

تحلیل پایداری تکیه‌گاه‌های ساختگاه سد بتنی قوسی بختیاری با استفاده از تئوری حدبالا

یعقوب یونس مؤمنی^۱؛ محمد فاروق حسینی^{۲*}

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، y.unesmomeni@ut.ac.ir

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، mfarogh@ut.ac.ir

(دریافت ۱۵ تیر ۱۳۹۴، پذیرش ۲۸ شهریور ۱۳۹۴)

چکیده

امروزه سدهای بزرگ با اهدافی نظیر تولید انرژی برق آبی، ایجاد مناطق گردشگری، افزایش عمر سدهای پایین دست و مواردی از این دست احداث می‌شوند. سدهای بتنی قوسی از جمله مقرون به صرفه‌ترین روش‌های سدسازی در مقیاس بزرگ هستند. بخش عمده‌ای از تحمل بار ناشی از فشار مخزن در سدهای قوسی به عهده تکیه‌گاه‌های آن است. این موضوع تأکیدی بر اهمیت بالای تحلیل پایداری تکیه‌گاه‌ها در این نوع سدها است. روش سنتی معمول برای تحلیل پایداری تکیه‌گاه‌های یک سد استفاده از روش تعادل حدی برای محاسبه ضریب ایمنی گوه‌های مستعد لغزش است. در روش مذکور، گوه‌های سنگی صلب و فاقد ناپیوستگی داخلی در نظر گرفته می‌شوند. در تحقیق پیش‌رو، پس از مروری کوتاه بر وضعیت زمین‌شناسی ساختگاه طرح سد و نیروگاه بختیاری و شناخت گوه‌های مستعد لغزش در محل تکیه‌گاه‌های سد، نیروی وارد بر تکیه‌گاه‌ها با استفاده از روش اجزای محدود تخمین زده شده است. در فرآیند مدل‌سازی عددی سعی بر این است که هندسه بدنه سد و تکیه‌گاه‌ها با حداقل ساده‌سازی، شبیه‌سازی شوند. همچنین برای اطمینان از عدم تأثیر فواصل مرزی بر نتایج مدل‌سازی، از المان‌های نیمه بی‌نهایت در مرزها بهره گرفته شده است. در نهایت پس از تخمین توزیع بارهای بدنه سد بر تکیه‌گاه‌ها، پایداری گوه‌های مستعد لغزش با استفاده از تئوری حدبالا تأیید شده است. روش مذکور، روشی مبتنی بر تعادل کار و انرژی است که بر خلاف روش تعادل حدی توانایی بررسی تسلیم در ناپیوستگی‌های داخلی گوه سنگی را دارد.

کلمات کلیدی

سد بتنی قوسی؛ تکیه‌گاه؛ تئوری حدبالا

۱- مقدمه

و تکیه‌گاه‌ها با حداقل ساده‌سازی، شبیه‌سازی شود. همچنین برای اطمینان از عدم تأثیر فواصل مرزی بر نتایج مدل‌سازی عددی، از المان‌های نیمه بی‌نهایت در مرزها بهره گرفته شده - است. در نهایت پس از تخمین توزیع بارهای وارد بر تکیه‌گاه‌ها، پایداری گوه‌های مستعد لغزش با استفاده از تئوری حد بالا بررسی می‌شود.

۲- پیشینه مطالعات

مطالعات مربوط به پایداری شیروانی‌ها اولین بار توسط کولمان^۲ و روی محیط‌های خاکی آغاز شد. روش او بر مبنای تعادل حدی نیروهای مقاوم و نیروهای محرک در توده خاک بود [۴]. اولین تحلیل‌های سه‌بعدی مربوط به تکیه‌گاه‌های سنگی را می‌توان به لوند^۳ نسبت داد. او که مطالعات خود را از روی گسیختگی سد مالپاست آغاز کرد، یک روش سه‌بعدی ساده بر مبنای آرایش هندسی ناپیوستگی‌های توده‌سنگ ارائه داد. گودمن و شی^۴ در کتاب خود روش مشابهی با نام تئوری بلوکی را ارائه دادند [۵]. در این روش به کمک تصاویر استریوگرافیک، گسیختگی‌های محتمل درون توده‌سنگ مشخص می‌شود. استفاده همزمان از مدل‌سازی‌های عددی و تئوری بلوکی، روش قدرتمندی را در حوزه تحلیل پایداری تکیه‌گاه‌ها ارائه داده است. در چنین تحلیل‌هایی پس از شناخت گسیختگی‌های بحرانی با استفاده از تئوری بلوکی، نحوه توزیع تنش، جابه‌جایی‌ها و نیروی پیشران حاصل از فشار مخزن با استفاده از مدل‌سازی‌های عددی به دست می‌آید. نمونه‌ای از چنین تحلیلی توسط یو و همکاران [۶] روی سد وزنی- قوسی هیو^۵ در چین انجام شده است. آن‌ها به کمک روش اجزای محدود و با در نظر گرفتن مدل رفتاری الاستوپلاستیک پایداری تکیه‌گاه‌های این سد را بررسی کردند و نتایج تحلیل خود را با نتایج تعادل حدی دویعدی مقایسه کردند. نمونه‌ای دیگر از چنین تحلیل‌هایی را می‌توان در مطالعات سهرابی و همکاران [۳] بر روی سد لیوزن^۶ به ارتفاع ۲۶۵ متر مشاهده نمود. این مطالعه با در نظر گرفتن بارهای لرزه‌ای بر روی تکیه‌گاه‌های چپ سد انجام پذیرفته است.

مفاهیم پایه‌ی به کارگیری تئوری حدبالا در مسائل ژئوتکنیک در مطالعات شن [۷] ارائه شده است. محاسبه ظرفیت باربری در توده‌های سنگی از جمله کاربردهای رایج روش‌های آنالیز

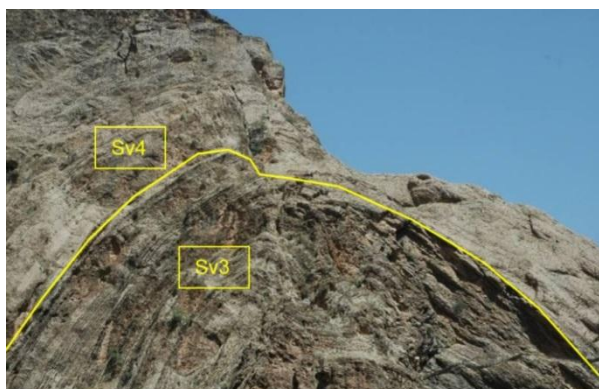
توزیع ناموزون مکانی جریان‌های سطحی و تغییرات شدید بین فصلی از ویژگی‌های هیدرولوژیکی مناطق وسیعی از سطح زمین محسوب می‌شود. وجود چنین شرایطی باعث شده است که مدیریت منابع آبی از دیرباز مورد توجه جوامع بشری قرار گیرد. در گذشته احداث بندها اغلب به منظور تأمین آب شرب و کشاورزی مناطق پایین‌دست انجام می‌شد. امروزه سدهای بزرگ با اهدافی نظیر تولید انرژی برق‌آبی، ایجاد مناطق گردشگری، افزایش عمر سدهای پایین‌دست و مواردی از این دست احداث می‌شوند. سرعت روبه‌رشد صنعت سدسازی به ویژه در کشورهای در حال توسعه، توجه بیش از پیش محققان را به این حوزه جلب کرده است [۱].

گسیختگی سد مالپاست^۱ واقع در جنوب فرانسه در سال ۱۹۵۹ مثال مناسبی برای بیان اهمیت پایداری سدها است. این حادثه به دنبال بارش‌های جوی و تغییر ناگهانی سطح آب مخزن رخ داد. گسیختگی تکیه‌گاه سمت چپ این سد باعث فروریختگی بدنه سد و سپس جریان سیلاب به سمت پایین‌دست شد. مناطق مسکونی پایین‌دست به طور کلی زیر آب رفتند و ۴۲۳ تن کشته شدند [۲].

تحلیل پایداری تکیه‌گاه‌های یک سد اغلب در فاز اول مطالعات ساختگاه قرار می‌گیرد. در این مطالعات رفتار توده‌سنگ با توجه به فاصله‌داری، شیب، جهت شیب، زبری، پرشدگی و فشار آب منفذی درزه‌ها تحت اثر نیروهای پیشران وارده از طرف مخزن سد مطالعه می‌شود و پایداری توده‌سنگ در مقابل مکانیزم‌های مختلف گسیختگی به دقت بررسی می‌شود.

