

الگوهای شکل مناسب برای سدهای قوسی در مناطق زلزله خیز

شقایق رشیدی نیا، محمدتقی احمدی*^۲

۱. دانش آموخته دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲. استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست/ دانشگاه تربیت مدرس

mahmadi@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۲/۶]

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۶/۲۲]

چکیده - طراحی ایمن سازه‌های حساسی مانند سدهای بتنی قوسی در کشور فوق‌العاده لرزه‌خیز ما دارای اهمیت خاصی است. از آنجاکه طراحی شکل این سدها عملکرد سازه‌ای آن‌ها را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد، در پژوهش، معرفی الگوهای شکل سدهای قوسی کارآمد در مناطق لرزه‌خیز و شناسایی گرایش‌ها و ویژگی‌های حاکم بر شکل این سدها با توجه به تغییرات شرایط فیزیکی و هندسی ساختگاه به کمک روش‌های نوین بهینه‌سازی ریاضی شکل سازه مورد نظر قرار گرفته است. روش انجام پژوهش به صورت انجام محاسبات پارامتریک و آماری (رگرسیون خطی) بر روی تعداد زیادی نمونه سد قوسی است. به این طریق که تعداد زیادی نمونه سد قوسی با شرایط مختلف از نظر ارتفاع، عرض دره، مدول الاستیسیته توده سنگ تکیه‌گاه، تولید شده و عملیات بهینه‌سازی بر روی آنها انجام می‌گیرد و شکل بهینه نمونه‌های سدهای بتنی قوسی به دست می‌آیند. با بررسی شکل سدهای موجود در شرایط مختلف ساختگاه، قوانین حاکم بر تغییرات شکل سدهای بهینه نسبت به تغییرات مشخصات ساختگاه، استخراج می‌شود. از مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش، مشاهده روند افزایشی متغیرهای طراحی ضخامت در طره مرکزی و در تکیه‌گاهها نسبت به افزایش مدول پی است. این قوانین می‌توانند به عنوان رهنمودهایی در هنگام طراحی شکل سدها استفاده شود.

واژگان کلیدی: سد بتنی قوسی، شکل هندسی بهینه، بهینه‌سازی، طراحی سد.

۱- مقدمه

تابع هدف، کمینه کردن حجم بتن سد در نظر گرفته شد و همچنین تعدادی قید رفتاری و هندسی در نظر گرفته شده بود. مسئله بهینه‌سازی غیرخطی به مسئله خطی تبدیل شد و برای حل آن از روش SLP استفاده شد. برای آنالیز تنش از روش کنسول مرکزی ریتز استفاده شد و تنها بارهای استاتیکی در این مسئله مدنظر قرار گرفته شده بود [۲].

بیشترین پژوهش‌ها در زمینه بهینه‌سازی سد بتنی در کشور چین و از اواسط دهه ۱۹۷۰ به وسیله‌ی ژو بوفانگ و همکارانش انجام شد [۳]. پس از آن نیز پژوهش‌های مهم

طراحی شکل تاثیر بسیار بزرگی بر روی اقتصاد و ایمنی سد قوسی دارد. هدف از طرح بهینه شکل سدهای قوسی، رسیدن به بهترین و اقتصادی‌ترین طرح است، به گونه‌ای که قیود مشخصی برآورده شوند. اولین پژوهش‌های انجام شده در زمینه بهینه‌سازی شکل سدهای قوسی بیشتر راه‌حل‌های غشایی را در نظر قرار داده بودند و در آن‌ها از انعطاف‌پذیری پی و تنش‌های خمشی چشم‌پوشی شد و تنها یک حالت بارگذاری ساده (فشار هیدرواستاتیک+وزن) مورد توجه قرار می‌گرفت [۱].

دیگری در زمینه بهینه‌سازی ریاضی سد قوسی ادامه یافت [۴]. پژوهش‌های بیشتری در این زمینه در این سال‌ها به روش‌های شبکه عصبی، الگوریتم ژنتیک، روش‌های قازی و مشابه آن برای این منظور به کار گرفته شده‌اند.

از جمله پژوهش‌هایی که با روش الگوریتم ژنتیک در این رابطه انجام شده است می‌توان به پژوهش‌های ماهری و بیدختی اشاره کرد [۵].

در ایران پژوهش‌های در این زمینه صورت گرفته است؛ که در کارهای تجلی و همکاران [۶]، سلاجقه و حمیدیان [۷] از روش SQP و از برنامه DOT برای بهینه‌سازی استفاده شده و تحلیل تنش با استفاده از نرم‌افزار تجاری Ansys انجام شده است.

در یک جمع‌بندی کلی می‌توان گفت که مدل هندسی به کار رفته به وسیله‌ی ژو بوفانگ انطباق خوبی با حالات عملی فراهم می‌آورد و در بین پژوهشگران مورد اقبال عمومی بوده است. با این حال مدل هندسی ارائه شده در به وسیله‌ی اکبری [۸]، یک روش جدید بر اساس الگوی قوس‌های سهموی است که برای تعیین مشخصات در امتداد بدنه سد از سه مجموعه معادلات اسپیلاین هرمیتی استفاده می‌کند. بر خلاف کارهای گذشته، مدل او تمام جزئیات اضافی طراحی واقعی را در مدلسازی بدنه سد پوشش می‌دهد بنابراین تا حد زیادی کاستی‌های مدل‌های هندسی قبل از خود را برطرف کرده است. طرح بهینه سازه‌های بزرگ در برابر بارهای دینامیکی با قیود وابسته به زمان، هزینه زیادی می‌طلبد و در این خصوص مشکلات زیادی از جمله منفصل بودن فضای طراحی^۱ مطرح است، پس در تحلیل این سازه‌ها بیشتر از تبدیل بار دینامیکی به بار معادل استاتیکی استفاده شده است. در مدل ارائه شده به وسیله‌ی اکبری، روش تحلیل دینامیکی طیفی به کار گرفته شده است.

