تأثیرمدل‌هاي غیرخطي سنگ‌پي در تحلیل‌هاي سد بتني دوقوسي کارون٣

آرش حسین‌زاده[1]، مهدي نوبري نسب[1]، وحید لطفي*[2] و عباس سروش[3]

[1] دانش آموخته کارشناسي ارشد دانشکده مهندسي عمران و محیط زیست - دانشگاه صنعتي امیرکبیر

[2] استاد دانشکده مهندسي عمران و محیط زیست - دانشگاه صنعتي امیرکبیر

[3] دانشیار دانشکده مهندسي عمران و محیط زیست - دانشگاه صنعتي امیرکبیر

(تاریخ دریافت ٨٥/١٢/١٢ ، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ٨٨/٥/٢٠ ، تاریخ تصویب ٨٩/٢/١٢)

چکیده

در طراحي سدهاي بتني قوسي اغلب از تحلیل الاستیک استفاده مي‌شود. اما در بیشتر مواقع نتایج توزیع تنش این تحلیل‌ها، حداقل به صورت موضعي دور از واقعیت است. براي رفع این مشکل مي‌توان از روش‌هاي مختلفي استفاده کرد. یکي از این روش‌ها که در ژئوتکنیک مقبول است، استفاده از مدل‌هاي الاستوپلاستیک براي سنگ‌پي و تکیه‌گاه‌ها است. در این مقاله با استفاده از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS، تأثیر استفاده از مدل الاستوپلاستیک مور-کولمب در سنگ‌پي بر تنش‌ها و تغییرشکل‌هاي بدنه و پي سدهاي بتني قوسي بررسي می‌شود. بدین منظور تنش‌ها و تغییرشکل‌ها در دو حالت پي الاستیک و الاستوپلاستیک با یکدیگر مقایسه شده و همچنین مطالعه پارامتریک نیز روي متغیرهاي الاستوپلاستیک نظیر زاویه اتساع، زاویه اصطکاک و چسبندگي انجام شده است. برای واقع‌بینانه‌تر شدن نتایج این تحقیق، از سد بتني دوقوسي کارون ٣ به عنوان مطالعه موردي استفاده شده است.

واژه‌هاي کلیدي: اجزای محدود، مدل مورکولمب، سد بتني قوسي، سد کارون٣، تکیه‌گاه سد

مقدمه

تحلیل سدهاي بتني قوسي به دلیل شکل هندسي بدنه و پیچیدگي‌هاي موجود در ساختگاه سد با دشواري‌ها و عدم قطعیت‌هاي فراواني رو به روست. طبیعي است هر چه مدلسازي به طور دقیق‌تري انجام شود، نتایج واقعي‌تري در بر خواهد داشت. به طور کلي مدل مورد استفاده در تحلیل را مي‌توان به دو بخش بدنه سد و سنگ پي تقسیم کرد. سنگ‌پي مجموعه‌اي از سنگ بکر و ناپیوستگي‌ها شامل: درز، ترک و گسل است. به دلیل تنوع چیدمان این ناپیوستگي‌ها، نحوه رفتار مکانیکي و عملکرد توده سنگ بسیار پیچیده است. به منظور مدلسازي رفتار سنگ‌ها از روش‌هاي مختلفي مي‌توان استفاده کرد. به طور کلي این روش‌ها را مي‌توان به دو دسته پیوسته و گسسته تقسیم کرد. در روش پیوسته، توده سنگ به شکل مجموعه‌اي پیوسته در نظر گرفته شده و اثر ناپیوستگي‌ها به طور ضمني و غیر مستقیم با استفاده از مدل‌هاي رفتاري مناسب نظیر مور-کولمب، دراکر-پراگر و چندلایه[1] [١] لحاظ مي‌شود. نکته مثبت این روش امکان استفاده از شبکه‌بندي اجزای محدود[2] مدل الاستیک است. در روش گسسته سعي مي‌شود ناپیوستگي‌ها به وسیله المان‌هاي ویژه نظیر المان‌هاي میان لایه[3] (المان درز[4]) و یا با استفاده از روش‌هاي عددي گسسته نظیر BT[5] [٢]، DEM[6] و DDA[7] به طور دقیق مدل شود. روش‌هاي گسسته بیشتر به منظور تحلیل پایداري تکیه‌گاه‌ها و بلوک‌هاي سنگي کاربرد دارد و در اغلب مواقع مدلسازي و تحلیل از این طریق بسیار دشوار و زمانبر است. در مقابل استفاده از روش‌هاي پیوسته به دلیل نیاز نداشتن به تغییر شبکه‌بندي مدل الاستیک مناسب‌تر به نظر مي‌رسد. Yu et al. در سال ٢٠٠٥ سد بتني وزني-قوسي Houhe را با استفاده از مدل الاستوپلاستیک دراکر- پراگر تحلیل پایداري کرد که حاصل این مطالعه دستیابي به نتایج و تنش‌هاي واقعیتر در بدنه سد است[٣].

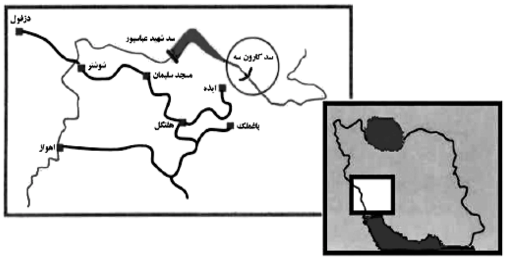
معرفي سد کارون ٣

طرح سد و نیروگاه کارون٣ با توان تولید ١٢٠٠ مگاوات ساعت برق، بزرگ‌ترین پروژه برق آبي کشور است. این سد از نوع بتني دوقوسي نازک به ارتفاع ٢٠٥ متر است و روي رودخانه کارون در استان خوزستان احداث شده است(شکل ١).

برخي از مشخصات این سد در جدول (١) ارائه شده و در شکل (٢) نیز نمایي از طره مرکزي این سد آمده است.

---

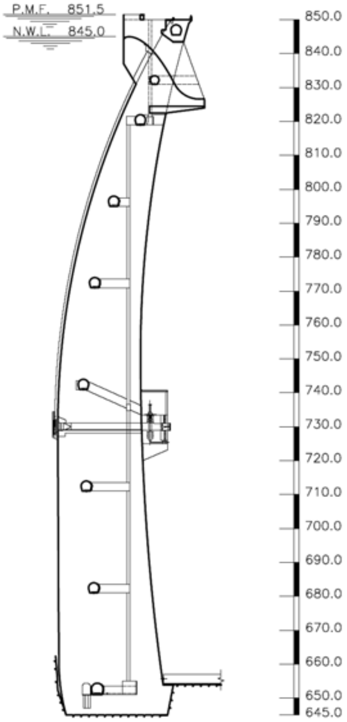
* نویسنده مسئول : تلفن : ٦٤٥٤٣٠١٧ , فاکس : ٦٦٤١٤٢١٣ , Email: vahlotfi@aut.ac.ir


دزفول
سد شهید عباسپور
سد کارون سه
شوشتر
مسجد سلیمان
ایذه
هفتکل
باغملک
اهواز

شکل ۱: موقعيت جغرافيايي سد كارون۳ [۴].

جدول ۱: مشخصات كلي سد كارون۳ [۴].

