



بررسی رفتار سدهای خاکی در زمان ساخت، مطالعه موردی: سد طالقان

سید محسن حائری^۱؛ دانیال فقیهی^۲؛

۱- استاد دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف؛

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی ژئو تکنیک، دانشگاه صنعتی شریف؛

d_faghihi@civil.sharif.edu

خلاصه:

در این مقاله رفتار سد خاکی - سنگریز طالقان در زمان ساخت توسط روش اجزا محدود و با در نظرگیری رفتار غیر اشباع مصالح مختلف سد مدلسازی شده است. رفتار مصالح سد به دو صورت الاستیک خطی و الاستوپلاستیک دو سطحی با استفاده از مدل‌های دراکر پراگر اصلاح شده Cap ، در نظر گرفته شده و رفتار کلی سد مورد ارزیابی قرار گرفته است. کرنشهای پلاستیک برشی و حجمی در قسمتهای مختلف سد بدست آمده و مقادیر تغییر مکان، فشار آب حفره ای و تنش بدست آمده از نتایج آنالیز در قسمتهای مختلف سد با نتایج ابزار دقیق موجود در سد مقایسه شده است. همچنین پدیده قوس زدگی در هسته قائم این سد، در حالات مختلف مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: سد سنگریز، سد خاکی، عملیات ساختمانی، مدل الاستو-پلاستیک دو سطحی، قوس زدگی، فشار آب حفره ای

مقدمه:

مقادیر تنشها و تغییر شکلهای بخشهای مختلف یک سد خاکی یا سنگریز در هنگام ساخت، در رفتار سد در طول عمر آن بسیار تاثیر گذار است. از پدیده هائی که در طول ساخت سد امکان وقوع دارد، پدیده قوس زدگی (*Arching*) در هسته رسی اینگونه سدها می باشد. قوس زدگی تاثیر بسزائی در رفتار تغییر شکلی هسته در طول ساخت دارد و همچنین این امر موجب کاهش سطح تنش در هسته می گردد که احتمال شکست هیدرولیکی در پروسه آبیگری اولیه را بالا می برد. در مجموع سه عامل موثر در بروز پدیده قوس زدگی عبارتند از: ۱- اختلاف خصوصیات تراکم پذیری میان هسته با فیلتر، زهکش و مصالح پوسته؛ ۲- توپوگرافی دره؛ ۳- هندسه سد؛ *Bishop (1957)* برای شرایط زهکشی نشده و *Nonveiller and Anagnosti (1961)* برای شرایط کاملاً زهکشی شده در سدهای سنگریز با هسته نازک روشهایی را برای بررسی پدیده قوس زدگی ارائه دادند. پیشرفت در علم اجزا محدود و توسعه مدل‌های رفتاری دقیق برای رابطه بین تنش - کرنش مصالح قابلیت بررسی پدیده قوس زدگی را به صورت دقیق ایجاد کرده است. چنین تحلیلی توسط *Naylor (1997)* بر روی سد *Beliche* انجام شد. چنین مدلی را بر روی هسته یک سد خاکی *Dounias et al (1996)* انجام داده اند. بررسی ها نشان می دهد که هر چه هسته قائم تر باشد و ضخامت آن کمتر باشد، امکان رخ دادن این پدیده در پایان ساخت بیشتر است.

از عوامل موثر دیگر در رفتار سدهای خاکی، میزان فشار آب حفره ای باقیمانده در هسته رسی در اثر عملیات ساختمانی است. عموماً بیشترین فشار آب حفره ای حین ساخت در هسته، زمانی ایجاد می گردد که بیشتر از نصف ارتفاع سد ساخته شده باشد. به دلیل ریزدانه بودن هسته مرکزی و طولانی بودن پروسه تحکیم، عموماً زمان زیادی برای زوال این فشار در هسته نیاز است. مقدار فشار آب حفره ای ایجاد شده در هنگام ساخت به درجه اشباع اولیه، خصوصیات تراکم پذیری مصالح، نفوذپذیری و زمان ساخت و سطح تنش اعمالی بستگی دارد. *Hilf (1948)* روشی را برای تخمین مقدار فشار آب حفره ای برای خاکهای نیمه اشباع از تنوری تحکیم یک بعدی ارائه کرد و آن را با مقادیر اندازه گیری شده در سایت و نیز آزمایش آدومتري در آزمایشگاه مقایسه کرد. شرایط این روش زهکشی نشده، تراکم پذیری به صورت یک بعدی و کرنش جانبی برابر صفر می باشد در این روش زاویه شدن مقادیر هوای محبوس در خاک که با اشباع شدن خاک همراه است باعث افزایش فشار آب حفره ای می گردد. *Rahardjo and Fredlund (1993)* عنوان کردند که هر چند روش *Hilf* تخمینی منطقی از فشار آب حفره ای بدست می دهد اما مقادیر آن تا حدودی دست بالاست زیرا فرض می کند که ماتریس مکش برابر صفر است یعنی مقدار فشار آب حفره ای برابر فشار هوای حفرات است. *Khalili (1996)* عنوان کرد که برای خاکهای نیمه اشباع با نفوذپذیری کم که در آنها شرایط زهکشی نشده برقرار است، نرخ افزایش فشار آب حفره ای در یک فشار محدود کننده همیشه کمتر از نرخ افزایش تنش قائم است زیرا تحت تنش وارده تغییر حجم کوچکی در هوای حفرات بوجود می آید.