همچنین در مدل ارائه شده به وسیله‌ی اکبری، گام موثری برای بهبود مدل به کمک مدل المان محدود وبا در

نظریه‌ی اندرکنش دینامیکی سیستم سد-پی و مخزن برداشته شده است.

در نظر گرفتن تعداد بسیار زیاد متغیرهای طراحی و قیود فراوان تنشی و اجرایی مساله بهینه‌سازی ریاضی را می‌تواند دچار بن‌بست‌های محاسباتی جدی کند. در این زمینه روش‌های احتمالاتی و مکاشفه‌ای^۲ نیز نیازمند تعداد محاسبات فراتر از تصور می‌شود و به هیچ‌وجه کارآمدی ندارند. به کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی ریاضی نیازمند محاسبه گرادیان‌ها است، که این کار در بیشتر پژوهش‌هایی به روش تفاضل محدود انجام می‌گرفته است که هزینه محاسباتی بالایی را در بردارد. از آنجا که تعیین حساسیت پاسخ‌ها نسبت به متغیرهای طراحی در سازه‌های با شکل‌های پیچیده و سه بعدی دشوار است، از مفهوم سرعت شبکه‌های المان محدود^۳ برای محاسبه گرادیان‌ها در مدل ارائه شده به وسیله‌ی اکبری استفاده شده است که هزینه محاسباتی و مشکلات عددی را به میزان چشمگیری کم می‌کند. همچنین از نوآوری‌های مدل اکبری، می‌توان به کنترل حساسیت بارگذاری‌های وابسته به شکل هندسی و میزان اهمیت آنها در محاسبات گرادیان اشاره کرد.

در این پژوهش بررسی سیستماتیک نمونه‌های سدهای بتنی قوسی با شرایط هندسی و فیزیکی مختلف دره و همچنین با ارتفاع‌های مختلف صورت گرفته و شکل هندسی بهینه شده هریک از این سدها تعیین شد. سپس با پردازش و بررسی این نمونه‌های بهینه، استخراج قوانین و روندهای تغییرات پارامترهای مختلف هندسی سدها میسر شده است. این نتایج می‌تواند در طراحی بهینه شکل یک سد قوسی بتنی در شرایط تکیه‌گاهی مختلف، استفاده شود.

۲- روش پژوهش

در این پژوهش از بهینه‌سازی عددی استفاده می‌شود.

۲-۱- الگوریتم حل زیرمسئله بهینه‌سازی

در حالت کلی مساله بهینه‌سازی شکل، یک مساله ریاضی برنامه‌ریزی غیرخطی مقید به فرم زیر است.

$$\text{Minimize: } F(X) \quad (1)$$

Subject to:

$$g_j(X) < 0, j=1, 2, \dots, m$$

$$X^L < X < X^U$$

که در آن $F(X)$ تابع هدف، X بردار متغیرهای طراحی، $g_j(X)$ بیانگر [آمین قید، m تعداد قیود طراحی و X^U و X^L حدود بالا و پایین متغیرهای طراحی است. حل مساله غیرخطی بالا با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مقید هدف اصلی است که مراحل حل آن به صورت گام‌های زیر است.

- ۱- حدس اولیه مهندسی $X=X_0$ و تعیین شماره تکرار $q=q+1$
- ۲- محاسبه مقادیر تابع هدف و قیود $F(X^{q-1}), g(X^{q-1})$
- ۳- محاسبه گرادیان توابع هدف و قیود $\nabla F(X^{q-1}), g(X^{q-1})$
- ۴- تعیین جهت جستجوی S^q و اندازه گام α
- ۵- بهبود متغیرهای طراحی با استفاده از رابطه $X^q = X^{q-1} + \alpha S^q$
- ۶- در صورت برآورده نشدن معیارهای توقف، برگشت به گام ۲ و تکرار محاسبات

بخش دشوار در گام‌های بالا، یافتن برای جستجوی قابل قبول S^q و طول گام α است که الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی مانند SQP از گام‌های زیر برای محاسبات جهات جستجو و اندازه گام استفاده می‌کند.

با استفاده از تقریب درجه دوم تابع هدف و تقریب خطی قیود، زیرمساله یافتن برای جستجو آغاز می‌شود که این زیرمساله با روش‌های درجه دوم QP حل می‌شود. یافتن جهت جستجو براساس روش جهات قابل قبول اصلاح شده است. در حل این زیرمساله متغیرهای طراحی مولفه‌های بردار S بوده و شامل تمام قیود مساله اصلی، یعنی $g_j(X)$ نیز است.

به علت بزرگی مساله بهینه‌سازی (از نظر تعدادمتغیرها و قیود) از روش سرعت شبکه و روش خطی سازی استفاده شده است با این حال از آنجا که تعداد قیود نامساوی هنوز می‌تواند کاملاً زیاد باشد، معمولاً زیرمجموعه‌ای از قیود را به عنوان قیود بحرانی انتخاب می‌کنیم که به این مجموعه قیود پتانسیل^۴ گویند. توضیحات بیشتر در مورد یافتن جهت جستجو و معیارهای همگرایی، محاسبه گرادیان‌ها به روش تحلیلی، تحلیل حساسیت گسسته، سرعت طراحی محدوده و گرادیان پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی در مرجع [۸] آورده شده است.

