



مجموعه مقالات  
دومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران

۲۴ الی ۲۶ آذر ماه ۱۳۸۳

تهران - دانشگاه تربیت مدرس

انجمن مکانیک سنگ ایران



شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران



دانشگاه تربیت مدرس



## اندرکنش پی سنگی و سدهای بتنی قوسی

جعفر بلوری بزاز

استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ص پ- ۱۱۱۱-۹۱۷۷۵ مشهد، ایران،  
[bolouri@ferdowsi.um.ac.ir](mailto:bolouri@ferdowsi.um.ac.ir) تلفن ۸۶۱۵۱۰۰

محمد رئیسیان زاده

شرکت مهندسی مشاور آب پوی، ضلع شمال شرقی فلکه استقلال شماره ۳۷۷، مشهد، تلفن ۶۰۶۳۰۴۴

### چکیده:

سدهای بتنی وزنی و یا قوسی از سازه‌های آبی هستند که به لحاظ هزینه و کارکرد دارای اهمیت ویژه می‌باشند. پیچیدگی رفتار اینگونه سدها نظیر پایداری و دوام و در کنار آن مسائل اقتصادی موجب شده است که ضوابط و معیارهای طراحی که برای آنها تدوین گردیده است، مورد بازبینی و بررسی دائم قرار گیرد. هنگام احداث یک سد باید تا رسیدن به یک بستر سنگی مناسب که قادر به تحمل نیروهای وارده از طرف سد و تاسیسات جانبی باشد حفاری در پی انجام گردد. برای مدل نمودن سد و تحلیل آن، این بستر، فصل جدایی بین پی سنگی و بدنه بتنی به شمار می‌رود. برای رسیدن به نتایج قابل قبول جهت کنترل تنش و تغییر مکان‌های بدنه سد در آیین‌نامه‌ها پیشنهاد شده است که عمق معینی از پی، معادل ارتفاع سد به همراه بدنه مدل گشته و تحلیل تنش-کرنش انجام پذیرد. در این مقاله یکی از سدهای بتنی وزنی-قوسی کشور در حال ساخت در نظر گرفته شده و برای بررسی اثر عمق پی بر رفتار بدنه سد، عمق پی سنگی تغییر داده شده است و برای بحرانی‌ترین حالت بارگذاری، تنش و تغییر مکان‌های بیشینه، تمیین و مقایسه گشته‌اند. نتایج، بیانگر این نکته هستند که انتخاب عمقی از پی که با بدنه مدل می‌شود، روی مقادیر تنش‌ها و تغییر مکان‌ها اثر مستقیم دارد که می‌تواند به طراحی بهینه سد کمک شایان نماید. همچنین در این مقاله اثر تغییرات پارامترهای مقاومتی پی بر تنش-کرنش سد مورد بررسی واقع شده است.

### واژه‌های کلیدی:

سد بتنی، قوسی، وزنی، پی سنگی، تنش، کرنش، ضریب ارتجاعی

### ۱- مقدمه

در میان سازه‌های آبی، سدها به لحاظ نقش ویژه‌ای که در توسعه اقتصادی و کشاورزی دارند از موقعیت منحصر به فردی برخوردارند. هزینه‌های بالا و تنوع و پیچیدگی عوامل دخیل در طراحی اینگونه سدها و نیز نیاز به افزایش ارتفاع باعث گردیده است تا ضمن در نظر گرفتن ضریب اطمینان کافی، توسعه فزاینده‌ای در روش‌های طرح و اجرا صورت گیرد [۱]. در کشورهایی که سازه‌های آبی جایگاه خاصی در توسعه پایدار دارند، مراکز تحقیقاتی آیین‌نامه و معیارهایی را برای طراحی و اجرا تدوین کرده‌اند که



می‌تواند منجر به یک طرح اقتصادی، اجرایی و پایا گردد. بنابراین با پیشرفت علم و تحقیقات، بازنگری و به‌روز نمودن این آیین‌نامه‌ها ضروری به نظر می‌رسد. تغییر شکل ایجاد شده در پی سنگی بر اثر اعمال بار، بر روی توزیع تنش و تغییر شکل بدنه اثر می‌گذارد. ارزیابی دقیق از تداخل پی سنگی و بدنه سد مستلزم تعیین مشخصه‌های مکانیکی و عمقی از پی سنگی است که با سد به عنوان یک مجموعه واحد در تغییر شکل سد نقش بازی می‌کنند [۳]. برای بررسی این اثر یکی از سدهای وزنی-قوسی کشور که در نزدیکی شهر طبس در حال ساخت است مورد بررسی واقع شده است. با توجه به اینکه در سالیان دور یک سد قوسی با مصالح بنایی در تنگ‌ترین نقطه دره رودخانه کریت ساخته شده است لذا با هدف حفظ این آثار باستانی با ارزش، سد جدیدی به منظور تنظیم آب این رودخانه و استفاده بهینه از آب آن در حال ساخت است [۲].

