

تأثیر مدل‌های غیرخطی سنگ‌پی در تحلیل‌های سد بتنی دوقوسی کارون ۳

آرش حسین‌زاده^۱، مهدی نوبری نسب^۱، وحید لطفی^{۲*} و عباس سروش^۳

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

^۲ استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

^۳ دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(تاریخ دریافت ۸۵/۱۲/۱۲، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۸/۵/۲۰، تاریخ تصویب ۸۹/۲/۱۲)

چکیده

در طراحی سدهای بتنی قوسی اغلب از تحلیل الاستیک استفاده می‌شود. اما در بیشتر مواقع نتایج توزیع تنش این تحلیل‌ها، حداقل به صورت موضعی دور از واقعیت است. برای رفع این مشکل می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده کرد. یکی از این روش‌ها که در ژئوتکنیک مقبول است، استفاده از مدل‌های الاستوپلاستیک برای سنگ‌پی و تکیه‌گاه‌ها است. در این مقاله با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS، تأثیر استفاده از مدل الاستوپلاستیک مور-کولمب در سنگ‌پی بر تنش‌ها و تغییرشکل‌های بدنه و پی سدهای بتنی قوسی بررسی می‌شود. بدین منظور تنش‌ها و تغییرشکل‌ها در دو حالت پی الاستیک و الاستوپلاستیک با یکدیگر مقایسه شده و همچنین مطالعه پارامتریک نیز روی متغیرهای الاستوپلاستیک نظیر زاویه اتساع، زاویه اصطکاک و چسبندگی انجام شده است. برای واقع‌بینانه‌تر شدن نتایج این تحقیق، از سد بتنی دوقوسی کارون ۳ به عنوان مطالعه موردی استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: اجزای محدود، مدل مور کولمب، سد بتنی قوسی، سد کارون ۳، تکیه‌گاه سد

مقدمه

تحلیل سدهای بتنی قوسی به دلیل شکل هندسی بدنه و پیچیدگی‌های موجود در ساختگاه سد با دشواری‌ها و عدم قطعیت‌های فراوانی رو به روست. طبیعی است هر چه مدلسازی به طور دقیق‌تری انجام شود، نتایج واقعی‌تری در بر خواهد داشت. به طور کلی مدل مورد استفاده در تحلیل را می‌توان به دو بخش بدنه سد و سنگ پی تقسیم کرد. سنگ‌پی مجموعه‌ای از سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها شامل: درز، ترک و گسل است. به دلیل تنوع چیدمان این ناپیوستگی‌ها، نحوه رفتار مکانیکی و عملکرد توده سنگ بسیار پیچیده است. به منظور مدلسازی رفتار سنگ‌ها از روش‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد. به طور کلی این روش‌ها را می‌توان به دو دسته پیوسته و گسسته تقسیم کرد. در روش پیوسته، توده سنگ به شکل مجموعه‌ای پیوسته در نظر گرفته شده و اثر ناپیوستگی‌ها به طور ضمنی و غیر مستقیم با استفاده از مدل‌های رفتاری مناسب نظیر مور-کولمب، دراکر-پراگر و چندلایه^۱ [۱] لحاظ می‌شود. نکته مثبت این روش امکان استفاده از شبکه‌بندی اجزای محدود^۲ مدل الاستیک است. در روش گسسته سعی می‌شود ناپیوستگی‌ها به وسیله المان‌های ویژه نظیر المان‌های میان لایه^۳ (المان درز^۴) و یا با استفاده از روش‌های عددی گسسته نظیر BT^۵ [۲].

تحلیل سدهای بتنی قوسی به دلیل شکل هندسی بدنه و پیچیدگی‌های موجود در ساختگاه سد با دشواری‌ها و عدم قطعیت‌های فراوانی رو به روست. طبیعی است هر چه مدلسازی به طور دقیق‌تری انجام شود، نتایج واقعی‌تری در بر خواهد داشت. به طور کلی مدل مورد استفاده در تحلیل را می‌توان به دو بخش بدنه سد و سنگ پی تقسیم کرد. سنگ‌پی مجموعه‌ای از سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها شامل: درز، ترک و گسل است. به دلیل تنوع چیدمان این ناپیوستگی‌ها، نحوه رفتار مکانیکی و عملکرد توده سنگ بسیار پیچیده است. به منظور مدلسازی رفتار سنگ‌ها از روش‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد. به طور کلی این روش‌ها را می‌توان به دو دسته پیوسته و گسسته تقسیم کرد. در روش پیوسته، توده سنگ به شکل مجموعه‌ای پیوسته در نظر گرفته شده و اثر ناپیوستگی‌ها به طور ضمنی و غیر مستقیم با استفاده از مدل‌های رفتاری مناسب نظیر مور-کولمب، دراکر-پراگر و چندلایه^۱ [۱] لحاظ می‌شود. نکته مثبت این روش امکان استفاده از شبکه‌بندی اجزای محدود^۲ مدل الاستیک است. در روش گسسته سعی می‌شود ناپیوستگی‌ها به وسیله المان‌های ویژه نظیر المان‌های میان لایه^۳ (المان درز^۴) و یا با استفاده از روش‌های عددی گسسته نظیر BT^۵ [۲].

معرفی سد کارون ۳

طرح سد و نیروگاه کارون ۳ با توان تولید ۱۲۰۰ مگاوات ساعت برق، بزرگ‌ترین پروژه برق آبی کشور است. این سد از نوع بتنی دوقوسی نازک به ارتفاع ۲۰۵ متر است و روی رودخانه کارون در استان خوزستان احداث شده است (شکل ۱).

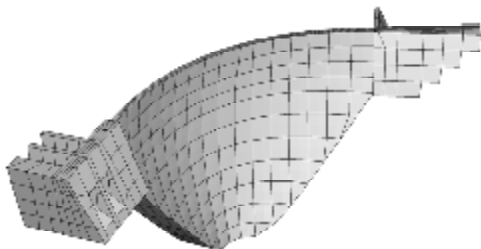
برخی از مشخصات این سد در جدول (۱) ارائه شده و در شکل (۲) نیز نمایی از طره مرکزی این سد آمده است.

معرفی مدل

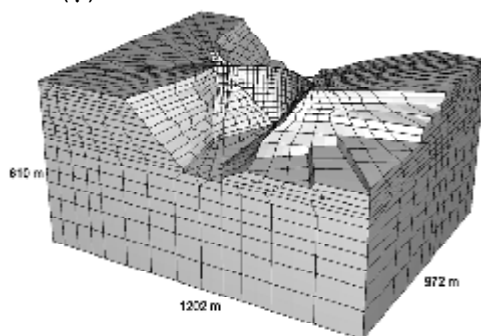
در انجام تحلیل‌ها، از نرم‌افزار جامع اجزای محدود ABAQUS استفاده شده است. بدین منظور مدلی شامل ۳۴۰۹۳ گره و ۷۸۰۸ المان بیست گرهی ایزوپارامتریک از مجموعه بدنه سد و تکیه‌گاه‌ها تهیه شده است. در مدلسازی بدنه سد از سه ردیف المان ۲۰ گرهی در ضخامت استفاده شده که از نظر هندسی با واقعیت (شکل ۲) تطابق دارد (شکل ۳). تراست بلوک‌ها نیز به دقت مدلسازی شده است (شکل ۳). همچنین در مدلسازی پی و تکیه‌گاه‌ها نیز لایه‌های مختلف توده سنگ و توپوگرافی دره در حد امکان منظور شده است (شکل ۳).