۲-۲- تعریف مدل هندسی شکل سد

هندسه سد با متغیرهای موقعیت سیستم مختصات سد، برآمدگی قوس‌های قائم، ضخامت طره مرکزی، شعاع انحنای رأس قوس‌های افقی در رویه بالادست، ضخامت قوس‌ها در محل برخورد سد با تکیه‌گاه‌ها، نقاط شروع ناحیه ضخامت متغیر در قوس‌های افقی تعیین می‌شود. هرکدام از این متغیرها در ۴ تراز طراحی مرجع (تراز مبنا، $0.75H$ ، $0.4H$ ، تراز تاج سد)، معلوم بوده و در دیگر ترازهای ارتفاعی به وسیله‌ی منحنی‌های اسپیرالین تعیین می‌شوند. پس از تکمیل بدنه سد، تکیه‌گاه‌های سنگی سد با استفاده از داده‌های توپوگرافی تولید شده، و مدل سه‌بعدی آماده گسسته‌سازی برای تحلیل المان محدود می‌شود [۸].

۲-۳- جزییات مدل بهینه‌سازی عددی

متغیرهای طراحی

برای بهینه‌سازی شکل سدها در این پژوهش از الگوی سهمی هادی در بالادست و پروفیل ضخامت در پایین‌دست استفاده شده است. شکل مقطع قائم با استفاده از رویه‌های بالادست و پایین دست تعیین می‌شوند. برای مدلسازی دقیق شکل سدها از ۲۷ متغیر طراحی در مدل‌های المان محدود و بهینه‌سازی استفاده شده است که این متغیرها در شکل ۱ نمایش داده شده‌اند. در شکل ۱-۱

• بارگذاری

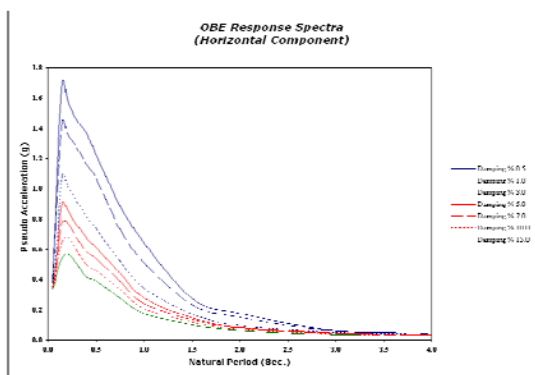
ارضای قیود بهینه سازی تحت سه حالت بارگذاری غیر عادی، نرمال و لرزه‌ای به شرح زیر انجام شده و بسته به حالت بارگذاری، قیود مربوطه باید هم‌زمان در فرآیند یافتن شکل بهینه رعایت شود.

بارگذاری اول غیرعادی و شامل تنها بار وزن است که برای تحلیل آن بسته به تعداد دفعات تریز درزهای قائم در فرآیند ساخت سد، چندین شبکه المان محدود برای بدنه سد در نظر گرفته شده است [۸]. حالت بعدی بارگذاری نرمال، شامل وزن بدنه سد به علاوه فشار هیدرواستاتیک روی رویه سراب آن است. مش سازه در این حالت پوسته‌ای یکپارچه را تشکیل می‌دهد. همچنین با توجه به اینکه طراحی یک سد برای طیف پاسخ زلزله هدف که در ساختگاه صورت می‌گیرد، حالت سوم بارگذاری، بار گذاری لرزه‌ای شامل بارگذاری نرمال به علاوه بار دینامیکی با استفاده از روش طیفی انجام می‌شود.

در این بارگذاری طیف شتاب هدف برای مؤلفه طولی زلزله به صورت نمونه در شکل ۲ ارائه شده است.

در محاسبات طیفی نسبت میرایی ۵٪ لحاظ شده و از ۱۵ مد برای تعیین پاسخ سد در تحلیل دینامیکی طیفی استفاده شده و تحلیل ارتعاش آزاد سازه به روش تکراری زیرفضا صورت می‌گیرد.

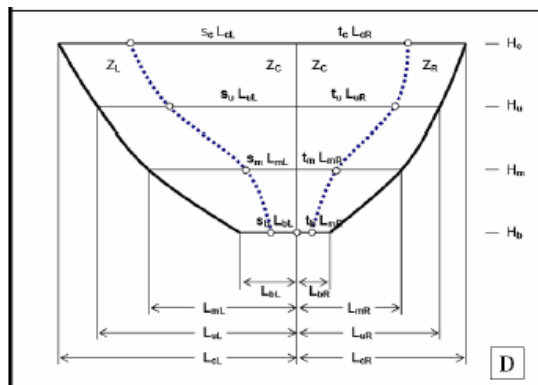
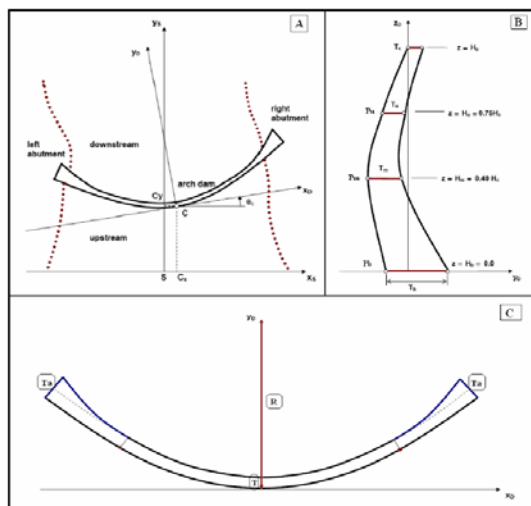
برای ترکیب آثار مدها با توجه به درگیری مودهای متعدد سدهای قوسی از تکنیک CQC استفاده می‌شود.



