

تحلیل تنش - کرنش استاتیکی سدهای خاکی با هسته آسفالتی

رضا ضیائی مؤید^۱

مجید فاطمی^۲

چکیده:

سد مخزنی گابریک واقع در استان هرمزگان به ارتفاع ۴۱ متر بر روی بستر آبرفتی به ضخامت ۱۳ متر قرار دارد. یکی از گزینه های مطرح در مطالعات مرحله اول این طرح، سدخاکی با هسته آسفالتی می باشد. در این طرح بنا بر ملاحظات طراحی، هسته آسفالتی بر روی پی آبرفتی قرار گرفته و در زیر آن دیواره آب بند جهت کنترل تراوش در پی منظور شده است. با توجه به قرار گرفتن هسته آسفالتی بر روی دیواره آب بند و پوسته سد بر روی پی آبرفتی، احتمال ایجاد نشستهای نامتقارن در مراحل ساخت و آبگیری سد وجود دارد که می تواند در رفتار بدنه سد و بالاجهت هسته آسفالتی مؤثر باشد. به منظور بررسی این موضوع، تنشها و تغییر شکلهای بدنه و پی سد در مراحل ساخت و آبگیری به کمک تحلیل دوبعدی به روش اجزاء محدود محاسبه گردیده است. مقاله حاضر به ارائه و بحث در خصوص نتایج این تحلیلها اختصاص دارد.

^۱ امور سدسازی-مهندسین مشاور لار

^۲ امور سدسازی-مهندسین مشاور لار

۱- مقدمه

سدهای با هسته بتن آسفالتی یکی از گزینه های مطرح در طراحی سدهای خاکی و سنگریزه ای بویژه در مناطقی که از نقطه نظر وجود مصالح ریزدانه با کیفیت و کمیت مناسب جهت اجرای هسته رسی کمبود وجود داشته باشد می باشند. از مزایای این نوع سد میتوان به عدم وجود درز و آب بندی بسیار مناسب، عدم حساسیت اجرا به شرایط آب و هوایی، امکان آبیگری حین ساخت، قابلیت خود ترمیمی مصالح هسته، تغییر شکل پذیری و انعطاف پذیر بودن، دوام و مقاومت در مقابل نشت مداوم، مقاومت نسبی در مقابل زلزله و ایمنی در مقابل حملات جنگی اشاره کرد. موارد متعددی از این نوع سدها در کشورهای مختلف دنیا ساخته شده است. دو کشور آلمان و نروژ در این زمینه در دنیا پیشرو هستند. در کشور ما نیز با توجه به بحران آب و توجه به امر سدسازی بررسی نحوه طراحی و اجرای این نوع سدها از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

۲- کلیات

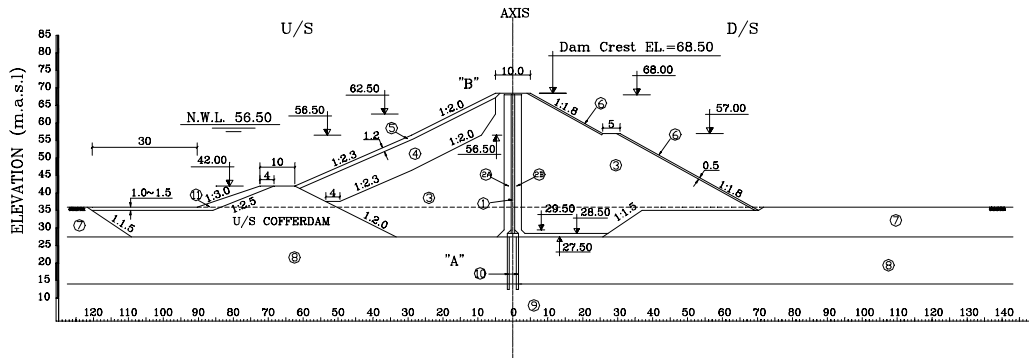
سد مخزنی گابریک به ارتفاع ۴۱ متر بر روی بستر آبرفتی به ضخامت ۱۳ متر قرار دارد. محل سد در استان هرمزگان به فاصله ۱۰۸ کیلومتری شمال شرقی بندرجاسک در حوزه آبریز رودخانه گابریک واقع شده است. یکی از گزینه های مطرح در مطالعات مرحله اول این طرح، سد خاکی با هسته آسفالتی می باشد. در این طرح، هسته آسفالتی بر روی پی آبرفتی قرار گرفتن است و در زیر آن دیواره آب بند جهت کنترل تراوش در پی منظور شده است. با توجه به قرار گرفته هسته آسفالتی بر روی دیواره آب بند و همچنین قرارگیری پوسته سد بر روی پی آبرفتی، احتمال ایجاد نشستهای نامتقارن در مراحل ساخت و آبیگری سد وجود دارد که میتواند در رفتار بدنه سد و بالاخص هسته آسفالتی مؤثر باشد. جهت بررسی این موضوع یک سری تحلیل اجزاء محدود نرم افزار FEADAM84 (Duncan et. al. 1984) در مراحل ساخت و آبیگری انجام شده است. پی سد از دو لایه تشکیل شده که لایه رویی از مصالح ماسه لای دار بوده و بالاتر از تراز رودخانه قرار دارد. لایه بالایی در بالادست کلاً برداشت شده در حالیکه در پائین دست بطور جزئی برداشت شده است. در این بررسی اثر مدول تغییر شکل هسته، سختی مصالح پی آبرفتی درشت دانه و میزان برداشت آبرفت ریزدانه بر روی نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