(الف)



(ب)

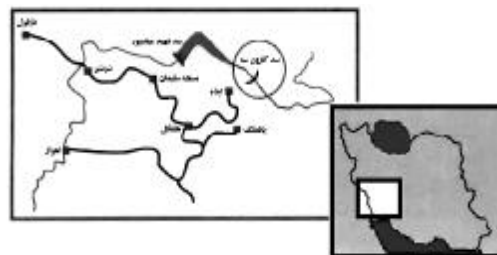


(پ)

شکل ۳: (الف) نمای از بالای بدنه سد، (ب) نمای سه بعدی از بدنه سد، (پ) نمای پایین دست از مدل بدنه، پی و تکیه‌گاه‌های سد کارون ۳ [۵].

فرضیه‌های تحلیل

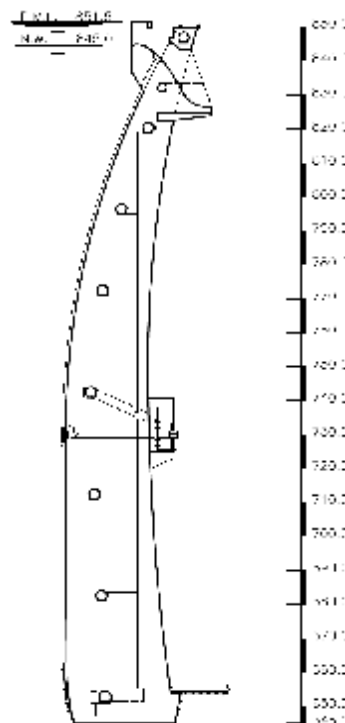
برای انجام تحلیل غیرخطی از مدل الاستوپلاستیک کامل مور-کولمب در سنگ پی استفاده شده است. در شکل (۴) منحنی این مدل و در روابط (۱) الی (۴) روابط



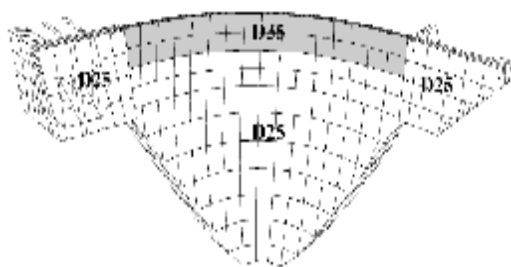
شکل ۱: موقعیت جغرافیایی سد کارون ۳ [۴].

جدول ۱: مشخصات کلی سد کارون ۳ [۴].

| نوع سد | بندی دو قوسی |
|-------------------------|----------------------|
| ارتفاع سد از پی | ۲۰۵ متر |
| طول تاج | ۳۸۸ متر |
| ضخامت سد در قسمت تاج | ۵/۵ متر |
| ضخامت سد در پی | ۲۹/۵ متر |
| تراز تاج سد | ۸۵۰ متر از سطح دریا |
| تراز آب در حالت مخزن پر | ۸۴۵ متر از سطح دریا |
| حجم مخزن | ۲۷۵۰ میلیون متر مکعب |
| مساحت دریاچه سد | ۴۶ کیلومتر مربع |



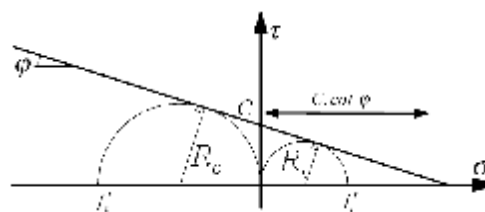
شکل ۲: طره مرکزی در بدنه سد کارون ۳.



شکل ۵: موقعیت قرارگیری انواع بتن مصرفی در بدنه و تراست بلوک های سد کارون ۳ [۵].

در این مطالعه سعی شده است، بارگذاری مدل به نحوی انجام شود که با واقعیت تطابق داشته باشد. بدین منظور، ابتدا المان های مربوط به بدنه سد از مدل حذف شده و مدل تنها شامل مجموعه پی و تکیه گاه ها شده است (این عمل با تعریف یک سختی بسیار کم برای المان های بدنه سد انجام می شود. به گونه ای که با ایجاد تغییر شکل، تنش در این المان ها ایجاد نمی شود و از طرف دیگر به دلیل سختی کم این المان ها، نقشی در تغییر شکل و توزیع تنش بقیه المان ها ندارند). سپس در این حالت وزن سنگ پی به مدل وارد شده است. اگر هنگام اعمال وزن سنگ پی، بدنه سد نیز در مدل وجود داشته باشد، به دلیل سختی ناچیز بدنه سد بتنی قوسی در مقابل مجموعه پی و تکیه گاه ها، تغییر شکل ها و تنش های بزرگ و غیر منطقی در بدنه سد مشاهده خواهد شد. پس از بارگذاری وزن سنگ پی، وزن بدنه سد به روش مراحل ساخت ساده شده در چهار مرحله مطابق شکل (۶) به مدل وارد شده است. در این روش بدنه سد به لایه های افقی تقسیم و در هر مرحله، وزن و سختی یک لایه به مدل وارد می شود. بدین طریق آویختگی بدنه سد از تکیه گاه ها که در اثر اعمال یک دفعه وزن بدنه سد ایجاد می شود، کاهش یافته و تنش های حاصله به واقعیت نزدیک تر می شود. این روش راه حلی میانی بین تحلیل زوج و فرد و اثر یک دفعه وزن بدنه سد است. در این مطالعه به دلیل محدودیت های نرم افزار، امکان استفاده از روش تحلیل زوج و فرد وجود نداشته است. لازم به ذکر است با استفاده از روش های کنترلی مختلف، درستی عملکرد و کارایی این روش اثبات شده است، ولی ارائه نتایج خارج از محدوده این مطالعه است [۵]. پس از بارگذاری وزن بدنه سد، فشار آب دریاچه نیز به صورت فشار هیدرواستاتیک بر وجه بالادست بدنه سد وارد شده است.

مورد نیاز ارائه شده است.



شکل ۴: سطح تسلیم در مدل الاستوپلاستیک مور-کولمب.

$$\tau = c - \sigma_n \cdot \tan \varphi \quad (1)$$

$$f'_t = 2R_t = \frac{2C \cos \varphi}{1 + \sin \varphi} \quad (2)$$

$$f'_{t(Max)} = C \cdot \cot \varphi \quad (3)$$

$$f'_c = 2R_c = \frac{2C \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (4)$$

در این روابط f'_t و f'_c به ترتیب مقاومت کششی و فشاری تک محوری مصالح مورد نظر است.

تحلیل در دو حالت رفتار الاستیک و الاستوپلاستیک برای سنگ پی انجام شده است. جدول (۲) مشخصات لایه های مختلف سنگ پی را نشان می دهد.

جدول ۲: مشخصات انواع سنگ های موجود در پی و تکیه گاه های سد کارون ۳ [۶] و [۷].

| Parameter | Definition | Rock Types | | | | | |
|-------------|------------------------------|------------|------|------|------|------|------|
| | | R4 | R5 | R6 | R8 | R10 | R12 |
| E | Modulus of Elasticity (GPa) | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 |
| ν | Poisson's Ratio | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.25 |
| φ_0 | Friction angle (Degree) | 44 | 44 | 44 | 46 | 48 | 48 |
| C_0 | Cohesion (MPa) | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.8 | 1 | 1 |
| γ | Specific Weight (kN/m^3) | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 |

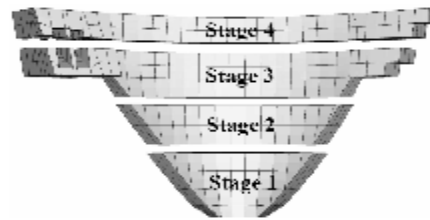
برای ارزیابی دقیق تر تأثیر استفاده از رفتار الاستوپلاستیک برای سنگ پی، در کلیه تحلیل ها رفتار بدنه سد الاستیک لحاظ شده است. جدول (۳) مشخصات بتن مصرفی در بدنه و شکل (۵) موقعیت آنها را نشان می دهد.

