بررسی تأثیر مدل‌سازی لایه‌به‌لایه در رفتار استاتیکی سدهای خاکی

مهدی شیردل [۱] و علی قنبری *[۲]

[۱] کارشناسی ارشد مهندسی ژئوتکنیک، عضو باشگاه پژوهشگران جوان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مراغه

[۲] دانشیار گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تربیت معلم

چکیده

تحلیل سدهای خاکی با مدل‌سازی در مرحله ساخت لایه به لایه و تراوش پایدار شروع شده و نهایتاً به مرحله اعمال زلزله در مناطق لرزه‌خیز منتهی می‌شود. با توجه به اینکه مدل‌سازی استاتیکی در ۲ مرحله ذکر شده به عنوان شرایط اولیه برای مدلسازی دینامیکی محسوب می‌شود لذا این بخش از مدلسازی از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. جهت بررسی تأثیر تعداد لایه‌های بکار رفته در مدلسازی مرحله پایان ساخت، سد مسجد سلیمان به عنوان مطالعه موردی انتخاب و با استفاده از روش اجزاء محدود در ۲ مرحله همراه با تغییر تعداد لایه‌ها به مدل‌سازی و بررسی پارامترهای مختلف پرداخته شده است. نتایج بدست آمده در امتداد خط مرکزی مقطع، حاکی از اختلاف عمده در میزان جابجایی‌ها و تنش برشی XY در مدل تک لایه نسبت به مدل‌های چند لایه در مرحله پایان ساخت می‌باشد. همچنین با اضافه شدن آب مخزن و مدل‌سازی مرحله تراوش پایدار تنها در میزان تغییرمکان قائم اختلاف فاحشی مشاهده شده است. نهایتاً با مقایسه پارامترهای حاصل از مدل‌های چند لایه در ۵ نقطه خاص مورد ارزیابی، تعداد ۱۰ لایه برای انطباق عینی رفتار سد با نتایج بدست آمده از مدل‌سازی مناسب تشخیص داده شده است.

واژگان کلیدی: سد خاکی، سد مسجد سلیمان، تحلیل لایه به لایه، تحلیل تراوش پایدار، مرحله پایان ساخت.

۱- مقدمه

سدهای خاکی در مرحله حین ساخت و در طول زمان بهره‌برداری در معرض انواع تنش‌های مختلفی از جمله تنش‌های حاصل از نشست سد، تنش‌های حاصل از وزن بدنه سد، فشار استاتیکی آب، نیروی دینامیکی امواج، زلزله و غیره قرار دارند که جهت ایجاد مقاومت در برابر آنها باید تمامی ملاحظات لازم در این خصوص در نظر گرفته شده و طرح ایمن برای سد اجرا گردد. تعداد لایه‌های استفاده شده برای مدل‌سازی استاتیکی و دینامیکی یکی از ملاحظاتی است که در طراحی به عنوان یک پارامتر تأثیرگذار در نظر گرفته می‌شود. لذا اولین بار Brown و Goodman [۱] و سپس Clough و Woodward [۲] اثر ساخت لایه به لایه را برای سدهای خاکی مورد بررسی قرار دادند. محققین مذکور تحلیل یک لایه‌ای و چند لایه‌ای را برای یک سد همگن بر روی پی صلب مورد ارزیابی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که اختلاف بسیار فاحشی در مورد تغییر شکل‌ها در بدنه سدهای مدل‌سازی شده وجود دارد. Eisentein [۳] نشان داد که ده لایه برای یکسان ماندن تقریبی میزان تنش‌ها و تغییر شکل‌ها نسبت به افزایش تعداد لایه‌ها کفایت می‌کند. Elgamal و همکاران [۴] با بررسی سدهای خاکی و مدل‌سازی آنها، ۸ لایه را برای رسیدن به نتایج مطلوب کافی دانستند. Patts و Zdrarkovic [۵] در مورد لایه‌بندی سدهای خاکی مطالعاتی انجام دادند که در نهایت نتیجه مطالعات آنها کفایت ۸ تا ۱۰ لایه را برای مدلسازی مرحله پایان ساخت نشان داد. با توجه به اختلاف موجود در تعداد لایه‌های پیشنهادی محققین مختلف و همچنین جهت بررسی دقیق تغییرات رخ داده بر روی پارامترهای مؤثر مورد نظر در مرحله تراوش پایدار بعد از مرحله پایان ساخت، سد مسجد سلیمان به عنوان مطالعه موردی انتخاب و با استفاده از روش اجزاء محدود مدل‌سازی شده است.

