ارزیابی ابعاد بهینه محفظه نصب سلول فشار به‌کمک مدل سازی عددی

کاوه آهنگری[۱]، سید محسن موسوی کجوری[۱]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران. musavi328@yahoo.com

تاریخ دریافت مقاله: ۹۰/۱۰/۲۱ تاریخ تصویب: ۹۱/۸/۲۳

چکیده

برای اندازه‌گیری تنش کل در خاک از سلول فشار استفاده می‌شود. امکان چرخش سلول فشار در حین تراکم خاکریزی و یا آسیب آن در اثر عبور ماشین‌ها وجود دارد. به‌همین علت، سلول فشار درون محفظه‌ای به نام عدسی که در خاک حفاری شده، قرار می‌گیرد. نامناسب بودن ابعاد عدسی مانع از اندازه‌گیری دقیق سلول فشار خواهد شد. برای مطالعه ابعاد بهینه محفظه، با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC دو بعدی مدلی جدید برای بررسی تأثیر خصوصیات سلول فشار و شرایط نصب آن روی نتایج حاصل از این ابزار در سدهای خاکی ارائه داده شد. نتایج مدلسازی‌ها نشان می‌دهند که عرض هر عدسی باید تقریباً ۳ برابر قطر صفحه سلول فشار و ارتفاع آن برابر قطر سلول نصب شده باشد.

واژگان کلیدی: تنش کل؛ سلول فشار؛ نرم‌افزار FLAC2D؛ سد خاکی؛ ابعاد محفظه قرارگیری.

مقدمه

رفتارنگاری به‌معنی بررسی عملکرد یک سد در دوران ساخت و مرحله‌ی بهره‌برداری و تطبیق آن با پیش‌بینی‌های زمان طراحی می‌باشد [۱]. رفتارنگاری مداوم سد، معمولاً تشخیص نواقص و پدیده‌های منفی را که ممکن است به گسیختگی منجر شود، امکان‌پذیر می‌کند [۲]. یکی از پدیده‌هایی که در سدهای خاکی اتفاق می‌افتد پدیده قوس‌زدگی است. قوس‌زدگی و کاهش سطح تنش در هسته، شکست هیدرولیکی را به‌ویژه در زمان آبگیری محتمل می‌سازد. از این‌رو نسبت تنش برای کنترل پدیده قوس‌زدگی اهمیت دارد.

نسبت تنش، عبارت از تنش قائم اندازه‌گیری شده به وزن ستون آن نقطه است [۳]. برای اندازه‌گیری نحوه توزیع و جهت تنش کل در داخل توده خاک، زیر پی‌ها و دیواره‌های حائل از سلول‌های اندازه‌گیری تنش استفاده می‌شود [٤]. ساختن سلول فشاری که سختی مشابه خاک داشته باشد، غیرممکن است [۵]. در صورتی‌که سلول دارای سختی بیشتری نسبت به محیط دربرگیرنده خود باشد. موجب تمرکز تنش یا اثرسختی (Hard – Inclusion) و در صورتی‌که دارای

سختی کمتری نسبت به محیط دربرگیرنده خود داشته باشد، موجب انحراف تنش یا اثر نرمی (Soft – Inclusion) می‌شود. در حالت اول تنش‌ها بزرگتر از حالت واقعی (Over Registration) و در حالت دوم تنش‌ها کوچک‌تر از حالت واقعی (Under Registration) دریافت و اندازه‌گیری می‌شوند [٦]. به‌علت دشواری تولید سلولی با سختی مشابه سختی محیط، از یک ماده‌ی پوششی با سختی و ابعاد مناسب استفاده می‌شود [۷].

استفاد از ماده پوششی نرم تر از خاک احاطه کننده موجب اثر نرمی پیرامون سلول فشار می‌شود. با افزایش ضخامت این ماده پوششی اثر نرمی تشدید می‌شود. در نتیجه متوسط تنشی که سلول فشار نشان می‌دهد رو به کاهش خواهد بود [۸].

یکی از روش‌ها جهت صحت‌سنجی نتایج حاصل از سلول‌فشار، روش‌های عددی می‌باشد. در مطالعات انجام‌گرفته با این روش، نتایج سلول فشار را در کنار نتایج حاصل از مدل عددی سد خاکی قرار می‌دهند. این در حالی است که خصوصیات سلول فشار در مقایسه با ابزار ژئوتکنیکی دیگر، بسیار متفاوت است. شرایط نصب سلول فشار بر روی نتایج آن بسیار موثر می‌باشد. تراکم خاک در اطراف سلول‌ها بخصوص در محفظه نصب سلول فشار نمی‌تواند کیفیتی مشابه خاکریز اصلی را داشته باشد. بنابراین پدیده قوسی‌شدن در اطراف سلول‌ها اتفاق می‌افتد. به‌همین خاطر در این مطالعه سعی شده شرایط نصب سلول فشار به‌طور کامل، مدل شود. ابعاد محفظه نصب، روی قوس‌زدگی موضعی خاک درون محفظه، بسیار مؤثر می‌باشد. از این‌رو در این پژوهش، تأثیر ارتفاع و عرض محفظه بر روی نتایج سلول فشار با توجه به مطالب فوق مورد بررسی قرار گرفته است. انجام تحلیل‌ها با فرض انعطاف‌پذیربودن لوله سلول فشار و عدم فرورفتگی در لوله انجام شد. از طرفی، ساخت سلول فشار با لوله‌ای با انحراف مورد نیاز در کارخانه نیز مقدور می‌باشد. با توجه به فرضیات موجود در حین نصب سلول فشار در سد خاکی، طول محفظه برابر عرض آن در نظر گرفته می‌شود. به‌همین خاطر در این مطالعه از مدل سازی دوبعدی به‌جای سه‌بعدی برای شرایط نصب سلول فشار استفاده شده است.