روش معمول برای تحلیل پایداری تکیه‌گاه‌های یک سد قوسی، استفاده از روش تعادل حدی برای محاسبه ضریب ایمنی گوه-های مستعد لغزش است. روش تعادل حدی با فرض‌هایی همراه است که از جمله آن می‌توان به فرض صلب در نظر گرفتن گوه-های سنگی اشاره کرد [۳]. در این روش درزه‌داری داخلی گوه-های سنگی مورد توجه قرار نمی‌گیرد. وجود چنین فرض‌هایی ممکن است دقت نتایج این روش را با ابهام مواجه سازد.

در تحقیق پیش‌رو پس از مروری کوتاه بر وضعیت زمین‌شناسی ساختگاه طرح U2M برای سد بختیاری و شناخت گوه‌های مستعد لغزش در محل تکیه‌گاه‌های سد، نیروی وارد بر تکیه‌گاه-ها با استفاده از روش اجزای محدود تخمین زده می‌شود. در فرآیند مدل‌سازی عددی سعی بر این است که هندسه بدنه سد



شکل ۲: سازندهای ساختگاه سد بختیاری در قسمت بالای تکیه‌گاه

تراز کف رودخانه در محل محور سد ۵۳۵ متر از سطح آب‌های آزاد است. دیواره راست دره در ناحیه محور سد شیب نسبتاً ثابت و حدود ۷۰ درجه دارد. دیواره چپ دره در ناحیه محور سد دارای شیب متغیر است. شیب کلی این دیواره در محل محور سد ۶۳ درجه است [۱۱].

۳-۲- گوه‌های مستعد لغزش

مشاهدات میدانی و اطلاعات حاصل از درزنگاری در ساختگاه طرح بختیاری حاکی از آن است که ترکیب ناپیوستگی‌ها، گوه‌های بالقوه ریزشی در محل تکیه‌گاه‌ها ایجاد نخواهد کرد. دلیل این امر محدودیت در توزیع ناپیوستگی‌های افقی و یا نسبتاً افقی است که سطح لغزش را برای گوه ایجاد کند. با این حال در این مطالعه با در نظر گرفتن سطوح لغزش افقی فرضی؛ که از ترکیب دسته‌درزه و سطوح لایه‌بندی که در محور طاق‌دیس به صورت نسبتاً افقی جانمایی شده‌اند، تعدادی گوه دارای پتانسیل لغزش در نظر گرفته شده و پایداری آن‌ها بررسی شده است [۱۲].

بر این اساس پایداری شش گوه در تکیه‌گاه راست و شش گوه در تکیه‌گاه چپ بررسی شده است. گوه‌های مذکور از تقاطع سه سطح ناپیوستگی P_1 ، P_2 و P_3 تشکیل شده‌اند.

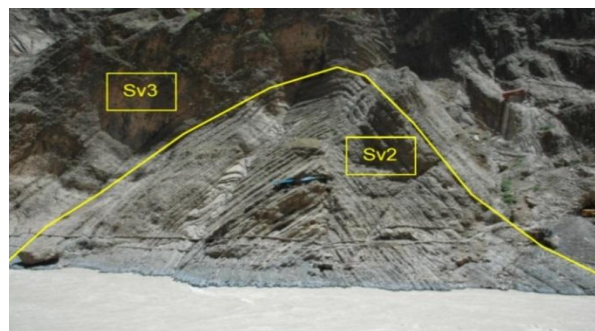
سطح P_1 ناپیوستگی فرضی است که از ترکیب دسته‌درزه‌ها، سطوح لایه‌بندی و سنگ بکر تشکیل شده است. سطح P_2 در تکیه‌گاه‌های چپ و راست معرف ناپیوستگی‌های نسبتاً قائم است. در نهایت سطح P_3 سطح پرده تزریق بین بالادست و پایین‌دست سد است. جداول ۱ و ۲ به ترتیب مشخصات گوه‌های مستعد لغزش در تکیه‌گاه چپ و گوه‌های مستعد لغزش در تکیه‌گاه راست را نشان می‌دهند. خواص مقاومتی در نظر گرفته شده برای این سطوح ناپیوستگی، با استفاده از ترکیب خواص

حدی است. ایمانی و همکاران [۸] به بررسی تأثیر فاصله درزه-داری و شیب درزه‌ها در ظرفیت باربری توده‌های سنگی پرداخته‌اند. دونالد و شن [۴] سعی بر به‌کار گرفتن روش‌های عددی در تحلیل‌های تئوری حد بالا برای محیط‌های سنگی داشتند. آن‌ها میدان نرخ پلاستیک وفق‌پذیر با شرایط مسئله را تعیین کردند و با استفاده از معادلات کار و انرژی، ضریب ایمنی را محاسبه کردند. شن و همکاران [۹،۱۰] روش اخیر را به مسائل سه‌بعدی تعمیم دادند.

۳- ساختگاه سد بختیاری

۳-۱- وضعیت زمین‌شناسی

با توجه به مطالعات امکان‌سنجی صورت پذیرفته در ارتباط با سد و نیروگاه بختیاری، طرح محور و هندسه سد با نام U2M به‌عنوان مناسب‌ترین طرح برای احداث سد شناخته شده است. ساختگاه طرح U2M در دره رودخانه بختیاری واقع شده است. این رودخانه از میان طاق‌دیس سیاه کوه و تقریباً عمود بر محور آن عبور می‌کند. در ازای این دره حدود ۱۱۵۰ متر و عرض آن در کف حدود ۲۵ تا ۳۵ متر است. عرض دره در محل تاج سد، حدود ۳۴۰ متر است. محل محور سد در فاصله حدود ۳۵۰ متری از ورودی دره واقع است. همان‌طور که در شکل‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود، سنگ پی این ساختگاه از سازندهای سروک (SV2 و SV3) در قسمت‌های پایینی و میانی تکیه‌گاه‌ها و SV4 در قسمت بالایی تکیه‌گاه‌ها تشکیل شده است. دره این رودخانه در مرکز طاق‌دیس سیاه‌کوه شیب نسبتاً ملایمی در قسمت‌های تحتانی دارد. البته در قسمت‌های فوقانی دره شیب دیواره‌ها در هر دو طرف افزایش می‌یابد و در برخی نواحی کاملاً عمود و حتی معکوس می‌شود [۱۱].

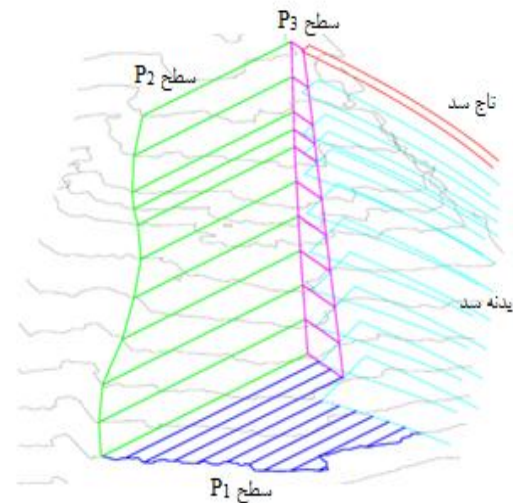


شکل ۱: سازندهای ساختگاه سد بختیاری در قسمت پایین تکیه‌گاه

جدول ۲: خواص هندسی و مکانیکی گوه‌های مستعد لغزش در تکیه-
گاه چپ [۱۲]

| گوه | رقوم تراز (m) | P3 | | P2 | | P1 | |
|---------|---------------------|------|------------|-----------------------|------------------------|------------------|------------------------|
| | | شیب | جهت شیب | شیب | جهت شیب | شیب | جهت شیب |
| W1 1 | ۸۴۰ | ۶۲۲ | ۵۸ | ۷۷ | ۷۲ | ۷۵ | ۰ |
| | ۸۲۰ | | | | | | |
| W1 2 | ۸۴۰ | ۱۹۴۰ | ۹۶ | ۷۷ | ۷۲ | ۷۵ | ۰ |
| | ۷۹۰ | | | | | | |
| W1 3 | ۸۴۰ | ۴۲۴ | ۸۸۶ | زاویه اصطکاک (Kpa) | زاویه اصطکاک (درجه) | چسبندگی (Kpa) | زاویه اصطکاک (درجه) |
| | ۷۴۰ | | | | | | |
| W1 4 | ۸۴۰ | ۷۴۴ | ۹۱۴ | زاویه اصطکاک (Kpa) | زاویه اصطکاک (درجه) | چسبندگی (Kpa) | زاویه اصطکاک (درجه) |
| | ۷۰۰ | | | | | | |
| W1 5 | ۸۴۰ | ۱۲۵۱ | ۲۵۵ | زاویه اصطکاک (Kpa) | زاویه اصطکاک (درجه) | چسبندگی (Kpa) | زاویه اصطکاک (درجه) |
| | ۶۶۰ | | | | | | |
| W1 6 | ۸۴۰ | ۲۳۹ | ۶۴۹۴ | زاویه اصطکاک (Kpa) | زاویه اصطکاک (درجه) | چسبندگی (Kpa) | زاویه اصطکاک (درجه) |
| | ۶۰۰ | | | | | | |

مقاومتی ناپیوستگی‌ها و سنگ بکر در نظر گرفته شده‌اند. روند تخمین خواص مقاومتی سطوح ناپیوستگی‌ها در مطالعات ملاحظات طراحی سد و نیروگاه بختیاری [۱۱] ارائه شده است. همچنین شکل ۳ هندسه یکی از گوه‌های تکیه‌گاه راست سد بختیاری را نشان می‌دهد.