## ۲- مشخصات سد باستانی کریت

استفاده از سد با هدف ذخیره سازی آب و به عنوان مخازن تنظیمی و ذخیره‌ای از زمان های بسیار دور در کشور ایران متداول بوده است. در استان خراسان سد کریت، سد کلات نادر، بند طرق و بند فریمان از جمله سدهای باستانی در ایران هستند.

سد قدیمی کریت با قدمت حدود ۷۰۰ سال، ارتفاع آن در دو دوره متفاوت افزایش یافته و ارتفاع نهایی آن به حدود ۵۶ متر از بستر دره رسیده است. طول تاج این سد قوسی باستانی که در نوع خود یکی از زیباترین سازه‌های آبی ایران بوده است، ۴۵ متر و عرض تاج آن ۱ متر می‌باشد؛ و از مصالح بنایی ساخته شده است (شکل ۱). در طول سالیان متمادی، رسوب مخزن سد را کاملاً پر نموده و عملاً بهره برداری از آن را غیر ممکن ساخته است. با توجه به آورد ۸/۱ میلیون متر مکعب رودخانه کریت و نیز ضرورت حفظ سد قدیمی کریت به عنوان یک اثر مهندسی باستانی و میراث فرهنگی، در سال ۱۳۷۸ مطالعات احداث یک سد بتنی قوسی-وزنی جدید در بالا دست سد قدیمی آغاز گردید.

## ۳- سد جدید کریت

### ۳-۱- نمای کلی سد کریت

پس از انجام مطالعات روی طرح‌های گوناگون از جمله سدهای بتنی و خاکی، با توجه به شرایط ساختگاه محل تنگه، سد بتنی قوسی با بازوی وزنی به عنوان بهترین گزینه انتخاب شد. نسبت عرض دره به

ارتفاع سد در قسمت قوسی برابر  $2/83$  متر و در تکیه گاه راست برابر  $5/59$  متر می‌باشد و به این دلیل جناح راست توسط یک بازوی وزنی تقویت گردید.



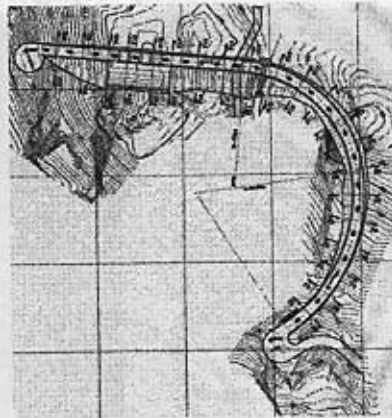
شکل ۱- تصویری از سد باستانی کریت

جنس ساختگاه دره کریت از نوع سنگ‌های آهکی با مقاومت فشاری و مدول ارتجاعی نسبتاً بالا و مناسب برای احداث سدهای قوسی می‌باشد. طراحی هندسی بخش قوسی سد با توجه به مقاومت مجاز فشاری و کششی بتن و با هدف توزیع بهینه تنش در بدنه سد و نیز مقاومت تکیه گاه سنگی سد صورت پذیرفت. با توجه به محدودیت‌های محلی نظیر عدم تقارن دره کریت، عمق لجن در پشت سد قدیمی و وجود رگه های سنگ نامناسب در جناحین، با انجام تحلیل های مقدماتی ابعاد اولیه سد کریت انتخاب گردید و سپس با تحلیل مجدد، هندسه سد نهایی گردید. ارتفاع سد از بستر رودخانه  $76/8$  متر و از پی  $53$  متر، ضخامت آن در پی  $15$  متر و در تاج  $5$  متر می‌باشد. طول تاج سد در بخش قوسی  $186/3$  متر و در بخش وزنی  $158/6$  متر و طول سرریز آن  $35$  متر تعیین شده است. شکل ۲ و ۳ پلان و مقاطع این سد را نشان می‌دهد.