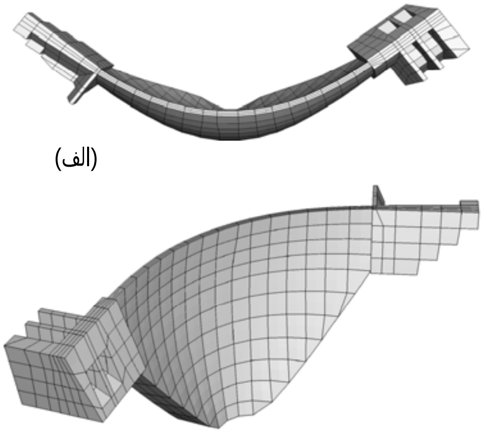
نوع سد	بتني دو قوسي
ارتفاع سد از پي	۲۰۵ متر
طول تاج	۳۸۸ متر
ضخامت سد در قسمت تاج	۵/۵ متر
ضخامت سد در پي	۲۹/۵ متر
تراز تاج سد	۸۵۰ متر از سطح دريا
تراز آب در حالت مخزن پر	۸۴۵ متر از سطح دريا
حجم مخزن	۲۷۵۰ ميليون متر مكعب
مساحت درياچه سد	۴۶ كيلومتر مربع


P.M.F. 851.5
N.W.L. 845.0
850.0
840.0
830.0
820.0
810.0
800.0
790.0
780.0
770.0
760.0
750.0
740.0
730.0
720.0
710.0
700.0
690.0
680.0
670.0
660.0
650.0
645.0

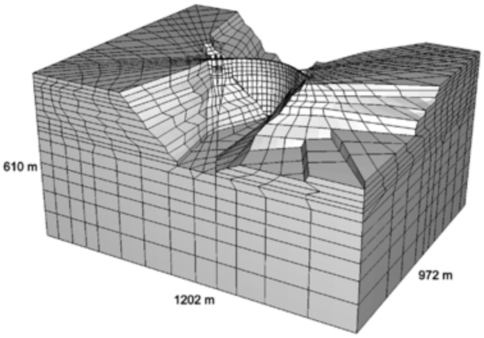
شكل۲: طره مركزي در بدنه سد كارون ۳.

معرفي مدل

در انجام تحليل‌ها، از نرم‌افزار جامع اجزای محدود ABAQUS استفاده شده است. بدين منظور مدلي شامل ۳۴۰۹۳ گره و ۷۸۰۸ المان بيست گرهي ايزوپارامتريک از مجموعه بدنه سد و تکيه‌گاه‌ها تهيه شده است. در مدلسازي بدنه سد از سه رديف المان ۲۰ گرهي در ضخامت استفاده شده که از نظر هندسي با واقعيت (شكل (۲)) تطابق دارد (شكل۳). تراست بلوک‌ها نيز به دقت مدلسازي شده است(شكل۳). همچنين در مدل‌سازي پي و تکيه‌گاه‌ها نيز لايه‌هاي مختلف توده سنگ و توپوگرافي دره در حد امکان منظور شده است (شكل ۳).


(الف)

(ب)


610 m
972 m
1202 m

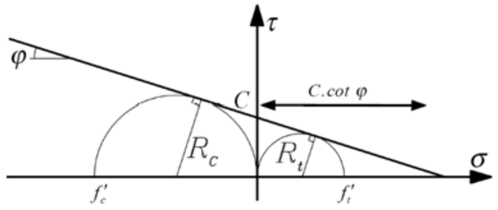
(پ)

شكل۳: (الف) نماي از بالاي بدنه سد، (ب) نماي سه بعدي از بدنه سد، (پ) نماي پايين دست از مدل بدنه، پي و تکيه‌گاه‌هاي سد كارون ۳ [۵] .

فرضیه‌های تحلیل

براي انجام تحليل غيرخطي از مدل الاستوپلاستيک كامل مور-كولمب در سنگ‌پي استفاده شده است. در شكل (۴) منحني اين مدل و در روابط (۱) الي (۴) روابط

مورد نیاز ارائه شده است.



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

$$\tau = c - \sigma_n.tan\,\varphi \quad (۱)$$

$$f_t' = 2R_t = \frac{2C\cos\varphi}{1+\sin\varphi} \quad (۲)$$

$$f_{t(Max)}' = C.cot\,\varphi \quad (۳)$$

$$f_c' = 2R_c = \frac{2C\cos\varphi}{1-\sin\varphi} \quad (۴)$$

در این روابط f_t' و f_c' به ترتیب مقاومت کششي و فشاري تک‌محوري مصالح مورد نظر است.

تحلیل در دو حالت رفتار الاستیک و الاستوپلاستیک براي سنگ‌پي انجام شده است. جدول (۲) مشخصات لایه‌هاي مختلف سنگ‌پي را نشان مي‌دهد.

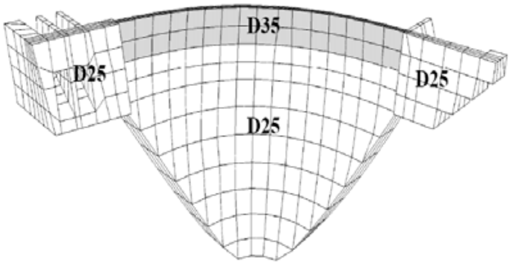
جدول ۲: مشخصات انواع سنگ‌هاي موجود در پي و تکیه‌گاه‌هاي سد کارون ۳ [۶]و [۷].

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 ارزیابي دقیق‌تر تأثیر استفاده از رفتار الاستوپلاستیک براي سنگ‌پي، در کلیه تحلیل‌ها رفتار بدنه سد الاستیک لحاظ شده است. جدول (۳) مشخصات بتن مصرفي در بدنه و شکل (۵) موقعیت آنها را نشان مي‌دهد.

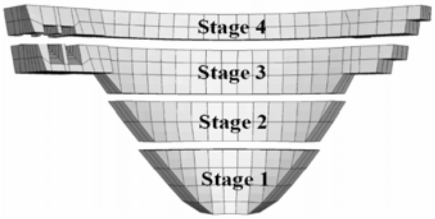
جدول ۳: مشخصات بتن مصرفي در بدنه سد کارون ۳ [۸].

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



شکل ۵: موقعیت قرارگیري انواع بتن مصرفي در بدنه و تراست بلوک‌هاي سد کارون ۳ [۵].

در این مطالعه سعي شده است، بارگذاري مدل به نحوي انجام شود که با واقعیت تطابق داشته باشد. بدین منظور، ابتدا المان‌هاي مربوط به بدنه سد از مدل حذف شده و مدل تنها شامل مجموعه پي و تکیه‌گاه‌ها شده است (این عمل با تعریف یک سختي بسیار کم براي المان‌هاي بدنه سد انجام مي‌شود. به گونه‌اي که با ایجاد تغییرشکل، تنشي در این المان‌ها ایجاد نمي‌شود و از طرف دیگر به دلیل سختي کم این المان‌ها، نقشي در تغییر شکل و توزیع تنش بقیه المان‌ها ندارند). سپس در این حالت وزن سنگ‌پي به مدل وارد شده است. اگر هنگام اعمال وزن سنگ‌پي، بدنه سد نیز در مدل وجود داشته باشد، به دلیل سختي ناچیز بدنه سد بتني قوسي در مقابل مجموعه پي و تکیه‌گاه‌ها، تغییرشکل‌ها و تنش‌هاي بزرگ و غیر منطقي در بدنه سد مشاهده خواهد شد. پس از بارگذاري وزن سنگ‌پي، 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 لایه‌هاي افقي تقسیم و در هر مرحله، وزن و سختي یک لایه به مدل وارد مي‌شود. بدین طریق آویختگي بدنه سد از تکیه‌گاه‌ها که در اثر اعمال یک دفعه وزن بدنه سد ایجاد مي‌شود، کاهش یافته و تنش‌هاي حاصله به واقعیت نزدیک‌تر مي‌شود. این روش راه حلي میاني بین تحلیل زوج و فرد و اثر یک دفعه وزن بدنه سد است. در این مطالعه به دلیل محدودیت‌هاي نرم‌افزار، امکان استفاده از روش تحلیل زوج و فرد وجود نداشته است. لازم به ذکر است با استفاده از روش‌هاي کنترلي مختلف، درستی عملکرد و کارایي این روش اثبات شده است، ولي ارائه نتایج خارج از محدوده این مطالعه است[۵]. پس از بارگذاري وزن بدنه سد، فشار آب دریاچه نیز به صورت فشار هیدرواستاتیک بر وجه بالادست بدنه سد وارد شده است.