شکل ۳: گوه W6r به همراه سطوح لغزش [۱۲]

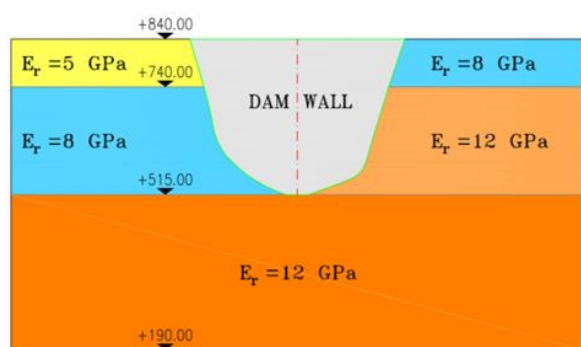
جدول ۱: خواص هندسی و مکانیکی گوه‌های مستعد لغزش در تکیه-
گاه راست [۱۲]

| گوه | رقوم تراز (m) | P3 | | P2 | | P1 | |
|---------|---------------------|------|------------|-----------------------|------------------------|------------------|------------------------|
| | | شیب | جهت شیب | شیب | جهت شیب | شیب | جهت شیب |
| Wr 1 | ۸۴۰ | ۲۹۰۴ | ۶۵ | ۷۵ | ۱۱۰ | ۰ | ۰ |
| | ۸۲۰ | | | | | | |
| Wr 2 | ۸۴۰ | ۴۵۵ | ۶۱۷ | ۷۵ | ۲۳ | ۰ | ۰ |
| | ۷۹۰ | | | | | | |
| Wr 3 | ۸۴۰ | ۱۰۸۲ | ۶۷۵ | زاویه اصطکاک (Kpa) | زاویه اصطکاک (درجه) | چسبندگی (Kpa) | زاویه اصطکاک (درجه) |
| | ۷۴۰ | | | | | | |
| Wr 4 | ۸۴۰ | ۱۵۴۴ | ۷۶۶ | زاویه اصطکاک (Kpa) | زاویه اصطکاک (درجه) | چسبندگی (Kpa) | زاویه اصطکاک (درجه) |
| | ۷۰۰ | | | | | | |
| Wr 5 | ۸۴۰ | ۲۰۲۲ | ۱۴۲ | زاویه اصطکاک (Kpa) | زاویه اصطکاک (درجه) | چسبندگی (Kpa) | زاویه اصطکاک (درجه) |
| | ۶۶۰ | | | | | | |
| Wr 6 | ۸۴۰ | ۲۵۲ | ۸۲۶۴ | زاویه اصطکاک (Kpa) | زاویه اصطکاک (درجه) | چسبندگی (Kpa) | زاویه اصطکاک (درجه) |
| | ۶۰۰ | | | | | | |

۴- مدل سازی
روش‌های عددی مبتنی بر اجزای محدود به دلیل سادگی در فرمول‌بندی و انعطاف بالای آن در توسعه مدل‌های رفتاری، بسیار فراگیر هستند. از این‌رو در بسیاری از مسائل که از مدل رفتاری خاصی تبعیت می‌کنند، اجزای محدود روش منحصر به فرد حل مسئله خواهد بود [۱۳]. چون امکان توسعه تحقیق از رویکردهای محوری این تحقیق است و همچنین به دلیل هندسه پیچیده بدنه و تکیه‌گاه‌های سد بختیاری در حالت سه بعدی، استفاده از روش‌های عددی مبتنی بر اجزای محدود از اولویت-های حل مسئله قرار گرفت. لازم به ذکر است که انتخاب روش اجزای محدود برای تحلیل پایداری تکیه‌گاه‌های سد‌های قوسی با دستورالعمل‌های ارائه شده توسط کمیته ایمنی و بازرسی سدها و نیروگاه‌های امریکا مطابقت دارد [۱۴].
از میان نرم‌افزارهای اجزای محدود، نرم‌افزار ABAQUS 6.13 توانایی بالایی در بررسی مدل‌های رفتاری مختلف در تحلیل‌های استاتیک و دینامیک دارد. از این‌رو استفاده از این نرم‌افزار امکان توسعه تحقیق در مراحل بعدی را فراهم می‌سازد. از سوی دیگر نرم‌افزار مذکور ابزار توانمندی برای پیاده‌سازی و مش‌بندی محیط‌های سه‌بعدی در اختیار کاربر قرار می‌دهد. وجود چنین ویژگی به همراه محیط نرم‌افزاری جذاب و توانایی بالا در ارائه خروجی‌های مدل، استفاده از این نرم‌افزار را توجیه‌پذیر می‌کند.

جدول ۴: خواص مکانیکی بدنه بتنی سد [۱۱]

| واحد | مقدار | پارامتر |
|-------------------|-------|---|
| MPa | ۲۵/۰ | مقاومت فشاری تک محوره ۱۸۰ روزه (f_c) |
| MPa | ۲۴۰۰۰ | ضریب الاستیک (E_c) ACI 350M-01: ((طبق استاندارد $E_c = 4700\sqrt{f_c}$)) |
| - | ۰/۱۸ | نسبت پواسون (ν_c) |
| kN/m ³ | ۲۴/۰ | وزن حجمی (γ_c) |



شکل ۴: ضرایب الاستیک توده‌سنگ [۱۱]

۳-۴- بارگذاری

به‌طور کلی تحلیل پایداری سدها نسبت به دیگر مسائل ژئوتکنیکی نیاز به ملاحظات ویژه در ارتباط با نحوه بارگذاری دارد. از جمله بارهای وارد بر تکیه‌گاه‌های سد در یک تحلیل استاتیکی می‌توان به بار مرده وزن سد، نیروی هیدرواستاتیک آب که به بدنه و متعاقبا به تکیه‌گاه‌ها اعمال می‌شود و نیروی گل و لای رسوب کرده در مخزن اشاره کرد.

۱-۳-۴- نیروی وزن مرده بدنه سد

در فرایند مدل‌سازی این مطالعه نیروی بار مرده بدنه سد در چهار مرحله به تکیه‌گاه اعمال می‌شود. طبق پیشنهاد کمیته ایمنی و بازرسی سدهای آمریکا [۱۴] اعمال بار مرده وزن بدنه سد به‌صورت مرحله‌ای منجر به یکنواختی توزیع تنش و همچنین کاهش تنش‌های کششی در بدنه سد خواهد شد.

۴-۱- خواص مکانیکی و مدل رفتاری مصالح

در روند این تحقیق، مدل‌سازی عددی فقط به‌منظور برآورد بارهای وارد بر تکیه‌گاه‌ها و با فرض رفتار الاستیک خطی برای دامنه مسئله انجام می‌پذیرد. در واقع اختصاص هر نوع رفتار تسلیم‌پذیر به توده‌سنگ در روند حل مرز بالا به مسئله اعمال می‌شود. معرفی خواص مکانیکی دامنه مدل در دو قسمت توده-سنگ و بدنه بتنی سد انجام می‌شود.

۴-۱-۱- خواص مکانیکی توده‌سنگ

در این مسئله مدل رفتاری الاستیک خطی همسانگرد برای توده-سنگ پی و تکیه‌گاه لحاظ شده است. ضرایب الاستیک توده-سنگ مطابق با آخرین مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی [۱۱] انجام شده در این زمینه در نظر گرفته شده‌اند. شکل ۴ معرف ضرایب الاستیک تخمین زده شده در دامنه مسئله است. همان‌طور که در این شکل مشخص است تغییرات ضرایب الاستیک فقط در راستای عمودی در نظر گرفته شده است. در واقع تغییرات ضرایب الاستیک توده‌سنگ در راستای افقی قابل اغماض است. همچنین در این مطالعه نسبت پواسون و وزن حجمی برای کل توده‌سنگ یکسان و مطابق با مقادیر ذکر شده در جدول ۳ هستند.