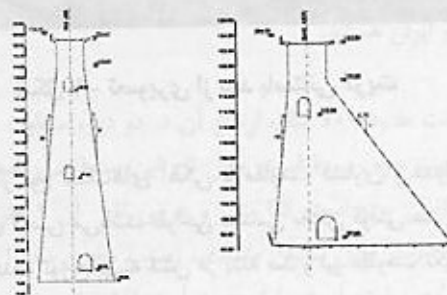
### ۳-۲- مشخصات فنی بتن بدنه و سنگ پی

در طراحی سد کریت فرض شده است که بتن متشکله بدنه سد، همگن و با خواص یکنواخت در تمام جهات می‌باشد. همچنین با توجه به میزان تنش های وارده، رفتار بتن ارتجاعی خطی در نظر گرفته شده

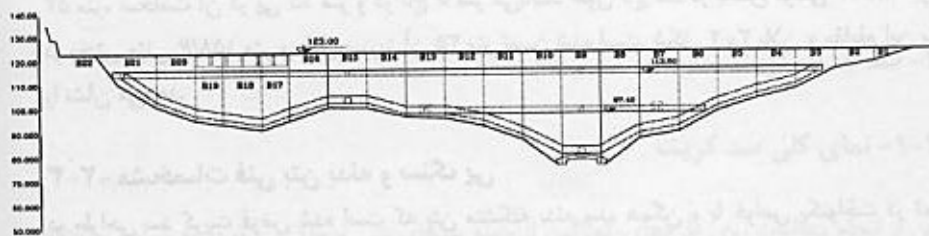
است. بر اساس نیازهای طراحی در قسمتهای گوناگون سد از بتن با مقاومت متفاوت استفاده شد است. جدول شماره ۱ مشخصات بتن را در قسمت‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۲- پلان طولی سد جدیدکریت



شکل ۳- الف) مقاطع عرضی سد جدیدکریت  
بخش قوسی      بخش وزنی



شکل ۳- ب) مقطع طولی سد جدیدکریت



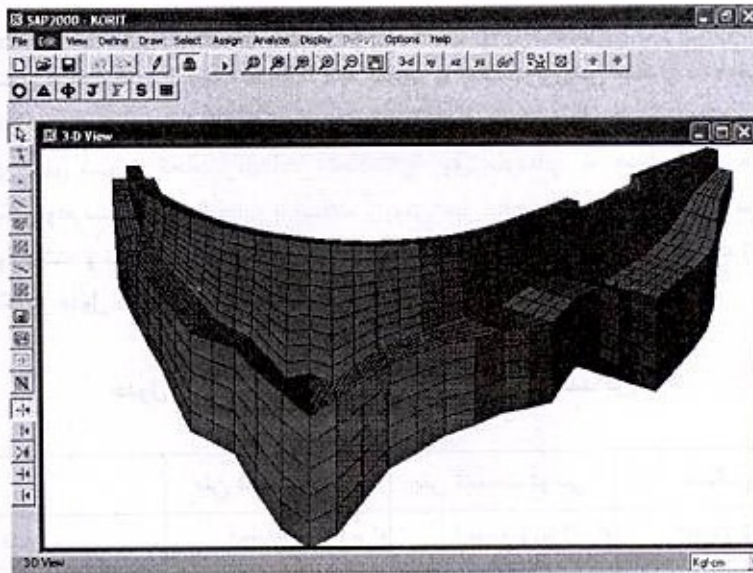
بر اساس مطالعات انجام شده محل سد کریت در بخش شرقی رشته کوه‌های شتری واقع شده است. این سازند شتری از آهک‌های با لایه متوسط تا لایه ضخیم به رنگ کرم روشن تشکیل شده است. شیب طبقات در محور سد بین ۲۰ تا ۲۶ درجه متغیر است و به سمت شمال شرق می‌باشد. با مطالعه گمانه‌های حفر شده و انجام آزمایشات ژئومکانیکی روی مغزه‌های به دست آمده، خصوصیات ژئومکانیکی توده سنگ تعیین گردید و با استفاده از روش طبق بندی بنیادسکی [۴]، توده سنگ مورد بررسی واقع شده و نوع آن در حد متوسط و در کلاس III طبقه بندی می‌گردد. مشخصات ژئوتکنیکی توده سنگ در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ - مشخصات مکانیکی بتن و سنگ پی سد کریت