شکل ۶: لايه‌هاي در نظرگرفته شده براي چهار مرحله ساخت.

نتايج تحليل

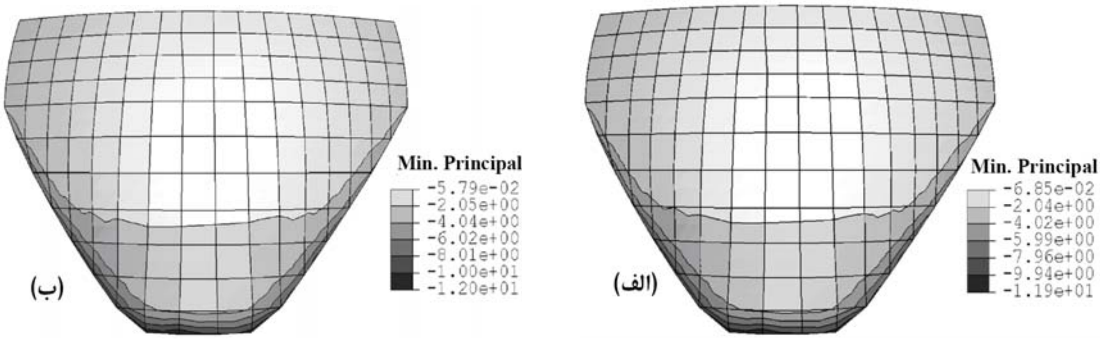
تنش در بدنه سد

جدول (۴) تنش‌هاي اصلي در بدنه سد را نشان مي‌دهد. ملاحظه مي‌شود که استفاده از مدل الاستوپلاستيک در سنگ‌پي سبب کاهش تنش‌هاي اصلي کششي بدنه سد در هر دو حالت بارگذاري وزن سد و وزن سد+ فشار آب مي‌شود. اين کاهش در حالت دوم بارگذاري برابر ۳۴درصد(۱/۳۵ MPa) است. اما تنش فشاري بدنه سد در تحليل الاستوپلاستيک تحت هر دو بارگذاري به مقدار کمي افزايش مي‌يابد. شکل‌هاي (۷) و (۸) به ترتيب تنش‌هاي اصلي کمينه در بالادست و بيشينه در پايين دست سد تحت بارگذاري وزن سد در حالت‌هاي پي الاستيک و الاستوپلاستيک در نقاط گرهي را نشان مي‌دهد. از مقايسه اين نتايج ملاحظه مي‌شود که توزيع کلي و مقادير تنش‌هاي اصلي کمينه بدنه سد تغيير معني‌داري نکرده، اما در مورد تنش‌هاي اصلي بيشينه اين طور نيست. در شکل‌هاي (۹) و (۱۰) نيز به ترتيب تنش‌هاي اصلي بيشينه در بالادست و کمينه در پايين‌دست سد تحت بارگذاري وزن سد+ فشار آب در حالت‌هاي پي الاستيک و الاستوپلاستيک در نقاط گرهي نشان داده شده است. در اين شکل‌ها نيز ملاحظه مي‌شود که اختلاف عمده براي مقادير بيشينه تنش‌هاي اصلي بدنه سد رخ مي‌دهد.

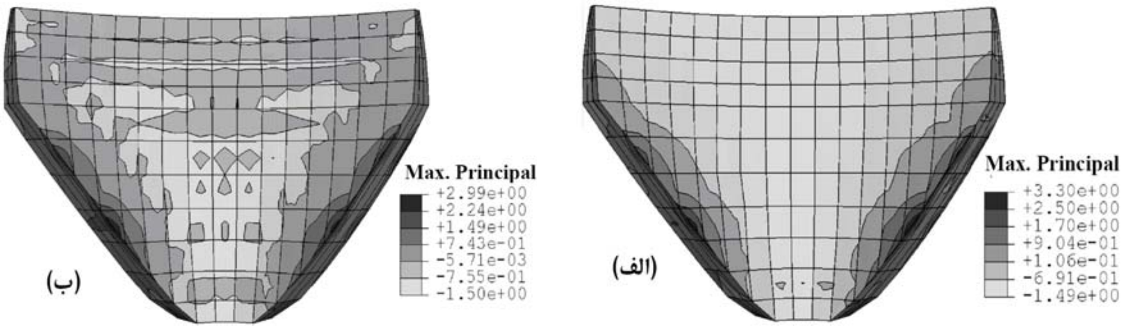
در مجموع ملاحظه می‌شود که استفاده از مدل الاستوپلاستيک سبب کاهش قابل توجه تنش‌هاي کششي در بدنه سد شده است (جدول ۴). با اين وجود ، به دليل فراتر بودن تنش‌هاي کششي حاصل از تحليل در بدنه سد نسبت به تنش‌هاي کششي مجاز بتن، احتمال ايجاد ترک در بدنه سد وجود دارد. بنابراين انجام تمهيداتي براي مدل‌سازي ترک در بدنه سد ضروري است که خارج از محدوده مطالعه حاضر است.

جدول ۴: تنش‌هاي اصلي به دست آمده در بدنه سد.

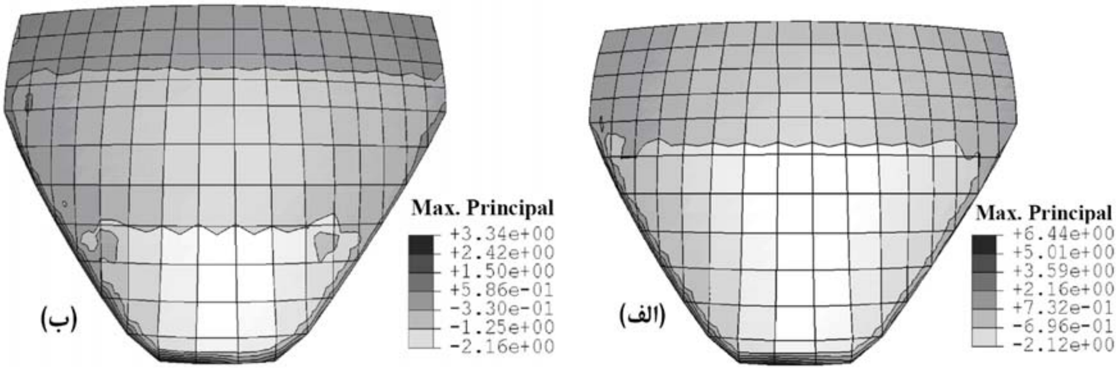
Location	Model	Stress Component		Load Combination	
				Dead	Dead+ Hydrostatic
Integration Points	Elastic	Major Princ.	Max. (MPa)	2.95	4.00
		Minor Princ.	Min. (MPa)	-9.91	-14.56
	Elasto Plastic	Major Princ.	Max. (MPa)	2.80	2.65
		Minor Princ.	Min. (MPa)	-9.95	-15.26
Element Nodes	Elastic	Major Princ.	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