شکل (۲) - شکل طیف شتاب بدون بعد مؤلفه طولی زلزله OBE

متغیرهای θ_c , C_y , C_x جانمایی محور سد در ساختگاه و در شکل ۱-B، پارامترهای خمیدگی به سمت سراب و پایاب در طره مرکزی و T_c, T_u, T_m, T_b ضخامت طره مرکزی در ترازهای مبنا نشان داده شده است. مطابق شکل ۱-C، مقادیر R_c, R_u, R_m, R_b به عنوان شعاع انحنای راس سهمی در رویه بالادست تعریف شده است. مقادیر $T_{cl}, T_{ul}, T_{ml}, T_{bl}$ و $T_{cr}, T_{ur}, T_{mr}, T_{br}$ نیز ضخامت تکیه‌گاه‌های راست و چپ در ترازهای ۴ گانه است. شکل ۱-D نیز نمایشگر پارامترهای t_c, t_u, t_m, t_b و S_c, S_u, S_m, S_b برای تعیین نقاط شروع ناحیه ضخامت متغیر در سمت راست و چپ بدنه در ۴ تراز مرجع است [۸].

همچنین در این مساله بهینه‌سازی سه دسته قیود هندسی، تنشی و پایداری وجود دارند که در ادامه تعریف شده‌اند.



شکل (۱) - متغیرهای طراحی به کار رفته در بهینه‌سازی شکل سدهای بتنی قوسی

جدول (۲): مقادیر مجاز قيود هندسی

T_{min} (m)	T_{max} (m)	θ_{Bmax}	θ_{Cmax}	U_{alw} (m)	$\bar{\theta}_B$	$\bar{\theta}_C$
6.5	0.25H	20°	20°	6.0	70°	70°

• T_{min} و T_{max} : کمینه و بیشینه ضخامت در بدنه سد،

• θ_{Bmax} و θ_{Cmax} : بیشینه زوایای مجاز بین شیب مماس بر منحنی برآمدگی‌های طره مرکزی در رویه‌های بالادست و پایین دست،

• U_{alw} : بیشینه مقدار مجاز برآمدگی افقی رویه بالادست نسبت به پاشنه سد و

• θ_B و θ_C : مقدار مجاز زاویه برخورد منحنی‌های شروع ضخامت متغیر با قوس‌های افقی در تاج و کف سد است.

برخی ثوابت تحلیل مربوط به مقادیر مجاز قيود تنشی برای بارگذاری‌های مختلف به صورت جدول ۳ است.

جدول (۳): مقادیر مجاز قيود تنشی در بارگذاری‌های مختلف

طره‌های مجزا	پوسته یکپارچه	بارگذاری ۲	بارگذاری ۳
$(\sigma_{ti})_{heel} \leq 0.10f_{cc}$ $ (\sigma_{ci})_{toe} \leq 0.25f_{cc}$	$\sigma_{ti} \leq 0.05f_{cc}$ $ \sigma_{ci} \leq 0.25f_{cc}$	$(SF_c)_{st} = 2.0$	$(SF_c)_{dy} = 1.30$ or $\sigma_{ti}^{dy} \leq 0.65f_{cc}^{2/3}$, $ \sigma_{ci}^{dy} \leq 1.30f_{cc}$

$(\sigma_{ti})_{heel}$ ، $(\sigma_{ci})_{toe}$: تنش‌های مجاز کششی و فشاری در پاشنه و پنجه طره مرکزی،

• σ_{ci} ، σ_{ti} : تنش‌های مجاز کششی و فشاری در پوسته سد و

• ثوابت تحلیل و قيود طراحی

در تحلیل‌های بهینه‌سازی عددی شکل سد قوسی برخی ثوابت تحلیل مربوط به ویژگی‌های مصالح مصرفی است که به وسیله‌ی کاربر به برنامه معرفی می‌شود. مشخصات مصالح به وسیله‌ی پارامترهای ذکر شده در جدول ۱، با مقادیر فرضی نمونه معرفی شده‌اند.

جدول (۱): مشخصات مصالح در تحلیل المان محدود

f_{CC} (MPa)	E_C (GPa)	γ_C ($\frac{kN}{m^3}$)	γ_w ($\frac{kN}{m^3}$)	E_r (GPa)	U_C	U_r
35	22	24	10	8	0.18	0.25

که در آن:

• f_{cc} : مقاومت فشاری تک محوری نمونه ۹۰ روزه بتن،

• E_C : مدول ارتجاعی استاتیکی بتن سد،

• γ_c : وزن مخصوص بتن،

• γ_w : وزن مخصوص آب،

• E_r : مدول ارتجاعی استاتیکی سنگ پی،

• U_C : ضریب پواسون بتن،

• U_r : ضریب پواسون سنگ پی،

است. در بارگذاری دینامیکی مدول ارتجاعی دینامیکی مصالح سنگی و بتن ۳۳ درصد افزایش پیدا می‌کند مقادیر مجاز قيود مختلف با توجه به ملاحظات طراحی تعیین خواهند شد.

همچنین برخی از ثوابت تحلیل مربوط به کرانه‌های بالایی و پایینی قيود هندسی (یا اجرایی) است که در جدول ۲ به عنوان نمونه موردی آورده شده است.

غیره) ذکر شده در بخش قبلی عیناً" در این مطالعات بکار گرفته شده است.

پارامترهای تولید سناریوهای مختلف سد سازی به همراه حدود تغییرات آنها شامل موارد زیر است:

جدول (۵)- پارامترهای سناریوهای مختلف سد سازی و حدود تغییرات

واحد پارامتر	گزینه‌ها	پارامتر ورودی
-	U شکل یا V شکل	شکل دره
متر	۱۰۰-۱۲۰-۲۰۰-۳۰۰	H (ارتفاع سد)
متر	۲۰۰-۳۰۰-۴۰۰	L (عرض دره در تاج سد)
گیگاپاسکال	۶-۱۲-۱۸	E_r
درجه	۳۵-۴۵	ϕ_r
مگاپاسکال	۰/۲-۰/۸	C_r

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ترکیب مقادیر مختلف پارامترها با یکدیگر، منجر به تولید تعداد زیادی نمونه سد با مشخصات هندسی و فیزیکی مختلف می‌شود.