جدول ۳: مشخصات بتن مصرفی در بدنه سد کارون ۳ [۸].

| Parameter | D25 | D35 |
|------------------------------|------|------|
| Compressive strength (MPa) | 25 | 35 |
| Tensile Strength (MPa) | 2.5 | 3.5 |
| Modulus of Elasticity (GPa) | 23.6 | 28.0 |
| Poisson's ratio (ν) | 0.2 | 0.2 |
| Specific Weight (kN/m^3) | 2.45 | 2.45 |

دست سد تحت بارگذاری وزن سد در حالت‌های پی الاستیک و الاستوپلاستیک در نقاط گرهی را نشان می‌دهد. از مقایسه این نتایج ملاحظه می‌شود که توزیع کلی و مقادیر تنش‌های اصلی کمینه بدنه سد تغییر معنی‌داری نکرده، اما در مورد تنش‌های اصلی بیشینه این طور نیست. در شکل‌های (۹) و (۱۰) نیز به ترتیب تنش‌های اصلی بیشینه در بالادست و کمینه در پایین‌دست سد تحت بارگذاری وزن سد+ فشار آب در حالت‌های پی الاستیک و الاستوپلاستیک در نقاط گرهی نشان داده شده است. در این شکل‌ها نیز ملاحظه می‌شود که اختلاف عمده برای مقادیر بیشینه تنش‌های اصلی بدنه سد رخ می‌دهد.

در مجموع ملاحظه می‌شود که استفاده از مدل الاستوپلاستیک سبب کاهش قابل توجه تنش‌های کششی در بدنه سد شده است (جدول ۴). با این وجود، به دلیل فراتر بودن تنش‌های کششی حاصل از تحلیل در بدنه سد نسبت به تنش‌های کششی مجاز بتن، احتمال ایجاد ترک در بدنه سد وجود دارد. بنابراین انجام تمهیداتی برای مدل‌سازی ترک در بدنه سد ضروری است که خارج از محدوده مطالعه حاضر است.



شکل ۶: لایه‌های در نظر گرفته شده برای چهار مرحله ساخت.

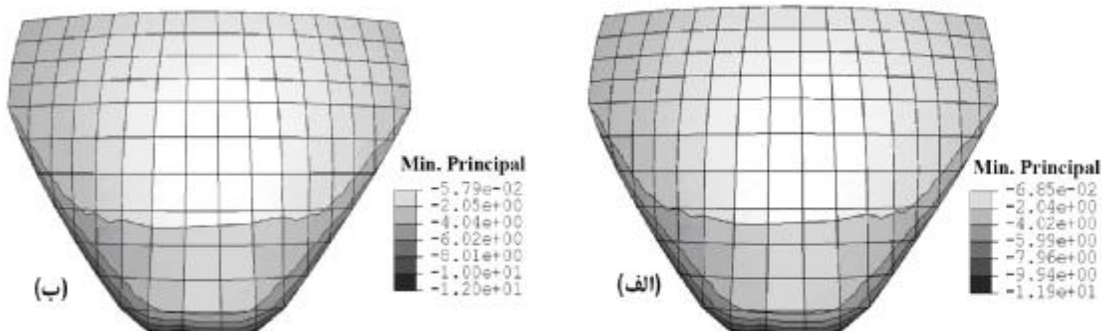
نتایج تحلیل

تنش در بدنه سد

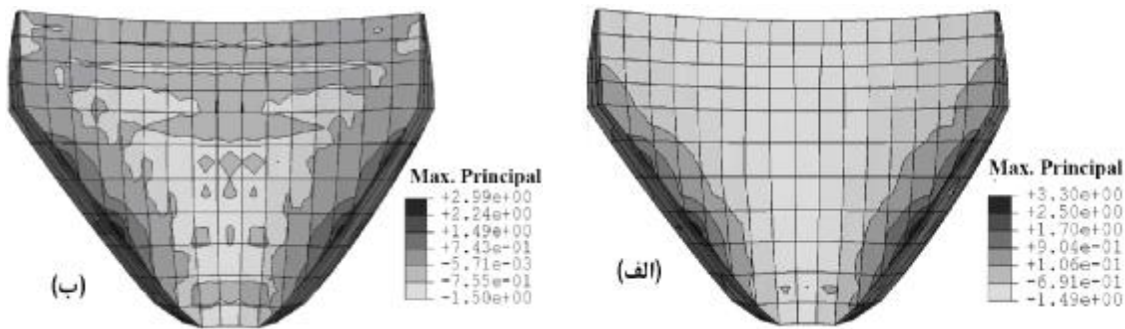
جدول (۴) تنش‌های اصلی در بدنه سد را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که استفاده از مدل الاستوپلاستیک در سنگ پی سبب کاهش تنش‌های اصلی کششی بدنه سد در هر دو حالت بارگذاری وزن سد و وزن سد+ فشار آب می‌شود. این کاهش در حالت دوم بارگذاری برابر ۳۴ درصد (۱/۳۵ MPa) است. اما تنش فشاری بدنه سد در تحلیل الاستوپلاستیک تحت هر دو بارگذاری به مقدار کمی افزایش می‌یابد. شکل‌های (۷) و (۸) به ترتیب تنش‌های اصلی کمینه در بالادست و بیشینه در پایین

جدول ۴: تنش‌های اصلی به دست آمده در بدنه سد.

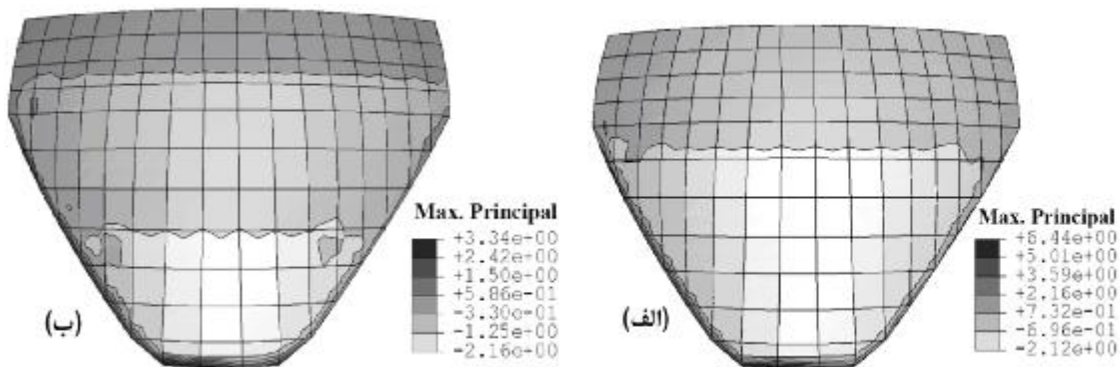
| Location | Model | Stress Component | | Load Combination | |
|--------------------|----------------|------------------|------------|------------------|-------------------|
| | | | | Dead | Dead+ Hydrostatic |
| Integration Points | Elastic | Major Princ. | Max. (MPa) | 2.95 | 4.00 |
| | | Minor Princ. | Min. (MPa) | -9.91 | -14.56 |
| | Elasto Plastic | Major Princ. | Max. (MPa) | 2.80 | 2.65 |
| | | Minor Princ. | Min. (MPa) | -9.95 | -15.26 |
| Element Nodes | Elastic | Major Princ. | Max. (MPa) | 3.30 | 6.44 |
| | | Minor Princ. | Min. (MPa) | -11.91 | -16.39 |
| | Elasto Plastic | Major Princ. | Max. (MPa) | 2.99 | 3.34 |
| | | Minor Princ. | Min. (MPa) | -12.03 | -17.28 |