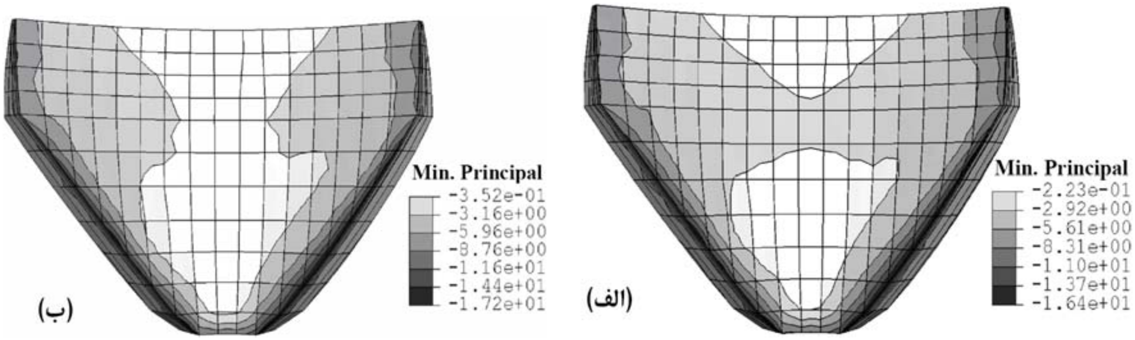
شکل ۷: تنش‌هاي اصلي کمينه در بالادست سد تحت بارگذاري وزن سد؛
(الف) مدل الاستيک، (ب) مدل الاستوپلاستيک.


Max. Principal
+3.30e+00
+2.50e+00
+1.70e+00
+9.04e-01
+1.06e-01
-6.91e-01
-1.49e+00
(الف)
Max. Principal
+2.99e+00
+2.24e+00
+1.49e+00
+7.43e-01
-5.71e-03
-7.55e-01
-1.50e+00
(ب)

شکل ۸: تنش‌هاي اصلي بيشينه در پايين‌دست سد تحت بارگذاري وزن سد؛
(الف) مدل الاستیک، (ب) مدل الاستوپلاستیک.


Max. Principal
+6.44e+00
+5.01e+00
+3.59e+00
+2.16e+00
+7.32e-01
-6.96e-01
-2.12e+00
(الف)
Max. Principal
+3.34e+00
+2.42e+00
+1.50e+00
+5.86e-01
-3.30e-01
-1.25e+00
-2.16e+00
(ب)

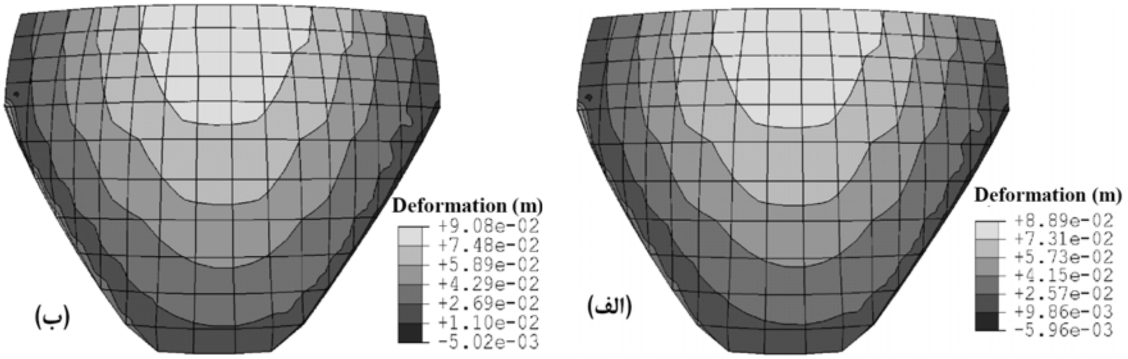
شکل ۹: تنش‌هاي اصلي بيشينه در بالادست سد تحت بارگذاري وزن سد+ فشارآب؛
(الف) مدل الاستیک، (ب) مدل الاستوپلاستیک.


Min. Principal
-2.23e-01
-2.92e+00
-5.61e+00
-8.31e+00
-1.10e+01
-1.37e+01
-1.64e+01
(الف)
Min. Principal
-3.52e-01
-3.16e+00
-5.96e+00
-8.76e+00
-1.16e+01
-1.44e+01
-1.72e+01
(ب)

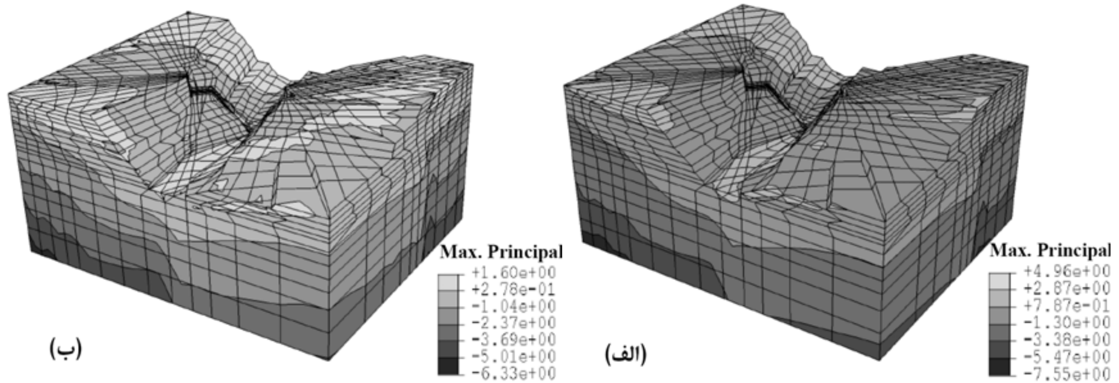
شکل ۱۰: تنش‌هاي اصلي کمينه در پايين‌دست سد تحت بارگذاري وزن سد+ فشارآب؛
(الف) مدل الاستیک، (ب) مدل الاستوپلاستیک.

تغییرشکل در بدنه سد

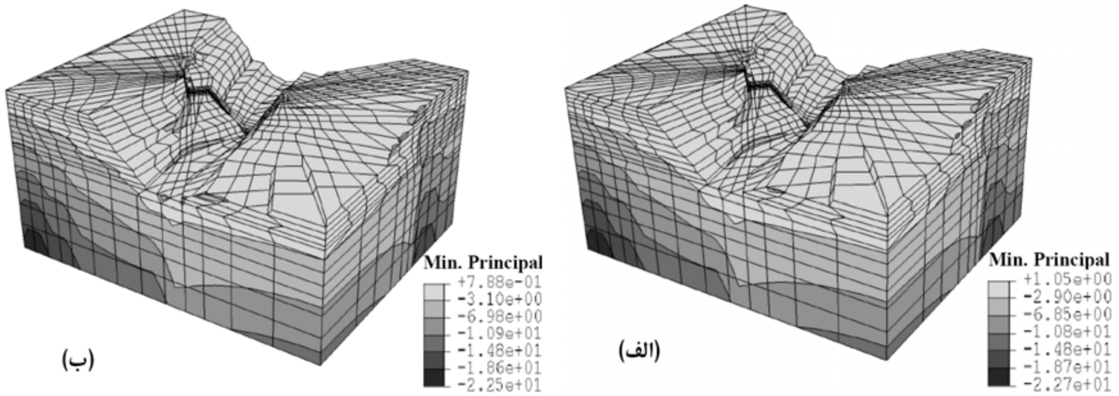
شکل (۱۱) تغییرشکل‌هاي بدنه سد تحت بارگذاري وزن سد+ فشار آب را در دو حالت الاستیک و الاستوپلاستیک نشان مي‌دهد. از مقايسه اين دو شکل مشاهده مي‌شود: نخست استفاده از مدل الاستوپلاستیک در سنگ‌پي تغيير معني‌داري در حالت تغییرشکل‌هاي بدنه سد ايجاد نکرده است. دوم، مقادير تغییرشکل‌ها در همه نقاط به طور تقریبی با یکدیگر برابر است، به طوري که حداکثر اختلاف ۰/۳ سانتي‌متر است. اين تأثير اندک در تغییرشکل‌هاي بدنه سد به دليل محدود بودن مناطق پلاستیک ايجاد شده در سنگ‌پي است. مطابق شکل (۱۴) مناطق پلاستیک تنها در قسمت‌هاي با تنش کششي زياد در نشيمنگاه سد به وجود آمده است.



