند.

جدول ۲) مصالح مورد استفاده در بدنه سد و پی سد ها

| ψ [deg] | C [Kpa] | زاویه اصطکاک [φ] | ضریب پواسون | مدول الاستیسته [Mpa] | وزن مخصوص [kN/m^3] | مشخصات مصالح | |
|-----------------|------------|-------------------------------|-------------|-------------------------|---------------------------|----------------------|------|
| 1 | 70 | 6 | 0/4 | 3/5 | 20/2 | ساخت (uu) | هسته |
| 2 | 50 | 12 | 0/4 | 2/5 | 20/2 | آبیگری (cu) | |
| 2 | 20 | 22 | 0/3 | 1/5 | 20/2 | تراوش پایدار (CD) | |
| 10 | 0 | 39 | 0/27 | 10/2 | 20/5 | پوسته | |
| 8 | 0 | 35 | 0/25 | 7 | 19/5 | فیلتر | |
| 12 | 5 | 39/4 | 0/3 | 100 | 22 | پی | |

۳- نتایج تحلیل ها

۳-۱- نشست حداکثر در مراحل مختلف

برای ارزیابی رفتار سد داشتن تغییر شکل های دقیق سد از جمله نشست حداکثر در انتهای ساخت مورد نیاز است. جدول ۳ مقادیر نشست سدهای تحلیل شده را بعد از اتمام مراحل مختلف نشان می دهد. ملاحظه می شود که حداکثر مقادیر نشست در زمان انتهای ساخت بوده است. بیشترین نشست در زمان اتمام ساخت در سد با هسته مایل ۲ دیده می شود که علت آن را می توان مقاومت کم مصالح هسته ذکر کرد که بخش اعظمی از سطح لغزش احتمالی

را در بر دارد. در مرحله آبیگری و پس از آن در مرحله تراوش پایدار به دلیل کاهش تنش مؤثر، نشست به صورت توری و به سمت بالا می باشد. در مرحله تراوش پایدار نکته قابل ذکر از افزایش نشست با مایل شدن هسته نسبت به مرحله آبیگری و بروز نشست ثانویه می باشد.

جدول ۳: مقایسه نتایج نشست در سدهای تحلیل شده

| انواع سد | اتمام ساخت | آبیگری | تراوش پایدار |
|------------------------|--------------|--------------|--------------|
| 50 متری با هسته قائم | 34 سانتی متر | 32 سانتی متر | 30 سانتی متر |
| 50 متری با هسته مایل 1 | 32 سانتی متر | 29 سانتی متر | 30 سانتی متر |
| 50 متری با هسته مایل 2 | 35 سانتی متر | 28 سانتی متر | 32 سانتی متر |

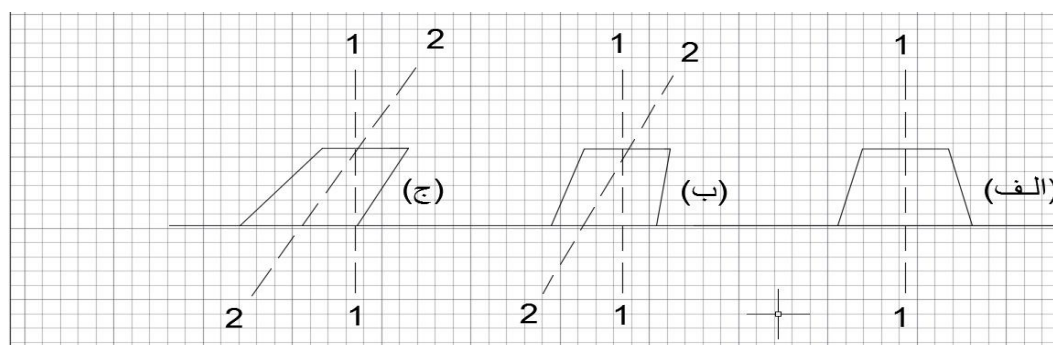
۳-۲- تحلیل نشست ها

با مدلسازی دقیق هندسی و اعمال روند تدریجی ساخت و آبیگری با مدل موهر - کولمب نشست های متناظر محاسبه گردیده است. در شکل های بعدی توزیع نشست در ارتفاع هسته سد به ترتیب برای سه مرحله اتمام ساخت، آبیگری و تراوش پایدار در دو محور ۱-۱ و ۲-۲ که بطور شماتیک در شکل ۲ مشاهده می شود ارائه گردیده است.