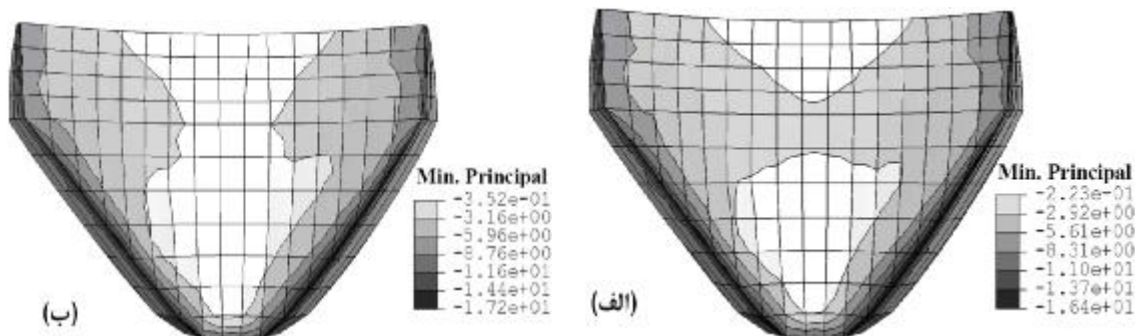
شکل ۷: تنش‌های اصلی کمینه در بالادست سد تحت بارگذاری وزن سد؛ (الف) مدل الاستیک، (ب) مدل الاستوپلاستیک.



شکل ۸: تنش‌های اصلی بیشینه در پایین دست سد تحت بارگذاری وزن سد؛
(الف) مدل الاستیک، (ب) مدل الاستوپلاستیک.



شکل ۹: تنش‌های اصلی بیشینه در بالادست سد تحت بارگذاری وزن سد + فشار آب؛
(الف) مدل الاستیک، (ب) مدل الاستوپلاستیک.

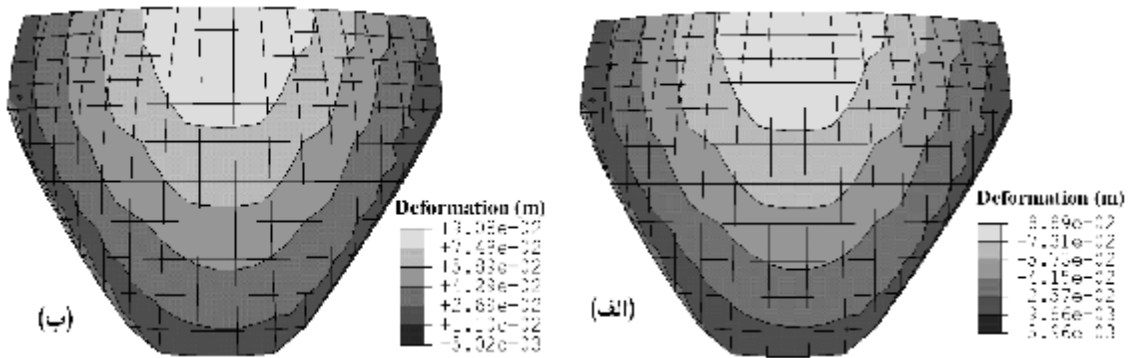


شکل ۱۰: تنش‌های اصلی کمینه در پایین دست سد تحت بارگذاری وزن سد + فشار آب؛
(الف) مدل الاستیک، (ب) مدل الاستوپلاستیک.

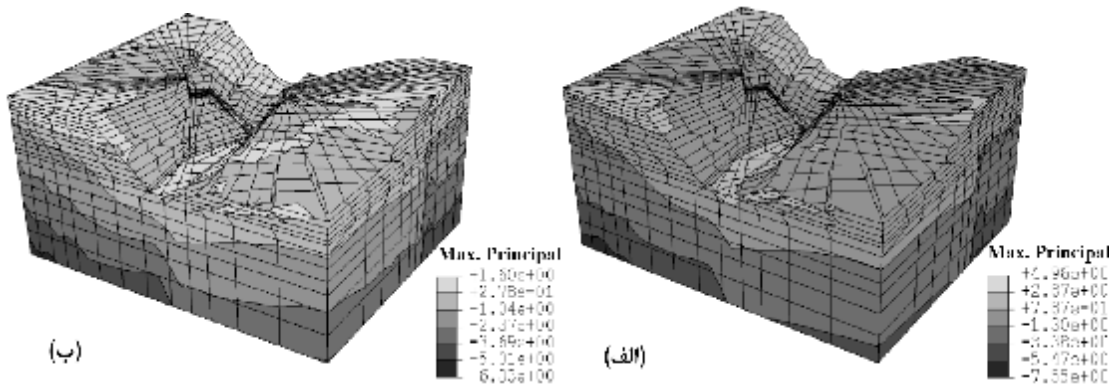
تغییر شکل در بدنه سد

شکل (۱۱) تغییر شکل‌های بدنه سد تحت بارگذاری وزن سد + فشار آب را در دو حالت الاستیک و الاستوپلاستیک نشان می‌دهد. از مقایسه این دو شکل مشاهده می‌شود: نخست استفاده از مدل الاستوپلاستیک در سنگ‌پی تغییر معنی‌داری در حالت تغییر شکل‌های بدنه سد ایجاد نکرده است. دوم، مقادیر تغییر شکل‌ها در

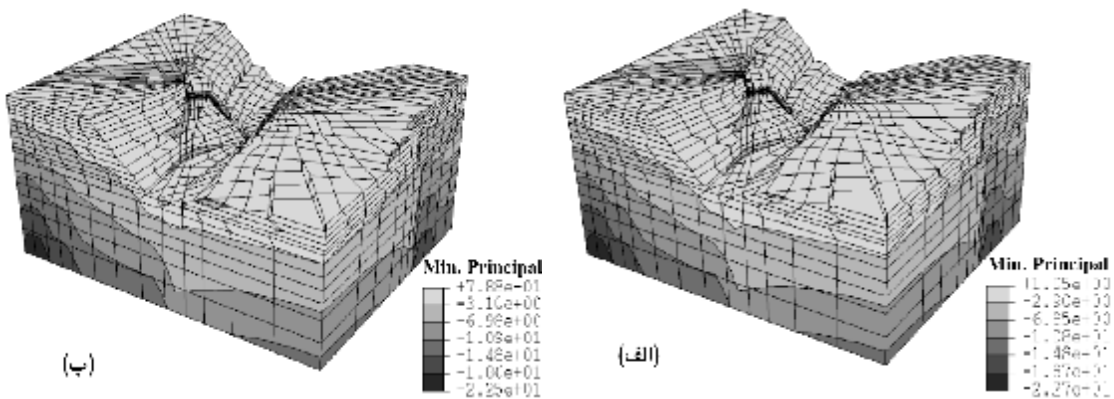
همه نقاط به طور تقریبی با یکدیگر برابر است، به طوری که حداکثر اختلاف ۰/۳ سانتی‌متر است. این تأثیر اندک در تغییر شکل‌های بدنه سد به دلیل محدود بودن مناطق پلاستیک ایجاد شده در سنگ‌پی است. مطابق شکل (۱۴) مناطق پلاستیک تنها در قسمت‌های با تنش کششی زیاد در نشیمنگاه سد به وجود آمده است.



شکل ۱۱: جا به جایی بدنه سد در جهت رودخانه تحت بارگذاری وزن سد+ فشار آب؛
(الف) مدل الاستیک، (ب) مدل الاستوپلاستیک.



شکل ۱۲: تنش‌های اصلی بیشینه در پی و تکیه‌گاه‌ها تحت بارگذاری وزن سد+ فشار آب؛
(الف) مدل الاستیک، (ب) مدل الاستوپلاستیک.



شکل ۱۳: تنش‌های اصلی کمینه در پی و تکیه‌گاه‌ها تحت بارگذاری وزن سد+ فشار آب؛
(الف) مدل الاستیک، (ب) مدل الاستوپلاستیک.