تحقیقات نشان‌داده که تحلیل دوبعدی سدهای خاکی که دارای نسبت طول تاج به ارتفاع بزرگی هستند، دارای تقریب خوبی از واقعیت است. تنها در مورد سدهایی که در دره‌های تنگ ساخته می‌شوند و احتمال پدیده قوسی‌شدن وجود دارد، استفاده از تحلیل سه‌بعدی توصیه شده است [۹]. در هر صورت یک آنالیز دوبعدی از مقطع عرضی سد به‌همراه تحلیلی دوبعدی از مقطع طولی می‌تواند اطلاعاتی راجع به اثرات سه‌بعدی بودن جسم فراهم آورد [۱۰]. بنابراین در این مطالعه از نرم افزار FLAC2D به‌جای FLAC3D در مدل سازی سد خاکی استفاده شد.

هنگامی‌که مراحل ساخت یک سد خاکی به‌وسیله روش تفاضل محدود به‌صورت مدل در می‌آید، امکان عملی درنظرگرفتن کلیه لایه‌های خاکریزی شده

نیست. تعداد محدودی لایه از یک تا ۱۵ یا کمی بیشتر برای سد می‌تواند اعمال شود.

گودمن (Goodman) در سال ۱۹۶۳ برای اولین بار، ساخت مرحله‌ای سد خاکی را مورد بررسی قرار داد و کالف و وودوارد (Calf & Woodward) در سال ۱۹۷۳ تحلیل براساس خاکریزی یک مرحله‌ای و چند مرحله‌ای را با استفاده از روش المان محدود مورد بررسی و مقایسه قرار دادند و متوجه شدند که بین تنش‌های حاصل از دو مدل، اختلاف چندانی وجود ندارد. اما اختلاف در تغییر شکل‌ها زیاد بود. کولهاوی (Kulhawy) این مسئله را مورد مطالعه قرار داد و به این نتیجه رسید که تعداد حداقل لایه‌ها هشت می‌باشد. نایلور (Naylor) طی تحقیقاتی اعلام کرد که در اکثر حالات ۵ لایه کفایت می‌کند. این درحالی است که آیزنشتین (Aizenshtein) در سال ۱۹۷۲ نشان‌داد که ده لایه برای تقریباً ثابت ماندن تنش‌ها و تغییر شکل‌ها کافی است. صدرنژاد در سال ۲۰۱۱ نتیجه گرفت تحلیل یک مرحله‌ای برای بدست آوردن تنش‌ها در یک سد همگن بناشده بر روی پی صلب کافی است.

در صورتی‌که تحلیل چند لایه برای پیش‌بینی تنش‌های عرضی در هسته بر روی یک پی تغییر شکل‌پذیر موردنیاز می‌باشد [۱۱].

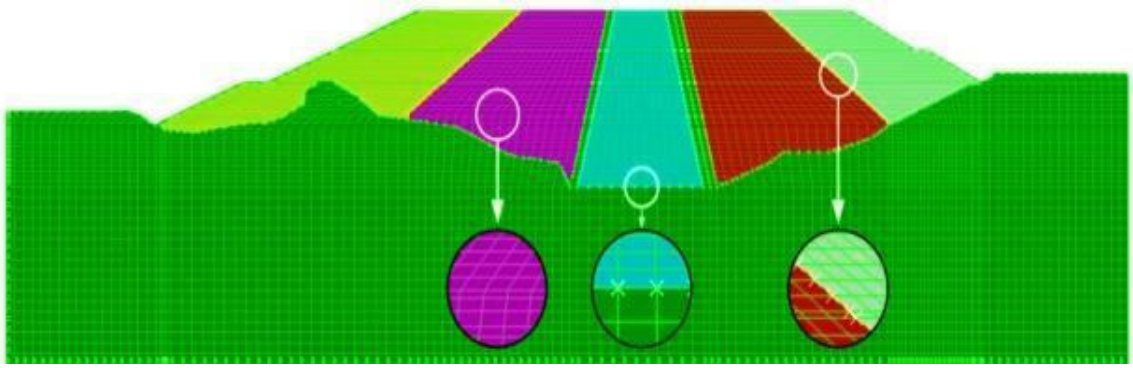
محاسبات تنش سد خاکی گیوی

جهت محاسبات تنش، سد خاکی گیوی واقع در استان اردبیل که در حین ساخت می‌باشد؛ مدل شد. برای مدلسازی‌ها از نرم‌افزار FLAC استفاده شده که نرم‌افزار توانمندی در زمینه تحلیل محیط‌های پیوسته از جمله سدهای خاکی می‌باشد. استفاده از این روش، امکان تحلیل تنش‌ها و نیز انتقال آنها به قسمت‌های مختلف مقطع سد را به‌وجود می‌آورد.

ساختگاه سد گیوی در ۲۰ کیلومتری شمال غربی شهرستان خلخال و ۵ کیلومتری شرق گیوی قرار دارد. ارتفاع سد از کف ۷۹ متر می‌باشد. طول تاج سد در حدود ۲۸۸ متر بوده و عرض تاج سد برابر ۱۲متر می‌باشد. دسترسی به ساختگاه سد از اردبیل به شهرستان گیوی (کوثر) و سپس ۵ کیلومتر از جاده اصلی گیوی خلخال به طرف خلخال می‌باشد. ساخت سد گیوی از سال ۸۳ شروع شد که تا کنون ٦٦ متر از ارتفاع این سد خاکریزی شده است [۱۱].