سنگ پی	بتن قسمت قوسی	بتن قسمت وزنی	
$f_r > 500 \text{ kg/cm}^2$	$f_c = 250 \text{ kg/cm}^2$	$f_c = 150 \text{ kg/cm}^2$	مقاومت فشاری
$E_{sr} = 246000 \text{ kg/cm}^2$	$E_{sc} = 239000 \text{ kg/cm}^2$	$E_{sc} = 185000 \text{ kg/cm}^2$	ضریب ارتجاعی استاتیک
$E_{dr} = 307500 \text{ kg/cm}^2$	$E_{dc} = 298900 \text{ kg/cm}^2$	$E_{dc} = 231300 \text{ kg/cm}^2$	ضریب ارتجاعی دینامیک
$\gamma_r = 2800 \text{ kg/m}^3$	$\gamma_c = 2400 \text{ kg/m}^3$	$\gamma_c = 2400 \text{ kg/m}^3$	وزن مخصوص
$\nu_r = 0.23$	$\nu_c = 0.17$	$\nu_c = 0.17$	ضریب پواسون

### ۳-۳- تحلیل تنش-کرنش سه بعدی سد

تحلیل سد قوسی-وزنی کریت با استفاده از روش شبکه عناصر محدود سه بعدی با استفاده از نرم افزار SAP2000 [۵] و المان Solid که یک المان ۸ گرهی ایزوپارامتریک می‌باشد انجام گرفته است. مقادیر تنش در گره‌های المان و در دستگاه مختصات سراسری محاسبه شده‌اند. برای مدل سازی پی، قسمتی از بستر سنگی زیر سد به صورت گوه‌ای دایروی جدا و نیز فرض شده است که تغییر مکان‌ها در گره انتهایی این گوه ناچیز و برابر صفر می‌باشد. شعاع گوه‌های مزبور در هر مقطع متناظر با ارتفاع سد بوده و تعداد المان مدل سد بر اساس پیشینه درجه آزادی که برنامه قادر به پردازش آن می‌باشد انتخاب شده است (شکل ۴). بارهای اصلی وارد بر سد شامل وزن مرده سد، نیروی هیدرواستاتیکی و هیدرودینامیکی، فشار رسوبات، اثر حرارت، نیروی موج، نیروی زیرفشار و نیروی ناشی از باد و زلزله می‌باشد. آیین نامه USBR ترکیبات بارگذاری گوناگونی را برای سدهای قوسی و وزنی پیشنهاد می‌نماید که شامل بارگذاری عادی، غیر عادی و استثنایی است [۳].



شکل ۴- المان بندی بدنه و سنگ پی سد در نرم افزار SAP2000 جهت تحلیل تنش- کرنش

#### ۴- بررسی اثر پارامترهای مقاومتی پی سنگی بر بدنه سد

همانگونه که اشاره شد اصولاً عمقی از پی سد همراه بدنه مدل شده و سپس مورد تحلیل قرار می‌گیرد. بر اساس پیشنهاد آیین نامه USBR اگر عمقی از پی سنگی معادل ارتفاع سد به عنوان مدل اصلی در نظر گرفته شود نتایج می‌تواند قابل قبول باشد. جهت بررسی این اصل عمق پی سنگی  $Z_f$  از  $Z_f=0$  تا  $Z_f=2h$  (  $h$ : بیشینه ارتفاع سد) انتخاب گردید و سپس با توجه به انواع ترکیبات بارگذاری تحلیل تنش- کرنش انجام گرفت و مقادیر تنش ها و کرنش های بیشینه در هر یک از حالات بارگذاری مشخص گردید. باید دقت شود که برای کلیه حالات بررسی شده در این بخش، مشخصات مکانیکی سنگ یکسان و بر اساس نتایج آزمایشات ژئوتکنیک که در جدول ۱ آمده در نظر گرفته شده است.