به منظور گروه‌بندی نمونه‌ها و ایجاد امکان مقایسه شکل بهینه سد در شرایط مختلف هندسه دره، جنس پی، و ارتفاع سد، نمونه‌های تولید شده و بررسی شده در این پژوهش، به عنوان نمونه به صورت جدول ۶ طبقه‌بندی می‌شوند. در این جدول خانواده سدهای قابل ساخت در دره‌های U شکل با هندسه متوسط معرفی شده است. فرآیند بهینه سازی برای کلیه این نمونه سدها طی شده و نتایج آن به صورت اثر اصلی (Main Effect) پارامترهای جدول ۵ روی برخی متغیرهای طراحی کلیدی مطابق بخش‌های بعدی نشان داده شده است.

$(SF_c)_{dy}$, $(SF_c)_{st}$: ضرایب اطمینان گسیختگی بتن بدنه سد در حالات استاتیکی و دینامیکی است. (به ترتیب برای حالت‌های تنش دو و تک‌محوره)

در پایان در جدول ۴ سایر ثوابت تحلیل شامل مشخصات مکانیکی مصالح پی و حدود مجاز قید پایداری پی (ضرایب اطمینان کلی آن تحت بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی) ارائه شده است. اعداد ذکر شده در این جدول، به عنوان نمونه آورده شده است.

جدول (۴): مشخصات مصالح پی و ضرایب ایمنی آن

C_r (MPa)	ϕ_r	$(K_s)_{st}$	$(K_s)_{dy}$
0.5	25	3.50	2.25

- C_r : ضریب چسبندگی توده سنگ پی،
- ϕ : زاویه اصطکاک داخلی مصالح در توده سنگ پی
- $(K_s)_{dy}$, $(K_s)_{st}$: ضرایب اطمینان پایداری توده‌های سنگی در حالات استاتیکی و دینامیکی است.

۳- مطالعات سناریوهای مختلف سدسازی و گروه بندی آنها

از آنجایی که هدف از انجام این پژوهش، شناسایی الگوی شکل سدهای بهینه‌شده در شرایط مختلف هندسی و فیزیکی تکیه‌گاه است، در ابتدا باید به تولید نمونه سدهای قوسی با مشخصات تکیه‌گاهی مختلف پرداخت.

این کار با در نظر گرفتن طیف گسترده‌ای از مقادیر پارامترهای هندسی و فیزیکی ساختگاه آن، و تولید ترکیبات مختلف از این مقادیر انجام می‌گیرد (جدول ۵). به این صورت تعداد زیادی نمونه سد قوسی با شرایط مختلف ایجاد می‌شود که باید بهینه سازی شکل برای آنها صورت گیرد. مقادیر ثوابت تحلیل (برخی مشخصات مصالح بتن و سنگ، حدود قیود مختلف و

جدول (۶) - طبقه‌بندی سدهای قوسی مورد بررسی، در دره‌های

U شکل

دره کوتاه	سد متوسط	سد بلند	$\frac{L}{H}$	دره بلند
H < 120m	120 < H < 200	H > 200		
H = 100 L = 200,300 Cr = 0.2,0.8 Er = 6,12,18 $\phi_r = 35,45$	H = 120,200 L = 200,300,400 Cr = 0.2,0.8 Er = 6,12,18 $\phi_r = 35,45$	H = 300 L = 400 Cr = 0.2,0.8 Er = 6,12,18 $\phi_r = 35,45$	$1.5 \leq \frac{L}{H} \leq 3$	

۴- بررسی حساسیت متغیرهای طراحی سد قوسی بهینه نسبت به مدول تغییر شکل پی دره متوسط U شکل

نرمی و یا سختی سنگ تکیه‌گاهها و پی، عامل بسیار مهمی در تعیین شکل هندسی سد قوسی است. در این قسمت به تأثیر این پارامتر بر شکل بهینه سدهای قوسی پرداخته می‌شود.

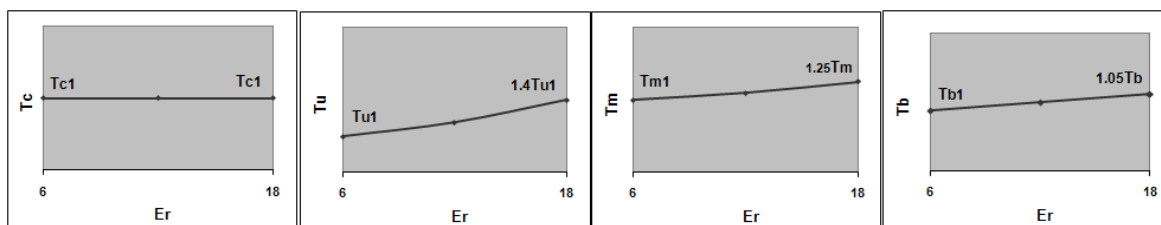
برای این منظور در خانواده‌های معرفی شده در جدول (۶) و در دره‌های U شکل، تمامی پارامترهای ورودی، ثابت در نظر گرفته می‌شود و تنها پارامتر متغیر، Er است.