در شکل ۳ دیده می شود که بیشترین نشست در کلیه هسته ها در یک سوم میانی هسته ها می باشد. محور ۱-۱ به خاطر مقاومت کم مصالح هسته نسبت به محور ۲-۲ دارای مقادیر نشست بیشتری می باشد که در هسته مایل ۲ به بیشترین مقدار می رسد. همچنین در محور ۱-۱ نشست ها در هر سه هسته متفاوت در یک محدوده ای قرار دارند.

در شکل ۴ دیده می شود که با آبیگری سد و اعمال فشار آب بر هسته سدها در میزان نشست در محور ۲-۲ چندان تأثیری ایجاد نشده است، ولی در محور ۱-۱، هسته مایل ۲ نسبت به هسته های دیگر نشست کمتری را نشان می دهد. این روند در هسته های قائم بدون تغییر باقی می ماند.

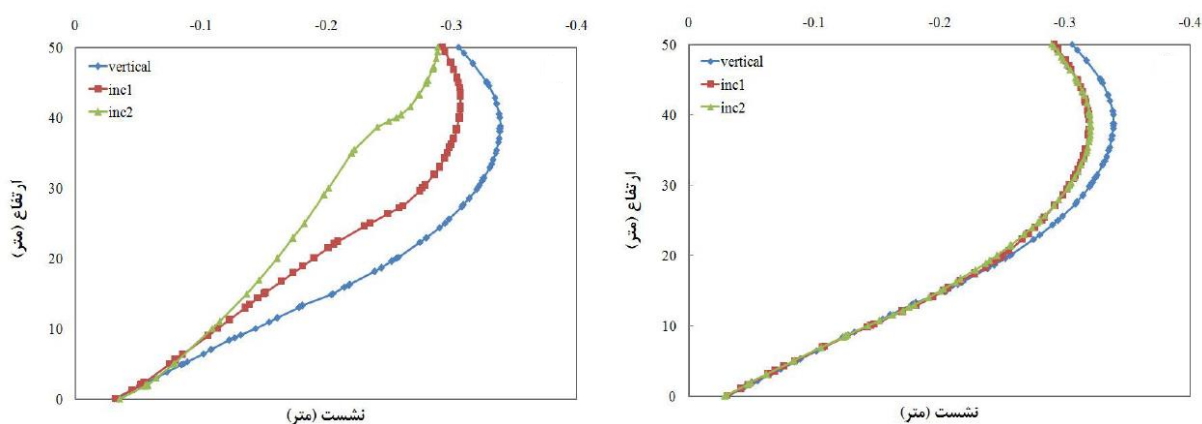
با توجه به شکل ۵ در مرحله تراوش پایدار، بروز نشست ثانویه در هسته مایل ۲ در محور ۱-۱ دیده می شود که این پدیده در هسته های قائم از شدت کمتری برخوردار می باشد.