۳- روش تحلیل

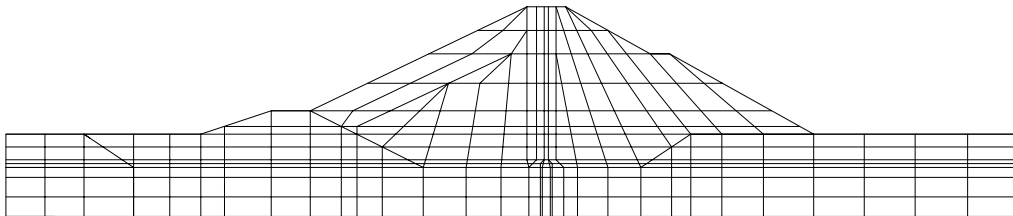
تحلیل اجزاء محدود با فرض رفتار خطی برای مصالح هسته و دیواره آب بند و رفتار غیرخطی برای سایر مصالح صورت گرفته است. در این روش بارگذاری ناشی از ساخت سد و آبیگری مخزن بصورت مرحله ای در نظر گرفته شده است. تحلیل های استاتیکی سد گابریک به روش اجزاء محدود و با فرض کرنش مسطح (Plane Strain) برای مقطع عرضی حداکثر سد با استفاده از نرم افزار FEADAM84 (Duncan et. al. 1984) انجام شده است.

۴- شبیه سازی هندسی

با توجه به مشخصات هندسی ساختگاه سد، شرایط کرنش مسطح در مقطع عرضی حداکثر سد با تقریب قابل قبول برقرار می باشد. این مقطع دارای بیشترین ارتفاع هسته آسفالتی و بیشترین ضخامت آبرفت می باشد. سنگ بستر در کلیه تحلیل ها بعنوان شرایط مرزی تغییر مکان صفر منظور گردیده و بدین لحاظ در مدل هندسی بکارنرفته است. مقطع عرضی حداکثر سد که در تحلیل های استاتیکی سد گابریک مدل گردیده در شکل (۱) ملاحظه می شود. شکل (۲) شبکه اجزاء محدود بکاررفته در تحلیلهای استاتیکی سد گابریک را نشان می دهد.