جدول ۳: وزن حجمی و نسبت پواسون توده‌سنگ [۱۱]

| واحد | مقدار | پارامتر |
|-------------------|-------|----------------------------------|
| - | ۰/۲۵ | نسبت پواسون (ν_r) |
| kN/m ³ | ۲۷/۰ | وزن حجمی توده‌سنگ (γ_r) |

۴-۱-۲- خواص مکانیکی بدنه بتنی سد

مدل رفتاری بدنه بتنی سد، مانند توده‌سنگ الاستیک خطی همسانگرد در نظر گرفته می‌شود. خواص مکانیکی بدنه بتنی سد در جدول ۴ خلاصه شده‌اند. لازم به ذکر است، ضریب الاستیک در نظر گرفته شده برای بتن مسلح از روی مقاومت فشاری ۱۸۰ روزه آن و مطابق با استاندارد (ACI 350M-01) تخمین زده شده است. همچنین چون توزیع تنش ناشی از اختلاف دمای دو وجه بدنه سد در این مطالعه در نظر گرفته نمی‌شود، از بیان خواص حرارتی بدنه سد صرف نظر شده است.

۴-۳-۲- نیروی هیدرواستاتیک مخزن

نیروی هیدرواستاتیک مخزن بر وجه بالادست بدنه سد و نیروی هیدرواستاتیک پساب بر وجه پایین دست سد و متناسب با تراز آب مخزن در شرایط معمول و غیر معمول ((سیلاب احتمالی)) اعمال خواهد شد. چون تراز آب مخزن در شرایط سیلاب احتمالی شرایط بحرانی تری نسبت به تراز نرمال آبیگری سد ایجاد خواهد کرد، در این تحقیق تراز آب مرتبط با سیلاب احتمالی برای سطح آب دریاچه مخزن در نظر گرفته می شود. فشار هیدرواستاتیک آب علاوه بر وجه بالادست بدنه سد به صورت همزمان بر وجه پایین دست سد و توسط آب مازاد مخزن وارد می شود. جدول ۵ ارائه دهنده رقوم تراز مرتبط با هریک از این سطوح آب مخزن و پساب سد در شرایط معمول و سیلاب است. وزن حجمی آب جهت اعمال بار هیدرواستاتیک معادل $9/81 \text{ kN/m}^3$ در نظر گرفته شده است [۱۱].

جدول ۵: رقوم تراز فشار هیدرواستاتیک [۱۱]

| عنوان | مخزن سد | پساب سد |
|---------------|------------------|---------|
| | رقوم تراز آب (m) | |
| سیلاب احتمالی | ۸۴۰ | ۵۵۳ |

۴-۴- معرفی مرزها و دستگاه مختصات مسئله

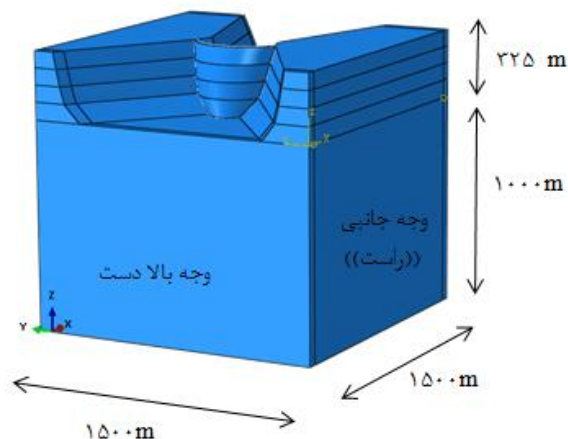
چون نتایج حل مسائل ژئوتکنیک بر مبنای دستگاه مختصات مورد استفاده ارائه خواهد شد، معرفی دستگاه مختصات امری غیرقابل اجتناب خواهد بود. در این تحقیق به منظور حل مسائل در تمامی مراحل از یک دستگاه مختصات کارتزین مرجع استفاده شده است. محور X در این دستگاه مختصات در راستای رودخانه و در جهت جریان آب در نظر گرفته شده است. همچنین محور Z این دستگاه مختصات در راستای شتاب گرانش زمین و در جهت خلاف آن تنظیم شده است. در نهایت محور Y با توجه قاعده دست راست تعیین شده است. در شکل ۵ دستگاه مختصات مرجع در گوشه سمت چپ قابل مشاهده است.

مسئله مطرح شده در این تحقیق دارای دو مرز جانبی در سمت راست و سمت چپ بدنه سد است. این مرزها حدودا به فاصله یک و نیم برابر ارتفاع سد، از دو گوشه تاج سد قرار دارند. این فواصل مطابق پیشنهاد ارائه شده توسط دستورالعمل کمیته ایمنی و بازرسی سدها و نیروگاه های امریکا [۱۴] انتخاب شده-

اند. مرزهای مذکور صفحاتی با بردار نرمال موازی محور Y هستند.

علاوه بر مرزهای جانبی، دو مرز در بالادست و پایین دست سد قرار دارد که در این تحقیق به عنوان مرزهای جلویی و پشتی مدل خوانده می شوند. این مرزها نیز به فاصله تقریبی دو برابری ارتفاع سد از مرکز قوس تاج سد قرار دارند. این فاصله بیشتر از فاصله یک و نیم برابری پیشنهاد شده توسط دستورالعمل کمیته ایمنی و بازرسی سدها و نیروگاه های امریکا [۱۴] در نظر گرفته شده اند.

برای اطمینان از عدم تأثیر مرزها بر نتایج مدل، از المان های نیمه بی نهایت در اطراف مدل استفاده شده است. به این ترتیب ضمن برقراری تعادل در مدل هیچ یک از جابه جایی ها در مرزهای نام برده شده، صفر در نظر گرفته نشده اند.



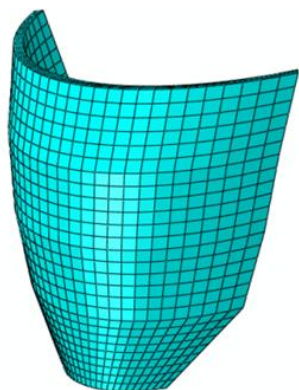
شکل ۵: ابعاد و مرزهای مدل سازی

مسئله پیش رو همچنین دارای یک مرز کف است که بردار نرمال آن در راستای محور Z است. فاصله این مرز تا کف بدنه سد بیش از دو برابر ارتفاع سد در نظر گرفته شده است که این مقدار نیز بیش از مقدار پیشنهاد شده توسط دستورالعمل کمیته ایمنی و بازرسی سدها و نیروگاه های امریکا [۱۵] است. در این مرز تمامی درجات آزادی مربوط به جابه جایی، صفر در نظر گرفته شده است.

۴-۵- المان بندی

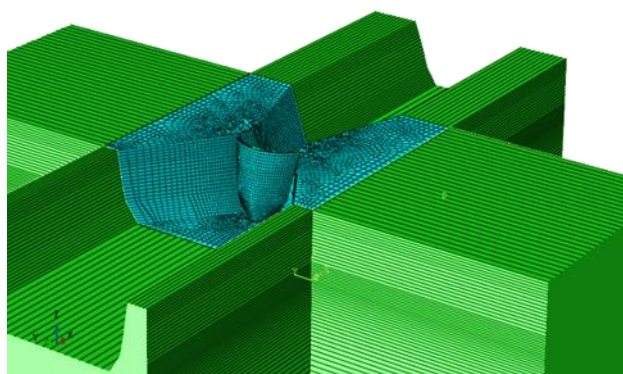
در یک مدل سازی عددی محیط مسئله به اجزای کوچک تر تقسیم می شود. هریک از این اجزا المان نامیده می شوند. المان-بندی مدل بایستی متناسب با هندسه مسئله، دقت خروجی ها و نوع باگذاری ها انتخاب شود.

در المان‌بندی بدنه سد، راستای عرضی تاج سد به چهار قسمت و راستای طولی سد به سی قسمت تقسیم شده است. شکل ۷ المان‌بندی این قسمت از مدل را نشان می‌دهد. تکیه‌گاه‌ها و پی سد نیز متناسب با المان‌بندی بدنه سد و به نحوی که تماس گره‌های مجاور دو قسمت برقرار باشد، المان‌بندی شده‌اند.



شکل ۷: المان‌بندی بدنه سد

المان‌بندی کلی مسئله در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است در مجاورت مرزهای مدل، المان‌های نیمه بی‌نهایت وجود دارند. استفاده از المان‌های نیمه بی‌نهایت یکی از راه‌کارهای کاهش اثر مرزها بر نتایج مدل‌های عددی هستند. المان‌های نیمه بی‌نهایت، المان‌های نسبتاً بزرگ با تعداد محدودی گره هستند که قابلیت مدل‌سازی رفتار الاستیک خطی در محیط اطراف مدل را فراهم می‌کنند. در نتیجه استفاده از این المان‌ها توزیع مناسبی از تنش‌ها در اطراف مدل را فراهم خواهند کرد.