تنش در سنگ پی

در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) کنترهای تنش‌های اصلی بیشینه و کمینه مربوط به پی و تکیه‌گاه‌ها در بارگذاری وزن بدنه سد + فشار هیدرواستاتیک ارائه شده است.

مطابق شکل (۱۲)، در هر دو حالت استفاده از رفتار الاستیک و الاستوپلاستیک، تنش‌های اصلی بیشینه تنها تا عمق متوسط ۵۰ متری از سطح مدل حالت کششی داشته و از این تراز به پایین تنش حالت فشاری دارد. دلیل این

نقاط انتگرال گیری است که اندکی با تنش های گرهی که در کنتورهای شکل (۱۲) و (۱۳) آورده شده، متفاوت است. مطابق این جدول تنش های کششی بیشینه در بارگذاری های وزن سد و وزن سد+ فشار آب به ترتیب MPa ۴/۲۴ و MPa ۴/۵۳ است که در هر دو حالت بسیار فراتر از تنش های کششی قابل تحمل توسط سنگ پی (MPa ۰/۵) است [۶]. ولی با استفاده از مدل الاستوپلاستیک تنش های کششی به MPa ۰/۸۵ محدود می شود که به تنش های کششی قابل تحمل توسط سنگ پی بسیار نزدیک است. اگر تنش کششی حاصل از تحلیل با مقاومت کششی تک محوری (رابطه ۲) و مقاومت کششی حداکثر (رابطه ۳) مقایسه شود، مشاهده می شود برای سنگ نوع R12 که حداکثر تنش کششی در آن رخ می دهد، رابطه $f'_t < \sigma_t < f'_{t(Max)}$ (۰/۷۷ < ۰/۸۵ < ۰/۹) برقرار است که نشان از درستی محاسبات دارد. لازم به توضیح است که دلیل استفاده نرم افزار از تنش های نقاط انتگرال گیری^۸ در تحلیل های الاستوپلاستیک، در اینجا نیز مبنای مقایسه، تنش در نقاط انتگرال گیری است. در مورد تنش های فشاری همان طور که شرح داده شد، بیشینه آن بر اثر وزن سنگ پی در کف مدل ایجاد می شود، به طور حتم مقدار آن به ابعاد مرزهای در نظر گرفته شده برای مدل در پی و تکیه گاه ها وابسته است. در مدل الاستیک می توان برای رفع این مشکل از تحلیل پی بدون جرم^۹ استفاده کرد. اما در مدل الاستوپلاستیک به دلیل کاهش غیر واقعی تنش های قائم، نمی توان از این روش استفاده کرد. با مقایسه تنش های فشاری سنگ پی (MPa ۲۳/۳۵) در تحلیل الاستوپلاستیک و تنش فشاری تک محوری توده سنگ (MPa ۵/۲۱-) که از رابطه (۴) به دست آمده است، اختلاف زیادی بین این دو مقدار مشاهده می شود. این اختلاف به دلیل ایجاد تنش های سه محوره فشاری در سنگ پی و افزایش مقاومت فشاری توده سنگ است.

در شکل (۱۴) مناطق پلاستیک ایجاد شده در سنگ پی با توجه به کنتور کرنش پلاستیک معادل^{۱۰} مشاهده می شود. ملاحظه می شود که ناحیه پلاستیک بزرگی در اثر اعمال وزن سنگ پی و تغییر شکل های دره ایجاد شده است (شکل ۱۴-الف). همچنین بر اثر اعمال وزن سد، تنها بخش کوچکی از پایین دست در اثر تنش کششی به حالت پلاستیک در آمده است (شکل ۱۴-ب). در عین حال شکل (۱۴-پ) نیز نشان می دهد که در اثر

پدیده اثر غالب بارگذاری وزن سنگ پی در تحلیل ها است. در مناطقی که تنش های اصلی بیشینه حالت کششی دارد، به دلیل کم بودن اثر وزن سنگ، این تنش ها از عواملی همچون شکل توپوگرافی سطح و سختی مختلف لایه های سنگی پیروی کرده و در نتیجه کنتورهای تنش اصلی بیشینه حالتی نامنظم پیدا کرده است. در مقابل در مناطق فشاری به دلیل غالب بودن اثر وزن سنگ پی، کنتورهای تنش اصلی بیشینه حالتی منظم داشته و از کنتورهای تنش اصلی کمینه (شکل ۱۳) پیروی می کند. بیشینه تنش های کششی برای هر دو حالت الاستیک و الاستوپلاستیک تحت بارگذاری وزن سد + فشار آب در نشیمنگاه سد رخ می دهد که محل وقوع آن در شکل (۱۴) مشخص است و توضیحات تکمیلی در آن قسمت ارائه می شود.

در حالت کلی با مقایسه کنتورهای تنش اصلی بیشینه در حالت های الاستیک و الاستوپلاستیک می توان گفت به جز تفاوت های اندک موجود در ناحیه کششی، در بقیه قسمت ها همخوانی مناسبی مشاهده می شود.

مطابق شکل (۱۲)، به دلیل لحاظ کردن وزن سنگ پی و ناچیز بودن دیگر بارگذاری ها نظیر وزن بدنه سد در مقابل آن، کمینه تنش های فشاری در کف مدل به وجود می آید. در حالت کلی تنش های اصلی کمینه حالت فشاری داشته و کنتورهای این تنش به لحاظ شکل از توپوگرافی سطح پیروی کرده و با افزایش عمق مقدار آن زیاد می شود. به دلیل مدل کردن لایه های مختلف سنگی با سختی های متفاوت، اعوجاج هایی در این کنتورها ایجاد شده و حالتی شبیه تمرکز تنش ایجاد کرده است. این پدیده همانند قوس زدگی در سدهای خاکی است. همان طور که ملاحظه می شود در حالت های استفاده از رفتار الاستیک و الاستوپلاستیک برای سنگ پی، کمینه تنش های اصلی کمینه و کنتورهای مربوطه از نظر شکل همخوانی مناسبی با یکدیگر دارند.

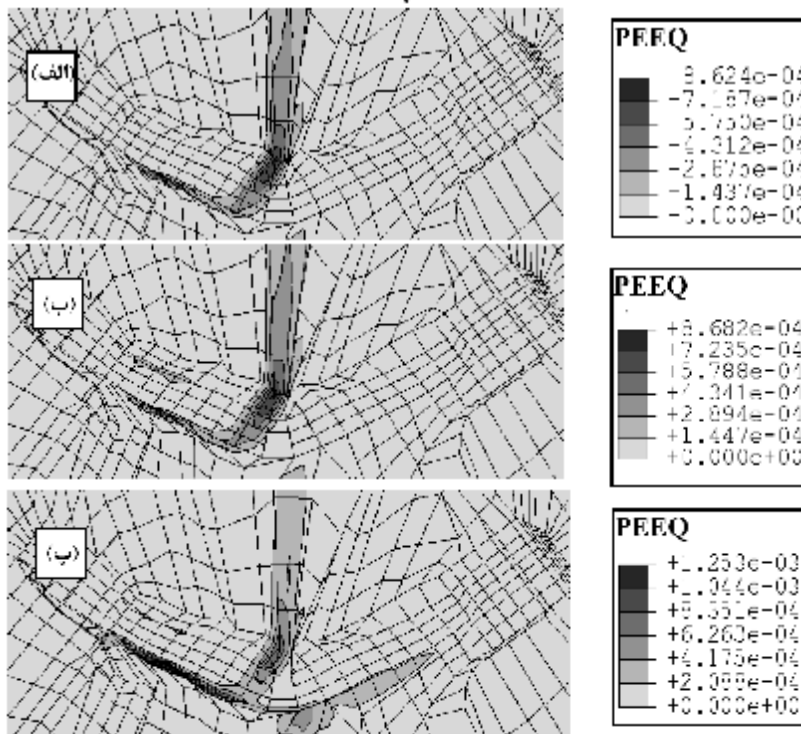
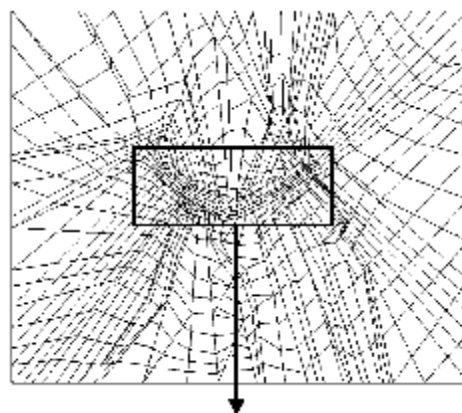
لازم به توضیح است که دلیل اثر غالب وزن سنگ پی نتایج تنش های اصلی بیشینه و کمینه از نظر شکل کنتور و همچنین مقادیر بیشینه و کمینه عددی در هر یک از بارگذاری های وزن سنگ پی، وزن بدنه سد و وزن بدنه سد + فشار آب تفاوت محسوس با یکدیگر ندارند.