شکل ١١: جا به جايي بدنه سد در جهت رودخانه تحت بارگذاري وزن سد+ فشار آب؛
(الف) مدل الاستيک، (ب) مدل الاستوپلاستيک.



شکل ١٢: تنش‌هاي اصلي بيشينه در پي و تکيه‌گاه‌ها تحت بارگذاري وزن سد+ فشار آب؛
(الف) مدل الاستيک، (ب) مدل الاستوپلاستيک.



شکل ١٣: تنش‌هاي اصلي کمينه در پي و تکيه‌گاه‌ها تحت بارگذاري وزن سد+ فشار آب؛
(الف) مدل الاستيک، (ب) مدل الاستوپلاستيک.

تنش در سنگ‌پي

در شکل‌هاي (١٢) و (١٣) کنتورهاي تنش‌هاي اصلي بيشينه و کمينه مربوط به پي و تکيه‌گاه‌ها در بارگذاري وزن بدنه سد + فشار هيدرواستاتيک ارائه شده است.

مطابق شکل (١٢)، در هر دو حالت استفاده از رفتار الاستيک و الاستوپلاستيک، تنش‌هاي اصلي بيشينه تنها تا عمق متوسط ٥٠ متري از سطح مدل حالت کششي داشته و از اين تراز به پايين تنش حالت فشاري دارد. دليل اين

پدیده اثر غالب بارگذاري وزن سنگ‌پي در تحليل‌ها است. در مناطقي كه تنش‌هاي اصلي بيشينه حالت كششي دارد، به دليل كم بودن اثر وزن سنگ، اين تنش‌ها از عواملي همچون شكل توپوگرافي سطح و سختي مختلف لايه‌هاي سنگي پيروي كرده و در نتيجه كنتورهاي تنش اصلي بيشينه حالتي نامنظم پيدا كرده است. در مقابل در مناطق فشاري به دليل غالب بودن اثر وزن سنگ‌پي، كنتورهاي تنش اصلي بيشينه حالتي منظم داشته و از كنتورهاي تنش اصلي كمينه (شكل ۱۳) پیروی می‌کند. بيشينه تنش‌هاي كششي براي هر دو حالت الاستيک و الاستوپلاستيک تحت بارگذاري وزن سد + فشار آب در نشيمنگاه سد رخ مي‌دهد كه محل وقوع آن در شكل (۱۴) مشخص است و توضيحات تكميلي در آن قسمت ارائه مي‌شود.

در حالت كلي با مقايسه كنتورهاي تنش اصلي بيشينه در حالت‌هاي الاستيک و الاستوپلاستيک مي‌توان گفت به جز تفاوت‌هاي اندک موجود در ناحيه كششي، در بقيه قسمت‌ها همخواني مناسبي مشاهده مي‌شود.

مطابق شكل (۱۲)، به دليل لحاظ كردن وزن سنگ‌پي و ناچيز بودن ديگر بارگذاري‌ها نظير وزن بدنه سد در مقابل آن، كمينه تنش‌هاي فشاري در كف مدل به وجود مي‌آيد. در حالت كلي تنش‌هاي اصلي كمينه حالت فشاري داشته و كنتورهاي اين تنش به لحاظ شكل از توپوگرافي سطح پی‌روی كرده و با افزايش عمق مقدار آن زياد مي‌شود. به دليل مدل كردن لايه‌هاي مختلف سنگي با سختي‌هاي متفاوت، اعوجاج‌هايي در اين كنتورها ايجاد شده و حالتي شبيه تمركز تنش ايجاد كرده است. اين پديده همانند قوس‌زدگي در سدهاي خاكي است. همان طوركه ملاحظه مي‌شود در حالت‌هاي استفاده از رفتار الاستيک و الاستوپلاستيک براي سنگ‌پي، كمينه تنش‌هاي اصلي كمينه و كنتورهاي مربوطه از نظر شكل همخواني مناسبي با يكديگر دارند.

لازم به توضيح است به دليل اثر غالب وزن سنگ‌پي نتايج تنش‌هاي اصلي بيشينه و كمينه از نظر شكل كنتور و همچنين مقادير بيشينه و كمينه عددي در هر يک از بارگذاري‌هاي وزن سنگ‌پي، وزن بدنه سد و وزن بدنه سد + فشار آب تفاوت محسوسي با يكديگر ندارند.