Ng and Small (1999) جهت بررسی پدیده شکست هیدرولیکی در سد *Hyetjuvet* با در نظر گرفتن فشار هوا ($Pa=0$) از منحنی درجه اشباع (S_r) - فشار آب حفره ای (u_w) جهت در نظرگیری خصوصیات غیر اشباع خاک در آنالیز عملیات ساختمانی و آبیگری اولیه سد بهره بردند. *Gens et al (1997)*

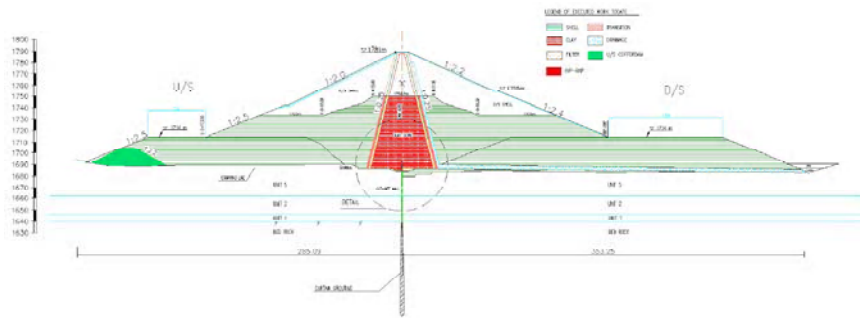


با در نظر گیری فشار هوا و سطح حالت ویژه برای پوسته ، رفتار فشار آب حفره ای هسته سد *El Limonero* را در پروسه ساخت و آنگیری مورد بررسی قرار داد. اکبری (۱۳۸۴) و قمصری (۱۳۸۴) در آنالیز زمان ساخت سد گتوند با استفاده از نرم افزار FLAC، از روش سیال تراکم پذیر (*Biot (1955)*) برای در نظر گیری میزان فشار آب حفره ای ایجاد شده در زمان ساخت سد استفاده نمودند. در این روش فاز آب و هوا به صورت ترکیب با یکدیگر به عنوان یک سیال تراکم پذیر در نظر گرفته می شود که مدول بالک آن کمتر از مدول بالک آب فرض می گردد (بین $1E7 (Pa)$ تا $5E7 (Pa)$). در مجموع در نظر گیری فرضیات مناسب در خصوص رفتار غیر اشباع می تواند مقادیر دقیق تری از فشار آب حفره ای ایجاد شده و زوال یافته در هسته در اختیار قرار دهد. همچنین مدل رفتاری مصالح هسته می تواند تاثیر بسزائی در میزان فشار ایجاد شده در هسته داشته باشد.

در این مقاله رفتار سد خاکی - سنگریز طالقان در زمان ساخت توسط روش اجزا محدود و با در نظر گیری رفتار غیر اشباع مختلف سد مدلسازی شده است. رفتار مصالح سد به دو صورت الاستیک خطی و الاستوپلاستیک دو سطحی با استفاده از مدل‌های دراکر پراگر اصلاح شده *Cap*، در نظر گرفته شده و رفتار کلی سد مورد ارزیابی قرار گرفته است. کرنشهای پلاستیک برشی و حجمی در قسمت‌های مختلف سد بدست آمده و مقادیر تغییر مکان، فشار آب حفره ای و تنش بدست آمده از نتایج آنالیز در قسمت‌های مختلف سد با نتایج ابزار دقیق موجود در سد مقایسه شده است. با مقایسه نتایج آنالیز بدست آمده از دو مدل رفتاری، می توان تاثیر مدل رفتاری مناسب در تعیین میزان مناسب تنش، فشار آب حفره ای و تغییر مکان را مشاهده نمود. با توجه به اهمیت قوس زدگی در کاهش سطح تنش هسته و افزایش امکان وقوع شکست هیدرولیکی در پروسه آنگیری مخزن، می توان عدم کارائی مدل الاستیک و همچنین مدل‌های الاستو-پلاستیک تک سطحی را در تعیین مقادیر صحیح بررسی نمود.

سد طالقان:

سد طالقان، سدی با هسته رسی قائم با ارتفاع ۱۰۳ متر و طول تاج ۱۰۰۰ متر می باشد. عرض تاج این سد ۶ متر و حداکثر عرض آن در تراز کف خاکریز (تراز ۱۶۹۰ متری از سطح دریا)، ۶۳۸ متر می باشد. شیب هسته در هر دو طرف ۱/۲۵ : ۱ و عرض آن حداکثر ۵۵ متر در تراز کف خاکریز و حداقل ۴ متر در ارتفاع ۱۰۰ متری از کف خاکریز می باشد. در طرفین هسته لایه های فیلتر و ناحیه انتقالی (*Transition*) هر یک به ضخامت ۲ متر قرار گرفته است. جهت کنترل تراوش از طریق پی، از دیوار آب بند (*Cutoff wall*) به ضخامت ۱/۲ متر و پرده تزریق (*Grout Curtain*) استفاده شده است. جهت جلوگیری از تمرکز تنش، دیوار آب بند تا ارتفاع ۱۲ متر در هسته سد وارد شده است و در روی آن کلاهکی از جنس رس با پلاستیسیتیه زیاد (*High Plastic Clay*) به ضخامت ۴ متر و عرض ۵ متر قرار گرفته است. مقطع عمومی سد و همچنین مصالح مختلف سد در شکل ۱ قابل مشاهده می باشد.