شکل ۱- مقطع عرضی حداکثر سد گابریک



شکل ۲- شبکه اجزاء محدود بکار رفته در تحلیلهای استاتیکی سد گابریک

۵- رفتار مصالح

با توجه به محدود بودن مقادیر کرنش در هسته آسفالتی می توان با تقریب قابل قبول رفتار مصالح هسته را الاستیک خطی فرض نمود (Adikari, et. al. – 1988). جهت تخمین پارامترهای رفتاری مصالح هسته از مقادیر توصیه شده توسط محققان قبلی در موارد مشابه استفاده شده است (Hoeg, K., 1993 , NGI 1999). در ضمن جهت بررسی اثر تغییرات مدول تغییر شکل هسته بر روی نتایج، تحلیل ها دو مقدار مدول تغییر شکل ۱۰۰ و ۲۵۰ مگاپاسکال انجام شده است. در هر دو حالت نسبت پواسون برابر با ۰/۴۹ در نظر گرفته شده است. دیواره آب بند نیز بصورت الاستیک خطی مدل شده است و پارامترهای الاستیک آن بر اساس توصیه (ICOLD – 1985) از روی خصوصیات مصالح پی آبرفتی انتخاب شده است. رفتار سایر مصالح شامل پوسته های تراسی و سنگریزه ای، نواحی انتقالی در بالادست و پائین دست هسته، پی آبرفتی ریزدانه و درشت دانه با مدل غیرخطی هذلولی (Duncan et. Al., 1980) شبیه سازی شده است. جهت بررسی اثر سختی مصالح پی آبرفتی بر روی تنش ها و کرنشهای هسته آسفالتی سه مقدار مختلف برای پارامتر مدول الاستیک هسته در مدل هذلولی ($K = 200, 400, 600$) در نظر گرفته شده است.

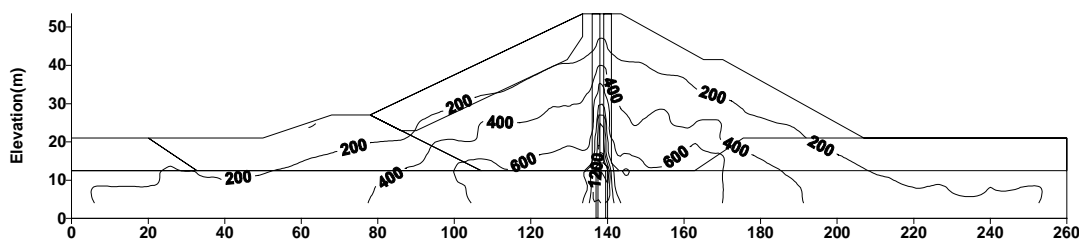
۶- نتایج تحلیلهای

توزیع تنشها و نحوه انتقال بار در بخشهای مختلف بدنه سد، مقادیر کرنش جانبی در هسته آسفالتی و بروز یا عدم بروز گسیختگی برشی و کششی در هسته آسفالتی از موارد مهمی هستند که در هر تحلیل مورد توجه قرار گرفته اند. در بررسی این موارد تأثیر پارامترهایی نظیر مدول تغییر شکل هسته آسفالتی سختی پی آبرفتی درشت دانه و میزان برداشت آبرفت ریزدانه مورد توجه می باشد.

۱-۶- توزیع تنشها

توزیع تنشهای قائم در خاتمه ساخت سد در شکل (۳) ارائه شده است. در توزیع تنشهای قائم، افزایش شدیدی در گذر از پوسته و لایه های انتقالی به سمت هسته آسفالتی مشاهده می شود و علت این امر تفاوت قابل توجه بین سختی و مدول تغییر شکل هسته آسفالتی و پوسته شن و ماسه ای بوده که منجر به نشست نابرابر آنها و انتقال بار از پوسته به هسته شده است. مقادیر تنش قائم در هسته آسفالتی تا دوبرابر فشار رو بار نیز می رسد که مبین انتقال بار قابل ملاحظه به هسته آسفالتی است.

STATIC ANALYSIS OF GABRIK DAM

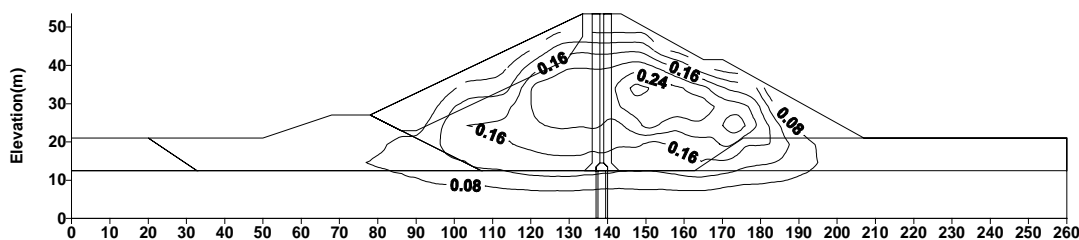


شکل ۳- توزیع تنشهای قائم در خاتمه ساخت (برحسب Kpa)