۲- معرفی مدل و سد مسجد سلیمان

طرح سد و نیروگاه مسجد سلیمان در استان خوزستان و بر روی رودخانه کارون احداث شده است. بدنه اصلی سد به حجم ۱۳/۵ میلیون مترمکعب، ارتفاع ۱۷۷ متر از پی، طول تاج ۴۸۰ متر، عرض تاج ۱۵ متر، عرض سد در پی ۷۸۰ متر و حجم حفاری ۱/۸ میلیون متر مکعب می‌باشد [۶]. برای مدل‌سازی استاتیکی سد مسجد سلیمان از نرم‌افزار (Sigma/w) که زیر مجموعه‌ای از نرم‌افزار جامع مهندسی خاک (Geostudio-Geoslope 2007) می‌باشد، استفاده شده است. جهت انجام تحلیل‌های استاتیکی، مقطع عرضی بحرانی براساس

Archive of SID

www.SID.ir

* نویسنده مسئول

دریافت ۸۹/۴/۲۹ پذیرش ۸۹/۱۲/۳

جانمایی و مقاطع ارائه شده در آلبوم نقشه‌های فنی بدنه سد استخراج گردیده است. در مقطع بحرانی مورد نظر، ارتفاع سد از پی برابر ۱۷۰ متر و عرض تاج معادل ۱۵ متر در نظر گرفته شده است. مدل مذکور با در نظر گرفتن کرنش صفحه‌ای و با ترکیبی از المان‌های مثلثی و مستطیلی شبیه‌سازی شده است. در شکل (۱) نمایی از سد مسجد سلیمان ارائه شده است.

در مدل حاضر سعی شده تا ابعادی مناسب برای المان‌ها انتخاب گردد. به همین منظور، چندین مدل با ابعاد المان‌های متفاوت ساخته شده و نهایتاً بهترین اندازه المان‌ها از فرآیند سعی و خطا در ساخت مدل استخراج گردیده است. مصالح پوسته بالادست و پایین‌دست، فیلترهای بالا و پایین‌دست، هسته و نهایتاً پی به طور جداگانه، در ۳ لایه تفکیک شده، جهت مدلسازی تغییر سختی مصالح در ارتفاع منظور شده است و در هر یک از نواحی و لایه‌ها برای مدل‌سازی دقیق از خصوصیات مصالح مربوط به آن ناحیه و لایه استفاده شده است. همچنین جهت اجتناب از تأثیرگذاری مرزها بر نتایج بدست آمده، مرزهای مدل به اندازه کافی (در جهت افق ۳ برابر بیشترین مقطع عرضی بدنه و در جهت قائم ۳ برابر ارتفاع سد) دور انتخاب شده است.

ساخت سد، آبگیری مخزن، تراوش و تخلیه سریع در بسیاری موارد در هسته، به عنوان زهکشی نشده و برای پوسته زهکشی شده محسوب شده و یکی از دو روش تحلیل براساس روش تنش موثر و یا تنش کل کاربرد دارد. در تحلیل براساس تنش موثر، پارامترهای مؤثر براساس سختی استخوان‌بندی مصالح مشخص می‌گردند. در چنین شرایطی طبق پیشنهاد (USBR)، روش تنش موثر برای آنالیز استاتیکی در شرایط پایان ساخت سد خاکی ارجح می‌باشد. به طور کلی در بررسی پایداری دراز مدت سد خاکی باید از پارامترهای مؤثر برای ارزیابی استفاده کرد. در این تحقیق نیز از روش تنش موثر برای بررسی مدل استفاده شده است [۷].

شکل ۱- نمایی از سد مسجد سلیمان قبل از آبگیری

۳- تحلیل لایه به لایه

با توجه به اجرای لایه به لایه سدهای خاکی و با در نظر گرفتن اثر تراکم در تغییر خواص مصالح، کاملا واضح است که برای حصول نتایج دقیق، باید سد خاکی به صورت لایه به لایه مدل گردد و بعد از اعمال هر لایه، لایه بعدی به صورت نیروی وزن روی بخش پیش ساخته قرار گیرد. برای شبیه‌سازی ساخت سد به صورت لایه به لایه ابتدا تنش‌های موجود در پی سد مشخص شده، سپس با صفر منظور کردن جابجایی پی که ناشی از وزن خود پی می‌باشد، در جهت مدل‌سازی لایه‌های مورد نظر اقدام شده است. در این مرحله تعداد لایه‌هایی که برای مدل‌سازی صحیح ساخت لایه به لایه باید استفاده شود، اهمیت می‌یابد. در عملیات اجرای واقعی ساخت لایه به لایه سدهای خاکی، بسته به ارتفاع سد از تعداد زیادی لایه خاکی که معمولاً از ضخامت ۲۰ سانتی‌متر تا ۱ متر در روز می‌تواند قابل اجرا باشد، جهت ساخت استفاده می‌گردد. اما در مدل‌سازی عددی این مرحله از ساخت با المان‌های محدود، امکان در نظر گرفتن کلیه این لایه‌ها به دلیل وقت‌گیر بودن فرآیند مدل‌سازی وجود ندارد، لذا مدل‌سازی عددی با استفاده از لایه‌های ضخیم‌تر و در مدت زمان کوتاه‌تر انجام می‌گیرد. پس از انجام تحلیل لایه به لایه با استفاده از مدل مذکور، ۶ پارامتر تغییرمکان در ۲ جهت، تنش موثر در ۲ جهت، تنش برشی XY و ماکزیمم تنش برشی به عنوان پارامترهای اصلی مورد ارزیابی قرار گرفتند. در جدول (۱) مشخصات تعداد لایه‌ها و ضخامت آنها ارائه شده است.