در جدول (۵) مقادیر تنش های اصلی بیشینه و کمینه در پی و تکیه گاه ها ارائه شده است. این مقادیر تنش های

فشار آب، در محل بالادست نشیمنگاه سد مناطق پلاستیک کششی شکل گرفته است و مطابق توضیحات گذشته بیشینه تنش‌های کششی در همین نواحی رخ می‌دهد. از بررسی دقیق‌تر حالت تنش در این مناطق می‌توان نتیجه گرفت ناحیه‌های پلاستیک ایجاد شده اغلب به صورت کششی است.

جدول ۵: تنش‌های اصلی به دست آمده در پی و تکیه‌گاه‌ها.

| Model | Location | Stress Component | | Load Combination | |
|----------------|---------------------|------------------|------------|------------------|------------------|
| | | | | Dead | Dead+Hydrostatic |
| Elastic | Integrations points | Major Princ. | Max. (MPa) | 4.24 | 4.53 |
| | | Minor Princ. | Min. (MPa) | -23.72 | -23.73 |
| Elasto Plastic | Integrations points | Major Princ. | Max. (MPa) | 0.85 | 0.85 |
| | | Minor Princ. | Min. (MPa) | -23.34 | -23.35 |



شکل ۱۴: کنتورهای کرنش پلاستیک معادل در محل تماس پی با بدنه سد تحت بارگذاری‌های (الف) وزن سنگ‌پی؛ (ب) وزن سنگ‌پی + وزن سد؛ (پ) وزن سنگ‌پی + وزن سد + فشار آب.

تأثیر پارامترهای سنگپی بر نتایج تحلیل الاستوپلاستیک

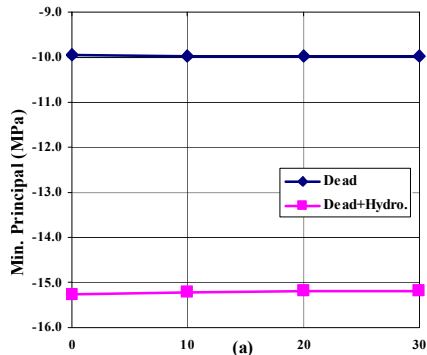
در این قسمت تأثیر پارامترهای، زاویه اتساع (ψ)، زاویه اصطکاک (ϕ) و چسبندگی (c) بر تنش‌های بدنه سد و سنگپی بررسی می‌شود. برای بررسی دقیق‌تر، به جز پارامتر مورد نظر همه مشخصات دیگر ثابت نگه داشته شده است. محدوده تغییرات پارامترها نیز به گونه‌ای انتخاب شده است که با واقعیت هماهنگی داشته باشد. همچنین مانند قسمت قبل، تنش‌های نقاط انتگرال‌گیری مبنای مقایسه قرار گرفته است.

زاویه اتساع (ψ)

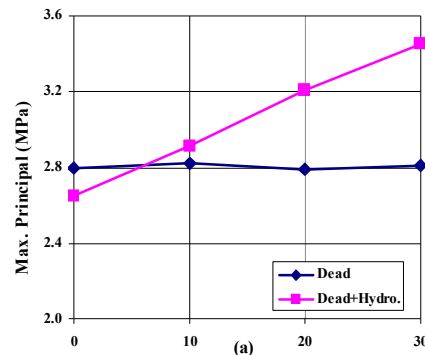
زاویه اتساع به صورت ($\psi = \phi - a$) مشخص و چهار

جدول ۶: تنش‌های اصلی بدنه سد و سنگپی با تغییر زاویه اتساع ($\psi = \phi - a$).

| Location | a | Stress Component | | Load Combination | |
|-----------------|--------------|------------------|------------|------------------|------------------|
| | | | | Dead | Dead+Hydrostatic |
| Dam Body | 0 | Major Princ. | Max. (MPa) | 2.80 | 2.65 |
| | | Minor Princ. | Min. (MPa) | -9.95 | -15.26 |
| | 10 | Major Princ. | Max. (MPa) | 2.82 | 2.91 |
| | | Minor Princ. | Min. (MPa) | -9.97 | -15.22 |
| | 20 | Major Princ. | Max. (MPa) | 2.79 | 3.21 |
| | | Minor Princ. | Min. (MPa) | -9.97 | -15.20 |
| 30 | Major Princ. | Max. (MPa) | 2.81 | 3.45 | |
| | Minor Princ. | Min. (MPa) | -9.98 | -15.19 | |
| Rock Foundation | 0 | Major Princ. | Max. (MPa) | 0.85 | 0.85 |
| | | Minor Princ. | Min. (MPa) | -23.34 | -23.35 |
| | 10 | Major Princ. | Max. (MPa) | 0.85 | 0.86 |
| | | Minor Princ. | Min. (MPa) | -23.35 | -23.36 |
| | 20 | Major Princ. | Max. (MPa) | 0.89 | 0.89 |
| | | Minor Princ. | Min. (MPa) | -23.36 | -23.36 |
| 30 | Major Princ. | Max. (MPa) | 0.90 | 0.90 | |
| | Minor Princ. | Min. (MPa) | -23.36 | -23.37 | |

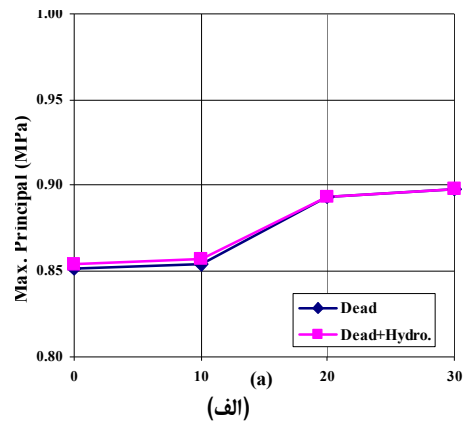
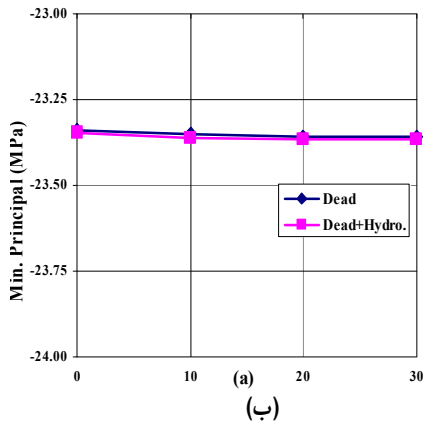


(ب)



(الف)