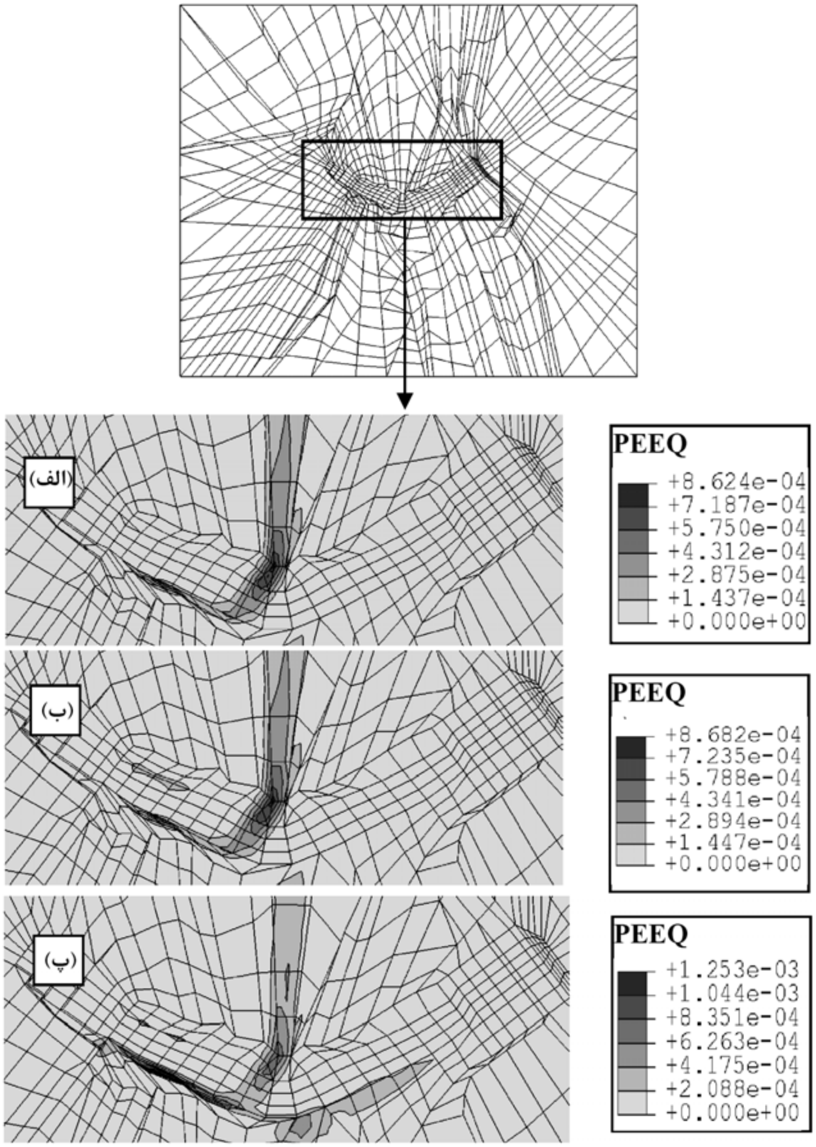
در جدول (۵) مقادير تنش‌هاي اصلي بيشينه و كمينه در پي و تكيه‌گاه‌ها ارائه شده است. اين مقادير تنش‌هاي نقاط انتگرال‌گيري است كه اندكي با تنش‌هاي گرهي كه در كنتورهاي شكل (۱۲) و (۱۳) آورده شده، متفاوت است. مطابق اين جدول تنش‌هاي كششي بيشينه در بارگذاري‌هاي وزن سد و وزن سد+ فشار آب به ترتيب MPa ۴/۲۴ و MPa ۴/۵۳ است كه در هر دو حالت بسيار فراتر از تنش‌هاي كششي قابل تحمل توسط سنگ‌پي (MPa ۰/۵) است [۶]. ولي با استفاده از مدل الاستوپلاستيک تنش‌هاي كششي به MPa ۰/۸۵ محدود مي‌شود كه به تنش‌هاي كششي قابل تحمل توسط سنگ‌پي بسيار نزديک است. اگر تنش كششي حاصل از تحليل با مقاومت كششي تک محوري (رابطه ۲) و مقاومت كششي حداكثر (رابطه ۳) مقايسه شود، مشاهده مي‌شود براي سنگ نوع R12 كه حداكثر تنش كششي در آن رخ مي‌دهد، رابطه $f'_t < \sigma_t < f'_{t(Max)}$ (۰/۷۷<۰/۸۵<۰/۹) برقرار است كه نشان از درستی محاسبات دارد. لازم به توضيح است به دليل استفاده نرم‌افزار از تنش‌هاي نقاط انتگرال‌گيري[۸] در تحليل‌هاي الاستوپلاستيک، در اينجا نيز مبناي مقايسه، تنش در نقاط انتگرال‌گيري است. در مورد تنش‌هاي فشاري همان طوركه شرح داده شد، بيشينه آن بر اثر وزن سنگ‌پي در كف مدل ايجاد مي‌شود، به طور حتم مقدار آن به ابعاد مرزهاي در نظر گرفته شده براي مدل در پي و تكيه‌گاه‌ها وابسته است. در مدل الاستيک مي‌توان براي رفع اين مشكل از تحليل پي بدون جرم[۹] استفاده كرد. اما در مدل الاستوپلاستيک به دليل كاهش غير واقعي تنش‌هاي قائم، نمي‌توان از اين روش استفاده كرد. با مقايسه تنش‌هاي فشاري سنگ‌پي (MPa ۲۳/۳۵) در تحليل الاستوپلاستيک و تنش فشاري تک محوري توده سنگ (MPa ۵/۲۱-) كه از رابطه (۴) به دست آمده است، اختلاف زيادي بين اين دو مقدار مشاهده مي‌شود. اين اختلاف به دليل ايجاد تنش‌هاي سه محوره فشاري در سنگ‌پي و افزايش مقاومت فشاري توده سنگ است.

در شكل (۱۴) مناطق پلاستيک ايجاد شده در سنگ‌پي با توجه به كنتور كرنش پلاستيک معادل[۱۰] مشاهده مي‌شود. ملاحظه می‌شود كه ناحيه پلاستيک بزرگي در اثر اعمال وزن سنگ‌پي و تغييرشكل‌هاي دره ايجاد شده است (شكل ۱۴-الف). همچنين بر اثر اعمال وزن سد، تنها بخش كوچكي از پايين‌دست در اثر تنش كششي به حالت پلاستيک در آمده است (شكل ۱۴-ب). در عين حال شكل (۱۴-پ) نيز نشان مي‌دهد كه در اثر

فشار آب، در محل بالادست نشیمنگاه سد مناطق پلاستیک کششي شکل گرفته است و مطابق توضیحات گذشته بیشینه تنش‌هاي کششي در همین نواحي رخ مي‌دهد. از بررسي دقیق‌تر حالت تنش در این مناطق مي‌توان نتیجه گرفت ناحیه‌هاي پلاستیک ایجاد شده اغلب به صورت کششي است.

جدول ۵: تنش‌هاي اصلي به دست آمده در پي و تکیه‌گاه‌ها.

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


(الف)
PEEQ
+8.624e-04
+7.187e-04
+5.750e-04
+4.312e-04
+2.875e-04
+1.437e-04
+0.000e+00
(ب)
PEEQ
+8.682e-04
+7.235e-04
+5.788e-04
+4.341e-04
+2.894e-04
+1.447e-04
+0.000e+00
(پ)
PEEQ
+1.253e-03
+1.044e-03
+8.351e-04
+6.263e-04
+4.175e-04
+2.088e-04
+0.000e+00

شکل ۱۴: کنتورهاي کرنش پلاستیک معادل در محل تماس پي با بدنه سد تحت بارگذاري‌هاي (الف) وزن سنگ‌پي؛ (ب) وزن سنگ‌پي+ وزن سد؛ (پ) وزن سنگ‌پي+ وزن سد+ فشار آب.

تأثير پارامترهای سنگ‌پي بر نتايج تحليل الاستوپلاستيک

در اين قسمت تأثير پارامترهاي، زاويه اتساع (ψ)، زاويه اصطكاک (φ) و چسبندگي (c) بر تنش‌هاي بدنه سد و سنگ‌پي بررسي مي‌شود. براي بررسي دقيق‌تر، به جز پارامتر مورد نظر همه مشخصات ديگر ثابت نگه داشته شده است. محدوده تغييرات پارامترها نيز به گونه‌اي انتخاب شده است كه با واقعيت هماهنگي داشته باشد. همچنين مانند قسمت قبل، تنش‌هاي نقاط انتگرال‌گيري مبناي مقايسه قرار گرفته است.

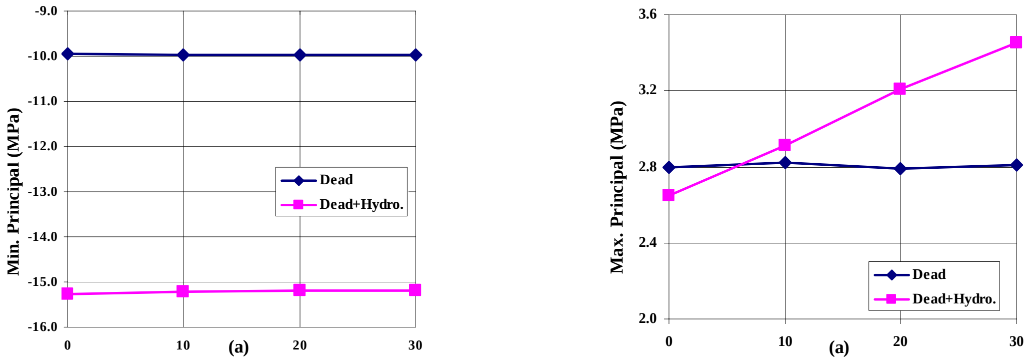
زاويه اتساع (ψ)

زاويه اتساع به صورت $(\psi = \varphi - a)$ مشخص و چهار مقدار براي a در نظر گرفته شده است. نتايج تحليل‌ها در جدول (۶) و شكل‌هاي (۱۵) و (۱۶) نيز به ترتيب منحني تغييرات تنش‌هاي اصلي در بدنه سد و سنگ‌پي را نشان مي‌دهد. ملاحظه مي‌شود تغيير زاويه اتساع تنها در تنش‌هاي كششي تأثير گذاشته است. به استثنای بيشينه تنش كششي در بدنه سد تحت بارگذاري وزن سد كه اين تنش‌هاي كششي تا حدودی ثابت مانده است. در عين حال مشاهده مي‌شود افزايش تنش كششي به نسبت كم است. به طوري كه حداكثر افزايش به مقدار ۳۰% (MPa ۰/۸) تحت بارگذاري وزن سد+ فشار آب در بدنه سد رخ مي‌دهد

.