برای بررسی دقیق اثرات تعداد لایه‌های مدل‌سازی شده، ۵ نقطه خاص واقع بر بدنه سد درنظر گرفته شده و پارامترهای مختلف در این نقاط بررسی شده است. مشخصات نقاط مفروض در جدول (۲) و نحوه قرارگیری آنها در شکل (۲) نشان داده شده است. در جدول (۲)، H ارتفاع سد خاکی می‌باشد.

برای انجام تحلیل لایه به لایه از مشخصات مصالح ارائه شده در جدول (۳) استفاده شده است.

جدول ۱- مشخصات لایه‌ها در تحلیل لایه به لایه

تعداد لایه‌ها	۱	۵	۱۰	۱۵	۳۰
ضخامت هر لایه (متر)	۱۷۰	۳۴	۱۷	۱۱/۳	۵/۶

جدول ۲- مشخصات نقاط مورد نظر جهت بررسی پارامترها

نقاط مفروض	A	B	C	D	E
فاصله از پی	3H/4	H/2	H/2	H/2	H/4
فاصله از خط مرکزی (متر)	0	50	0	50	0

Archive of SID

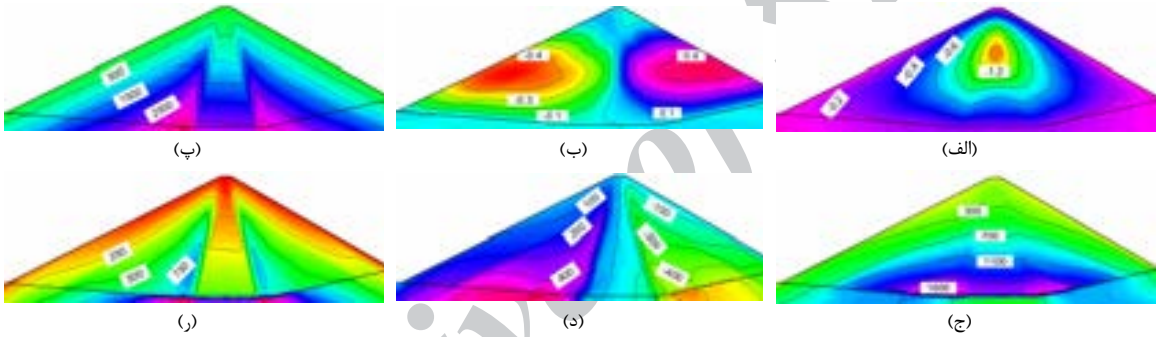
www.SID.ir

شکل ۲- چگونگی قرارگیری نقاط فرضی در نظر گرفته شده

همچنین کانتورهای پارامترهای مورد ارزیابی در شکل (۳) و نتایج بدست آمده در محور مرکزی مقطع انتخابی سد در شکل (۴) ارائه شده است. در نمودارهای ارائه شده، محور قائم نسبت به ارتفاع کل سد نرمالایز شده و به این ترتیب H ارتفاع کل سد و h ارتفاع مورد بررسی نسبت به پایه سد می‌باشد.