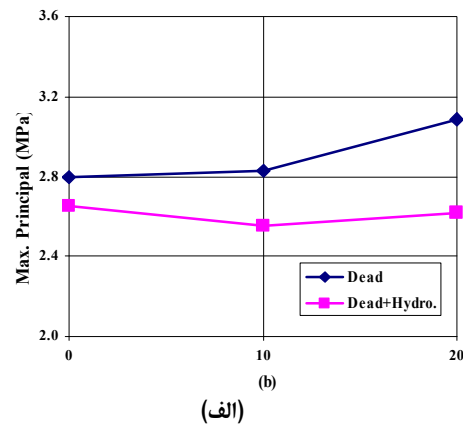
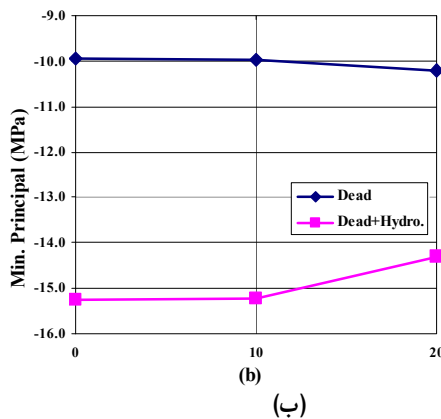
شکل ۱۵: تغییرات تنش‌های اصلی در بدنه سد با تغییر زاویه اتساع ($\psi = \phi - a$)
(الف) تنش کششی، (ب) تنش فشاری.



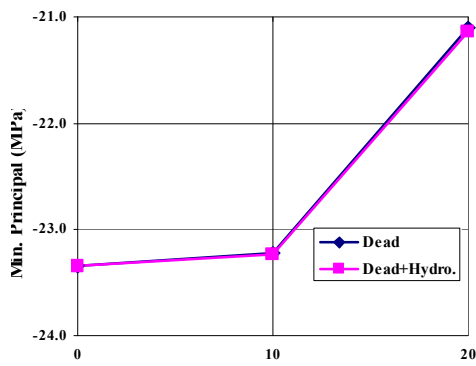
شکل ۱۶: تغییرات تنش‌های اصلی در سنگ‌پی با تغییر زاویه اتساع ($\psi = \varphi - a$) (الف) تنش کششی، (ب) تنش فشاری.

جدول ۷: تنش‌های اصلی بدنه و سنگ‌پی با تغییر زاویه اصطکاک ($\varphi = \varphi_0 - b$).

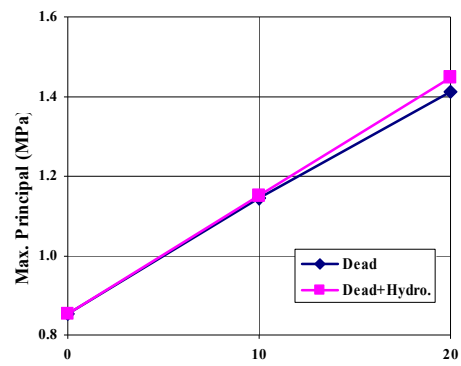
| Location | b | Stress Component | | Load Combination | |
|-----------------|----|------------------|------------|------------------|------------------|
| | | | | Dead | Dead+Hydrostatic |
| Dam Body | 0 | Major Princ. | Max. (MPa) | 2.80 | 2.65 |
| | | Minor Princ. | Min. (MPa) | -9.95 | -15.26 |
| | 10 | Major Princ. | Max. (MPa) | 2.83 | 2.55 |
| | | Minor Princ. | Min. (MPa) | -9.98 | -15.24 |
| | 20 | Major Princ. | Max. (MPa) | 3.08 | 2.62 |
| | | Minor Princ. | Min. (MPa) | -10.21 | -14.31 |
| Rock Foundation | 0 | Major Princ. | Max. (MPa) | 0.85 | 0.85 |
| | | Minor Princ. | Min. (MPa) | -23.34 | -23.35 |
| | 10 | Major Princ. | Max. (MPa) | 1.14 | 1.15 |
| | | Minor Princ. | Min. (MPa) | -23.22 | -23.23 |
| | 20 | Major Princ. | Max. (MPa) | 1.41 | 1.45 |
| | | Minor Princ. | Min. (MPa) | -21.10 | -21.14 |



شکل ۱۷: تغییرات تنش‌های اصلی در بدنه سد با تغییر زاویه اصطکاک ($\varphi = \varphi_0 - b$) (الف) تنش کششی، (ب) تنش فشاری.



(ب)

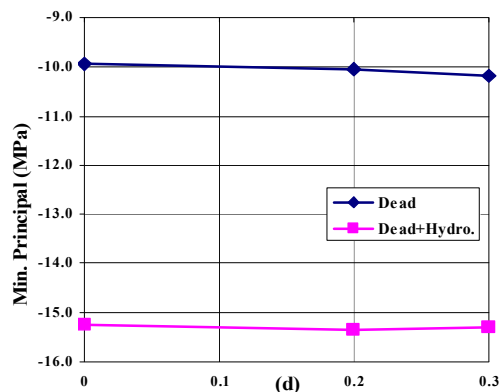


(الف)

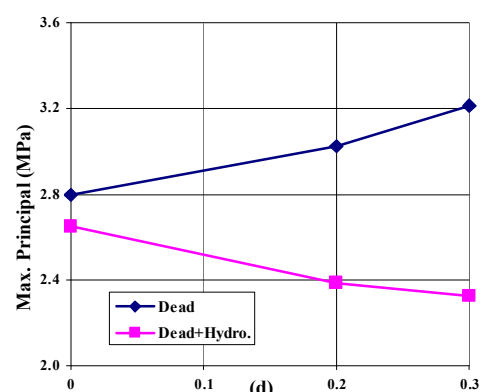
شکل ۱۸: تغییرات تنش‌های اصلی در سنگ پی با تغییر زاویه اصطکاک ($\varphi = \varphi_0 - b$)
(الف) تنش کششی، (ب) تنش فشاری.

جدول ۸: تنش‌های اصلی بدنه و سنگ پی با تغییر چسبندگی ($C = C_0 - d$).

| Location | d | Stress Component | | Load Combination | |
|-----------------|-----|------------------|------------|------------------|------------------|
| | | | | Dead | Dead+Hydrostatic |
| Dam Body | 0 | Major Princ. | Max. (MPa) | 2.80 | 2.65 |
| | | Minor Princ. | Min. (MPa) | -9.95 | -15.26 |
| | 0.2 | Major Princ. | Max. (MPa) | 3.02 | 2.39 |
| | | Minor Princ. | Min. (MPa) | -10.06 | -15.35 |
| | 0.3 | Major Princ. | Max. (MPa) | 3.22 | 2.33 |
| | | Minor Princ. | Min. (MPa) | -10.17 | -15.29 |
| Rock Foundation | 0 | Major Princ. | Max. (MPa) | 0.85 | 0.85 |
| | | Minor Princ. | Min. (MPa) | -23.34 | -23.35 |
| | 0.2 | Major Princ. | Max. (MPa) | 0.69 | 0.69 |
| | | Minor Princ. | Min. (MPa) | -23.36 | -23.36 |
| | 0.3 | Major Princ. | Max. (MPa) | 0.60 | 0.60 |
| | | Minor Princ. | Min. (MPa) | -23.37 | -23.38 |

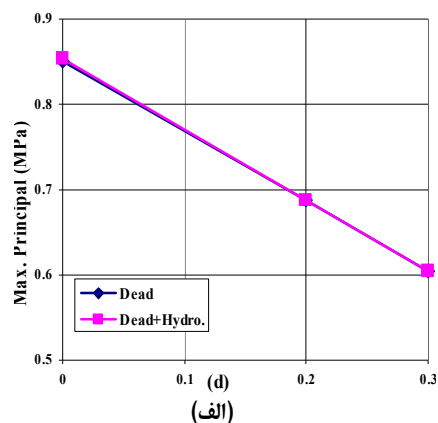
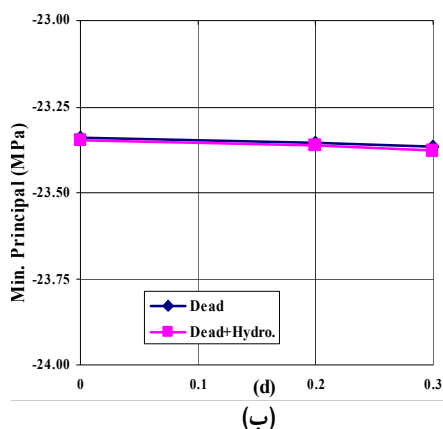


(ب)



(الف)

شکل ۱۹: تغییرات تنش‌های اصلی در بدنه سد با تغییر چسبندگی ($C = C_0 - d$)
(الف) تنش کششی، (ب) تنش فشاری.