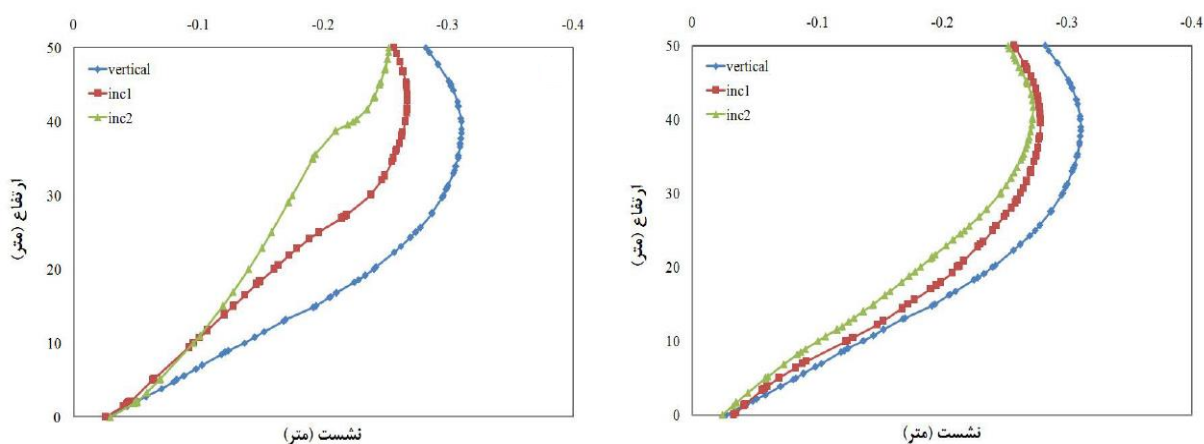
شکل ۲) شکل شماتیک محورهای تحلیل شده نشست : الف) هسته قائم -- ب) هسته مایل ۱ - ج) هسته مایل ۲

۳-۳- اثر نحوه اجرا و روند تحکیم بر مقادیر نشست

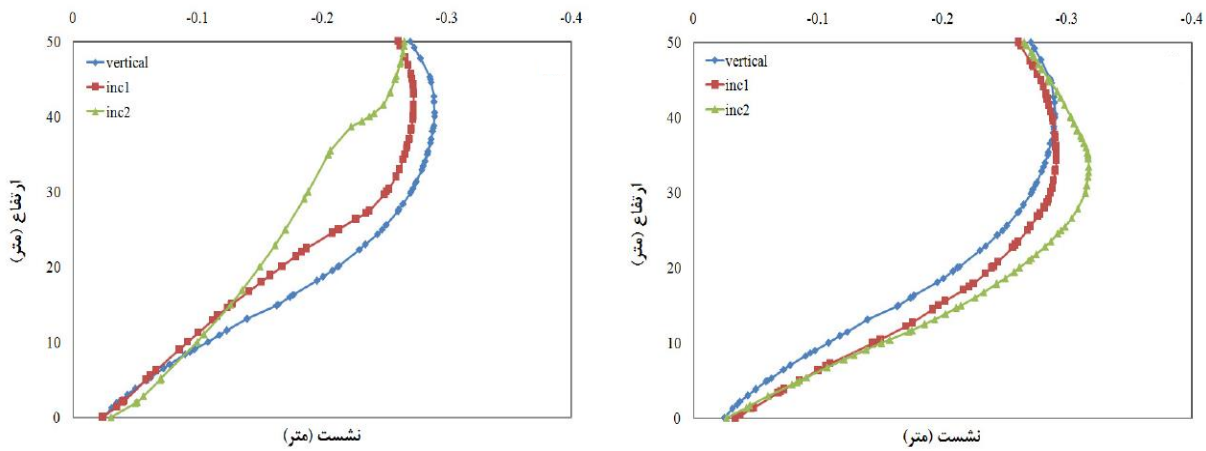
در گام بعدی اثر زمان در ساخت بدنه سد و تعداد آنالیز تحکیم و تأثیر آن بر روی نشست مورد بررسی قرار می گیرد. مدلسازی دوران ساخت بدنه سد به سه طریق انجام گرفت. در حالت اول فرض می شود لایه ها در ضخامت ۵ متری اجرا شده و پس از ساخت، هر لایه به مدت دو ماه تحکیم داده می شود. در حالت دوم ارتفاع سد به سه قسمت تقسیم شده و هر بار پس از اجرای هر لایه به ضخامت یک سوم ارتفاع سد، مدت ۶ ماه برای تحکیم لایه ها در نظر گرفته شد. در حالت سوم، نصف ارتفاع سد به صورت سریع اجرا شده و سپس به مدت ۹ ماه فرصت داده می شود تا لایه اجرا شده تحکیم یابد. سپس نصف ارتفاع باقیمانده اجرا و تحکیم می شود. در نهایت انتهای ساخت در هر سه حالت فشار آب حفره ای اضافی ایجاد شده ناشی از تحکیم به صفر رسانده می شود. با توجه به اشکال ۳ تا ۵ اثر آنالیز تحکیم در هر دو حالت دیده می شود. این پدیده در محور ۲-۲ در هسته قائم از شدت بیشتری و در هسته مایل ۲ کمتر می باشد.