جدول ۳- مشخصات مصالح مورد استفاده در تحلیل لایه به لایه مدل سد مسجد سلیمان [۶]

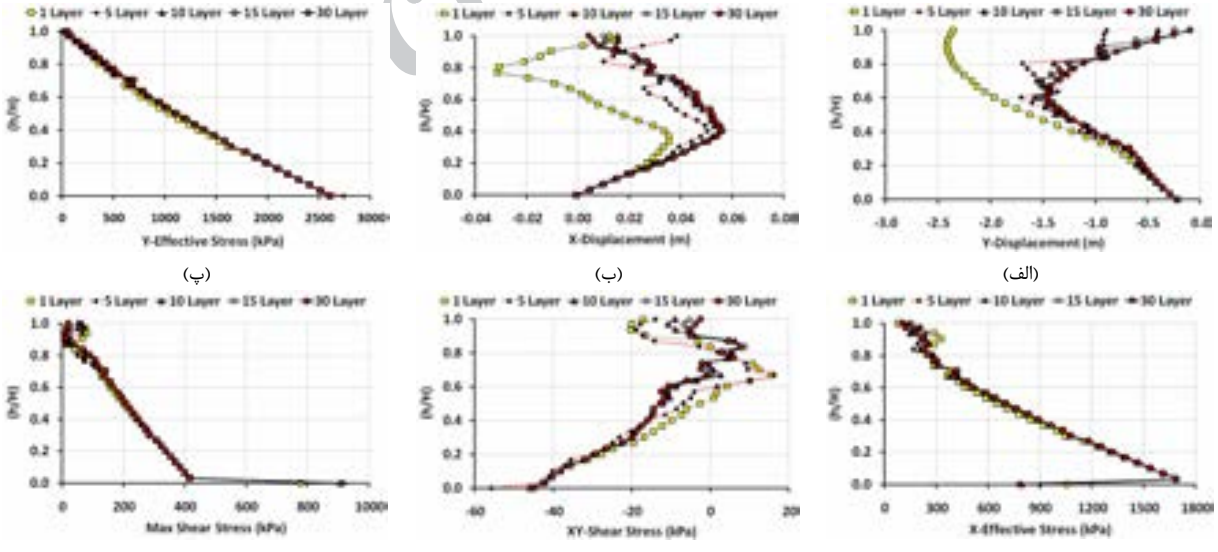
مناطق مختلف بدنه	چسبندگی (kpa)	زاویه اصطکاک داخلی	ضریب پواسون	جرم مخصوص (kg/m^3)	زاویه اتساع	مدول الاستیسیته ($*10^5$ kPa)				
						۱۲ متر	۳۱ متر	۴۳ متر	۹۳ متر	۱۴۸ متر
هسته	۵۰	۱۰	۰/۳۴	۲۰۵۰	۰	–	۰/۳	–	۰/۷	۱/۶
پوسته بالادست	۰	۴۵	۰/۴	۲۳۵۰	۲۲	–	۰/۶۴	–	۱/۰۹	۱/۳۳
پوسته پایین دست	۰	۳۷	۰/۳۸	۲۲۰۰	۱۸	–	–	۰/۷	۱/۰۲	۱/۳
فیلتر اشباع	۰	۴۰	۰/۳۶	۲۳۵۰	۰	–	۰/۴۹	–	۰/۹۴	۱/۴۴
فیلتر مرطوب	۰	۴۰	۰/۳۶	۲۲۰۰	۰	–	۰/۷	–	۱/۰۶	۱/۵۵
فونداسیون	۷۰۰	۳۰	۰/۳	۲۵۰۰	–	۳/۸۷۲۲				



(پ) (ب) (الف)

(ر) (د) (ج)

شکل ۳- کانتورهای بدست آمده از بررسی پارامترهای مختلف در مرحله پایان ساخت برای مدل ۳۰ لایه‌ای
(الف) تغییرمکان قائم (متر)، (ب) تغییرمکان افقی (متر)، (پ) تنش موثر قائم (کیلوپاسکال)، (ج) تنش موثر افقی (کیلوپاسکال)،
(د) تنش برشی X-Y (کیلوپاسکال)، (ر) ماکزیمم تنش برشی (کیلوپاسکال)



(پ) (ب) (الف)

(ر) (د) (ج)

شکل ۴- نتایج بدست آمده از بررسی پارامترهای مختلف در مرحله پایان ساخت برای مدل ۳۰ لایه‌ای
(الف) تغییرمکان قائم (متر)، (ب) تغییرمکان افقی (متر)، (پ) تنش موثر قائم (کیلوپاسکال)، (ج) تنش موثر افقی (کیلوپاسکال)، (د) تنش برشی X-Y
(کیلوپاسکال)، (ر) ماکزیمم تنش برشی (کیلوپاسکال)