شکل ۱- مقطع عمومی و مصالح مختلف سد.

آنالیز اجزا محدود:

در سال‌های اخیر آنالیز اجزا محدود بطور گسترده جهت آنالیز سد های خاکی و سنگریز مورد استفاده قرار گرفته است. در این مقاله، آنالیز اجزا محدود به صورت دو بعدی با در نظر گیری رفتار غیر اشباع خاک و به صورت همبسته توسط *ABAQUS* انجام گرفته است.

در مساله مدلسازی ساخت و آنگیری سد، دو پدیده عمده وجود دارد که بطور همزمان رخ می دهند. این دو پدیده شامل حرکت سیال حفره ای و تغییر شکل محیط می باشند که بر هم تاثیر متقابل دارند. معادلات حاکم بر این دو پدیده به (۱) معادله تعادل و (۲) معادله پیوستگی جریان سیال حفره ای معروف می باشند. در این آنالیز از حل مستقیم این سیستم بصورت همبسته استفاده شده است.

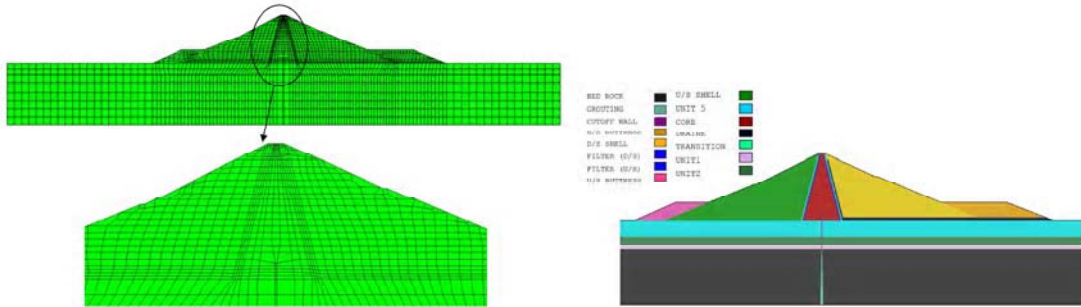
نرم افزار خواص غیر اشباع خاک را با استفاده از منحنی *sorption* در نظر می گیرد. این منحنی تعیین کننده میزان جذب (*absorption*) و دفع آب (*exsorption*) در محیط غیر اشباع می باشد که در اصل منحنی مشخصه آب - خاک (*SWCC*) در فضای درجه اشباع (S_r) - مکش ($-u_w$) می باشد. با توجه به اینکه نرم افزار فشار هوا را در نظر نمی گیرد ($Pa=0$)، فشار آب حفره ای منفی در این منحنی بیانگر مکش (*suction*) می باشد. با تعریف حدی برای فشار آب منفی که در آن $S_r = 1$ باشد می توان جذب سطحی را وارد مساله نمود.

آنالیز اجزا محدود سد طالقان:

در این تحقیق آنالیز همبسته اجزا محدود جهت مدلسازی رفتار سد در زمان ساخت انجام گرفته است. شکل ۲ بیانگر مقطع ایده آل سازی شده جهت آنالیز مطابق با شکل ۱ می باشد. مصالح مختلف در نظر گرفته شده در مدل، در این شکل نشان داده شده است. شکل ۳ نشان دهنده مش اجزا محدود



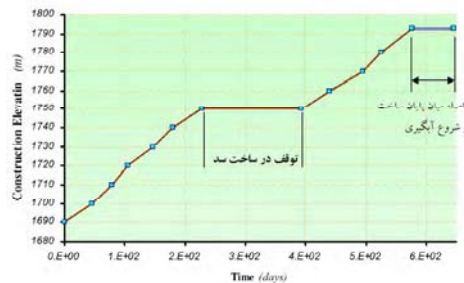
مدل می باشد. در مش بندی این مدل از المانهای خطی (bilinear displacemen and pore pressure) موسوم به CPE4P در نرم افزار استفاده گردیده که المانهای چهار ضلعی و چهار گره ای می باشند و هر گره علاوه بر درجات آزادی مربوط به تغییر شکل دارای یک درجه آزادی مربوط به فشار آب حفره ای می باشد. در مجموع مش بندی مدل شامل ۲۲۴۸ المان و ۲۳۸۰ گره می باشد.



شکل ۳- مش بندی مدل سد.

شکل ۲- مدل ایده آل و مصالح مختلف سد طالقان.

آنالیز زمان ساخت در ۱۰ لایه ۱۰ متری (لایه آخر ۱۳ متر) انجام گرفته است. هر لایه به صورت دسته ای از المانها در نظر گرفته شده و برای اضافه نمودن هر لایه (دسته المان) از آنالیز تحکیمی استفاده گردیده است. زمان آنالیز در هر مرحله تحکیمی بر اساس زمان واقعی ساخت سد طالقان با توجه به ابزار دقیق موجود در تراز ۱۹۶۰ و در مقطع ماکزیمم در نظر گرفته شده است. نمودار افزایش ارتفاع سد بر اساس زمان در شکل ۴ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می گردد پس از ساخت سد تا ارتفاع ۶۰ متری (تراز ۱۷۵۰) توقفی در حدود ۶ ماه در ساخت سد رخ می دهد.