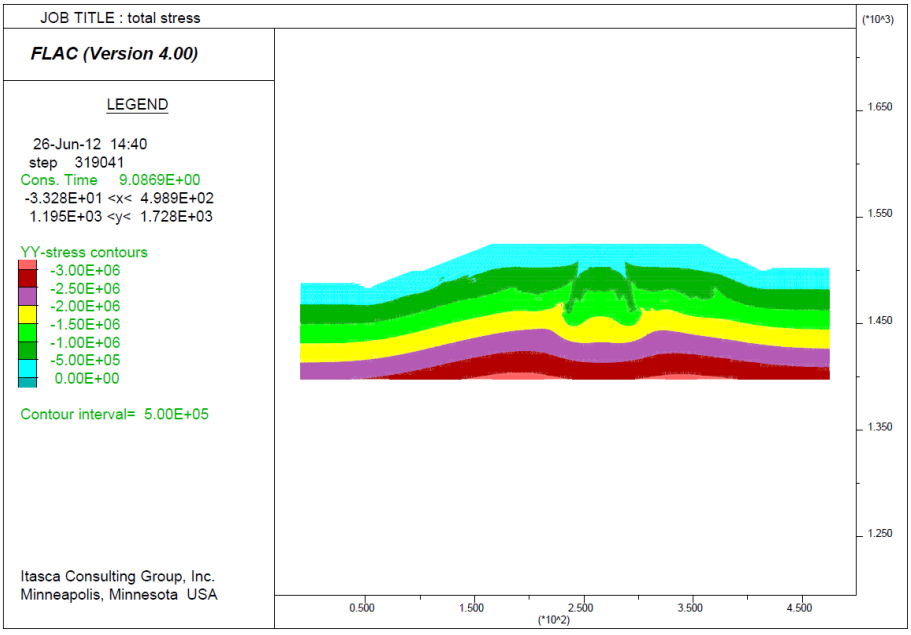
همان‌طورکه ذکر شد درمورد تعداد لایه‌ها هنوز اختلاف نظر زیادی وجود دارد. به همین‌خاطر در این مطالعه به بررسی تنش در ۵ مدل سد به‌ترتیب با ۱۷ لایه ۳/۸ متری، ۱۱ لایه ٦ متری، ۷ لایه ۹/٤۳ متری، ۳ لایه ۲۲ متری و نهایتاً ۱ لایه ٦٦ متری پرداخته شد. تمامی مراحل ساخت مدل سازی شد. به این‌ترتیب که ابتدا شبکه‌ای با توجه به هندسه مسئله، اعمال شد. جهت دستیابی به بالاترین دقت، بایستی تا حد ممکن نسبت بین ابعاد ظاهری زون‌ها را نزدیک به یک اختیار نمود. نسبت‌های بالاتر از ۵:۱ پتانسیلی از بی‌دقتی را در پی خواهد داشت. ایجاد پرش‌های بزرگ در ابعاد زون‌ها بین نواحی مختلف شبکه توصیه نمی‌شود. در حقیقت نسبت بین مساحت زون‌های مجاور نبایستی از ٤:۱ تجاوز کند [۱۲].

برای رسیدن به مدلی با دقت معقول، مطابق شکل ۱ موارد مذکور رعایت گردید. پس از تعیین هندسه مدل، شرایط مرزی و اولیه استاتیکی لحاظ شد و در ادامه خصوصیات مواد (مدل موهر-کولمب) اعمال گردید.

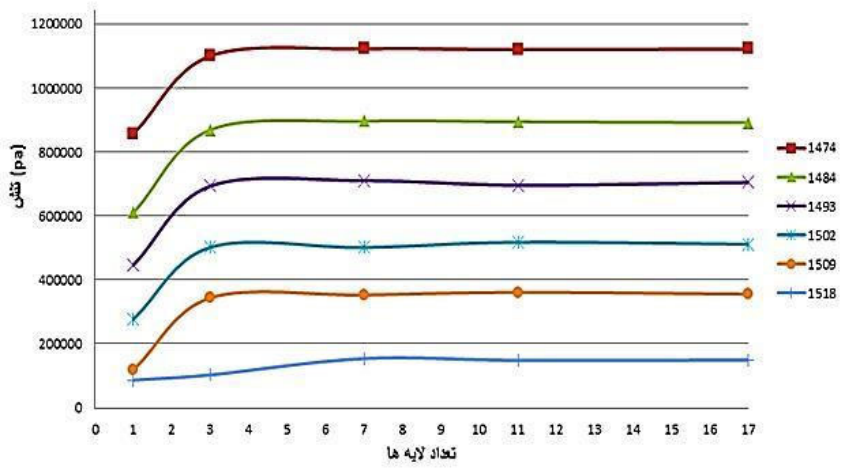


شکل ۱- هندسه مدل سد خاکی گیوی

بعد از آنالیز پی و اعمال شرایط اولیه استاتیکی، لایه‌های خاکریزی طی ۱، ۳، ۷، ۱۱ و ۱۷ مرحله در ۵ مدل اعمال گردیدند و آنالیز شدند. در نهایت، حل کل مدل‌ها تا شرایط پایدار انجام شدند. به‌عنوان نمونه، شکل ۲ کنتورهای تنش قائم را برای حالتی‌که مدل با ۱۷ لایه خاکریزی است، نشان می‌دهد. جهت مقایسه ۵ مدل، تنش قائم در ٦ تراز مختلف از مدل‌ها محاسبه شد. مطابق نمودار شکل ۳ تنش‌های کل در ۳ بار خاکریزی تقریباً به تعادل رسیدند. در واقع نتایج نشان دادند که تعداد ۳ لایه برای ثابت ماندن تنش‌ها به روش تفاضل محدود کفایت می‌کند.