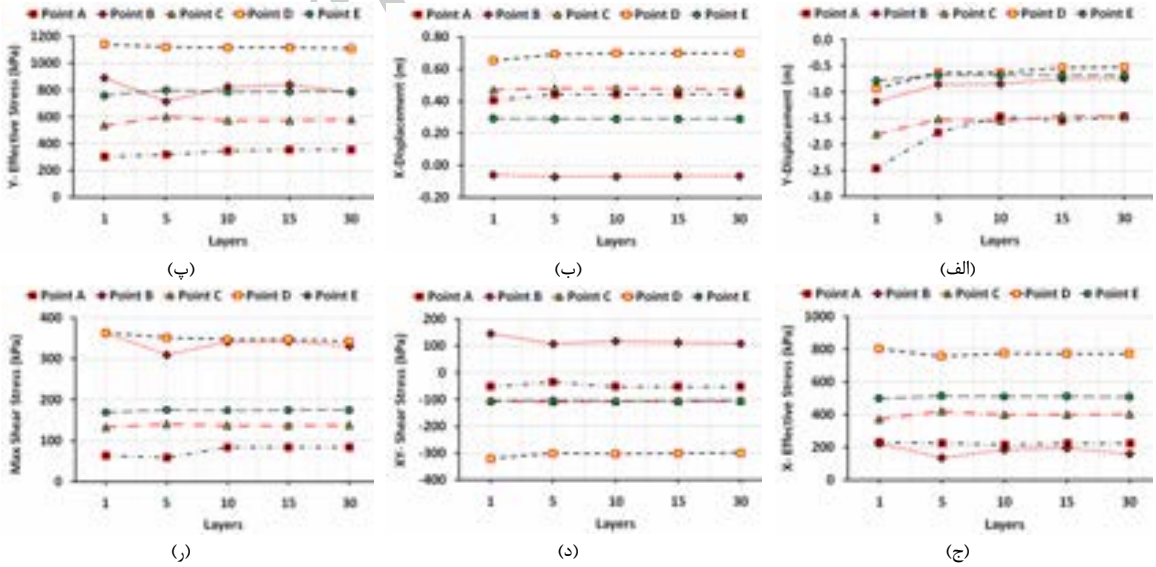
www.SID.ir

در مرحله پایان ساخت، تغییرمکان‌های اتفاق افتاده برای مدل تک لایه در مقایسه با مدل ۳۰ لایه بسیار متفاوت بوده است. بیشترین تغییرمکان قائم رخ داده در مدل تک لایه در تاج سد و در مدل ۳۰ لایه در ۰/۶ ارتفاع سد رخ داده است. بیشترین تغییرمکان افقی در مدل تک لایه و ۳۰ لایه در ۰/۴ ارتفاع سد از پی رخ داده است. همچنین در این مرحله میزان تنش موثر قائم، افقی و تنش‌های برشی ماکزیمم در هر دو مدل تقریبا یکسان بوده است. میزان تفاوت تنش‌های برشی XY در مدل تک لایه نسبت به مدل ۳۰ لایه بسیار فاحش بوده است. در مابقی پارامترهای مورد بررسی، تفاوت چشمگیری بین مدل‌های مختلف مشاهده نشده است. نتایج بدست آمده از بررسی چگونگی تأثیرگذاری تعداد لایه‌های مدل شده بر پارامترهای مورد ارزیابی در شکل (۵) ارائه شده است.

در شکل (۵) نقاط مورد بررسی در ۵ مدل مختلف با لایه‌بندیهای متمایز برای ۶ پارامتر مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل (۵) در واقع نحوه تغییر پارامترهای مورد بررسی همزمان با تغییر تعداد لایه‌ها ارائه شده است. آنچه که از بررسی نتایج ارائه شده در مرحله پایان ساخت بدست می‌آید، کفایت ۱۰ لایه برای مدلسازی این مرحله را تأیید می‌کند. البته با توجه به اینکه هدف از این بررسی، ایجاد بستر مناسب جهت انجام تحلیل دینامیکی می‌باشد، لذا ارزیابی پارامترها در مرحله تراوش پایدار نیز ادامه یافته است.

۴- تحلیل در حالت تراوش پایدار

حالت تراوش پایدار پس از برقرار شدن جریان دائمی آب ایجاد می‌شود و در این حالت تنش‌های مؤثر و فشار آب حفره‌ای در مقادیر حدی ثابت می‌شوند. این شرایط در سدهای بزرگ معمولاً پس از گذشت چند سال حاصل می‌گردد. در این مرحله با در نظر گرفتن نتایج بدست آمده از تحلیل لایه به لایه، تنش‌های اولیه در مدل مشخص شده و به عنوان شرایط اولیه برای تحلیل در مرحله تراوش پایدار در نظر گرفته شده است تا هرچه دقیق‌تر شرایط ساخت واقعی سد مسجد سلیمان مدل‌سازی گردد. همچنین در این مرحله سطح آب و وزن مخزن به مدل محاسباتی افزوده شده است. برای انتخاب مشخصات مکانیکی خاک از جمله چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مصالح بدنه در این مرحله (با فرض اینکه زمان کافی برای زهکشی کامل موجود بوده است) رفتار مصالح، زهکشی شده در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که مشخصات مصالح در مرحله تراوش پایدار برای تمام مصالح بکار رفته در بدنه به جز هسته منطبق بر جدول (۳) می‌باشد. در این مرحله با اعمال شرایط تراوش پایدار برای هسته، میزان زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی به ترتیب ۱۹ و ۴۰ خواهد بود.