شکل ۴- نمودار افزایش ارتفاع سد نسبت به زمان؛ تاریخ شروع ساخت 2004/4/14

همچنین بر اساس قرائت ابزار موجود در سد و ابزار اندازه گیری سطح آب در مخزن، پس از گذشت حدود دو ماه از اتمام ساخت سد آگیری سد آغاز گردیده است که در شکل ۴ این مقدار نشان داده شده است. این زمان با زمان ساخت لایه آخر سد جمع گردیده و به عنوان زمان قرار گیری لایه آخر به نرم افزار داده شده است.

مشخصات مصالح:

در بررسی رفتار سد طالقان ابتدا رفتار مصالح به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته شده است و سپس در آنالیزی دیگر جهت مدلسازی رفتار مصالح هسته و Unit 2 که دارای مصالح ریزدانه هستند از مدل الاستو پلاستیک چند سطحی Modified Drucker-Prager/Cap و برای بقیه مصالح که درشت دانه هستند از مدل Modified Drucker-Prager بهره گیری شده است. پارامترهای مدل پلاستیک در جدول ۱ نشان داده شده است. پارامترهای d و β برای مصالح سد با استفاده از پارامترهای مقاومت برشی (C, ϕ) قابل محاسبه می باشند. مقدار K که برای اصلاح مدل دراگر-پراگر و نزدیکتر کردن آن به رفتار واقعی خاک است، برای تمام مصالح 0.8 در نظر گرفته شده است. پارامترهای تعیین کننده شکل Cap (R, α) با توجه به مقادیر در نظر گرفته شده در مثالهای حل شده نرم افزار و مشخصات هر یک از مصالح و قضاوت مهندسی لحاظ شده است. برای بدست آوردن رفتار سخت شوندگی مصالح برای مدل Cap می بایست از رابطه (۱) بهره گیری شود که با داشتن پارامترهای تحکیمی (λ, K) و نسبت تخلخل اولیه مصالح (e_0) می توان نمودار $p_B = p_B^pl = p_B^pl(\epsilon_{vol}^pl)$ را محاسبه نمود. در این رابطه بیانگر مقدار تنش فشاری مطابق با نسبت تخلخل اولیه مصالح در نمودار تحکیمی $e - \ln p$ می باشد (Helwany 2007).

$$\epsilon_{vol}^pl = \frac{\lambda - K}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{p_0} \quad (1)$$

در مورد مصالح سد طالقان، مقادیر C_c و C_s مصالح هسته و Unit 2 از مصالح پی، از گزارشات مکانیک خاک بدست آمده است (جدول ۱). همچنین مقادیر p_0 در هسته و Unit 2 به ترتیب $p_0 = 2 \times 10^5 (Pa)$ و $p_0 = 1 \times 10^5 (Pa)$ فرض شده است. رفتار سخت شوندگی مصالح دانه ای سد، نیز که از مدل Modified Drucker-Prager جهت شبیه سازی رفتار آنها استفاده شده، از نوع برش خالص انتخاب شده است و میزان تنش تسلیم (σ_c) با استفاده از رابطه (۲) به برنامه داده شده است.



$$\sigma_c^0 = \frac{1}{1 - \frac{1}{3} \tan \beta} d \quad (۲)$$

همانگونه که در جدول ۱ مشاهده می‌گردد، زاویه اتساع (ψ) برای مصالح دانه ای بی ($Unit1, Unit5$) که بسیار متراکم هستند به میزان $\beta/2 +$ و برای مصالح پیوسته که نسبتاً متراکم بوده و در برش اتساع کمتری نسبت به مصالح پی از خود نشان می‌دهند به میزان $\beta/3 +$ انتخاب گردیده است. با توجه به این امر که مصالح فیلتر و زهکش و $Transition$ خیلی متراکم نیستند و امکان دارد این مصالح تحت برش از خود کاهش حجم نشان دهند، زاویه اتساع این مصالح $\beta/3 -$ انتخاب گردیده است.

جدول ۱- پارامترهای مدل پلاستیک مصالح سد طالقان.

Item	c (kPa)	φ^*	2D			σ_c^0	R	Initial Cap position	α	K
			d (kPa)	β	ψ^*					
Unit 1	0	38	0	45.15	22.57	0	-	-	-	0.8
Unit 2	130	9.6	220.62	10.35	-	-	1.2	0.003	0.05	0.6
Unit 5	0	38	0	45.15	22.57	0	-	-	-	0.8
U/S Shell	0	36	0	43.96	14.65	0	-	-	-	0.8
D/S Shell	0	37	0	44.57	14.86	0	-	-	-	0.8
Core	50	24	77.03	34.45	-	-	1	0.055	0.05	0.8
Transition / Drainage	0	33	0	41.99	-14.00	0	-	-	-	0.8
Filter	0	33	0	41.99	-14.00	0	-	-	-	0.8

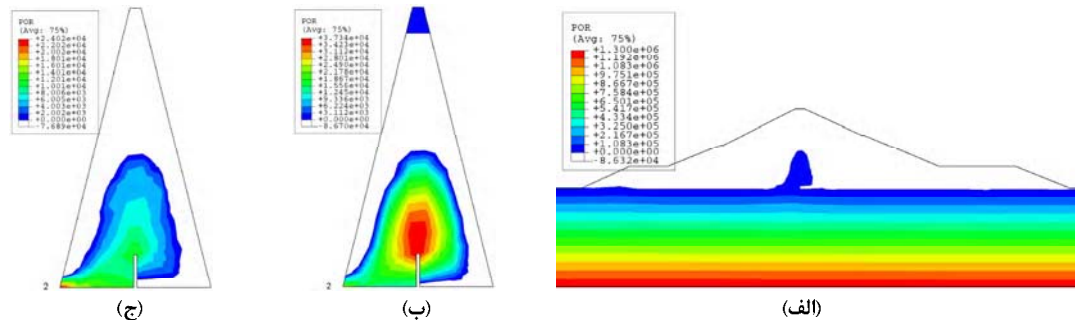
جدول ۲- پارامترهای تحکیمی مصالح هسته و Unit2.