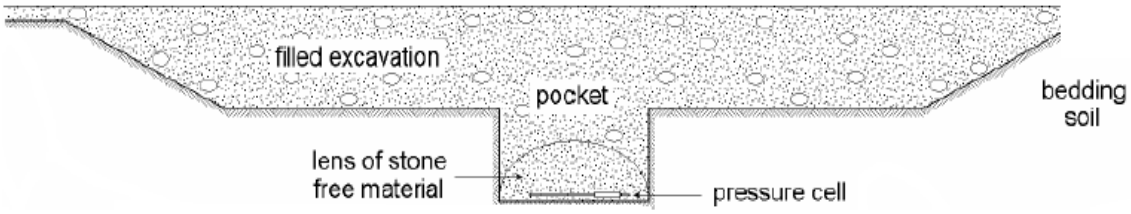
شکل ۲- کنتور های تنش با ۱۷ لایه خاکریزی



شکل ۳- نمودار تأثیر ضخامت لایه‌های خاکریزی بر نتایج تنش در مدل سد خاکی

محاسبات تنش ترانشه نصب سلول فشار

جهت نصب افقی سلول فشار در محل باید دقت شود که تراکم خاک پیرامون سلول با تراکم خاک محیط اطراف آن یکسان باشد [۱۳]. از طرفی امکان(ترانشه نصب سلول فشار) در یک محل از پیش حفر شده قرار گیرد و با لنزی از مصالح عاری از قلوه‌سنگ پوشانده می‌شود [۱٤]. آسیب‌دیدن یا چرخش سلول فشار در حین تراکم خاک، وجود دارد.به‌همین خاطر، سلول می‌تواند مطابق شکل شماره ٤ معمولا جهت صحت‌سنجی نتایج حاصل از سلول فشار از نتایج حاصل از مدل سازی سد خاکی استفاده می‌شود. درحالی که از یک طرف ساختن سلول فشار که سختی مشابه خاک داشته باشد، عملا



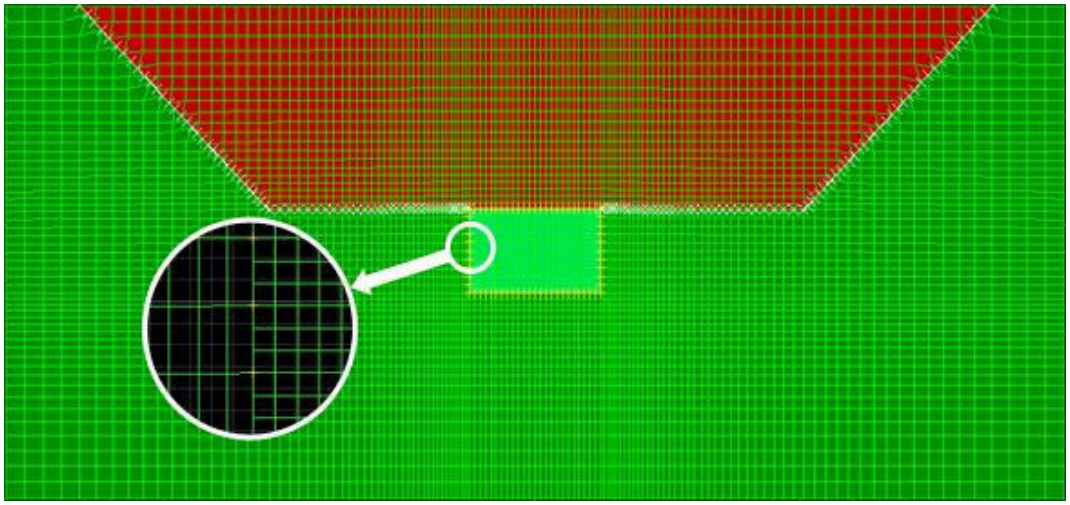
شکل ٤- جانمایی سلول در محفظه [۱٤]

امکان‌پذیر نیست و از سویی دیگر، اختلافی بین خصوصیات الاستیک خاکریز پشتی و توده خاکریز که به‌دلیل اختلاف در متراکم‌سازی می‌باشد؛ همواره ایجاد می‌شود [۱۵]. علت این اختلاف، استفاده از ماشین‌آلات سبک برای مقاطع نصب است. درحالی‌که از ماشین‌های سنگین و بزرگ برای مقاطع خاکریزی

معمولی استفاده می‌شود [١٦]. از این‌رو حضور سلول فشار در ترانشه نصب، باعث تغییر توزیع تنش در آن ناحیه می‌شود.

با توجه به مطالب فوق، اهمیت مدلسازی ترانشه جهت تحلیل تنش پیرامون سلول فشار آشکار می‌شود. جهت مدل سازی، ابتدا مدلی مطابق شکل ٥ طراحی شد. ابعاد این مدل ٤×١/٨ متر می‌باشد. سپس ترانشه نصب سلول فشار به‌همراه محفظه «عدسی سلول» حفر گردید.

در ادامه، سلول فشار درون ترانشه جاگذاری شد و پس از آن ترانشه توسط خاک پوشاننده‌ای با مدول الاستیسیته کمتر از خاک اولیه با نسبت $\frac{1}{2}$ (E-ratio) مطابق جدول ١ (به‌علت محدودیت در تراکم توسط ماشین‌آلات خاکریزی) پر شد.