شکل ۵- نتایج بدست آمده از بررسی پارامترهای مختلف در نقاط انتخابی در مرحله پایان ساخت (الف) تغییرمکان قائم (متر)، (ب) تغییرمکان افقی (متر)، (پ) تنش موثر قائم (کیلوپاسکال)، (ج) تنش موثر افقی (کیلوپاسکال)، (د) تنش برشی XY (کیلوپاسکال)، (ر) ماکزیمم تنش برشی (کیلوپاسکال)

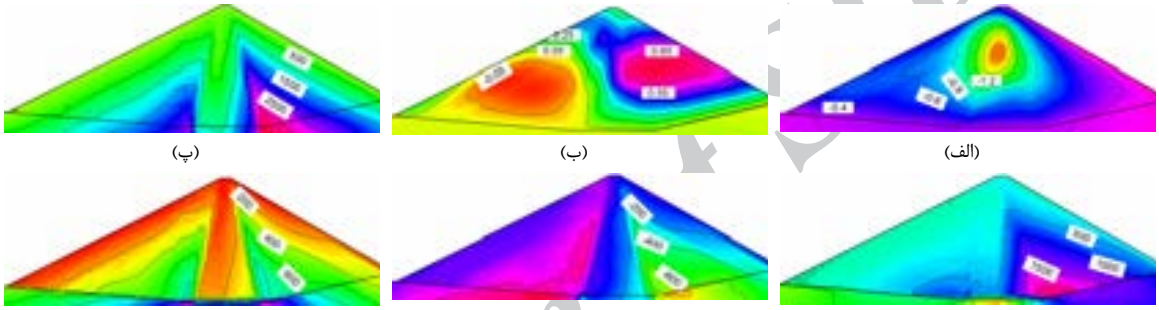
Archive of SID

www.SID.ir

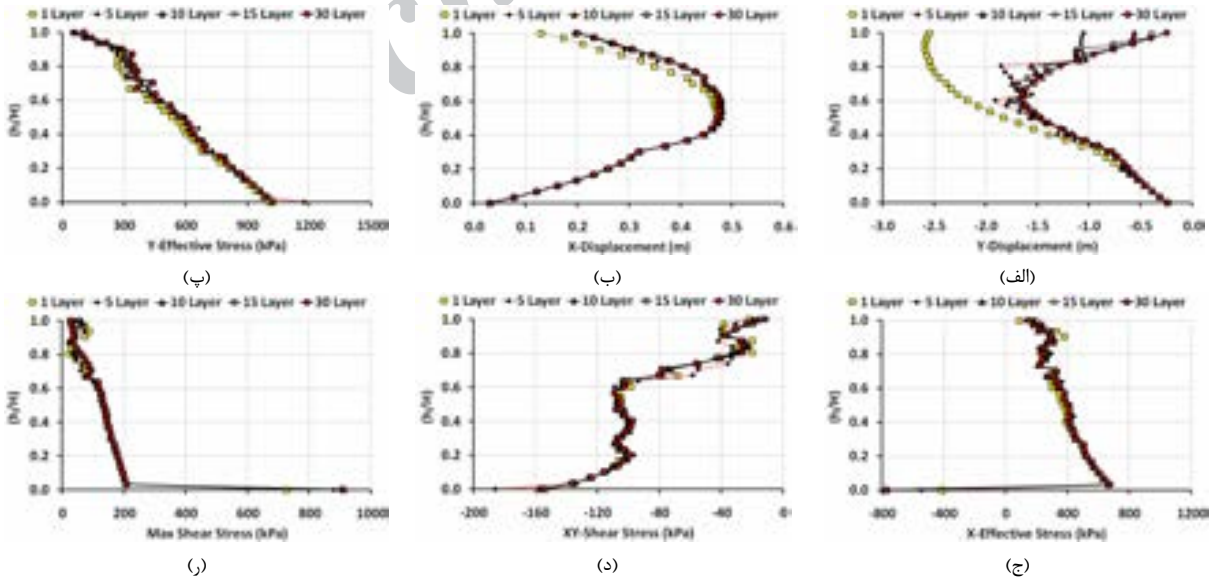
کانتورهای پارامترهای مورد بررسی در شکل (۶) و نتایج پارامترهای مورد بررسی بدست آمده در خط مرکزی مقطع سد، در شکل (۷) نشان داده شده است.