Items	C_c	C_s	λ	κ
Unit 2	0.235	0.040	0.102	0.017
core	0.199	0.028	0.086	0.012

نتایج آنالیز و مقایسه با ابزار دقیق :

نتایج آنالیز در حالت الاستیک:

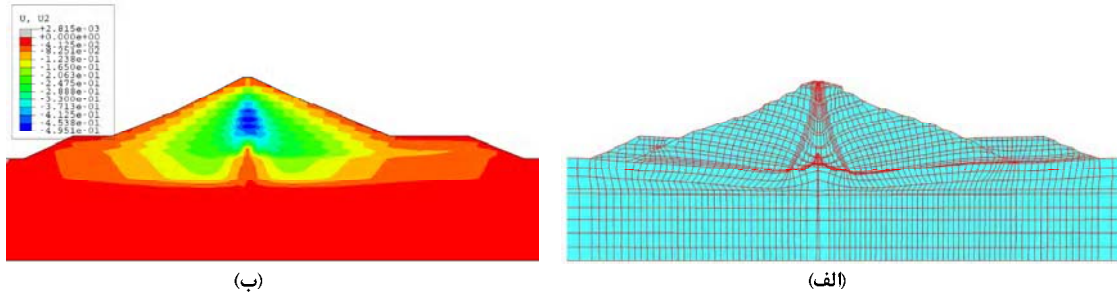
شکل ۶ نشان دهنده فشار آب حفره ای قسمتهای مختلف سد می‌باشد. در شکل ۶ (الف) مشاهده می‌گردد که فشار آب حفره ای تنها در قسمت هسته باقی مانده است و قسمتهای دیگر خاکریز دارای فشارهای حفره ای منفی می‌باشد. شکل ۶ (ب) و (ج) به ترتیب فشارهای حفره ای در هسته سد در ابتدا قرارگیری لایه آخر و در ابتدای آبیگری (پایان ساخت + فاصله زمانی ساخت تا آبیگری) نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که زوال آب حفره ای موجود در سد از طرفین و از طریق پی سد انجام گرفته به طوری که حداکثر فشار آب در وسط هسته واقع شده است که این امر با شرایط واقعی مطابقت دارد.



شکل ۶- کانتور فشار آب حفره ای (الف) سد در ابتدای آبیگری ($t \approx 646 \text{ day}$). (ب) هسته در ابتدای قرارگیری لایه آخر ($t \approx 528 \text{ day}$)؛ (ج) هسته در ابتدای آبیگری ($t \approx 646 \text{ day}$).

همچنین مشاهده می‌شود که فاصله نسبتاً زیاد میان قرارگیری لایه آخر و شروع آبیگری موجب زوال مقدار قابل توجهی از فشار آب باقی مانده در هسته می‌گردد. شکل ۷ (الف) و (ب) به ترتیب مش تغییر شکل یافته سد در مقیاس ۱۰۰ برابر و کانتورهای تغییر مکان قائم در سد را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷ (الف) می‌توان مشاهده نمود که المانهای هسته به دلیل تغییر شکل پذیری زیاد مصالح آن دارای نشست بیشتری نسبت به قسمتهای دیگر سد شده است.

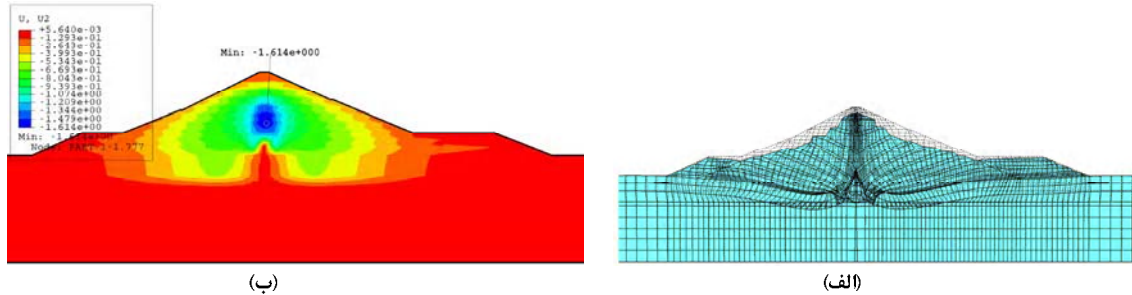
همچنین مدول الاستیسیته بزرگ مصالح دیوار آب بند ($cut \text{ off wall}$) موجب می‌گردد که تغییر مکان بسیار کمی در محل اتصال هسته به پی بوجود آید. این مسئله در شکل ۷ (ب) نیز قابل مشاهده می‌باشد. کانتورهای نشان داده شده در این شکل بیانگر این مطلب می‌باشند که حداکثر تغییر مکان در وسط هسته رخ داده است که نشانگر صحت مدلسازی توالی ساخت در نرم افزار است. شکستگی های قابل مشاهده در شکل ۷ (ب) به جهت مدلسازی زمان ساخت سد در ۱۰ لایه و وارد آمدن ناگهانی بار وزن به هر لایه است.