جدول ۶: تنش‌هاي اصلي بدنه سد و سنگ‌پي با تغيير زاويه اتساع $(\psi = \varphi - a)$.

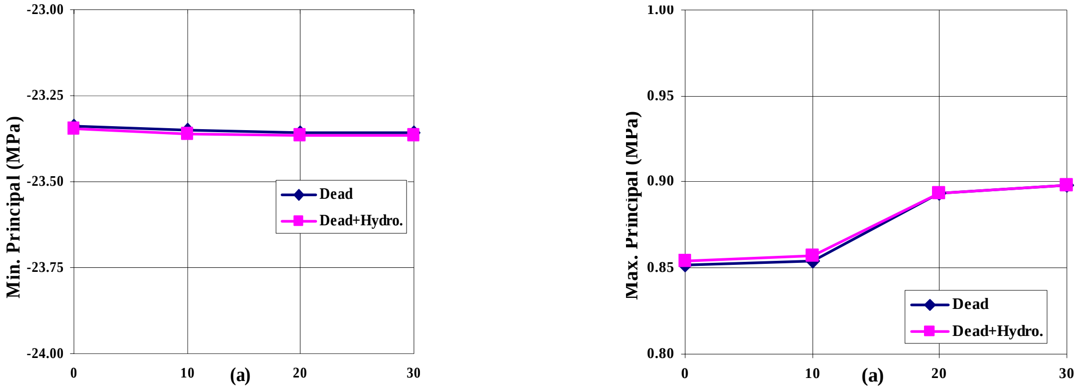
Location	a	Stress Component		Load Combination	
				Dead	Dead+Hydrostatic
Dam Body	0	Major Princ.	Max. (MPa)	2.80	2.65
		Minor Princ.	Min. (MPa)	-9.95	-15.26
	10	Major Princ.	Max. (MPa)	2.82	2.91
		Minor Princ.	Min. (MPa)	-9.97	-15.22
	20	Major Princ.	Max. (MPa)	2.79	3.21
		Minor Princ.	Min. (MPa)	-9.97	-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)

شكل ۱۵: تغييرات تنش‌هاي اصلي در بدنه سد با تغيير زاويه اتساع $(\psi = \varphi - a)$

(الف) تنش كششي، (ب) تنش فشاري.

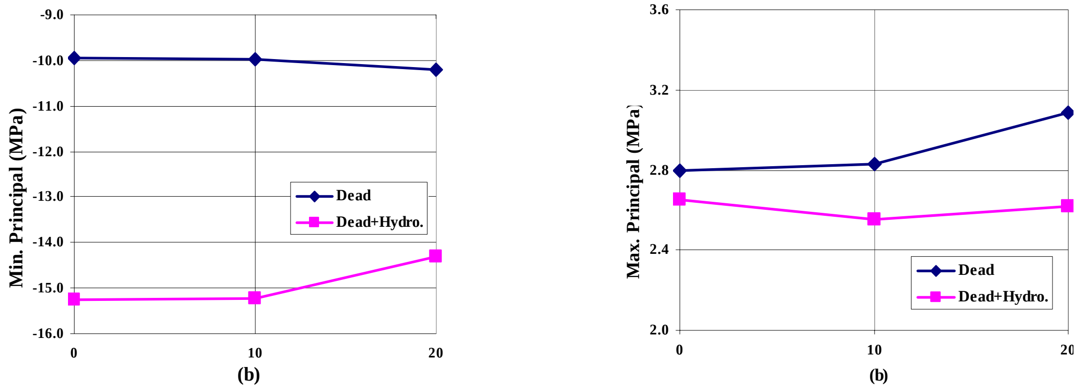


(الف) (ب)

شکل ۱۶: تغييرات تنش‌هاي اصلي در سنگ‌پي با تغيير زاويه اتساع $(\psi = \varphi - a)$
(الف) تنش کششي، (ب) تنش فشاري.

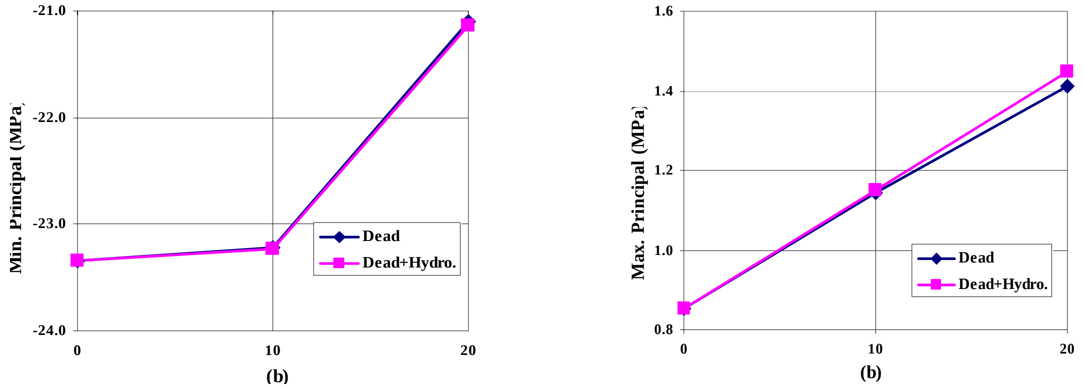
جدول ۷: تنش‌هاي اصلي بدنه و سنگ‌پي با تغيير زاويه اصطکاک $(\varphi = \varphi_0 - b)$.

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



(الف) (ب)

شکل ۱۷: تغييرات تنش‌هاي اصلي در بدنه سد با تغيير زاويه اصطکاک $(\varphi = \varphi_0 - b)$
(الف) تنش کششي، (ب) تنش فشاري.

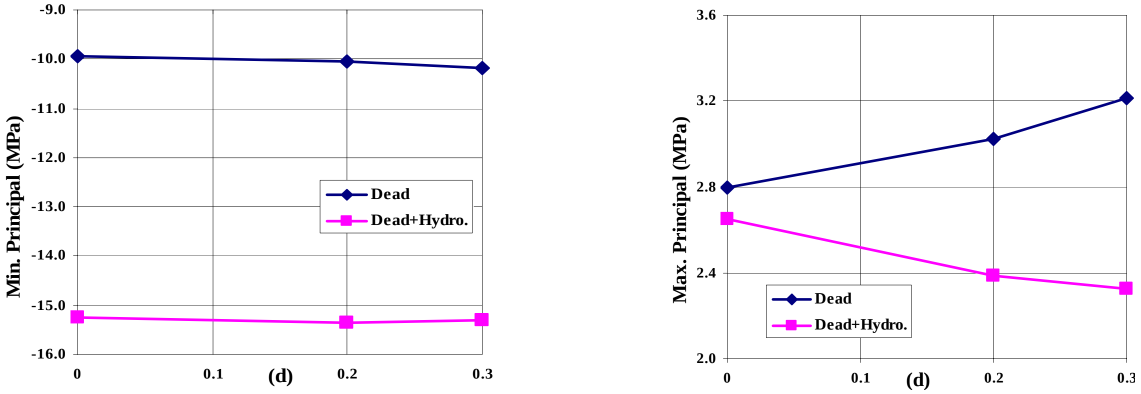


(الف) (ب)

شکل ۱۸: تغییرات تنش‌هاي اصلي در سنگ‌پي با تغيير زاويه اصطکاک $(\varphi = \varphi_0 - b)$
(الف) تنش کششي، (ب) تنش فشاري.