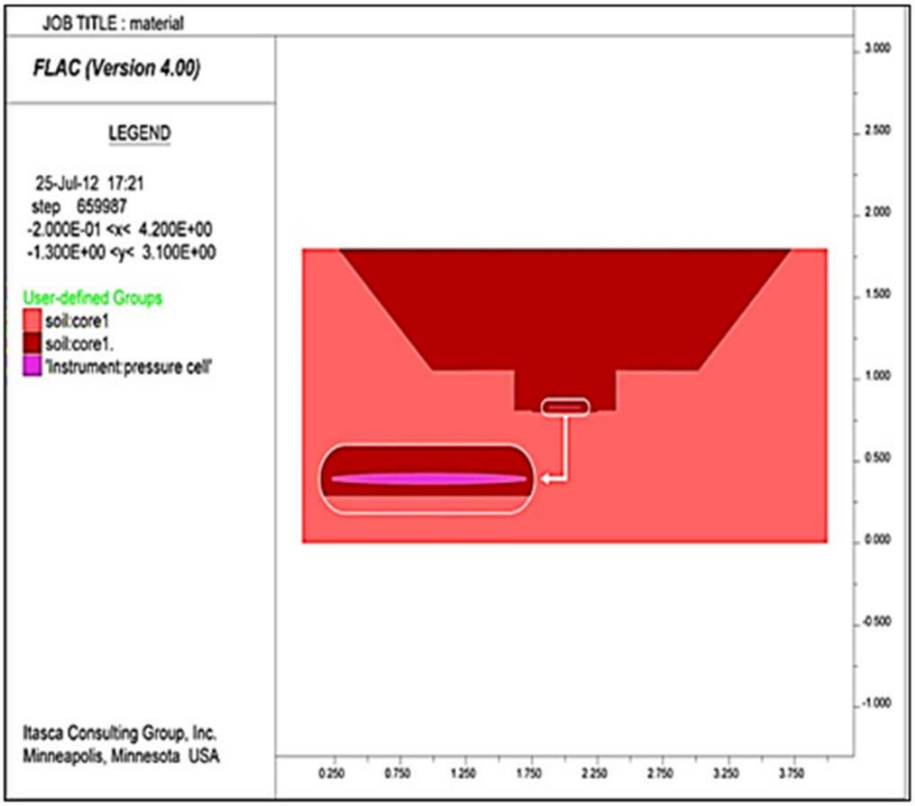


شکل ٥- هندسه ترانشه نصب سلول فشار

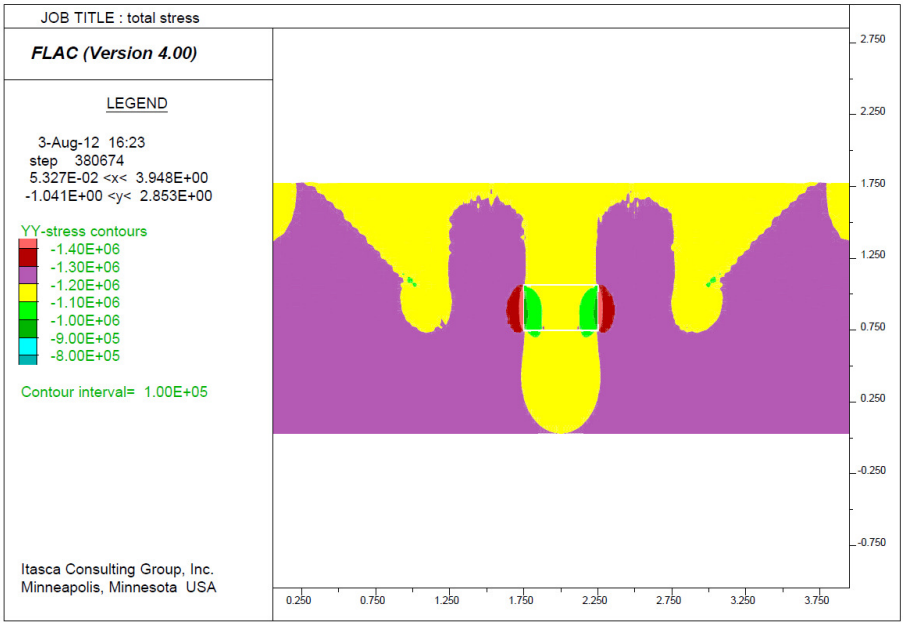
جدول شماره ١- مشخصات ژئومکانیکی ترانشه نصب سلول فشار

مشخصات مواد	ρ (Kg/m³)	E (MPa)	N (-)	C (MPa)	Ø (°)
خاک اولیه	١٩٨٠	٣٢	٠/٣٨	٠/٠٤٢٥	٢١
خاک ثانویه	١٩٠٠	١٦	٠/٣٩	٠/٠٤٢٥	٢١
سلول فشار	٨٦٤٠	٧٠٠٠٠	٠/٢٥		

تخصیص مصالح، مطابق شکل ٦ انجام شد. برای سلول فشار از مدل رفتاری الاستیک و برای خاک، مدل رفتاری الاستوپلاستیک با معیار گسیختگی موهرکولمب استفاده گردید. پس از اتمام مدل سازی-ها بارگذاری با مقدار معادل تنش‌های به‌دست آمده از خاکریزی‌ها در تراز نصب سلول فشار اعمال گردید، به‌طوری‌که بر روی ترانشه اول ۱، ترانشه دوم ۳، ترانشه سوم ۷، ترانشه چهارم ۱۱ و ترانشه پنجم ۱۷ بارگذاری حاصل از ۵ مدل سد خاکی اعمال شد. شکل ۷ کنتورهای تنش قائم را برای مدلی که طی ۱۷ مرحله بارگذاری شده بود، نشان می‌دهد.



شکل ٦– تخصیص مصالح مدل عددی



شکل ۷- کنتورهای تنش قائم برای ترانشه با ۱۷ لایه خاکریزی

ضریب تأثیر (C_I)

در این مطالعه، ضریب C_I (Coefficient Impact) جهت بررسی تأثیر لایه‌های خاکریزی بر روی نتایج سلول فشار تعریف شد. این ضریب، بیانگر مقدار تنش ثبت‌شده توسط سلول فشار در مدل ترانشه به مقدار تنش محاسبه شده در مدل سد خاکی می‌باشد. با توجه به تعریف فوق خواهیم داشت:

$$C_I = \frac{\sigma_c}{\sigma_d} \quad (1)$$

که در آن:

C_I = ضریب تأثیر

σ_c = متوسط تنش کل در زون‌های سلول فشار مدل شده در ترانشه نصب

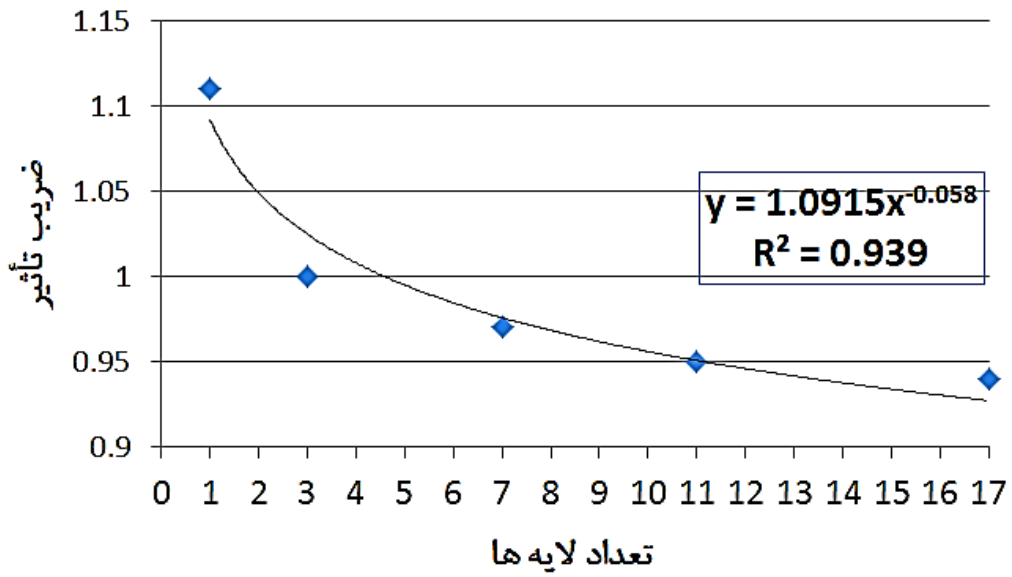
σ_d = تنش بدست آمده از سد خاکی مدل شده در تراز مربوط به نصب سلول فشار

اگر $C_I = ۱$ باشد، نشان‌دهنده تطابق مناسب، بین مدل سد خاکی و مدل ترانشه نصب سلول فشار با توجه به خاکریزی‌ها می‌باشد درحالی که $C_I > ۱$ بود، بیانگر آن است که مدل سلول فشار، تنش بیشتری را نسبت به مدل سد خاکی نشان می‌دهد و اگر $C_I < ۱$ باشد، یعنی تنش به‌دست آمده از سلول

فشار کمتر از تنش بدست آمده از مدل سد خاکی می‌باشد.

همان‌طور که در نمودار شکل ۸ مشخص است، با افزایش تعداد لایه‌های خاکریزی C_I کوچکتر می‌شود. در واقع تنشی که سلول فشار در مدل ترانشه نشان می‌دهد رو به‌کاهش می‌باشد و کمتر از میزان تنش در تراز مربوط به نصب سلول فشار برای مدل سد خاکی است.

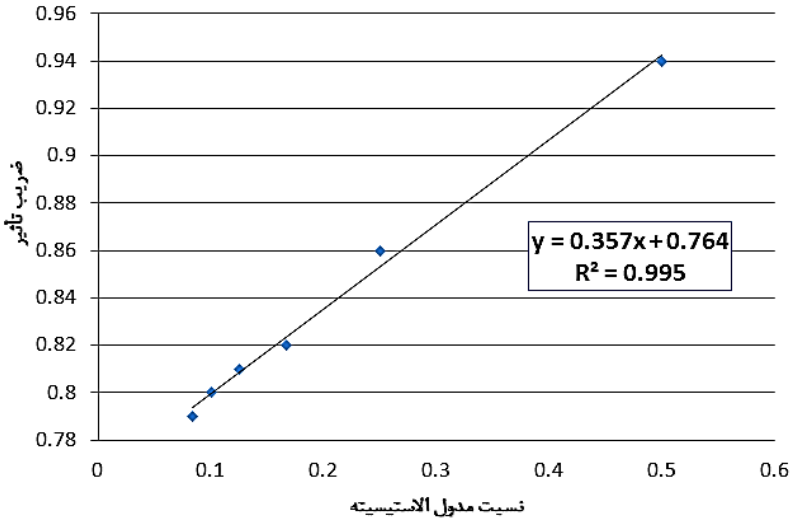
C_I درمدل با ۱۷ بار خاکریزی به حداقل مقدار خود می‌رسد. یعنی با افزایش تعداد لایه‌های خاکریزی (کمتر شدن ضخامت لایه‌ها) بر روی ترانشه نصب، پدیده قوسی شدن اطراف سلول فشار بیشتر شد؛ بنابراین تأثیر ترانشه نصب سلول بر روی نتایج حاصل از سلول فشار مطابقت بیشتری با شرایط واقعی پیدا کرد. از این رو نتایج حاصل از مدل‌ها با افزایش تعداد لایه‌های خاکریزی، تطابق بیشتری با مطالعات انجام شده دارد. به همین خاطر جهت مدلسازی صحیح برای ترانشه از بارگذاری حاصل از تنش‌های بدست آمده از مدل سد خاکی با ۱۷ لایه خاکریزی استفاده شود.



شکل ۸- نمودار تاثیر تعداد لایه‌های خاکریزی روی نتایج حاصل از سلول فشار

تاکنون جهت مدلسازی ترانشه از نسبت مدول الاستیسیته (E-ratio) $\frac{1}{2}$ استفاده شد.با توجه به مشکلات متراکم‌سازی حین نصب سلول فشار، احتمال اینکه این نسبت حتی به ۰/۰۵ هم برسد، بعیدنیست. از این رو مدل‌هایی با مدول الاستیسیته مختلف حل‌گردیده و ضریب C_I برای هریک از مدل‌ها محاسبه شد. همان‌طور که در نمودار شکل ۹ مشخص است با کاهش مدول الاستیسیته خاک

پرکننده نسبت به لایه‌های خاکریزی، میزان تنش‌هایی که در سلول فشار به وجود می‌آید، رو به کاهش است. علت این امر، افزایش پدیده قوس‌زدگی پیرامون سلول فشار می‌باشد.همان‌طور که ضرایب C_I نشان می‌دهند، درصدی از کل تنش‌هایی که به‌طور معمول در مدل عددی سد خاکی محاسبه می‌شوند، می‌بایست حذف شوند.