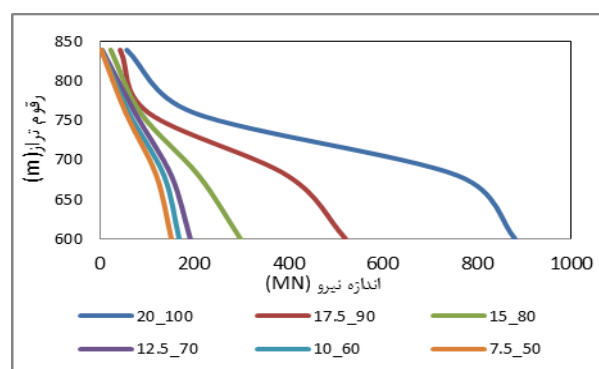


شکل ۸: المان‌بندی کل مسئله به همراه المان‌های نیمه بی‌نهایت

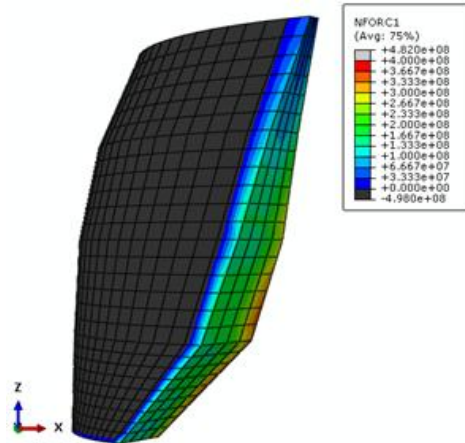
در انتخاب ابعاد المان‌ها باید به این نکته دقت داشت که با ریز شدن المان‌ها تعداد گره‌ها و متعاقباً تعداد معادلات افزایش می‌یابد. در نتیجه المان‌های ریزتر نیاز به حافظه و زمان بیشتری برای حل مسئله دارند. بدیهی است که ریز شدن المان‌ها در برای افزایش دقت مسائل عمل می‌کند اما فرآیند ریز شدن المان‌ها، الزاماً پاسخ بهتری ارائه نمی‌دهد. در صورتی که نسبت بین اضلاع المان‌ها مناسب نباشد، در روند بارگذاری ممکن است المان‌ها دچار لاغری و در نتیجه منجر به ایجاد خطا در پاسخ مسئله شوند. در نتیجه تعیین ابعاد مناسب برای المان‌ها نیاز به توجه ویژه دارد [۱۵].

به منظور تعیین ابعاد مناسب المان‌ها در این مسئله، خروجی اندازه نیروی وارد بر تکیه‌گاه راست، به ازای المان‌بندی‌های مختلف از رقوم تراز ۶۰۰ m تا ۸۴۰ m بررسی شد. شکل ۶ نتایج این بررسی را نشان می‌دهد. حدود نشان داده شده در زیر نمودار معرف کمینه و بیشینه بعد المان‌های به کار گرفته شده برای مسئله هستند. لازم به ذکر است در المان‌بندی مسئله در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها که دقت پاسخ‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد، المان‌های ریزتر و با حرکت به سمت مرزهای مدل المان‌های بزرگ‌تر به کار گرفته شده‌اند.

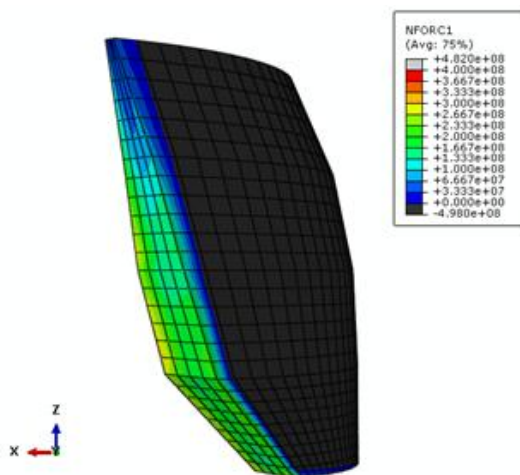
همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود با کوچک شدن کمینه و بیشینه ابعاد المان‌ها بزرگی نیروهای وارد بر تکیه‌گاه راست در ترازهای مختلف کاهش می‌یابد. دلیل این امر را تا حدودی می‌توان در افزایش نقاط گره‌ای در تکیه‌گاه‌های سد جست‌وجو کرد. به ازای کمینه بعد ۷/۵ متر و بیشینه بعد ۵۰ متر، بزرگی نیروهای وارد بر تکیه‌گاه راست در ترازهای مختلف همگرایی نسبی از خود نشان می‌دهند.



شکل ۶: توزیع نیروی گره‌ای در تکیه‌گاه راست به ازای ابعاد مختلف المان



شکل ۹: توزیع نیروهای گره‌ای در راستای X در سمت راست بدنه سد.



شکل ۱۰: توزیع نیروهای گره‌ای در راستای X در سمت چپ بدنه سد.

شکل‌های ۱۱ و ۱۲ در محور افقی نشان‌دهنده مجموع نیروهای گره‌ای در سه راستای X، Y، Z و اندازه برآیند نیروها و در محور قائم رقوم تراز پی تا کف تکیه‌گاه‌های چپ و راست هستند. همانطور که در این تصاویر مشخص است نیروی در راستای X که اغلب ناشی از عملکرد قوسی بدنه سد است، از تراز تاج به تراز پی سد روند نزولی دارد. البته در رقوم ۶۰۰ متر یک شکستگی برای این روند در هر دو تکیه‌گاه مشاهده می‌شود. در واقع در این رقوم روند صعودی نیروی راستای X ثابت و در نهایت نزولی خواهد شد. با نگاهی به هندسه بدنه سد در این رقوم مشخص خواهد شد قوس‌های کنسولی بدنه سد در این تراز دچار تغییر شیب خواهند شد. در چنین شرایطی از عملکرد قوسی سد کاسته شده و به عملکرد کنسولی آن افزوده می‌شود. در چنین حالتی در واقع نیروی هیدرواستاتیک مخزن به جای آنکه به تکیه‌گاه‌ها اعمال شود توسط پی سد تحمل خواهد شد.

در جدول ۶ خلاصه‌ای از تعداد و نوع المان‌های به کار گرفته شده در مدل‌سازی عددی ارائه شده است.

جدول ۶: خلاصه‌ای از نوع و تعداد المان‌های به کار گرفته شده در مدل

| قسمت | نوع المان | تعداد المان | تعداد گره | ابعاد تقریبی بزرگترین المان (m) | ابعاد تقریبی کوچک‌ترین المان (m) |
|---------------------|------------------------|-------------|-----------|---------------------------------|----------------------------------|
| بدنه سد | شش وجهی با تغییرات خطی | ۳۲۴۰ | ۴۲۴۰ | ۱۸/۵ | ۷/۵ |
| تکیه‌گاه و پی | شش وجهی با تغییرات خطی | ۱۷۲۴۹۶ | ۱۸۱۳۶۷ | ۵۰ | ۲/۵ |
| مرزهای نیمه بینهایت | نیمه بینهایت سه بعدی | ۶۹۶۰ | ۱۴۷۷۶ | ۱۰۰۰ | ۵۰ |

۴-۶- توزیع نیروهای گره‌ای در تکیه‌گاه‌ها

محاسبه نیروهای وارد بر تکیه‌گاه از طرف بدنه سد در زمره اصلی‌ترین اهداف این مدل‌سازی قرار دارد. چون در فرایند مدل‌سازی درجات آزادی گره‌های موجود در بدنه سد در محل تکیه‌گاه‌ها به توده‌سنگ تکیه‌گاه متصل شده است، نیروهای گره‌ای تکیه‌گاه و بدنه سد با هم برابر خواهند بود. در نتیجه می‌توان نیروهای گره‌ای وارد بر تکیه‌گاه را بر روی بدنه سد در محل تکیه‌گاه‌ها نشان داد. این کار به دلیل پراکندگی کم نیروهای گره‌ای در بدنه سد، توزیع مناسب‌تری را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. در اشکال ۹ و ۱۰ به ترتیب توزیع نیروهای گره‌ای در راستای X در سمت راست و چپ مشاهده می‌شود. همان‌طور که انتظار می‌رود شدت نیروها از تراز تاج تا پی در افزایش می‌یابد. همچنین نگاه دقیق‌تر در نحوه توزیع نیروهای گره‌ای راستای X در تکیه‌گاه‌ها افزایش شدت نیروها در یک تراز به سمت وجه پایین دست را نشان می‌دهد. این موضوع عملکرد قوسی سد را به درستی نشان می‌دهد. چرا که تنش‌های داخلی بدنه سد، از سمت نواحی مقعر به سمت نواحی محدب جهت‌گیری کرده‌اند.