#### ۴-۱- اثر عمق پی سنگی بر تغییرات تنش‌های فشاری و کششی در بدنه سد

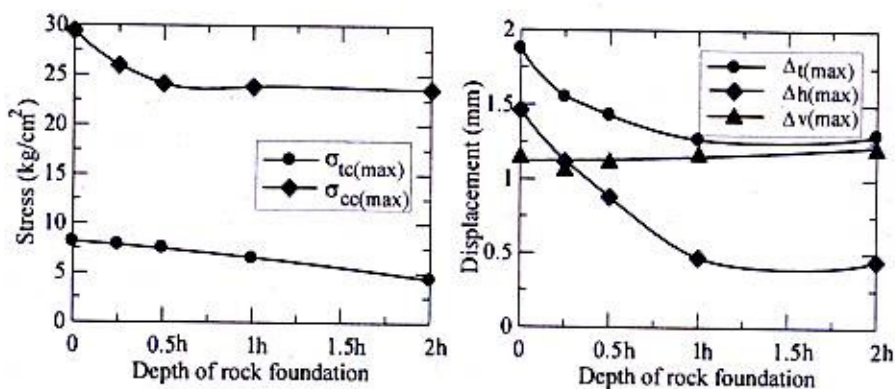
برای بررسی اثر عمق پی سنگی بر تنش‌های ایجاد شده در بدنه، مدل سد با عمق های متفاوت برای کلیه ترکیبات بارگذاری در هر حالت تحلیل گردید و تنش‌های بیشینه فشاری،  $\sigma_{cc(max)}$  و کششی،  $\sigma_{tc(max)}$  بتن بدنه سد در هر حالت ثبت گردید. این مقادیر در جدول شماره ۲ آورده شده است. همچنین

برای درک بهتر، مقادیر تنش بر حسب تغییرات عمق پی در شکل ۵ نیز نشان داده شده است.

جدول ۲ - تنش فشاری و کششی بیشینه ایجاد شده در بتن بدنه سد برای مقادیر گوناگون

عمق پی

$Z_f$	$\sigma_{tc(max)}$ kg/m <sup>3</sup>	$\sigma_{cc(max)}$ kg/m <sup>3</sup>
0	8.1	29.4
h/4	7.8	25.9
h/2	7.5	24.1
h	6.5	23.8
2h	4.4	23.6



شکل ۵- اثر عمق پی سنگی بر تنش‌های کششی و فشاری و تغییر مکان‌های بیشینه سد

۴-۲- اثر عمق پی سنگی بر تغییر مکان‌های بدنه سد

پس از تحلیل سد در حالات مختلف بیان شده، تغییر مکان کلی بیشینه  $\Delta t(max)$  تغییر مکان افقی بیشینه  $\Delta h(max)$  و تغییر مکان قائم بیشینه  $\Delta v(max)$ ، محاسبه شده و مقادیر آن در جدول شماره ۳ آورده شده است. همچنین برای درک بهتر، تغییرات تنش فشاری و کششی بیشینه بر حسب تغییرات عمق پی سنگی در شکل ۵ نشان داده شده است. روابط تغییر مکان‌ها به صورت معادلات ۱ تا ۳ هستند.

$$\Delta t = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2} \quad (1)$$



$$\Delta h = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \quad (۲)$$

$$\Delta v = \Delta z \quad (۳)$$

جدول ۳ - تغییر مکان کلی، افقی و قائم بیشینه ایجاد شده در بدنه سد برای مقادیر گوناگون

عمق پی

$Z_f$	$\Delta u(\max)$ mm	$\Delta h(\max)$ mm	$\Delta v(\max)$ mm
0	1.87	1.46	1.16
h/4	1.55	1.12	1.07
h/2	1.43	0.88	1.13
H	1.27	0.47	1.18
2h	1.3	0.45	1.22

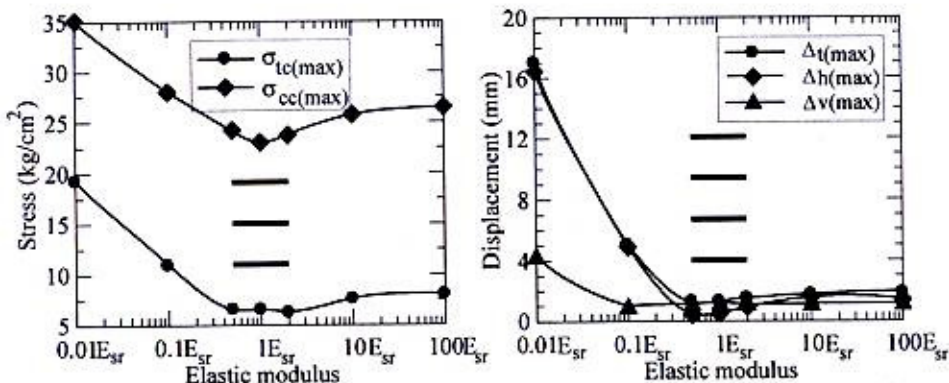
همانگونه که از شکل مشاهده می‌گردد مقادیر تنش و تغییر مکان به ازاء مقادیر بیش از h تقریباً ثابت است و پیشنهاد USBR منطقی به نظر می‌رسد. نتایج رفتارنگاری سد پس از آب‌گیری می‌تواند اثر عمق سنگ پی را آشکارتر نماید. ارتفاع کمتر از h به این معنی است که مجموعه سد و پی سنگی که محیطی یا اینرسی بالا را ایجاد می‌کرده تبدیل به سازه ای شده که تکیه‌گاه آن در فصل جدایی پی و سد بوده و با اینرسی کمتر موجب افزایش تغییر مکان شده است.