حساسیت متغیرهای طراحی سد قوسی نسبت به تغییرات Er برای رسیدن به شکل سد بهینه در نمودارهای زیر نمایش داده شده است. همچنین برای مقایسه روند

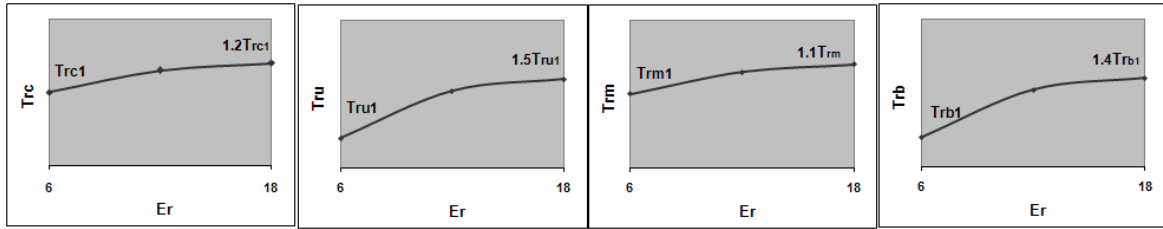
تغییرات تابع هدف یا همان حجم بتن بدنه سد، نمودار تغییر تابع هدف نسبت به افزایش پارامتر Er، نیز رسم شده است. به این ترتیب می‌توان در مورد حساسیت حجم بدنه سد بهینه نسبت به مدول ارتجاعی (یا مدول تغییر شکل) پی، نظر داد.

برای به دست آوردن دقت مورد نیاز در هنگام برازش، از منحنی درجه دو استفاده شده است.

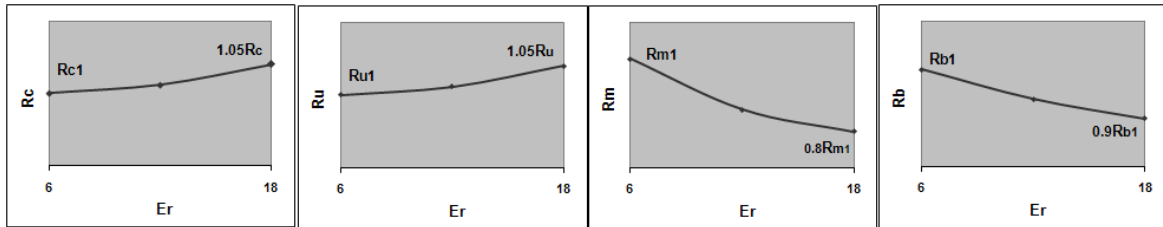
در مورد سدهای قوسی با ارتفاع بلند و هندسه دره متوسط، شکل ۳-الف نشان می‌دهد که به شکل مشخص برای سدهای بهینه با ارتفاع بلند، رشد ۳ برابری مدول تغییر شکل پی می‌تواند ضخامت طره در ترازهای بالایی بدنه را تا حدود ۴۰ درصد افزایش دهد. حال آنکه ضخامت تاج و پایه طره چندان تغییر نمی‌کند. با همین میزان تغییر مدول پی ضخامت تکیه‌گاه‌های بدنه در ترازهای مختلف بین ۱۰ تا ۵۰ درصد و شعاع انحنای قوس در ترازهای نیمه پایین سد بین ۱۰ تا ۲۰ درصد افزایش می‌یابد (شکل ۳-ب و ۳-ج). بدین طریق بر خلاف تصور عامه طراحان می‌توان گفت افزایش سختی پی بیشتر موجب افزایش حجم بدنه می‌شود (شکل ۳-د). این گرایش‌های حساسیت برای سدهای با ارتفاع متوسط هم البته با شدت کمتری مشاهده شد. برای سدهای با ارتفاع کم نیز بیشتر همان روال‌های حساسیت دیده می‌شود و تفاوت‌های جزئی آن در شکل ۴ قابل بررسی است.