۲-۶- توزیع تغییر مکانها

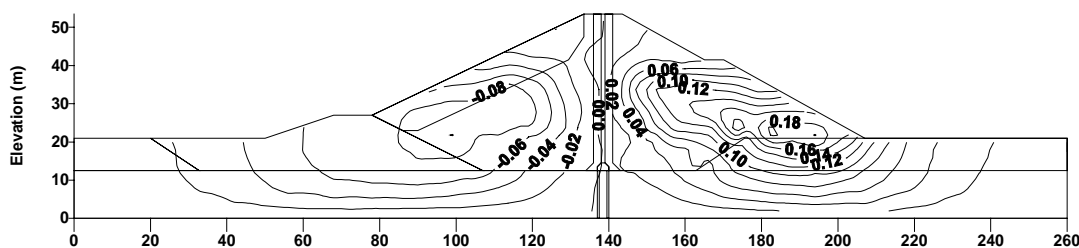
توزیع تغییر مکانهای بدنه و پی سد در خاتمه ساخت در شکلهای (۴) و (۵) ارائه شده است. در شکل (۴) منحنی های هم نشست در پایان ساختمان رسم شده است. حداکثر نشست در میانه ارتفاع در پوسته پائین دست و در مجاورت ناحیه انتقالی رخ داده است که برابر با ۰/۲۸ متر می باشد و با حرکت به سمت شیلروانها به سرعت کاهش می یابد. عدم تقارن موجود در توزیع نشستهای قائم در پوسته بالادست و پائین دست مربوط به عدم تقارن در خصوصیات مصالح و هندسه سد می باشد.

STATIC ANALYSIS OF GABRIK DAM



شکل ۴- توزیع تغییر مکانهای قائم در خاتمه ساخت (برحسب متر)

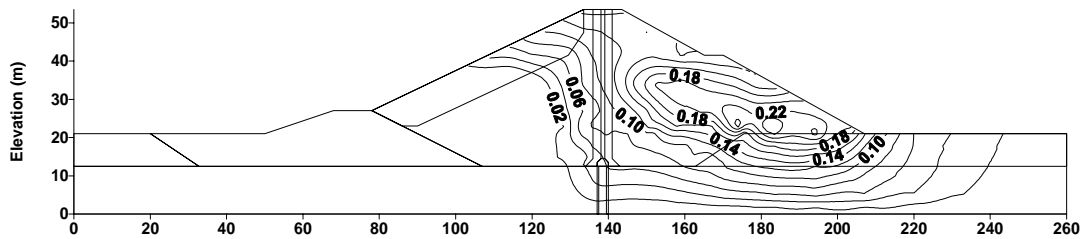
STATIC ANALYSIS OF GABRIK DAM



شکل ۵- توزیع تغییر مکانهای افقی در خاتمه ساخت (برحسب متر)

توزیع جابجایی های افقی در خاتمه ساخت سد در شکل (۵) ملاحظه می گردد. بیشترین جابجایی افقی در پوسته پائین دست اتفاق افتاده و برابر با ۰/۱۸ متر به سمت پائین دست می باشد. حداکثر جابجایی افقی در پوسته بالادست برابر با ۰/۰۸ متر است. در مجموع جابجایی های افقی سد در پایان ساختمان مقادیر نسبتاً کمی داشته و مبین وضعیت پایدار آن در این شرایط است. جابجایی های افقی پس از آبیگری در شکل (۶) رسم شده است در این شرایط حرکت نقاط به سمت پائین دست بوده و بیشترین جابجایی افقی در پوسته پائین دست برابر با ۰/۲۴ متر می باشد. حداکثر تغییر مکان قائم هسته آسفالتی در حالت خاتمه ساخت ۰/۲۲ متر می باشد. تغییر مکان افقی هسته آسفالتی در اینحالت ناچیز بوده در حالیکه پس از آبیگری به حداکثر ۰/۱۴ متر در تاج سد می رسد.