شکل ۷- (الف) مش تغییر شکل یافته سد در پایان ساخت (scale: 100)، (ب) کانتور تغییر شکل قائم سد در پایان ساخت.

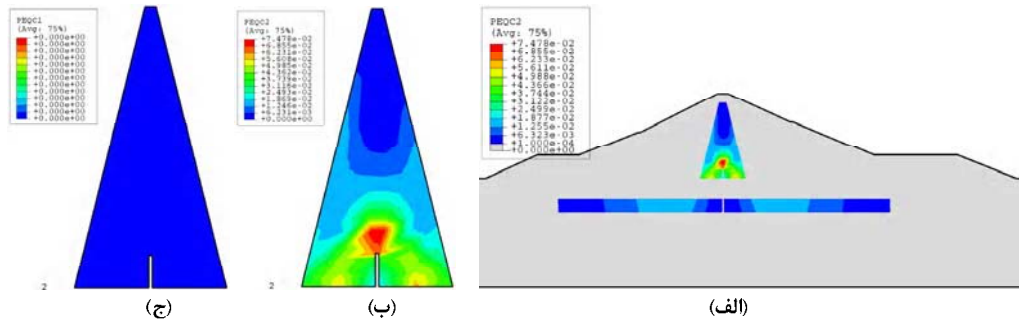
نتایج آنالیز در حالت پلاستیک:

شکل ۸ (الف) و (ب) به ترتیب بیانگر مش بندی سد در دو حالت تغییر شکل نیافته و تغییر شکل یافته در مقیاس ۵۰ برابر و کانتورهای تغییر مکان قائم در سد می باشد. با مقایسه با شکل ۷ نشست زیاد هسته و *Unit 2* بدلیل کرنشهای پلاستیک فشاری در این شکل کاملاً مشهود است.



شکل ۸- (الف) مش تغییر شکل یافته سد در پایان ساخت (scale: 50)، (ب) تغییر مکان قائم سد در پایان ساخت.

شکل ۹ (الف) کرنشهای پلاستیک مربوط به سطح تسلیم *Cap* را در مصالح هسته و بی نشان می دهد. مشاهده می گردد که مصالح *Unit 2* از خود کرنش پلاستیک فشاری نشان می دهد که حداکثر آن ۱.۷٪ و در سطح بالایی لایه مذکور و به فاصله ۶۰ متری از محور سد اتفاق می افتد. شکل ۹ (ب) و (ج) نیز کرنشهای پلاستیک هسته را به ترتیب بر روی سطح *Modified Drucker-Prager* و بر روی سطح *Cap* بصورت مجزا نشان میدهد.



شکل ۹- کرنشهای پلاستیک مربوط به سطح تسلیم *Cap* در پایان ساخت.

همانگونه که در این شکل مشاهده می گردد کرنشهای پلاستیک خرابی برشی (بر روی سطح *Modified Drucker-Prager*) در طول ساخت در هسته سد اتفاق نمی افتد. در نتیجه می توان پیش بینی نمود که در صورت در نظر گرفتن مدلهای الاستو پلاستیک تک سطحی (نظیر *Mohr-Coloumb*) مقادیر نشست و تنش در هسته مشابه نتایج بدست آمده از مدل الاستیک خواهد بود و تغییر مکان بیشتر هسته نشان داد شده در شکل ۸ به خاطر کرنشهای پلاستیک فشاری ناشی از استفاده از مدل دو سطحی خواهد بود.

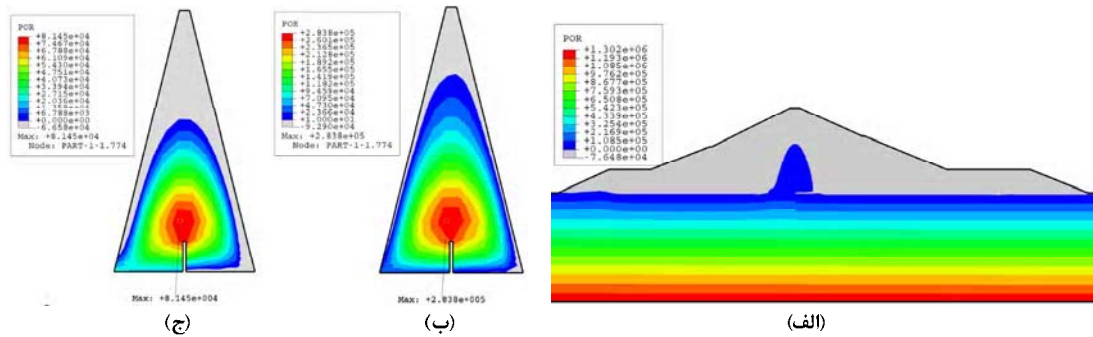
شکل ۱۰ فشار آب حفره ای سد را نشان می دهد. در مجموع به نظر میرسد که به دلیل تغییر شکلهای بیشتر هسته نسبت به حالت الاستیک فشار آب حفره ای بیشتری در هسته سد به وجود می آید. مقادیر حداکثر فشار آب حفره ای در هسته سد در ابتدای قرار گیری لایه آخر و در ابتدای آبیگری به ترتیب ۲۸۴ (kPa) و ۸۱.۴ (kPa) می باشد که نشانگر زوال مقدار قابل توجهی از فشار آب حفره ای در حدفاصل ساخت و آبیگری می باشد.