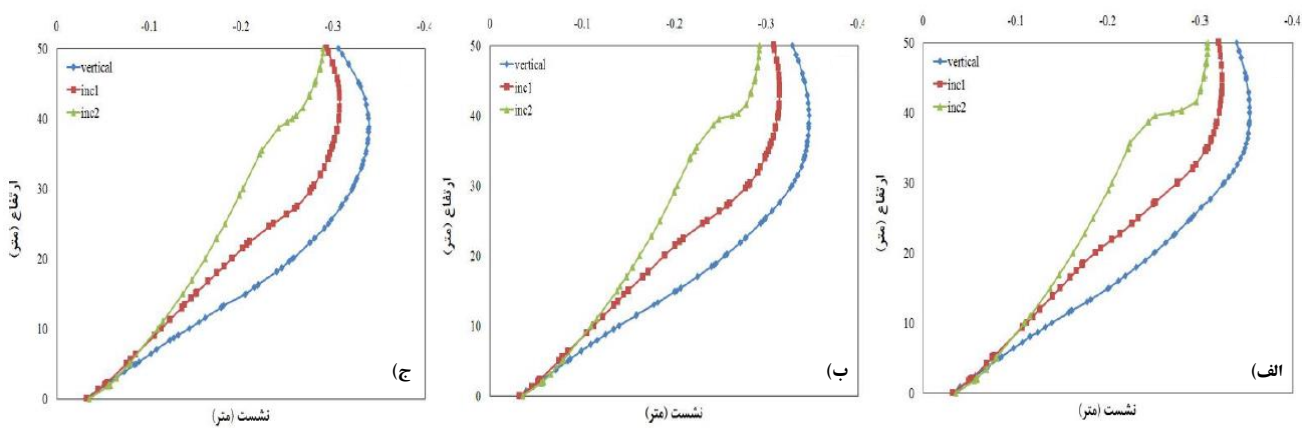
شکل ۳) مقایسه نشست در طول ارتفاع سد در مرحله اتمام ساخت (شکل سمت راست: محور ۱-۱ و شکل سمت چپ محور ۲-۲)



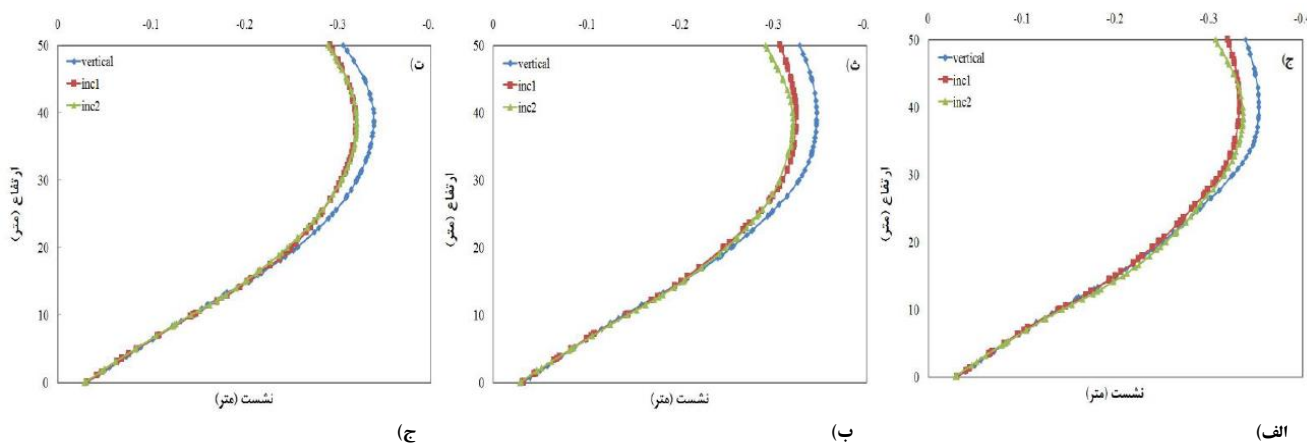
شکل ۴) مقایسه نشست در طول ارتفاع سد در مرحله آجگیری (شکل سمت راست: محور ۱-۱ و شکل سمت چپ محور ۲-۲)