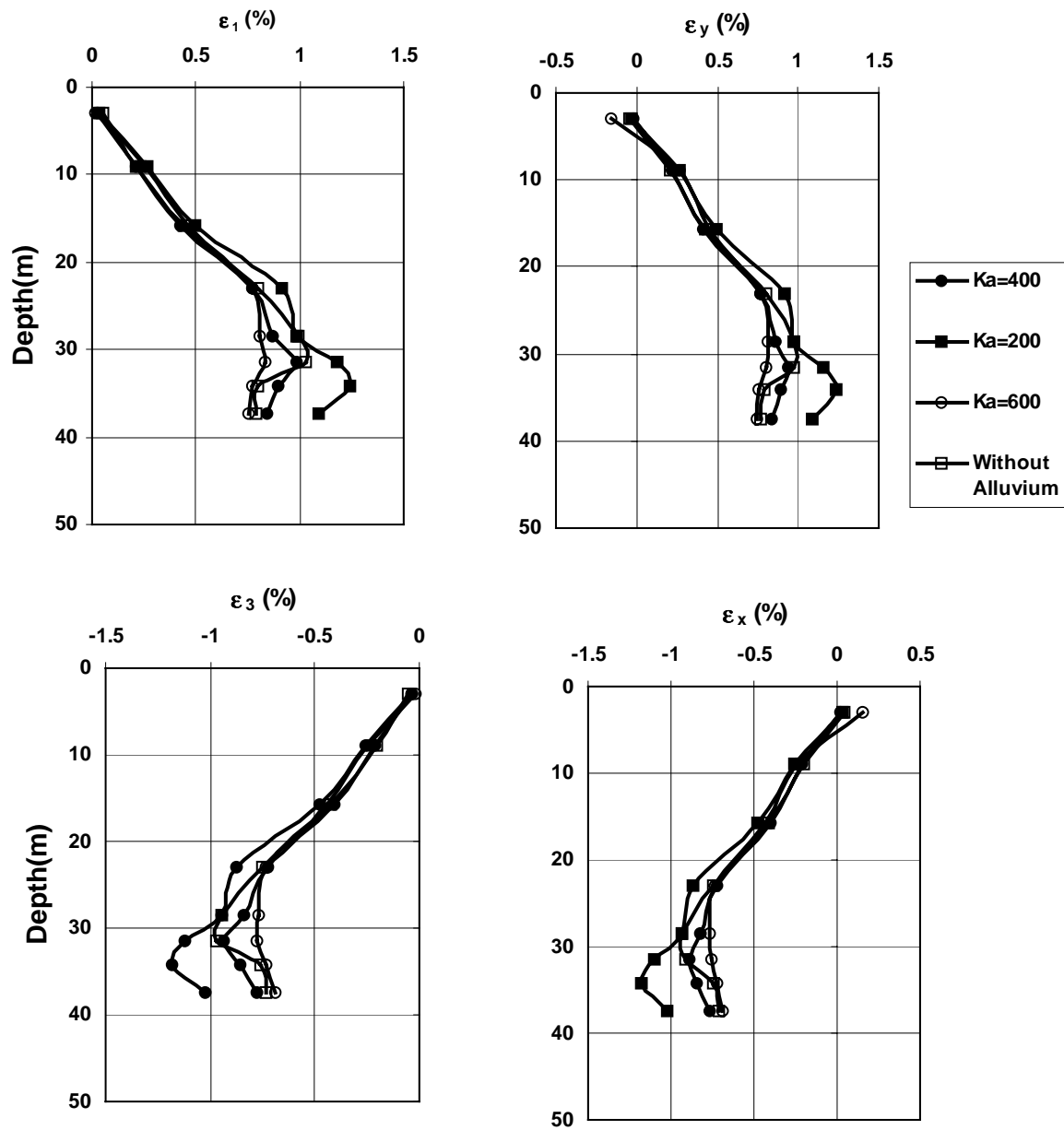
STATIC ANALYSIS OF GABRIK DAM



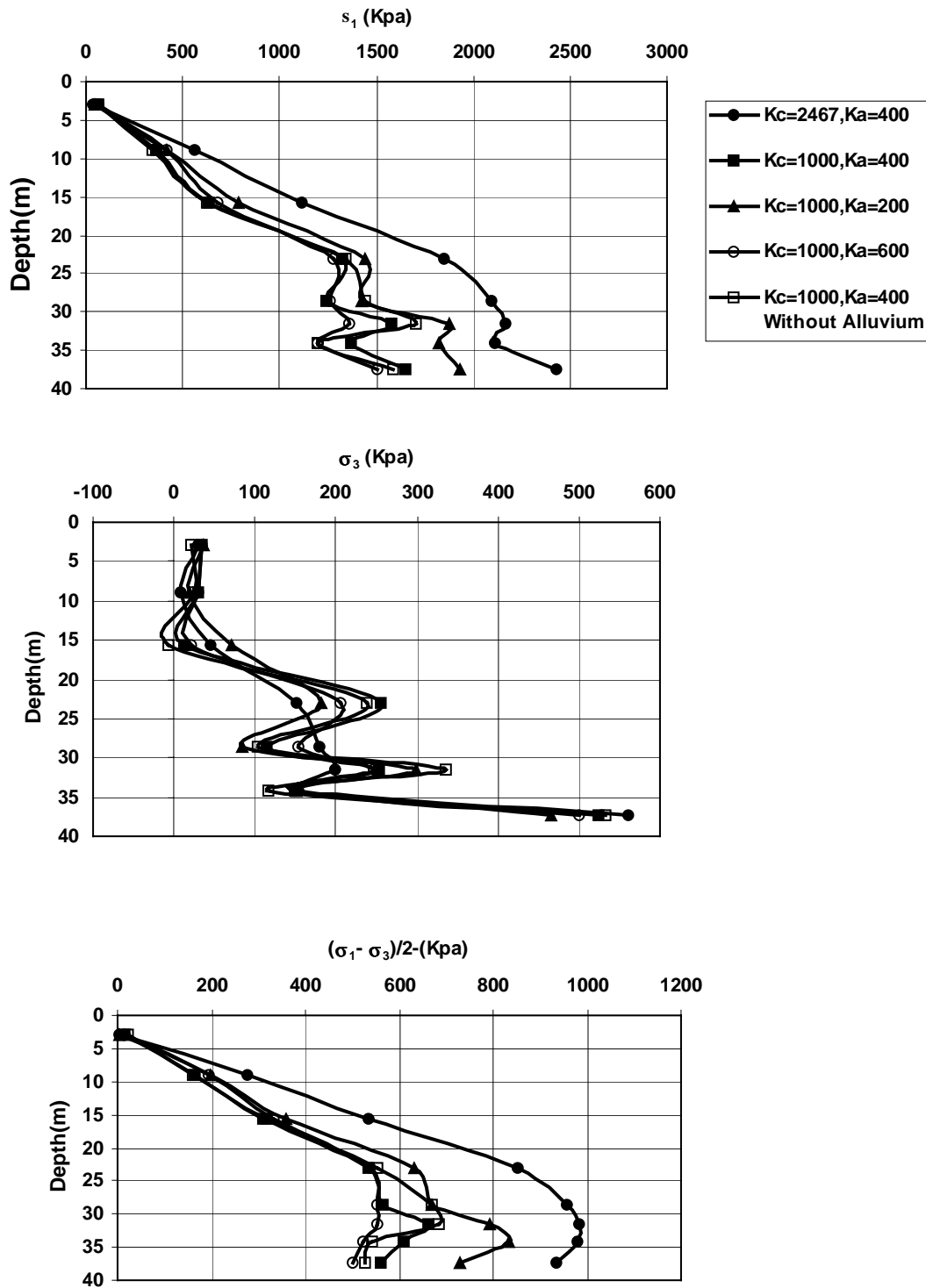
شکل ۶- توزیع تغییر مکانهای افقی پس از آبیگری (بر حسب متر)

۶-۳- کنترل گسیختگی و کرنش جانبی در هسته

مقادیر کرنش های جانبی در المانهای هسته آسفالتی در حالات مختلف در شکل ۷ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود مقادیر کرنشهای جانبی در هسته به مقدار ۱/۲ درصد محدود می شود لذا از نقطه نظر تغییر نفوذپذیری مشکلی وجود ندارد (Adikari, et. al. 1988). مقادیر تنشهای برشی حداکثر در هسته آسفالتی در حالات مختلف در شکل (۸) ارائه شده است که با توجه به نتایج آزمایشهای مصالح هسته متراکم آسفالتی در موارد مشابه (Hoeg, 1993) احتمال گسیختگی برشی یا کششی هسته آسفالتی پس از آبیگری ضعیف است.