مقایسه نتایج آنالیز با نتایج حاصل از اندازه گیریهای ابزار دقیق:

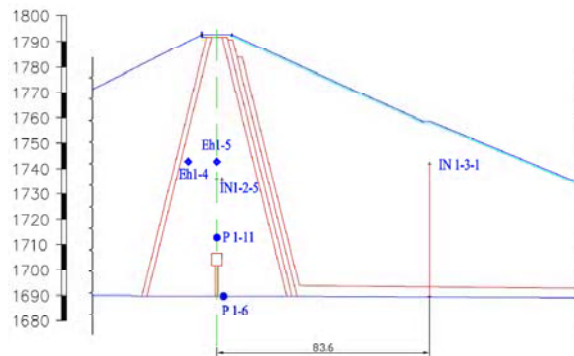
در این قسمت نتایج آنالیز دو بعدی سد طالقان با نتایج بدست آمده از ابزار دقیق موجود در سد مقایسه شده است. با توجه به این که مدل دو بعدی سد براساس مقطع حداکثر مدلسازی شده است، از ابزار دقیق موجود در همین مقطع جهت بررسی صحت نتایج استفاده شده است. در این بخش خروجی



های فشار حفره ای در هسته، نشست در پوسته و هسته و تنش قائم در هسته با نتایج ابزار مقایسه شده است. البته می بایست توجه داشت که نتایج آنالیز در نزدیکترین نقاط ممکن مدل به محل نصب ابزار در نظر گرفته شده است. شکل ۱۱ نحوه قرارگیری نشست سنجها، تنش سنجها (*earth pressure cell*) و وسایل اندازه گیری فشار آب حفره ای (*pizometer*) که مورد مقایسه قرار گرفته اند را نشان می دهد.

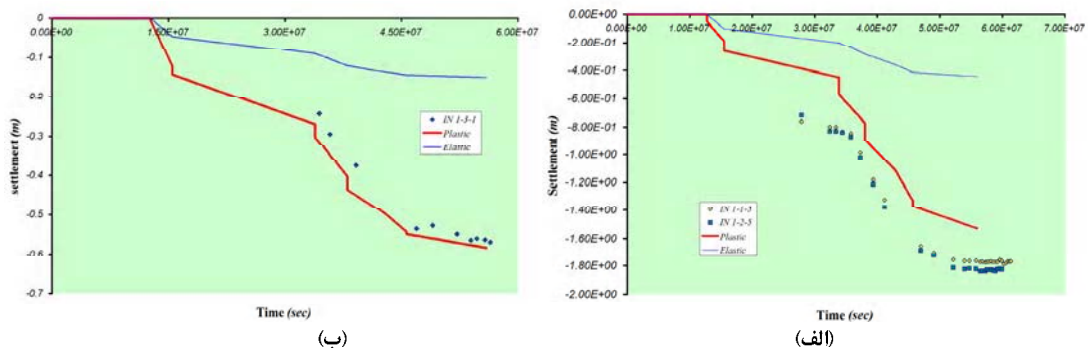


شکل ۱۰- کانتور فشار آب حفره ای (الف) سد در ابتدای آبیگری ($t \approx 646 \text{ day}$). (ب) هسته در ابتدای قرارگیری لایه آخر ($t \approx 528 \text{ day}$)؛ (ج) هسته در ابتدای آبیگری ($t \approx 646 \text{ day}$).



شکل ۱۱- نحوه قرار گیری ابزار دقیق مورد مقایسه با آنالیز در سد طالقان.

شکل ۱۲ (الف) نشانگر اندازه گیریهای نشست توسط نشست سنج *IN 1-1-5* واقع در هسته و در تراز ۱۷۳۶ و بر روی محور سد و نشست سنج *IN 1-2-5* به فاصله ۲ متری از محور سد و در همان تراز می باشد. از این شکل می توان دریافت که نشست محاسبه شده با مدل *Cap* به نتایج حاصل از ابزار دقیق نزدیک است اما مدل الاستیک و مدل های الاستو پلاستیک تک سطحی نمی توانند مقادیر صحیحی از میزان نشست ها در هسته بدست دهند. شکل ۱۲ (ب) بیانگر نشست اندازه گیری شده توسط نشست سنج *IN 1-3-1* واقع در نقطه ای از هسته در تراز ۱۷۴۲ و به فاصله ۸۳/۶ متری از محور سد در پوسته می باشد. با توجه به این شکل مشاهده می گردد که نتایج مدل پلاستیک تطابق مناسبی با نتایج ابزار دقیق نشان می دهد اما مدل الاستیک بیانگر مقادیر کمتری است. این امر را می توان به نشست زیاد هسته در مدل پلاستیک نسبت داد زیرا کرنشهای پلاستیک ایجاد شده در مدل پلاستیک ناشی از *Modified Drucker-Prager* به حدی نیست که این میزان اختلاف را در دو مدل ایجاد نماید.