شکل ۹- نمودار تاثیر نسبت مدول الاستیسیته روی نتایج حاصل از سلول فشار

محاسبه‌ی مقدار ضریب ثبت (R.R)

ضریب R.R (Registration Ratio) بیانگر مقدار تنش ثبت‌شده توسط سلول فشار به‌مقدار تنش واقعی در محل، بدون حضور سلول می‌باشد. با توجه به تعریف فوق خواهیم داشت:

$$R.R=\frac{\sigma_c}{\sigma_s} \qquad (۲)$$

که در ان:

R.R: ضریب ثبت

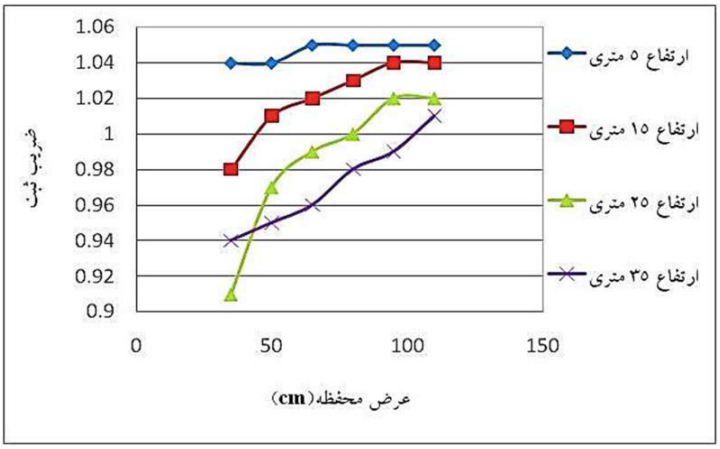
σ_c: میانگین تنش کل در سلول فشار

σ_s: میانگین تنش کل در محل، بدون حضور سلول فشار در واقع ضریب R.R نتیجه‌ای از دو مدل می‌باشد درمدل اول، سلول فشار مدل‌شده «نصب شده» است. بنابراین در این مدل، تنش در زون‌هایی از جنس رس محاسبه شده است. در مدل دوم، متوسط تنش بر روی همان زون‌ها اما از جنس سلول فشار انجام گرفت. دلیل این امر، مطالعه اثر واقعی نصب سلول فشار با توجه به تغییرات ابعاد محفظه سلول می‌باشد.

در صورتی‌که R.R>1 باشد آن‌گاه سلول فشار، تنشی بیش از مقدار ایده‌آل (بدون حضور سلول فشار و اعمال شرایط ترانشه نصب) از خود نشان‌داده است (Over Registration). در حالت عکس، یعنی RR<1

نیز سلول فشار، تنشی کمتر از مقدار ایده‌آل نشان‌داده است . (Under Registration). در این مطالعه تنها ازآن‌جایی‌که تغییرات ارتفاع و عرض محفظه سلول فشار مدنظر بود، از تحلیل دوبعدی استفاده شد. از این رو جهت تعیین ابعاد بهینه محفظه نصب سلول فشار، ضریب ثبت R.R برای محدوده‌ی تغییر پارامترهای طول و عرض محفظه سلول فشار که در زیر آمده‌اند محاسبه شد. عرض محفظه سلول فشار، ۵، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ سانتی‌مترارتفاع محفظه سلول فشار: ۳۵، ۵۰، ٦٥، ۸۰ ، ۹۵ و ۱۱۰ سانتی‌متر برای مطالعه تمامی حالات فوق، نیاز به انجام ٤×٦=٢٤ تحلیل می‌باشد که با توجه به نتایج بدست آمده ابعاد بهینه محفظه قرارگیری سلول فشار ۲۵×۸۰ سانتی متر بدست آمد.

تراکم خاکریز در محفظه نصب سلول فشار نمی‌تواند کیفیتی مشابه خاکریز اصلی را دارا باشد. در واقع خاک رس در ناحیه محفظه، نرم‌تر از خاک پیرامون محفظه است. در نتیجه با افزایش عرض و ارتفاع محفظه به ترتیب قطر و ضخامت ماده نرم‌تر پیرامون سلول فشار افزایش خواهد یافت. با توجه به مطالعات آهنگری و نورزاد، افزایش ضخامت ماده نرم‌تر «افزایش ارتفاع محفظه» در محیطی با سختی بیشتر «خاکریز اصلی» موجب افزایش پل‌زدگی پیرامون ماده نرم‌تر و تشدید اثر نرمی در آن خواهد شد [۸]. همان‌طور که در نمودار شکل ۱۰ مشخص است با افزایش ارتفاع محفظه تنش‌هایی که توسط سلول فشار محاسبه می‌شود؛ کاهش یافته است. از طرفی با افزایش عرض محفظه « افزایش قطر ماده نرم‌تر» در محیطی با سختی بیشتر موجب افزایش تراکم تنش و کاهش اثر نرمی ناشی از محفظه خواهد شد. همانطور که در نمودار ملاحظه می‌شود؛ افزایش عرض محفظه موجب کاهش پل‌زدگی بار و افزایش تنش‌های حاصل از سلول می‌شود. بنابراین در حالتی که ابعاد محفظه ۲۵×۸۰ می‌باشد؛ خطایی که در اثر سختی بین سلول، ماده پرکننده و خاکریز اصلی به وجود می‌آید؛ به حداقل می‌رسد. در واقع از یک طرف برای کاهش اثر تمرکز تنش و از طرفی دیگر برای کاهش اثر قوسی بر سلول فشار، لازم است تا ابعاد محفظه به میزان تعیین شده اعمال شود.