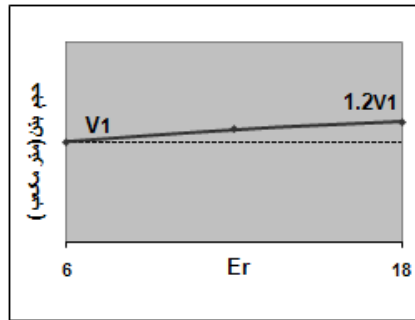
الف - متغیرهای ضخامت طره مرکزی



ب- متغیرهای ضخامت سد در تکیه‌گاه‌های جانبی

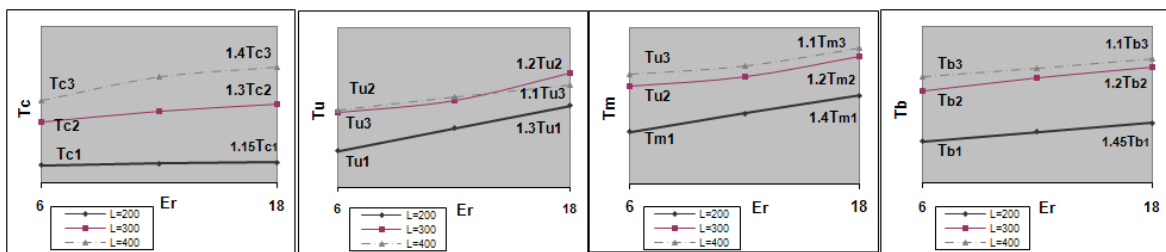


ج- متغیرهای شعاع انحنا در قوسهای افقی

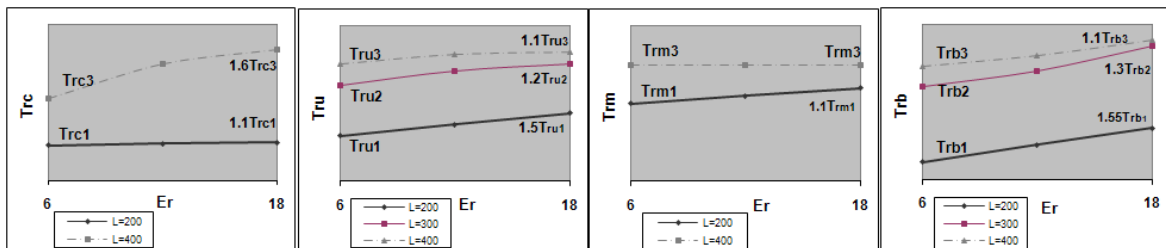


د- حجم بدنه

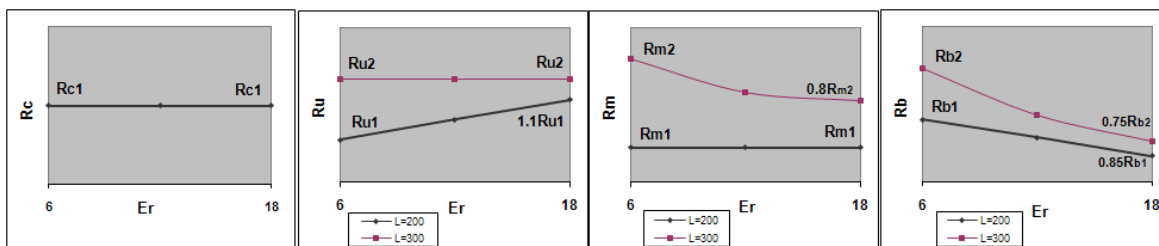
شکل (۳) - حساسیت متغیرهای طراحی سدهای بلند قوسی در دره‌های U شکل متوسط با شکل بهینه به تغییرات مدول پی



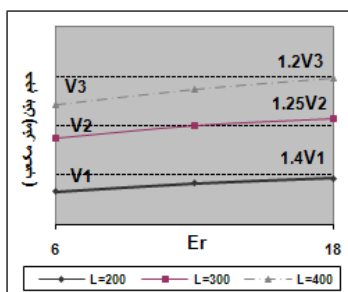
الف- متغیرهای ضخامت طره مرکزی



ب- متغیرهای ضخامت سد در تکیه‌گاه‌های جانبی



ج- متغیرهای شعاع انحنا در قوس‌های افقی



د- حجم بدنه

شکل (۴)- حساسیت متغیرهای طراحی سدهای قوسی کوتاه در دره‌های متوسط U شکل با شکل بهینه به تغییرات مدول پی

به طور کلی با افزایش مدول الاستیسیته تکیه‌گاه، شعاع انحنا در قوس‌های افقی در ترازهای بالا افزایش و در ترازهای پایین نزدیک به پی، کاهش می‌یابد. با افزایش مدول پی، متغیرهای شعاع انحنا در قوس‌های افقی در سدهای بهینه موجود در دره‌های با عرض کم نسبت به سدهای موجود در دره‌های عریض، روند کاهشی شدیدتری دارند.

۵- گرایش‌های شکل طره مرکزی و قوس‌های سد بهینه با افزایش مدول پی در دره‌های U شکل

برای درک بهتر موارد گفته شده بالا، حساسیت شکل طره مرکزی و شکل قوس‌های افقی در ترازهای طراحی در اثر افزایش مدول پی آورده شده است. روند مشاهده شده در شکل‌های زیر، در مورد سایر خانواده‌های سدهای قوسی بررسی شده، تقریباً مشابه است.

اگر پی سد قوسی دارای سختی خیلی زیاد باشد، هماهنگی لازم بین سختی پی و سختی سد قوسی وجود نداشته و پخش بار در سد به صورت مناسبی صورت نمی‌گیرد و تنش‌های کششی در سد قوسی به وجود می‌آید. همچنین در محل اتصال سد و پی، تمرکز تنش‌های نقطه‌ای ایجاد می‌شود و باعث بروز ترک‌هایی می‌شود. بنابراین سد موجود در یک پی سخت (مدول نرمی کم)، دارای ضخامت بیشتری در ترازهای مختلف است.

مقایسه اشکال (۳) و (۴) نشان می‌دهد که در سدهای قوسی با ارتفاع کم، نسبت به سدهای با ارتفاع زیاد، با افزایش مدول پی، سد قوسی بهینه تمایل بیشتری به افزایش ضخامت طره مرکزی و ضخامت تکیه‌گاه‌ها دارد. تاثیر افزایش مدول پی در افزایش ضخامت سد بهینه در سدهای با عرض دره کوچک، به مراتب بیشتر است. این موضوع در تمامی ترازهای ارتفاعی به جز تراز تاج سد صدق می‌کند.

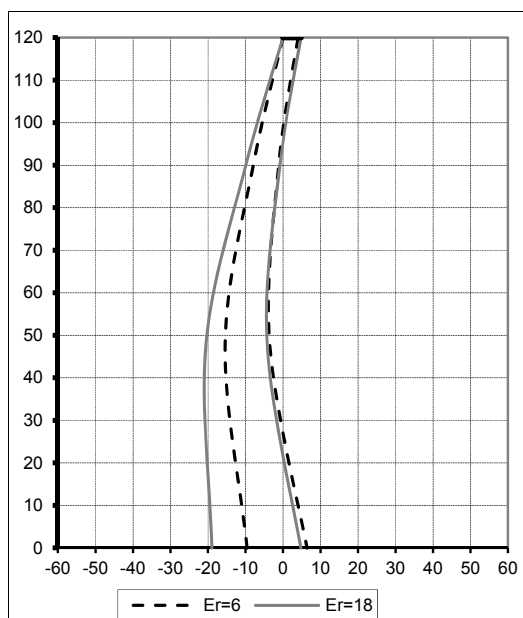
بنابراین تاثیر افزایش مدول پی بر افزایش حجم بتن بدنه سد بهینه در سدهای با عرض کوچک دره، شدیدتر است.