#### ۴-۳- اثر مشخصات مکانیکی سنگ بر پارامترهای مقاومتی بدنه سد

یکی از مهمترین مشخصه‌های مکانیکی سنگ پی که هنگام تحلیل سد به عنوان داده ورودی می‌باشد، ضریب ارتجاعی سنگ،  $E_{sr}$  است. برای بررسی تاثیر این پارامتر بر تنش‌ها و تغییر مکان‌های سد، بر اساس ضریب ارتجاعی حقیقی سنگ ( $E_{sr} = 246000 \text{ kg/cm}^2$  جدول ۱) که نتایج تحلیل آن با فرض  $Z_f = h$  در جدول‌های ۲ و ۳ آمده است و با در نظر گرفتن ضریب ارتجاعی سنگ معادل  $100E_{sr}$ ،  $10E_{sr}$ ،  $1E_{sr}$ ،  $0.1E_{sr}$ ،  $0.01E_{sr}$ ، تحلیل سد با توجه به انواع ترکیبات بارگذاری انجام گرفت و مقادیر تنش‌ها و کرنش‌های بیشینه ملاحظه شده در بتن بدنه سد برای هر یک از حالات بارگذاری مشخص شد. همانگونه که اشاره شد برای کلیه حالات بررسی شده در این بخش، عمق سنگ کف  $Z_f = h$  در نظر گرفته شده است. انتخاب مقادیر فوق صرفاً برای نشان دادن تغییرات پارامترهاست و واضح است که دامنه تغییرات  $E_{sr}$  در این حدود نیست. شکل ۶ تغییرات تنش و تغییر مکان‌های ایجاد شده در بدنه سد را برحسب تغییرات ضریب ارتجاعی سنگ در محدوده  $0.01E_{sr} \leq E \leq 100 E_{sr}$  نشان می‌دهد. تعیین ضریب ارتجاعی سنگ در آزمایشگاه و یا در محل قابل اندازه‌گیری است معمولاً اگر



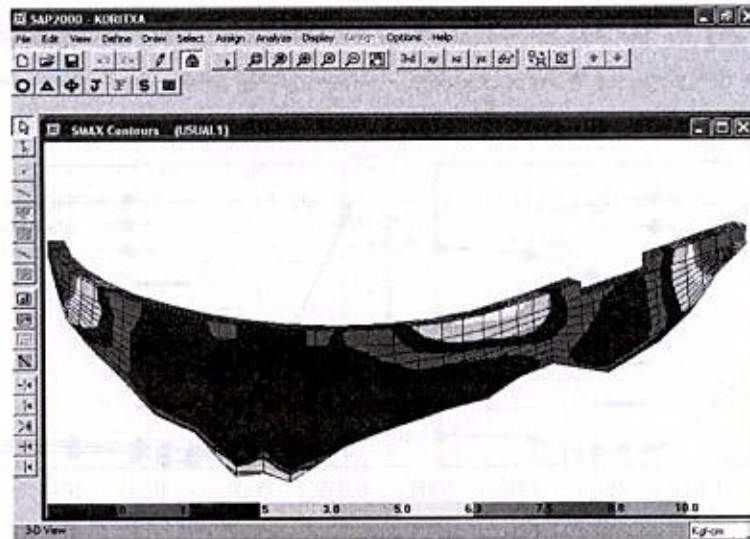
خطایی در تعیین ضریب ارتجاعی حقیقی سنگ باشد در محدوده  $0.5E_{sr} \leq E \leq 2E_{sr}$  واقع خواهد شد که با توجه به شکل ۶ ملاحظه می‌گردد این تغییرات اثر چشم‌گیری بر تنش‌ها و تغییر مکان‌های سد ندارد.