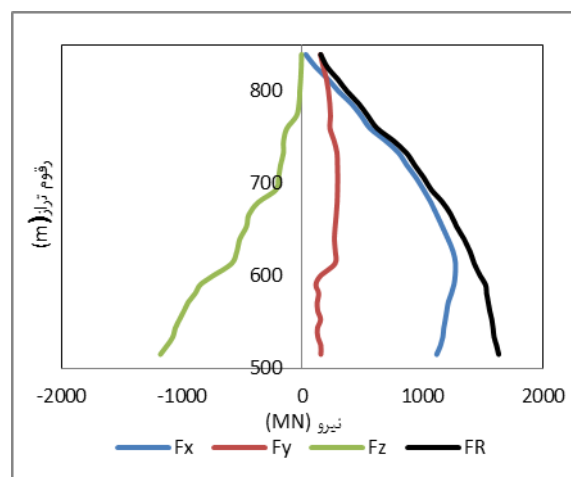
۷-۴- صحت‌سنجی مدل

در یک مدل‌سازی عددی، ممکن است فرضیات متعددی در زمینه هندسه مسئله، رفتار مصالح و درجات آزادی مرزها در نظر گرفته شود. از این رو ضروری است که صحت نتایج یک مدل-سازی عددی بررسی می‌شود. در فرآیند صحت‌سنجی یک مدل-سازی عددی، اغلب نتایج مدل، با نتایج روش‌های تحلیلی، روش‌های تجربی و یا داده‌های حاصل از ابزاربندی مقایسه قرار می‌شوند [۱۶].

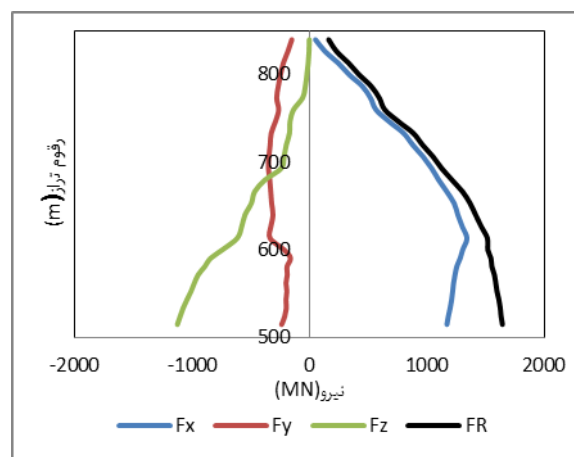
۷-۴-۱- روش تئوری ارتجاعی

روش تئوری ارتجاعی یک روش تحلیلی دو بعدی به‌منظور برآورد تنش‌های داخلی سدهای قوسی و همچنین محاسبه نیروهای تکیه‌گاهی است. در این بخش از تحقیق با به‌کارگیری این روش، نیروهای تکیه‌گاهی سد قوسی بختیاری در مقطعی به فاصله ۸۰ متری از تراز تاج سد محاسبه شده‌است و با نتایج مدل‌سازی مقایسه شده‌است.

در شکل ۱۳ یک قوس دوسرگردار که تحت بارگذاری مشخص قرار گرفته‌است، مشاهده می‌شود. با توجه به نامعین بودن سازه مذکور از لحاظ استاتیکی، به‌منظور حل مسئله، علاوه بر معادلات تعادل بایستی از معادلات تطابق تغییر شکل‌ها استفاده شود. پس از تعیین عکس‌العمل‌های تکیه‌گاهی و با توجه به نیروهای خارجی وارد بر سد، می‌توان مقادیر تنش در هر مقطع دلخواه و همچنین نیروهای تکیه‌گاهی را تعیین کرد. چنانچه قوس مورد مطالعه مطابق شکل ۱۴ از هر مقطع دلخواه به دو قسمت گردد و اثرات قسمت جدا شده به صورت سه نیروی وارده بر مقطع نشان داده شود، می‌توان به جای سه عکس‌العمل تکیه‌گاهی اضافی، سه عکس‌العمل مقطع جدا شده را محاسبه نمود و با داشتن آن‌ها، تنش در نقاط مختلف را تعیین کرد. نیروی افقی H_c ، نیروی قائم V_c و لنگر خمشی M_c که در شکل ۱۴ نشان داده شده‌اند، اثرات متناظر با سمت راست قوس هستند. روش مذکور به همراه جزییات نحوه محاسبه نیروهای تکیه‌گاهی در کتاب مهندسی سدها [۱۷] ارائه شده‌است.

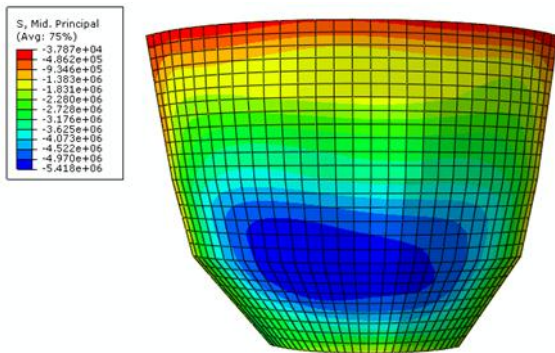


شکل ۱۱: توزیع نیروهای گره‌ای از تراز پی تا تاج سد در تکیه‌گاه راست

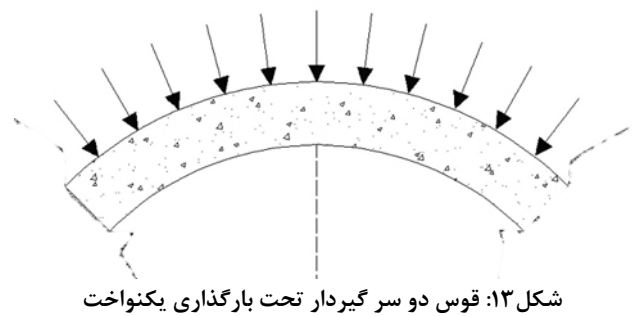


شکل ۱۲: توزیع نیروهای گره‌ای از تراز پی تا تاج سد در تکیه‌گاه چپ

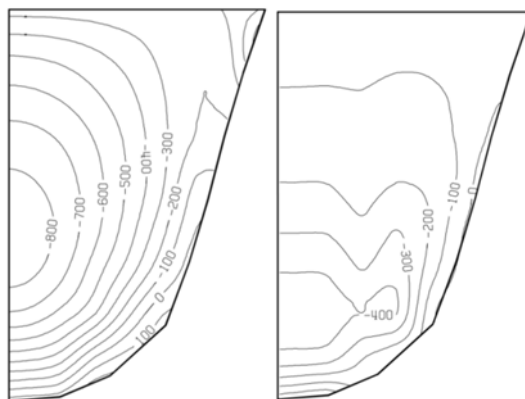
نکته قابل توجه این‌که مطالعه عملکردهای قوسی و کنسولی در یک مدل‌سازی عددی نیازمند پیاده‌سازی هندسه بدنه سد و تکیه‌گاه‌ها با دقت لازم است. در صورتی که نرم‌افزار مورد استفاده این امکان را برای محقق فراهم نسازد، محقق ناچار به ساده‌سازی در هندسه بدنه سد و تکیه‌گاه‌ها خواهد بود. در بسیاری از مطالعات ساده‌سازی‌ها به اندازه‌ای هستند که بسیاری از حقایق در ارتباط با نحوه اعمال بار به تکیه‌گاه و پی از دست خواهد رفت. خوشبختانه در این تحقیق استفاده از نرم‌افزار SOLIDWORKS جهت پیاده‌سازی هندسه دقیق در کنار نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS شرایط مساعدی در این زمینه فراهم کرده‌است.



شکل ۱۶: توزیع تنش‌های اصلی میانی بر وجه بالادست بدنه سد



شکل ۱۳: قوس دو سر گیردار تحت بارگذاری یکنواخت

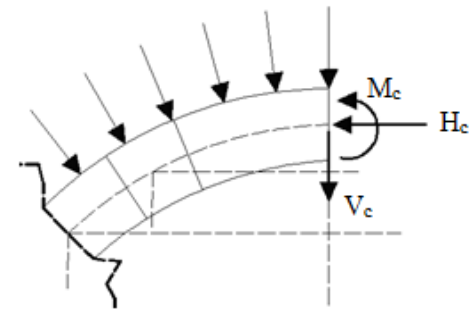


(ب)

(الف)

شکل ۱۷: (الف)-توزیع تنش‌های اصلی حداقل بر وجه بالادست بدنه سد قوسی پیشنهاد شده توسط دستورالعمل ایمنی و بازرسی سدهای امریکا [۱۴] (ب)-توزیع تنش‌های اصلی میانی بر وجه بالادست بدنه سد قوسی پیشنهاد شده توسط دستورالعمل ایمنی و بازرسی سدهای امریکا [۱۴].