۶- بحث و نتیجه‌گیری

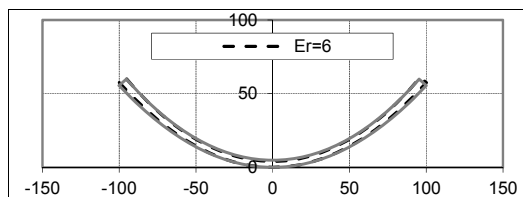
بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که در سدهای قوسی بهینه در دره‌های U شکل، افزایش پارامتر مدول پی، باعث افزایش متغیرهای طراحی ضخامت در طره مرکزی و همچنین افزایش ضخامت در قوسهای افقی در تکیه‌گاه می‌شود. در هنگام افزایش پارامتر فیزیکی مدول پی، با افزایش عرض دره، تمایل متغیرهای طراحی ضخامت سد به افزایش، کاسته شده و نمودار افزایشی T-Er، دارای شیب کمتری است. در مورد تغییرات متغیرهای طراحی شعاع انحنا در قوس‌های افقی نسبت به مدول پی نیز در تمام گروه‌های بررسی شده در دره‌های U شکل، روند مشابهی دارد. به این صورت که با افزایش مدول الاستیسیته سنگ تکیه‌گاه، شعاع انحنا در ترازهای بالایی سد قوسی بهینه، تمایل به افزایش و در ترازهای پایین سد، تمایل به کاهش از خود نشان می‌دهد. در هنگام افزایش مدول پی شعاع انحنا در ترازهای پایین سدهای با ارتفاع کم‌تر و یا عرض‌های بیشتر دره، روند کاهشی تندتری از خود نشان می‌دهند.

۶- مراجع

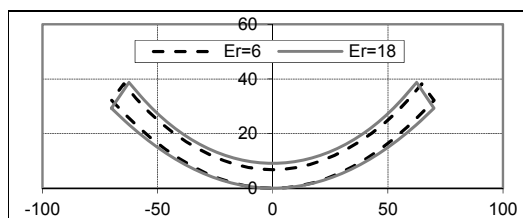
1. Serafim, J.L. 1966. New Shapes For Arch Dams, Civil Engineering, ASCE, Vol. 36, No.2
2. Sharpe, R. 1969. The Optimum Design Of Arch Dams, Proc. Institution Of Civil Engineers (ICE), Paper No.7200s, Suppl Vol., pp.73-98
3. Zhu, B., Jia, J., Li, Y., Xu, S. & Wang, Z. 1993. Intelligent Optimal CAD (IOCAD) For Arch Dams, Computing In Civil And Building Engineering, pp.1065-1072
4. Yao, T.M. & Choi, K.K. 1989. Shape Optimal Design Of An Arch Dam, ASCE Journal Of Structural Engineering, Vol. 115, No.9, pp.2401-2405
5. Maheri, M.R. Taleb-Beydokhti, N. 2003. Shape Optimization Of Concrete Arch Dams Using Simple Genetic Algorithm, Dam Engineering, Vol. XIV, Issue 2, pp.105-140
6. Tajalli.F, Ahmadi.M.T & Moharrami.H (2007), Shape Optimization of Concrete Arch Dam for Enhance Seismic Behavior, Journal of Dam Eng., Vol 23 ,P234-255
7. سلاجقه، ج و حمیدیان ۱۳۸۳، "بهینه‌سازی شکل سدهای دوقوسی بتنی با استفاده از روش تقریب‌سازی"،



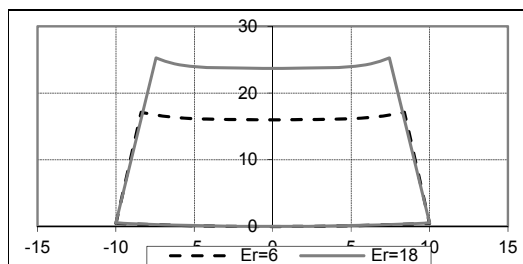
شکل (۵)- حساسیت شکل طره مرکزی سد بهینه با تغییرات مدول پی در دره‌های U شکل



شکل (۶)- حساسیت شکل قوس افقی در تراز تاج سد بهینه با تغییرات مدول پی در دره‌های U شکل



شکل (۷)- حساسیت شکل قوس افقی در تراز 0.75H سد بهینه با تغییرات مدول پی در دره‌های U شکل



شکل (۸)- حساسیت شکل قوس افقی در تراز پی سد بهینه با تغییرات مدول پی در دره‌های U شکل

10. Shape Sensitivity Analysis With Design-Dependent Loadings—Equivalence Between Continuum And Discrete Derivatives J Akbari, NH Kim, MT Ahmadi—Journal of Structural and Multidisciplinary Optimization, 2010 – Springer-Verlag, vol.15, pp 34-46

۱۱. گزارش تحلیل دینامیکی سد شهید رجایی-شرکت مهتاب قدس ۱۳۷۲

اولین کنگره ملی مهندسی عمران، اردیبهشت ۱۳۸۳،
دانشگاه صنعتی شریف

۸. اکبری، ج. ۱۳۸۶، "بهینه سازی شکل سدهای بتنی قوسی به منظور بهبود رفتار لرزه ای و پایداری تکیه گاهها"، رساله دکتری عمران-سازه های هیدرولیکی، زیر نظر: احمدی، م.ت. دانشگاه تربیت مدرس

9. Advances in Concrete Arch Dams Shape Optimization J Akbari, MT Ahmadi, H Moharrami—Journal Of Applied Mathematical Modelling, 2011 – Elsevier, Vol.35, pp 3316-3333