شکل ۲۰: تغییرات تنش‌های اصلی در سنگ پی با تغییر چسبندگی ($C = C_0 - d$)
(الف) تنش کششی، (ب) تنش فشاری.

نشدن مناطق پلاستیک فشاری، این تنش‌ها به طور تقریبی ثابت باقی می‌ماند.

کمینه تنش‌های فشاری در بدنه سد نیز همانند نتایج پی و تکیه‌گاه‌ها با تغییر چسبندگی ثابت است (شکل ۱۹-ب). ولی در مورد بیشینه تنش‌های کششی به دلیل استفاده از مدل الاستیک در بدنه، تغییرات روند مطلوبی ندارد. به طوری که در بارگذاری وزن بدنه سد + فشار آب مطابق پیش‌بینی با کاهش چسبندگی، بیشینه تنش کششی کاهش می‌یابد، ولی در بارگذاری وزن بدنه سد بر خلاف پیش‌بینی با کاهش چسبندگی بیشینه تنش کششی افزایش می‌یابد (شکل ۱۹-الف).

مطابق نتایج این قسمت، تنش‌های بیشینه کششی و کمینه فشاری سنگ پی در هر دو حالت بارگذاری وزن سد و وزن سد + فشار آب با یکدیگر برابر هستند و نیروی هیدرواستاتیک آب تأثیری بر تنش‌های سنگ پی ندارد. این برابری در تنش‌های بیشینه کششی به دلیل استفاده از مدل الاستوپلاستیک است که تنش‌های کششی را به مقدار مشخصی محدود می‌کند. همچنین به دلیل وارد نشدن فشار هیدرواستاتیک آب به دیواره پی و تکیه‌گاه‌ها، تنش‌های کمینه فشاری تنها تابع وزن سنگ پی بوده و طبیعی است که در هر دو حالت بارگذاری، مقداری ثابت داشته باشد. اما در بدنه سد به دلیل استفاده از مدل الاستیک و همچنین وارد شدن فشار هیدرواستاتیک آب به بالادست بدنه سد، این تنش‌ها در هر دو حالت بارگذاری، مقداری تفاوت دارند.

زاویه اصطکاک (φ)

در این قسمت برای کاهش حالات مورد بررسی از فرض قانون جریان همبسته ($\varphi = \psi$) استفاده شده است. تنش‌های اصلی بدنه سد و سنگ پی در جدول (۷) و در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) نیز به ترتیب تغییرات تنش‌های اصلی در بدنه و سنگ پی نشان داده شده است. البته با توجه به شکل (۴) واضح است که با کاهش زاویه اصطکاک تنش‌های فشاری تک محوری، کاهش و تنش‌های کششی تک‌محوری افزایش می‌یابد. با توجه در تنش‌های سنگ پی چنین روندی به خوبی مشاهده می‌شود. نکته مهمی که در نتایج وجود دارد، این است که در حالت ($\varphi = \varphi_0 - 2\theta$) به دلیل کاهش زیاد زاویه اصطکاک، مناطق پلاستیک فشاری در سنگ پی ایجاد شده و تنش فشاری به حدود $21/5$ MPa محدود شده است. اما در بدنه سد به دلیل استفاده از مدل الاستیک افزایش تنش کششی و کاهش تنش فشاری روندی ملایم-تر داشته است.

چسبندگی (c)

تنش‌های اصلی در جدول (۸) و تغییرات تنش‌های اصلی در بدنه و سنگ پی به ترتیب در شکل‌های (۱۹) و (۲۰) برای مقادیر مختلف چسبندگی نشان داده شده است. مطابق شکل (۴) با کاهش چسبندگی، تنش‌های کششی تک محوری کاهش می‌یابد. در پی و تکیه‌گاه‌ها به دلیل استفاده از مدل الاستوپلاستیک این روند در کشش به خوبی مشاهده می‌شود. در مناطق فشاری به دلیل ایجاد

نتیجه گیری

- استفاده از مدل الاستوپلاستیک مور-کولمب در سنگ پی سدهای بتنی قوسی، سبب دستیابی به تنش های واقع بینانه تری در محدوده پی و تکیه گاه ها می شود. لازم به توضیح است در این روش پی و تکیه گاه ها به صورت پیوسته در نظر گرفته شده و اثر ناپیوستگی های توده سنگ به طور ضمنی و به شکل محدود شدن تنش کششی قابل تحمل توده سنگ با استفاده از مدل مور-کولمب لحاظ می شود

- استفاده از مدل الاستوپلاستیک در مقایسه با حالت الاستیک، برای سنگ پی سبب کاهش تنش های اصلی کششی در بدنه سد می شود. این کاهش در بارگذاری وزن سد + فشار آب بیشتر از بارگذاری وزن سد است.

همچنین استفاده از مدل الاستوپلاستیک تأثیر ناچیزی در تغییر شکل بدنه سد تحت بارگذاری وزن سد + فشار آب دارد.

- تغییر پارامترهای الاستوپلاستیک سنگ پی (c, ϕ, ψ) در محدوده آنالیز حساسیت، تأثیر قابل ملاحظه ای بر تنش های بدنه سد دارد. این تأثیر در کشش بسیار بیشتر از فشار است.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از زحمات و همکاری بی دریغ شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران و همچنین شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس در ارائه اطلاعات برای انجام این تحقیق تقدیر و تشکر به عمل می آید.

مراجع

- 1 - Pande, G. N. and Xiong, W. (1982). "An improved multi-laminate model of jointed rock masses." *Inter. Sym. On Numerical models in Geomechanics*, Zurich, PP. 218-226.
- 2 - Chen, S., Xu, M., Shahrour, I. and Egger, P. (2003). "Analysis of arch dams using coupled trial load and block element methods." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 129, No. 11.
- 3 - 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." *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, Vol. 42, PP. 415-430.
- 4 - Khoshboresh, A. (2005). *Drilling and grouting of Karun 3 dam*, Jaam-e-andisheh, Tehran. [Persian]
- 5 - Hosseinzadeh, A. (2007). *Three dimensional numerical analysis of stress-strain in arch concrete dams, Using more accurate modeling of foundation*, Msc thesis, Amirkabir University of Technology. [Persian]
- 6 - Mahab Ghods-Acres JV. (1993). *Dam site geological and geotechnical report*, KARUN III Development Project, Vol. 1.
- 7 - Mahab Ghods-Acres JV. (2001). *Dam and thrust block analysis*, Design report in KARUN III development project.
- 8 - Mahab Ghods-Acres JV. (1992). *Dam structural Analysis*, KARUN III Development Project.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Multi Laminate Model
- 2 - Finite Element Mesh
- 3 - Interface Element
- 4 - Joint Element
- 5 - Block Theory (BT)
- 6 - Distinct Element Method (DEM)
- 7 - Discontinuous Deformation Analysis (DDA)
- 8 - Integration Points
- 9 - Weight-less
- 10 - Plastic Strain Equivalent (PEEQ). $(\epsilon^i = \int_v \frac{1}{c} \sigma : d\epsilon^i)$, where c is the cohesion yield stress.