شکل ۷- تغییرات مقادیر کرنشهای جانبی در هسته آسفالتی در حالات مختلف



شکل ۸- دیاگرام تغییرات تنشها در هسته آسفالتی پس از آبگیری

۶-۴- بررسی اثر مدول تغییر شکل هسته

همانطور که گفته شد جهت تخمین پارامترهای رفتاری مصالح هسته از مقادیر توصیه شده توسط محققان در پروژه های مشابه استفاده شده است. بدین ترتیب تحلیلیها با دو مدول تغییر شکل ۱۰۰ و ۲۵۰ مگاپاسکال انجام شده و نتایج بدست آمده شامل تغییرات مقادیر تنشها و کرنشها و همچنین تغییر مکانها در هسته مورد بررسی قرار گرفته است.

همانطور که در شکل (۸) مشاهده می شود با افزایش سختی مصالح هسته، مقدار تنش اصلی حداکثر در تمامی نقاط هسته در عمق افزایش یافته که نشان دهنده جذب تنش بیشتر توسط هسته آسفالتی در اینحالت می باشد. همچنین با افزایش سختی مصالح هسته، مقدار تنش برشی حداکثر در تمامی نقاط هسته افزایش یافته است. در هر دو حالت، مقادیر تنشهای برشی حداکثر در هسته آسفالتی در حدی است که احتمال گسیختگی برشی در هسته ضعیف می باشد با بررسی تغییرات کرنشهای افقی و قائم در هسته میتوان نتیجه گرفت که با کاهش سختی مصالح هسته، کرنشهای قائم و افقی افزایش یافته اند اما در کلیه حالات مقادیر کرنشهای افقی به ۱/۲ درصد محدود می باشد و در نتیجه هسته آسفالتی پس از تغییر شکل همچنان نفوذناپذیر باقی خواهد ماند.

۶-۵- بررسی اثر میزان برداشت آبرفت ریزدانه در پائین دست سد

یکی از مسائل مهم از نقطه نظر اقتصادی، میزان برداشت آبرفت می باشد. در این خصوص نیز جهت بررسی اثر میزان برداشت آبرفت ریزدانه بر روی نتایج، تحلیلهایی انجام شده است. همانطور که در شکلهای (۷)، (۸)، مشاهده می شود برداشت کلی آبرفت ریزدانه از زیر پوسته پائین دست عملاً تأثیر چندانی بر روی مقادیر تنشها و کرنشها در هسته آسفالتی ندارد. لذا برداشت آبرفت در محدوده زیر پوسته پائین دست کمک چندانی به تعدیل تنشها و کرنشها در هسته نخواهد کرد.

۶-۶- بررسی اثر سختی مصالح پی آبرفتی

مهمترین مسئله در رفتار تنش - کرنش سد گابریک، بررسی اثر وجود پی آبرفتی در مقادیر تنشها و کرنشها در هسته آسفالتی می باشد. در این راستا پارامتر مدول هدلولی (K) برای مصالح پی آبرفتی در محدوده ۲۰۰ تا ۶۰۰ در نظر گرفته شده است. جهت بررسی اثر سختی پی آبرفتی بر روی نتایج در هر مورد تحلیلهایی انجام شده است. در شکل (۸) تغییرات تنشها در هسته آسفالتی پس از آنگیری در حالات مختلف از نظر سختی پی آبرفتی ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود مقادیر تنشها در محدوده عمق تقریبی ۲۰ متری از تاج سد (میان ارتفاع سد) در حالات مختلف سختی پی تقریباً یکسان است اما در محدوده عمق زیر ۲۰ متر (نیمه پائینی سد) با کاهش سختی پی آبرفتی مقادیر تنشهای اصلی حداکثر و تنشهای برشی در المان های هسته آسفالتی افزایش یافته است. در شکل (۷) دیگرام تغییرات کرنشها در هسته آسفالتی پس از آنگیری در حالات مختلف از نظر سختی پی آبرفتی ارائه شده است. همانطور مشاهده می شود مقادیر کرنشها در محدوده نیمه بالایی سد در حالات مختلف تقریباً یکسان است اما در محدوده نیمه پائینی سد با کاهش سختی پی آبرفتی مقادیر کرنشهای قائم و افقی افزایش یافته اند