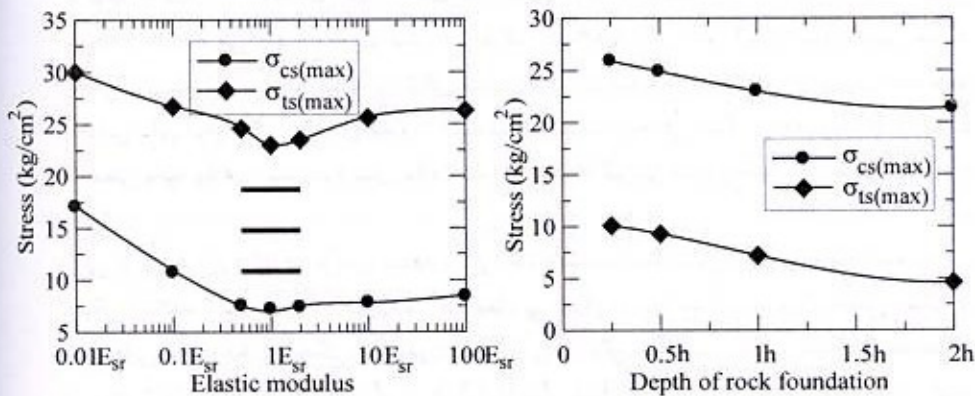
شکل ۶ - اثر ضریب ارتجاعی پی سنگی  $E_{sr}$  بر تنش‌های کششی و فشاری و تغییر مکان‌های بیشینه سد

با توجه به شکل ۷ که منحنی هم تراز تنش‌ها را برای بارگذاری استثنایی و داده‌های جدول ۲ نشان می‌دهد ملاحظه می‌گردد که تمرکز تنش در اطراف تکیه‌گاهها و در محل تبدیل مقطع قوسی سد به بخش وزنی آن است. واضح است این شکل نتیجه یکی از ترکیبات بارگذاری است و ممکن است نقاط بحرانی برای انواع دیگر بارگذاری متفاوت باشد. مقادیر ضریب ارتجاعی سنگ در محدوده  $E \leq 0.1 E_{sr}$  به معنی وجود یک پی بسیار نرم برای سازه است که منجر به افزایش تنش و تغییر مکان‌ها می‌گردد.

یکی از پارامترهایی که در طراحی سدهای بتنی حائز اهمیت است کنترل تنشهای ایجاد شده در پی سنگی اینگونه سدها است. در این بخش اثر عمق پی سنگی و نیز تغییرات ضریب ارتجاعی سنگ بر تنش‌هایی که در خود پی سنگی ایجاد می‌شود مورد بررسی واقع شده است. بنابراین مدل‌های مختلف با در نظر گرفتن عمق پی سنگی  $Z_f$  از  $Z_f=0.25h$  تا  $Z_f=2h$  تهیه گردید و سپس برای انواع ترکیبات بارگذاری تحلیل انجام شد و تنش‌های بیشینه فشاری  $\sigma_{cr(max)}$  و کششی  $\sigma_{tr(max)}$  که در پی سنگی ملاحظه شده ثبت گردید (توجه شود در این حالت  $Z_f=0$  بی‌معنی است). شکل ۸ تغییرات تنش را در سنگ پی به ازای مقادیر مختلف  $h$  به تصویر کشیده است.



شکل ۷- منحنی هم تراز تنش‌ها در بدنه سد برای یکی از انواع ترکیبات بارگذاری  
۵- بررسی اثر پارامترهای مقاومتی و عمق پی سنگی بر تنش‌های ایجاد شده در پی



شکل ۸- اثر ضریب ارتجاعی و عمق پی سنگی بر تنش‌های کششی و فشاری  
ایجاد شده در پی

در قسمت بعد با تغییر مقدار ضریب ارتجاعی سنگ معادل  $0.01E_{sr}$  ،  $0.1E_{sr}$  ،  $1E_{sr}$  ،  $10E_{sr}$  و



100E<sub>sr</sub> تحلیل سد با توجه به انواع ترکیبات بارگذاری انجام گرفت و مقادیر تنش‌ها و کرنش‌های بیشینه ایجاد شده در سنگ پی برای هر یک از حالات بارگذاری مشخص شد. همانگونه که اشاره شد برای کلیه حالات بررسی شده در این بخش، عمق سنگ کف  $Z_f=h$  در نظر گرفته شده است. شکل ۸ تغییرات تنش را در سنگ پی به ازای مقادیر مختلف E<sub>sr</sub> نشان می‌دهد.