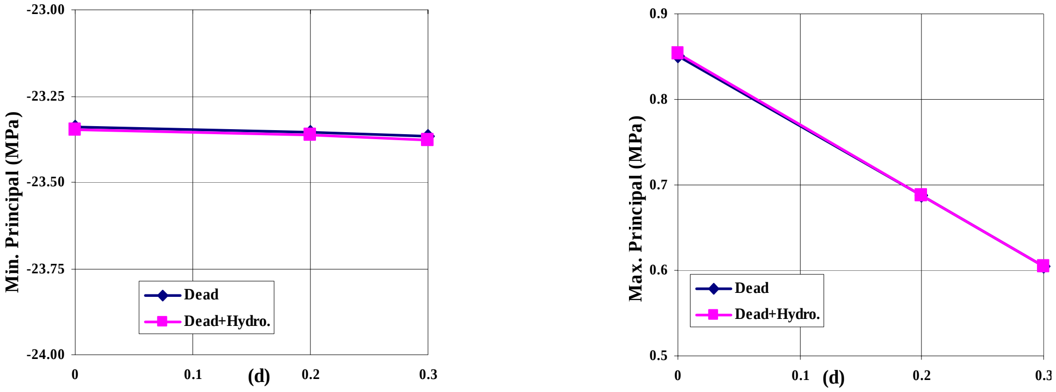
جدول ۸: تنش‌هاي اصلي بدنه و سنگ‌پي با تغيير چسبندگي $(C = C_0 - d)$.

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



(الف) (ب)

شکل ۱۹: تغییرات تنش‌هاي اصلي در بدنه سد با تغيير چسبندگي $(C = C_0 - d)$
(الف) تنش کششي، (ب) تنش فشاري.



(ب) (الف)

شكل ٢٠: تغييرات تنش‌هاي اصلي در سنگ‌پي با تغيير چسبندگي $(C = C_0 - d)$
(الف) تنش كششي، (ب) تنش فشاري.

زاويه اصطكاك (φ)

در اين قسمت براى كاهش حالات مورد بررسي از فرض قانون جريان همبسته $(\varphi=\psi)$ استفاده شده است. تنش‌هاي اصلي بدنه سد و سنگ‌پي در جدول (٧) و در شكل‌هاي (١٧) و (١٨) نيز به ترتيب تغييرات تنش‌هاي اصلي در بدنه و سنگ‌پي نشان داده شده است. البته با توجه به شكل (۴) واضح است كه با كاهش زاويه اصطكاک تنش‌هاي فشاري تک محوري، كاهش و تنش‌هاي كششي تک‌محوري افزايش مي‌يابد. با توجه در تنش‌هاي سنگ‌پي چنين روندي به خوبي مشاهده مى‌شود. نكته مهمي كه در نتايج وجود دارد، اين است كه در حالت $(\varphi=\varphi_0-20)$ به دليل كاهش زياد زاويه اصطكاک، مناطق پلاستيک فشاري در سنگ‌پي ايجاد شده و تنش فشاري به حدود ٢١/۵ MPa محدود شده است. اما در بدنه سد به دليل استفاده از مدل الاستيک افزايش تنش كششي و كاهش تنش فشاري روندي ملايم‌تر داشته است.

چسبندگي (c)

تنش‌هاي اصلي در جدول (٨) و تغييرات تنش‌هاي اصلي در بدنه و سنگ‌پي به ترتيب در شكل‌هاي (١٩) و (٢٠) براي مقادير مختلف چسبندگي نشان داده شده است. مطابق شكل (۴) با كاهش چسبندگي، تنش‌هاي كششي تک محوري كاهش مي‌يابد. در پي و تكيه‌گاه‌ها به دليل استفاده از مدل الاستوپلاستيک اين روند در كشش به خوبي مشاهده مي‌شود. در مناطق فشاري به دليل ايجاد نشدن مناطق پلاستيک فشاري، اين تنش‌ها به طور تقريبي ثابت باقي مي‌ماند.

كمينه تنش‌هاي فشاري در بدنه سد نيز همانند نتايج پي و تكيه‌گاه‌ها با تغيير چسبندگي ثابت است (شكل ١٩-ب). ولي در مورد بيشينه تنش‌هاي كششي به دليل استفاده از مدل الاستيک در بدنه، تغييرات روند مطلوبي ندارد. به طوري كه در بارگذاري وزن بدنه سد + فشار آب مطابق پيش‌بيني با كاهش چسبندگي، بيشينه تنش كششي كاهش مي‌يابد، ولي در بارگذاري وزن بدنه سد بر خلاف پيش‌بيني با كاهش چسبندگي بيشينه تنش كششي افزايش مي‌يابد (شكل ١٩-الف).

مطابق نتايج اين قسمت، تنش‌هاي بيشينه كششي و كمينه فشاري سنگ‌پي در هر دو حالت بارگذاري وزن سد و وزن سد + فشار آب با يكديگر برابر هستند و نيروي هيدرواستاتيک آب تأثيري بر تنش‌هاي سنگ‌پي ندارد. اين برابري در تنش‌هاي بيشينه كششي به دليل استفاده از مدل الاستوپلاستيک است كه تنش‌هاي كششي را به مقدار مشخصي محدود مي‌كند. همچنين به دليل وارد نشدن فشار هيدرواستاتيک آب به ديواره پي و تكيه‌گاه‌ها، تنش‌هاي كمينه فشاري تنها تابع وزن سنگ‌پي بوده و طبيعي است كه در هر دو حالت بارگذاري، مقداري ثابت داشته باشد. اما در بدنه سد به دليل استفاده از مدل الاستيک و همچنين وارد شدن فشار هيدروستاتيک آب به بالادست بدنه سد، اين تنشها در هر دو حالت بارگذاري، مقداري تفاوت دارند.

نتيجه‌گيري

- استفاده از مدل الاستوپلاستیک مور-کولمب در سنگ‌پي سدهاي بتني قوسي، سبب دستيابي به تنش‌هاي واقع بينانه‌تري در محدوده پي و تکيه‌گاه‌ها مي‌شود.

لازم به توضيح است در این روش پي و تکيه‌گاه‌ها به صورت پيوسته در نظر گرفته شده و اثر ناپيوستگي‌هاي توده سنگ به طور ضمني و به شکل محدود شدن تنش کششي قابل تحمل توده سنگ با استفاده از مدل مور-کولمب لحاظ می‌شود

- استفاده از مدل الاستوپلاستیک در مقايسه با حالت الاستیک، براي سنگ‌پي سبب کاهش تنش‌هاي اصلي کششي در بدنه سد می‌شود. این کاهش در بارگذاري وزن سد + فشار آب بيشتر از بارگذاري وزن سد است.

همچنين استفاده از مدل الاستوپلاستیک تأثير ناچيزي در تغييرشکل بدنه سد تحت بارگذاري وزن سد + فشار آب دارد.

- تغيير پارامترهاي الاستوپلاستیک سنگ‌پي (c,φ,ψ) در محدوده آناليز حساسيت، تأثير قابل ملاحظه‌اي بر تنش‌هاي بدنه سد دارد. این تأثير در کشش بسيار بيشتر از فشار است.

تقدير و تشکر

بدين وسيله از زحمات و همکاري بي‌دريغ شرکت توسعه منابع آب و نيروي ايران و همچنين شرکت مهندسين مشاور مهاب قدس در ارائه اطلاعات براي انجام اين تحقيق تقدير و تشکر به عمل مي‌آيد.

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 Geoenviromental 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.

واژه‌هاي انگليسي به ترتيب 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). ($\bar{\varepsilon}^{pl} = \int \frac{1}{c}\boldsymbol{\sigma} : d\varepsilon^{pl}$, where c is the cohesion yield stress.