۷- نتیجه گیری

نتایج تحلیلهای تنش - کرنش استاتیکی گزینه هسته آسفالتی سد گابریک امکان بررسی رفتار سد در مراحل ساخت و آنگیری را فراهم ساخته است. در این مطالعات اثر مدول تغییر شکل هسته، سختی مصالح پی آبرفتی درشت دانه و میزان برداشت آبرفت ریزدانه بر روی مقادیر تنشهای اصلی، تنشهای برشی حداکثر و کرنشهای قائم و افقی بررسی شده است. همچنین توزیع تنشهای قائم در خاتمه ساخت، توزیع تغییر مکانهای افقی و قائم در خاتمه ساخت و توزیع تغییر مکانهای افقی پس از آنگیری نیز ارائه شده اند. نتایج بدست آمده نشان میدهند که در حالات مختلف، مقادیر کرنشهای افقی در المانهای هسته کمتر از ۱/۲ درصد بوده لذا می توان پیش بینی نمود که پس از تغییر شکل هسته آسفالتی همچنان نفوذناپذیر باقی می ماند. با توجه به تنشهای برشی بدست آمده در هسته احتمال گسیختگی برشی در المانهای هسته ضعیف می باشد. با افزایش سختی مصالح هسته، تنش اصلی حداکثر در تمامی نقاط هسته

در عمق افزایش یافته است که نشان دهنده جذب بیشتر تنش توسط هسته آسفالتی می باشد. با افزایش سختی مصالح هسته مقدار تنش حداکثر برشی نیز در تمامی نقاط هسته در عمق افزایش یافته است. با کاهش سختی مصالح هسته، کرنشهای قائم و افقی نیز افزایش یافته اند. برداشت کلی آبرفت ریزدانه از زیر پوسته پائین دست عملاً تاثیر چندانی بر روی مقادیر تنشها و کرنشها در هسته آسفالتی ندارد. مقادیر تنشها و کرنشها پس از آبرگیری در نیمه بالایی سد در حالات مختلف سختی پی آبرفتی تقریباً یکسان است در صورتیکه در نیمه پائینی سد با کاهش سختی پی آبرفتی مقادیر تنشهای اصلی حداکثر و تنشهای برشی حداکثر در المانهای هسته آسفالتی افزایش یافته اند. همچنین کرنشهای قائم و افقی نیز با کاهش سختی پی آبرفتی افزایش یافته اند.

سپاسگذاری:

از زحمات و همکاری صمیمانه کلیه همکاران در شرکت مهندسین مشاور لار بویژه جناب آقای مهندس محبی و جناب آقای مهندس طبائی و جناب آقای دکتر نجمائی که پشتیبان ما در انجام این پروژه بوده اند و همچنین از زحمات سرکار خانم مظاهری که در تایپ و تهیه این مقاله ما را یاری فرمودند سپاسگذاری و قدردانی می گردد.

مراجع

- گزارش مطالعات مرحله اول طراحی بدنه سد مخزنی گابریک (در دست تهیه)، مهندسین مشاور لار.
- Adikari, G. S. N., Valstad, T., Kjarnsli, B., and Hoeg, K., (1988), " Behaviour of Storvatn Dam, Norway. A Case of Prediction Versus Performance," NGI Publication, No. 173, Olso.
- Duncan, J.M., Byrne, P., Wong, K.S., Mabry, P.,(1980), " Strength, Stress-Strain and Bulk Modulus Parameters for Finite Element Analysis of Stresses and Movments in Soil Masses", Department of Civil Engineering, University of California, Berkely.
- Duncan, J. m., Seed, R.B., Wong, K.S., Ozawa, y.,(1984)" FEADAM84 : Users Manual, " Department of Civil Engineering, Stanford University.
- Hoeg, K.(1993), " Asphaltic Concrete Cores for Embankment Dams.," Norwegian Geotechnical Institute.
- ICOLD (1985), Filling Materials for Watertight Cutoff Walls." International Commission on Large Dams ,Bulletin 51.
- Norwegian Geotechnical Institute (1999), "Asphalt Core Embankment Dams, Effects of Compaction Method on Stress – Strain – Strength Characteristics of Asphalt Concrete."