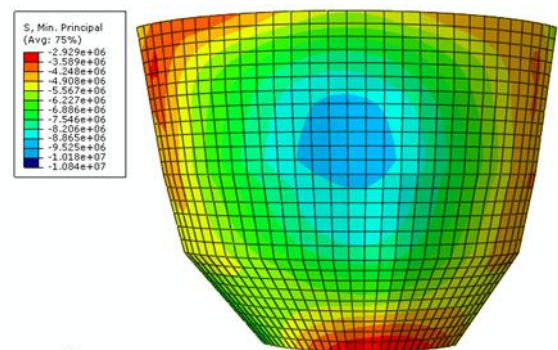
جدول ۷ خلاصه‌ای از مقادیر نیروهای محاسبه شده توسط روش دو بعدی تئوری ارتجاعی و مدل‌سازی سه‌بعدی است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر نیرویی تخمین زده شده توسط روش تئوری ارتجاعی در تمامی موارد بیشتر از مقادیر نیروی تخمین زده شده توسط مدل‌سازی است. این تفاوت را می‌توان به ضعف روش دو بعدی تئوری ارتجاعی در لحاظ کردن عملکرد کنسولی سد دانست. در واقع بخشی از نیروی ناشی از فشار آب در مخزن سد توسط عملکرد کنسولی به سنگ‌پی منتقل می‌شود.



شکل ۱۴: سمت چپ قوس دو سر گیردار به همراه نیروهای داخلی

۴-۷-۲- بررسی توزیع تنش روی بدنه سد

در اشکال ۱۵ و ۱۶ توزیع تنش‌های اصلی حداقل و میانی روی وجه بالادست بدنه سد بختیاری دیده می‌شود. همچنین در شکل ۱۷ الف و ب توزیع تنش‌های اصلی حداقل و میانی در نیمی از وجه بالادست یک سد قوسی که در دستورالعمل ایمنی و بازرسی سدها و نیروگاه‌های امریکا [۱۴] به‌عنوان نمونه ارائه شده، نمایش داده شده است. همان‌طور که مشخص است الگوهای توزیع تنش در این دو تصویر مطابقت مناسبی را با یکدیگر نشان می‌دهند. این موضوع را می‌توان مهر تأییدی بر صحت نتایج مدل‌سازی دانست.



شکل ۱۵: توزیع تنش‌های اصلی حداقل بر وجه بالادست بدنه سد

$$\int_{\Omega} \sigma_{ij}^* \cdot \varepsilon_{ij}^* dv + \int_{\Gamma} dD_s^* = WV^* + T^*V^*$$

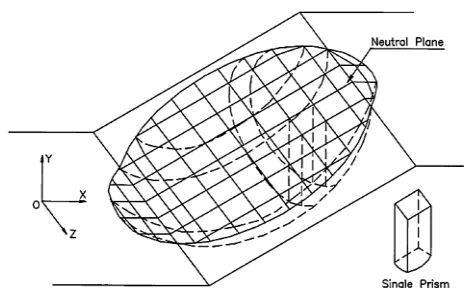
رابطه ۱

در رابطه ۱، W معرف نیروهای حجمی و V^* نرخ جابه‌جایی-های پلاستیک توده‌سنگ هستند. همچنین جملات سمت چپ معادله بالا، بیان‌گر انرژی کرنشی ذخیره شده درون توده‌سنگ و روی سطح گسیختگی هستند.

در فرآیند آنالیزحدی، توده‌سنگ به تعدادی المان شش وجهی تقسیم می‌شود و انرژی کرنشی دورنی توده‌سنگ از جمع جبری انرژی در تمامی المان‌ها به‌دست می‌آید (شکل ۱۸). از این بحث چنین برمی‌آید که رابطه ۱ را می‌توان با جمع جبری المان‌ها و به صورت زیر بازنویسی کرد.

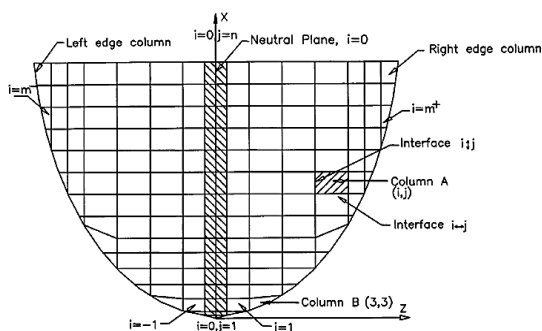
$$\sum D_{i \leftrightarrow j}^* + \sum D_{ij}^* + \sum D_{ij}^* = WV^* + T^*V^*$$

رابطه ۲



شکل ۱۸: المان‌بندی شیروانی دارای پتانسیل ریزش قاشقی [۱۰]

در رابطه بالا نماد \updownarrow برای نشان دادن سطوح بین دو ردیف و نماد \leftrightarrow برای نشان دادن سطوح بین دو ستون استفاده شده‌اند (به شکل ۱۹ مراجعه شود). سه عبارت سمت چپ رابطه ۲ نشان‌دهنده انرژی کرنشی ذخیره شده در سطوح ستون به ستون المان‌ها، سطوح سطر به سطر المان‌ها و سطح گسیختگی هستند.



شکل ۱۹: دید از بالای یک شیروانی جز بندی شده [۱۰]

جدول ۷: نیروهای تکیه‌گاهی در تراز ۷۶۰ m

| تکیه-گاه | روش محاسبه | F_x (MN) | F_y (MN) | V_c (MN) | H_c (MN) |
|----------|------------|------------|------------|------------|------------|
| راست | مدل‌سازی | ۵۶۴/۲۴ | -۲۶۵/۰۴ | -- | -- |
| | تحلیلی | ۶۹۶/۸۹ | -۴۷۳/۴۵ | -۰/۳۳ | -۶۸/۷۲ |
| چپ | مدل‌سازی | ۵۶۲/۵۳ | ۲۲۹/۴۸ | -- | -- |
| | تحلیلی | ۶۸۷/۷۵ | ۴۵۹/۲۷ | -۰/۳۳ | -۶۸/۷۲ |

۵- تحلیل پایداری گوه‌های مستعد لغزش

۵-۱- مبانی تئوری حد بالا

تئوری حد بالا از جمله روش‌های مبتنی بر آنالیزحدی است که به‌طرز گسترده‌ای در مسائل ژئوتکنیک به‌کارگرفته شده‌است. مفاهیم پایه به‌کارگیری تئوری حد بالا در مسائل ژئوتکنیک در مطالعات شن [۷] آورده شده‌است. شن و همکاران [۹،۱۰] روش مدونی به‌منظور تحلیل پایداری شیب‌های خاکی و سنگی با استفاده از تئوری حد بالا ارائه داده‌اند. انسجام و کاربردی بودن این روش، موجب استفاده از آن در تحقیق پیش‌رو شده‌است. در این بخش به بررسی و مطالعه روش مذکور پرداخته می‌شود.

۵-۱-۱- فرضیات روش شن و همکاران

- ۱- گوه سنگی در این روش در راستای سطوح ناپیوستگی داخلی و سطوح لغزش بیرونی گسیخته می‌شود.
- ۲- در این روش تأثیر لنگرهای داخلی و خارجی گوه ناچیز فرض می‌شود.
- ۳- مقاومت کششی در صفحات لغزش صفر در نظر گرفته می‌شود.
- ۴- تسلیم سطوح ناپیوستگی از تابع تسلیم مور کلمب تبعیت می‌کند.
- ۵- نرخ کرنش‌های پلاستیک در سطوح ناپیوستگی از قانون جریان همبسته پیروی می‌کنند.
- ۶- تعادل کار بیرونی و انرژی داخلی توده‌سنگ به‌عنوان حد گسیختگی گوه در نظر گرفته می‌شود.

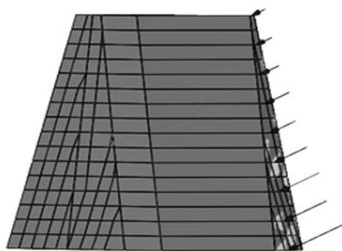
۵-۱-۲- فرمول‌بندی روش شن و همکاران

در صورتی که توده‌سنگ Ω^* تحت بار T به حد تسلیم خود رسیده باشد، بنا بر تئوری حد بالا نیروی خارجی T را می‌توان با بهینه‌سازی T^* از رابطه کار و انرژی زیر به‌دست آورد.

گوه‌ها از حداقل ضریب ایمنی تعریف شده در ملاحظات طراحی ساختگاه سد و نیروگاه بختیاری [۱۱] بیشتر است. در نتیجه پایداری گوه‌های مذکور تحت شرایط ذکر شده در بخش‌های قبل، تامین خواهد شد.