شکل ۱۰- نمودار تأثیر ابعاد محفظه روی نتایج حاصل از سلول

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، ابعاد محفظه نصب سلول فشار مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور ابتدا شرایط نصب سلول فشار، مدل سازی شد. در ادامه مدل مربوطه برای ابعاد مختلف محفظه قرارگیری سلول فشار در ۲٤ حالت تحلیل گردیدند.

مدل‌های سد خاکی نشان دادند که تعداد ۳ لایه برای ثابت ماندن تقریبی تنش‌ها به روش تفاضل محدود کفایت می‌کند. با افزایش تعداد لایه‌های خاکریزی (کمتر شدن ضخامت لایه‌ها) بر روی ترانشه نصب، پدیده قوسی شدن اطراف سلول فشار بیشتر شد و موجب کاهش تنش در ناحیه سلول فشار گردید؛ بنابراین تأثیر ترانشه نصب سلول بر روی نتایج حاصل از سلول فشار مطابقت بیشتری با شرایط واقعی پیدا کرد. از این رو نتایج حاصل از مدل‌ها با افزایش تعداد لایه‌های خاکریزی، تطابق بیشتری با مطالعات انجام شده دارد. به همین خاطر جهت مدل سازی صحیح برای ترانشه از بارگذاری حاصل از تنش‌های بدست آمده از مدل سد خاکی با ۱۷ لایه خاکریزی استفاده شود.

مدل سازی‌ها نشان می‌دهد در صورتی‌که خاک پوشاننده سلول با محیطی که سلول در آن معمولاً سلول فشار ۵۰ تا ۷۰ درصد تنش موجود در سد خاکی را نشان می‌دهد. در واقع ۳۰ الی ۵۰ درصد کمتر از مقدار واقعی تنش را ثبت می‌کند. مطابق نتایج بدست آمده از مدلسازی‌ها درصدی از این کاهش تنش مربوط به قوسی‌شدن نواحی پیرامون سلول فشار می‌باشد.

با توجه به آن‌که ابعاد محفظه نصب، تاثیر بسزایی روی نتایج حاصل از سلول فشار داشت، می‌توان گفت که یکی از مهم‌ترین عوامل مربوط به نحوه نصب سلول فشار در خاکریزها مربوط به طراحی هندسه محفظه سلول می‌باشد. ارتفاع و عرض بهینه برای محفظه با توجه به تحلیل‌های انجام شده ۲۵×۸۰ سانتی‌متر می‌باشد.

زمانی‌که نسبت مدول الاستیسیته خاک پوشاننده سلول فشار به خاک اولیه $\frac{۱}{۲}(\mathrm{E-ratio})$ می‌باشد، عرض هر عدسی باید تقریباً ۳ برابر قطر صفحه سلول فشار و ارتفاع آن برابر قطر سلول نصب شده «حدوداً $\frac{1}{3}$ عرض عدسی» باشد.افزایش عرض محفظه، باعث تنشی بیش از مقدار ایده‌آل (Over Registration) و افزایش ارتفاع آن سبب تنشی کمتر از مقدار ایده‌آل (Under Registration) می‌شود و بلعکس. بنابراین در صورتیکه دو پارامتر ارتفاع و عرض، کوچکتر یا بزرگتر از میزان بهینه اعمال شوند. خطای اندازه‌گیری‌ها به میزان زیادی افزایش خواهد یافت.

منابع

۱- سعیدی‌نیا، ع.، سالمی، الف.، رسولی، م.، اکبری، ح. و اسدی، م.، " ابزار دقیق سدهای خاکی"،(۱۳۸۹). چاپ اول، شرکت مهندسی سپاسد، ۳۵۰ص.

۲- آهنگری، ک.، "راهنمای استفاده از سلول فشار"، (۱۳۸۹).پروژه تحقیقاتی، شرکت مدیریت منابع آب ایران، وزارت نیرو، ۵۱۲ص.

۳- میرقاسمی، ع. و شغلی، ب.، "(۱۳۸۸).بررسی قابلیت سلولهای فشار خاک در اندازه‌گیری مقادیر واقعی فشارها در جهات مختلف و تعیین حداقل جهات لازم اندازه‌گیری با استفاده از اطلاعات پنج سد خاکی سنگریزه‌ای کشور"، پروژه تحقیقاتی، شرکت مدیریت منابع آب ایران، وزارت نیرو، تهران، ایران، ۲۱۳ص.

4- Weiler, W.A. and Kulhawy, F.H, "Factors Affecting Stress Cell Measurement in Soil", Journal Geot. Eng. pp. 108 – 109. pp

5- Hadala, P.F., "The Effect of Placement Method on the Response of Soil Stress Gages", in Proceeding of the International Symposium on Wave Propagation and Dynamic Prpperties of Earth Materials, The University of New Mexico Press, Albuquerque. NM,. 255 – 263, pp

6- Kirby, J.M., "Soil Stress Measurement: Part I. Transducer in a Uniform Stress Field", Journal of Agricultural Engineering Research, Vol.72, No.2, pp. 151 – 160 pp.

7- Ahangari, K. and Noorzad, A., "Use of Casing and its Effect on Pressure Cells", Elsevier, Mining Science and Technology (China), Volume 20, Issue 3384 – 390 pp.

8- Potts, M. and Zdravcovic, L., "Finite Element, Analysis in Geotechnical Engineering Theory",Thomas Telford Publisher,341-352PP.

9- Itasca Consulting Group, Inc., "FLAC User Manual", Version 4.0 USA.1341-1365PP.

10. Sisgeo company, "Stress cells", Manual of Instruments, 160P.

11- Mirghasemi, A., "Karkheh Dam InstrumentationSystemExperiences",Geotechnical Instrumentation News (GIN), 44 – 48 pp.

12- Matsuu, M., Takahashi, A., Uchita, Y. and Ohta, H., "Improvement of Earth Pressure Measurement Method in Rock-Fill Dams", International Commission on Large Dams, 76th Annual Meeting, Sofia, Bulgaria, 121P.