نتایج بدست آمده از بررسی کانتور پارامترهای مختلف، حاکی از تغییرات رخ داده در میزان پارامترها با اضافه شدن آب و وزن مخزن می‌باشد. در مرحله تراوش پایدار بر مقدار تغییر مکان قائم رخ داده در بالادست بدنه سد، حدود ۱۲/۵ درصد افزوده شده است. همچنین در این مرحله بر میزان تغییر مکان افقی اتفاق افتاده در بدنه پایین‌دست سد به میزان ۶۰ درصد افزوده شده است. در مورد پارامترهای تنش موثر افقی و تنش برشی XY، آنچه که مشهود است این است که حالت پخش‌شدگی تنش در پایین‌دست سد تغییر یافته و بر میزان تنش‌ها افزوده شده است. در مورد پارامتر تنش موثر قائم و ماکزیمم تنش برشی، وجود فشار آب حفره‌ای در هسته سد در کاهش میزان تنش، در مرحله تراوش پایدار نسبت به مرحله پایان ساخت قابل توجه است.

با اعمال حالت تراوش پایدار در مدل‌های مختلف، میزان اختلاف تغییر مکان افقی رخ داده در مدل‌های تک لایه نسبت به ۳۰ لایه کمتر شده است ولی همچنان تفاوت در تغییرمکان قائم رخ داده کاملا مشهود است.



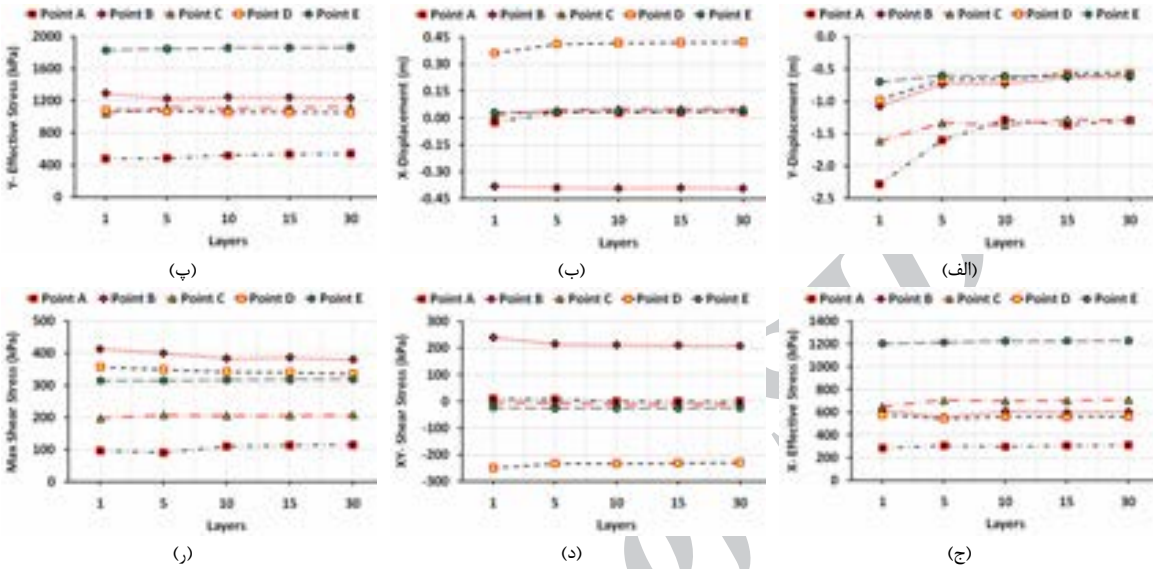
شکل ۶- کانتورهای بدست آمده از بررسی پارامترهای مختلف در مرحله تراوش پایدار برای مدل ۳۰ لایه‌ای (الف) تغییرمکان قائم (متر)، (ب) تغییرمکان افقی (متر)، (پ) تنش موثر قائم (کیلوپاسکال)، (ج) تنش موثر افقی (کیلوپاسکال)، (د) تنش برشی XY (کیلوپاسکال)، (ر) ماکزیمم تنش برشی (کیلوپاسکال)