## ۶- بحث و نتیجه گیری

آنچه در این تحقیق مورد بررسی واقع شد شامل اثر عمق پی و ضریب ارتجاعی بر رفتار بدنه سد و نیز تنش‌های ایجاد شده در پی می‌باشد. از نتایج بدست آمده که در شکل‌های قبل آورده شده است نتایج زیر را می‌توان استخراج کرد:

- با افزایش عمق پی اصولاً مقادیر تنش فشاری بیشینه و تنش کششی بیشینه کاهش می‌یابد. این موضوع به ویژه برای تنش کششی که اغلب ابعاد سد را کنترل می‌کند، حائز اهمیت است. تغییر مقدار عمق سنگ کف نیز منجر به جابجایی نقاط تمرکز تنش‌ها می‌شود که به طرح بهینه نسبی می‌تواند کمک کند.
- اگر چه تغییرات تنش و تغییر مکان‌های ایجاد شده در بدنه سد نسبت به ضریب ارتجاعی سنگ حساس است، اما در محدوده  $0.5E_{sr} \leq E \leq 2E_{sr}$  که در شکل با زمینه هاشورخورده نشان داده شده است، تغییرات تنش یا تغییر مکان در سد بسیار ناچیز است. بنابراین شناخت درز و ترک‌ها و گسل‌های احتمالی در پی سنگی و تکیه‌گاه‌ها و بررسی اثر آن در رفتار سد اهمیت بیشتری دارد.
- با افزایش عمق پی اصولاً مقادیر تنش فشاری بیشینه و تنش کششی بیشینه در پی سنگی، مشابه بدنه سد کاهش می‌یابد. در این حالت نیز کاهش مقدار تنش کششی که اغلب حائز اهمیت است حساس تر می‌باشد. در این حالت نیز تغییر ضریب ارتجاعی سنگ در محدوده‌ای که به دقت انجام آزمایش مربوط می‌شود، اثر ناچیز بر مقادیر تنش دارد.

در انتها لازم است یاد دیگر یادآوری گردد عمقی از پی که باید همراه با بدنه سد مدل گشته و تحلیل سد انجام پذیرد، نقش مهمی در مقدار تنش‌های کششی بتن بازی می‌کند. بنابراین اگر در سدهای قوسی و یا وزنی، تنش کششی کنترل کننده طرح است، ضروری است با افزایش عمق پی سنگی، سد مجدداً تحلیل گردد تا بتوان طرحی اقتصادی‌تر ارائه کرد.

## ۷- تشکر و قدردانی

از همکاری مهندسين مشاور آب پوی که با در اختیار گذاشتن اطلاعات، شرایط انجام این تحقیق را فراهم نمودند، صمیمانه قدردانی می‌گردد.

## ۸- علائم اختصاری

عمق پی سنگی	$Z_f$	ارتفاع بیشینه سد	$h$
ضریب ارتجاعی استاتیکی سنگ	$E_{sr}$	ضریب ارتجاعی استاتیکی بتن	$E_{sc}$
ضریب ارتجاعی دینامیکی سنگ	$E_{dr}$	ضریب ارتجاعی دینامیکی بتن	$E_{dc}$
وزن مخصوص سنگ	$\gamma_s$	وزن مخصوص بتن	$\gamma_c$
ضریب پواسون سنگ	$\nu_s$	ضریب پواسون بتن	$\nu_c$
تنش بیشینه کششی بتن	$\sigma_{tc(max)}$	تنش بیشینه فشاری بتن	$\sigma_{cc(max)}$
تغییر مکان افقی بیشینه	$\Delta h(max)$	تغییر مکان کلی بیشینه	$\Delta l(max)$
تنش بیشینه کششی سنگ پی	$\sigma_{tr(max)}$	تنش بیشینه فشاری سنگ پی	$\sigma_{cr(max)}$

## ۹- مراجع

- [1] ابریشمی، جلیل و وهاب رجایی، ناصر؛ ۱۳۸۰؛ «سدهای بتنی : طرح و اجرا»، انتشارات آستان قدس رضوی، ص-۱۰۰.
- [2] مهندسين مشاور آب پوی ؛ ۱۳۷۸؛ «طرح سد ذخیره‌ای سد کریت طبس»، گزارش طراحی بدنه سد، شماره ۱۹۳-۱۴، ص-۴.
- [3] "Design Criteria for Concrete Arch and Gravity Dams", A Water Resources Technical Publication, No. 19, United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation (USBR), 1977
- [4] Bieniawski, Z. T. (1989), "Engineering Rock Mass Classification", Wiley, New York
- [5] Habibulah, A, et al, (1995), "SAP 2000, Static and Dynamic Analysis of Structures: base program user guide", University of Berkeley, California, USA