جدول ۸: ضرایب ایمنی تکیه‌گاه‌های راست و چپ

| حداقل ضریب ایمنی | ضریب ایمنی | گوه | ضریب ایمنی | گوه |
|------------------|------------|-----|------------|-----|
| ۱/۳۰ | ۵/۹۹ | W1 | ۱۳/۵۳ | Wr1 |
| | ۴/۵۰ | W2 | ۶/۸۸ | Wr2 |
| | ۲/۶۳ | W3 | ۳/۹۳ | Wr3 |
| | ۲/۳۰ | W4 | ۳/۰۵ | Wr4 |
| | ۲/۱۱ | W5 | ۲/۴۸ | Wr5 |
| | ۲/۱۷ | W6 | ۲/۶۱ | Wr6 |



شکل ۲۰: المان‌بندی گوه Wr6

۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه پس از مروری کوتاه بر وضعیت زمین‌شناسی ساختگاه سد بختیاری و تشخیص گوه‌های مستعد لغزش در تکیه‌گاه‌های چپ و راست، سد به همراه تکیه‌گاه‌ها و سنگ‌پی آن با استفاده از روش اجزای محدود تحلیل شدند. پیاده‌سازی هندسه بدنه سد و تکیه‌گاه‌ها در نرم افزار ABAQUS شرایط مناسبی برای مطالعه دقیق نحوه توزیع نیروها در دو تکیه‌گاه سد را فراهم آورد. در نهایت پس از مروری کوتاه تئوری حد بالا و روش شن و همکاران در مسائل تحلیل پایداری، ضریب ایمنی هر یک از گوه‌های مستعد لغزش با استفاده از تئوری حد بالا تخمین زده شد. نتایج این تحقیق به شرح زیر ارائه می‌شود:

۱- عملکرد کنسولی سدهای قوسی می‌توانند تأثیر به‌سزایی در نحوه توزیع نیروها در تکیه‌گاه‌ها داشته باشند. نمودارهای توزیع

در تحلیل پایداری شیروانی‌های خاکی و سنگی پارامترهای چسبندگی کاهش یافته c'_g و ضریب اصطکاک کاهش یافته ϕ'_g مطابق با روابط زیر ارائه می‌شوند.

$$c'_g = \frac{c'}{F}$$

رابطه ۳

$$\tan \phi'_g = \frac{\tan \phi'}{F}$$

رابطه ۴

c' و ϕ' به ترتیب چسبندگی و زاویه اصطکاک توده سنگ و F ضریب ایمنی هستند.

به این ترتیب رابطه ۲ را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$\sum D_{i \rightarrow j, \varepsilon}^* + \sum D_{ij, \varepsilon}^* + \sum D_{i, j, \varepsilon}^* = WV^* + T^*V^*$$

رابطه ۵

در رابطه ۵ زیر نویس ε نشان‌دهنده این است که انرژی‌های کرنشی درونی بر حسب پارامترهای مقاومتی کاهش یافته محاسبه می‌شوند. با توجه به این‌که در مسئله تحلیل پایداری تکیه‌گاه‌های سدهای بتنی بارهای اعمالی به تکیه‌گاه با استفاده از مدل‌سازی عددی تخمین زده می‌شوند، تنها مجهول رابطه ۵ ضریب ایمنی F خواهد بود.

در صورتی که بتوان میدان نرخ کرنش پلاستیک وفق‌پذیر با شرایط مسئله را توسعه داد، انرژی کرنشی پلاستیک داخلی توده‌سنگ قابل محاسبه خواهد بود.

میدان نرخ جابه‌جایی پلاستیک توده‌سنگ بایستی از قانون جریان همبسته پیروی کند، همچنین معادلات سازگاری را ارضا کنند. شن و همکاران روشی مدون برای محاسبه میدان نرخ کرنش پلاستیک وفق‌پذیر با معادلات سازگاری و معادلات قانون جریان همبسته ارائه داده‌اند. بر مبنای این روش ابتدا توده‌سنگ مستعد تسلیم با توجه به نحوه توزیع ناپیوستگی‌ها به تعدادی المان تقسیم می‌شود.

شکل ۱۹ نحوه المان‌بندی گوه Wr6 از ساختگاه بختیاری را نشان می‌دهد. پس از جزبندی، معادلات سازگاری و قانون جریان همبسته برای هر یک از المان‌ها بسط داده شده است و از حل این معادلات مولفه‌های نرخ کرنش پلاستیک محاسبه شده است. فرایند حل معادلات و محاسبه نرخ کرنش پلاستیک با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام شده است.

در جدول ۸ ضرایب ایمنی هر یک از گوه‌های مستعد لغزش ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود ضرایب ایمنی تمامی

- [8]. Imani, M., Fahimfar, A., and Sharifzadeh, M. 2012, Bearing failure modes of rock foundations with consideration of joint spacing. *Scientia Iranica*, 19,(6)1411-1421.
- [9]. Chen, Z., Wang, X., Haberfield, C., Yin, J.H., and Wang, Y. 2001, A three-dimensional slope stability analysis method using the upper bound theorem part I: theory and methods, *International journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38, 369-378.
- [10]. Chen, Z., Wang, X., Haberfield, C., Yin, J.H., and Wang, Y. 2001, A three-dimensional slope stability analysis method using the upper bound theorem part II: numerical approaches, application and extensions, *International journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38, 379-397.
- [11]. Bakhtiary Dam & HEPP, "Final Dam Design Criteria", Bakhtiary joint Venture Consultants, Doc. No. 4673/4250 Rev. 0, Aug. 2012.
- [12]. Bakhtiary Dam & HEPP, "Preliminary Stability Analysis of Abutments", Bakhtiary joint Venture Consultants, Doc. No. 4673/4246 Rev. 0, July. 2012.
- [13]. Eberhardt, E. 2003, Rock Slope Stability Analysis Utilization of Advanced Numerical Techniques. Earth and Ocean Sciences at UBC. vancouver, canada.
- [14]. "ENGINEERING GUIDELINES FOR THE EVALUATION OF HYDROPOWER PROJECTS". Federal Energy Regulatory Commission Division of Dam Safety and Inspections: Washington, DC. October, 1999.
- [15]. Dassault Systèmes Simulia Corp, 2010 "Abaqus documentation", version 6.10.
- [16]. Qiang, Y., KuangDai, L., YaoRu, L. 2011, A finite element approach for seismic design of arch dam-abutment structures. *Science China Technological Sciences*, 54, 516-521.
- [17]. Golze, A.R., "Handbook of Dam Engineering", 1977, New York: Van Nostrand Rheinhold Co.

پی‌نوشت

- ¹ Malppaset
² Culman
³ Londe
⁴ Goodman & Shi
⁵ Houhe
⁶ Luzzon

نیروی گره‌ای در تکیه‌گاه‌ها حاکی از آن است که در ترازهای نزدیک به پی، تأثیر عملکرد کنسولی بدنه سد بیشتر خواهد بود.

۲- مقایسه نتایج روش تحلیل تئوری ارتجاعی با روش مدل-سازی عددی ضمن تصدیق مدل‌سازی عددی، نشان داد که روش تئوری ارتجاعی عملکرد کنسولی بدنه سد را در محاسبات تأثیر نمی‌دهد و از این رو نیروهای تکیه‌گاهی برآورد شده در این روش مقادیر بیشتری نسبت به روش مدل‌سازی عددی خواهد داشت.

۳- با به‌کارگیری روش تئوری حد بالا در تحلیلی پایداری شیروانی‌های سنگی در قبال روش معمول تعادل حدی می‌توان تأثیر تسلیم ناپیوستگی‌های توده‌سنگ در مطالعات تحلیل پایداری وارد ساخت.

۴- مطالعات تحلیل پایداری تکیه‌گاه‌های ساختگاه سد بختیاری حاکی از آن است که در شرایط بارگذاری تعریف شده، گوه‌های مستعد لغزش در هر دو تکیه‌گاه حداقل ضریب ایمنی مورد نیاز را تأمین می‌کنند.

مراجع

- [۱]. فهیمی‌فر، الف و سروش، ح. ۱۳۸۹، "اصول پی در سد سازی"، چاپ دوم. انتشارات جهاد دانشگاهی امیر کبیر.
- [2]. Maurenbrecher, M. 2008, Analysing the analysis of the Malpasset arch dam failure of 1959. *Geo international*, reprinted from Newslette, 58-62.
- [3]. Sohrabi, M., Feldbacher, R., and Zenz, G. 2012, Stability of dam abutment including seismic loading.
- [4]. Donald, I., Chen, ZY. 1997, Slope stability analysis by the upper bound approach: fundamentals and methods. *Can Geotech J*, 34:853-862.
- [5]. Wyllie, D.C., and Mah, C.W. 2004, *Rock Slope Engineering Civil and Mining 4th Edition*. Spon Press, UK.
- [6]. Yu, X., Zhou, Y.F., and Peng, S.Z. 2005, Stability analyses of dam abutments by 3D elasto-plastic finite-element method: a case study of Houhe gravity-arch dam in China, *International journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42, 415-430.
- [7]. Chen, WF. 1975, *Limit Analysis and Soil Plasticity*, New York: Elsevier Scientific Publishing Co.