شکل ۷- کانتورهای بدست آمده از بررسی پارامترهای مختلف در مرحله تراوش پایدار برای مدل ۳۰ لایه‌ای (الف) تغییرمکان قائم (متر)، (ب) تغییرمکان افقی (متر)، (پ) تنش موثر قائم (کیلوپاسکال)، (ج) تنش موثر افقی (کیلوپاسکال)، (د) تنش برشی XY (کیلوپاسکال)، (ر) ماکزیمم تنش برشی (کیلوپاسکال)

www.SID.ir

در این مرحله میزان اختلاف تنش‌های مؤثر قائم، افقی و ماکزیمم تنش برشی در مدل‌های تک لایه نسبت به ۳۰ لایه به حداقل مقدار خود رسیده است. همچنین اختلاف فاحش موجود در میزان تنش‌های برشی XY رخ داده در مرحله پایان ساخت بین مدل تک لایه و ۳۰ لایه در مرحله تراوش پایدار از میان رفته است. نتایج بدست آمده از بررسی پارامترهای مورد بررسی در نقاط مورد نظر در شکل (۸) آورده شده است.



شکل ۸- نتایج بدست آمده از بررسی پارامترهای مختلف در نقاط انتخابی در مرحله تراوش پایدار (الف) تغییرمکان قائم (متر)، (ب) تغییرمکان افقی (متر)، (پ) تنش موثر قائم (کیلوپاسکال)، (ج) تنش موثر افقی (کیلوپاسکال)، (د) تنش برشی XY (کیلوپاسکال)، (ر) ماکزیمم تنش برشی (کیلوپاسکال)

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق سد مسجد سلیمان در دو مرحله پایان ساخت و تراوش پایدار مدل‌سازی شده و مدل مورد نظر با انتخاب پارامترهای اصلی تأثیرگذار بر رفتار استاتیکی سد و با ۲ رویکرد بررسی پارامترها در خط مرکزی مقطع سد و در ۵ نقطه خاص از بدنه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

نتایج بدست آمده از بررسی پارامترها در خط مرکزی سد و در مرحله پایان ساخت، حاکی از اختلاف ناچیز مقادیر بدست آمده برای پارامترهایی همچون تنش قائم، تنش افقی و ماکزیمم تنش برشی در مدل تک لایه نسبت به مدل‌های چند لایه بوده است. در صورتیکه اختلاف نتایج بدست آمده برای پارامترهایی همچون تغییر مکان افقی، تغییر مکان قائم و تنش برشی XY در مدل تک لایه نسبت به مدل‌های چند لایه قابل توجه می‌باشد. با اضافه شدن آب و مدل‌سازی مرحله تراوش پایدار، نتایج بدست آمده از پارامترهای مورد بررسی دستخوش تغییر و تحول شدند، بطوریکه علاوه بر پارامترهای مورد اشاره قبلی، تغییرمکان افقی و تنش برشی XY نیز در مدل‌های تک لایه نسبت به مدل‌های چند لایه از مقادیر یکسان برخوردار شدند. به این ترتیب در مرحله تراوش پایدار، نتایج بدست آمده از پارامتر تغییرمکان قائم در مدل تک لایه نسبت به مدل‌های چند لایه از اختلاف فاحش برخوردار می‌باشد.

در رویکرد بعدی پارامترهای مورد بررسی در ۵ نقطه از بدنه سد مورد ارزیابی قرار گرفتند که نتایج در مرحله پایان ساخت و تراوش پایدار حاکی از کفایت ۱۰ لایه برای رسیدن به مدل‌سازی مطلوب می‌باشد.

۶- مراجع

[1] Brown, C. B., Goodman, L.E., "Gravitational stresses in accreted bodies", Proceedings of the Royal Society of London, 1963, Series A 276,571–576.

[2] Clough, R.W., Woodward, R., "Analysis of embankment stresses and deformations", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE 1967, 93, 529–549.

[3] Eisenstein, Z., "Computer Analyses in Earth Dam Engineering", Computers in Soil Mechanics, Present and Future, R.L.

Archive of SID
www.SID.ir

schiffman, ed., MAA Publishing co., Taipei, 1979, pp 79-122.

[4] Elgamal, A.W.M., Abdel-Ghaffar, A.M., Prevost, J.H., "2-D Elasto plastic Seismic Shear Response of Earth Dam", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 113 (5), 702-713.

[5] Potts, D.M., Zdravkovic, L., "Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering Application Thomas", Telford, London 2001.

[6] Davoodi, M., "Evaluating dynamic characteristics of embankment dams using ambient and forced vibration tests". PhD. thesis, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, 2003.

[7] The U.S. Bureau of Reclamation., "Design of small dams", U.S. Bureau of Reclamation, Water Resources Technical Publication, Denver, Colorado, 860 p, 1987.

Archive of SID

www.SID.ir