شکل ۵) مقایسه نشست در طول ارتفاع سد در مرحله تراوش پایدار (شکل سمت راست: محور ۱-۱ و شکل سمت چپ محور ۲-۲)



شکل ۶) نتایج انواع نشست تحکیم در محور ۲-۲ سد : الف) تحکیم در دو لایه - ب) تحکیم در سه لایه - ج) تحکیم مرحله ای



شکل ۷) نتایج انواع نشست تحکیم در محور ۱-۱ سد : الف) تحکیم در دو لایه - ب) تحکیم در سه لایه - ج) تحکیم مرحله ای



نتایج

در این مقاله، نتایج تحلیل های انجام شده به صورت اثر شکل هسته بر روی مقادیر نشست در هسته ارائه شد. خلاصه ای از نتایج بدست آمده به شرح زیر است:

- ۱- با بررسی تغییر مکان ها می توان دید که حداکثر نشست ۱ در صد بوده که این مقدار مناسب می باشد. با مایل شدن هسته سد نشست در مرحله اتمام ساخت کاهش پیدا می کند. همچنین ملاحظه می گردد که با مایل شدن هسته خطر پدیده لغزش در هسته افزایش پیدا می کند و این پدیده در سدهای با ارتفاع بلندتر محسوس تر است.
- ۲- روند اجرا و تحکیم سد در وقوع پدیده نشست تأثیر گذار است، به طوری که هر چه بدنه سد در تعداد لایه های بیشتر اجرا شود و پس از اجرا مدت زمان کافی جهت تحکیم لایه ها داده شود در کاهش وقوع نشست مؤثر است.
- ۳- بر اساس تحلیل های عددی صورت گرفته بیشترین نشست ها در مرحله اتمام ساخت صورت گرفته و تمرکز آن در هسته بیشتر است.
- ۴- با توجه ب اشکال ملاحظه می شود که حداکثر مقدار نشست اندازه گیری شده در فاصله یک سوم میانی ارتفاع سد از بستر آن رخ داده است که با محل مقدار حداکثر نشست حاصل از نتایج قبلی همخوانی بسیار نزدیکی دارد.

مراجع:

- 1) Marsal, R. J., "análisis de asentamientos en la presa Presidente Aleman," Oaxaca, No. 5, Instituto de Ingenieria, UNAM, Mexico City, Mexico (in Spanish), 1958.
- 2) Mahab-GHods Consulting Engineers Co., Alavian dam technical reports. Tehran, Iran, 1992-1997.
- 3) Pagano, L., Desidri, A. and Vinale F., " Interpreting Settlement Profiles of Earth Dams," JGGED, ASCE, vol. 124, No. 10, pp 923-932, 1998.
- 4) Speedie, M. G., "Dam behavior measurements". ANCOLD, Bulletin No. 30, Marsch 1970, pp27-35, 1970.
- 5) Fell, R., MacGregor, P. and Stapledon, D. Geotechnical Engineering of Embankment Dams. A.A. Balkema, p 349, 1992.

۱) کاربرد روش اجزای محدود با استفاده از PLAXIS - مولفان مهدی نیک زاد، وحید تائبی - تهران دایره دانش ۱۳۹۳