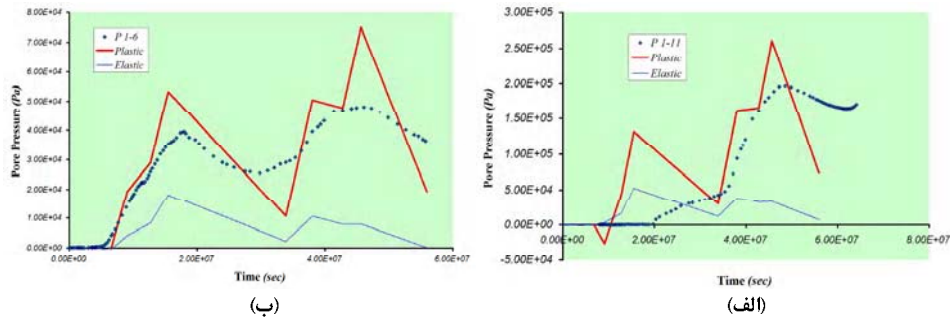


شکل ۱۲- مقایسه نتایج آنالیز با نشست سنجهای (الف) *IN 1-1-5* و *IN 1-2-5* در هسته؛ (ب) *IN 1-3-1* در پوسته.

شکل ۱۳ نشانگر نتایج حاصل از اندازه گیری فشار آب حفره ای در پیژومتر *PI-6* واقع در تراز ۱۶۹۰ و به فاصله ۲/۶ متری از محور سد و پیژومتر *PI-11* واقع در تراز ۱۷۱۳ و بر روی محور سد می باشد. در هر دو این شکلها مشاهده می گردد که آنالیز الاستیک مقادیر فشار حفره ای کمتری نسبت به آنالیز پلاستیک نشان می دهد. این موضوع را می توان به تغییر شکل های کمتر مدل الاستیک و ایجاد شدن فشار آب حفره ای کمتر در پروسه کاهش

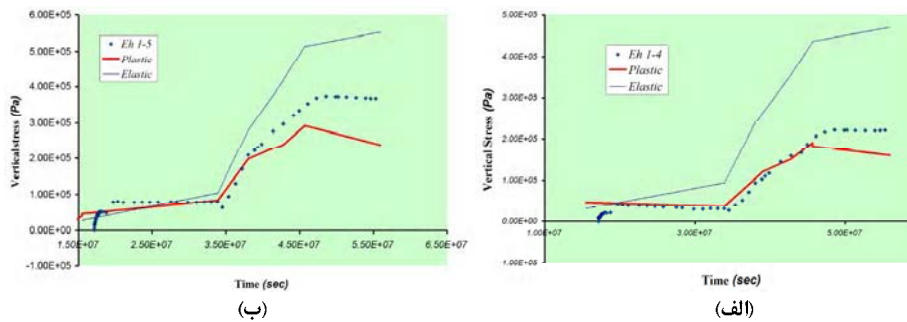


حجم نسبت داد، همچنین در هر نمودار مقادیر فشار آب حفره ای حاصل از آنالیز دارای مقدار حداکثری قبل از توقف ساخت می باشد در صورتیکه مقادیر اندازه گیری شده در شکل ۱۳ چنین چیزی را نشان نمی دهد و افزایش فشار آب حفره ای ناشی از پروسه تحکیم هسته سد عمدتاً پس از اتمام زمان توقف و پس از شروع ساخت لایه ۶۰ متری ایجاد شده است. در پیرومتر $P\ 1-11$ بجز در قسمت ابتدائی و در پیرومتر $P\ 1-6$ مجموعاً تطابق نسبتاً خوبی بین نتایج حاصل از آنالیز با در نظر گرفتن خاک غیر اشباع و مدل رفتاری الاستو-پلاستیک دو سطحی با مقادیر اندازه گیری شده بدست می دهد.

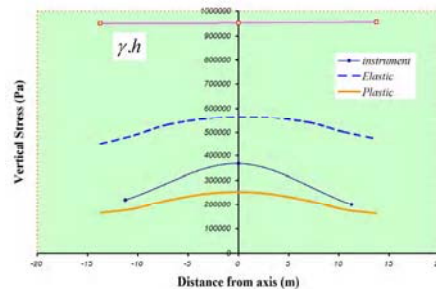


شکل ۱۳ - مقایسه نتایج آنالیز با پیرومترهای (الف) $P\ 1-11$; (ب) $P\ 1-6$ در هسته.

شکل ۱۴ میزان فشار خاک و تنشهای قائم در تراز ۱۷۴۳ را در دو فشار سنخ واقع در محور سد ($Eh\ 1-5$) و واقع در فاصله ۱۱/۲۵ متری از محور سد ($Eh\ 1-5$) را نشان می دهد. همانطور که از این شکل مشاهده می شود مدل رفتاری الاستیک تنشهای بیشتری را نسبت به مقادیر ابزار دقیق و مدل الاستو-پلاستیک نشان می دهد. در مجموع مشاهده می گردد که نتایج حاصل از مدل الاستو-پلاستیک دو سطحی تطابق بسیار خوبی با نتایج ابزار دقیق دارد. افت میزان تنش کل حاصل از آنالیز در پایان ساخت به دلیل افت بیش از حد فشار آب حفره ای در زمان توقف ساخت در این منطقه می باشد که موجب کاهش تنش کل می گردد. شکل ۱۵ نشان دهنده مقادیر تنشهای قائم مقطعی از هسته در ارتفاع ۵۵ متری (تراز ۱۷۴۵) از سطح پی می باشد. این مقادیر از آنالیزهای الاستیک و الاستو-پلاستیک به دست آمده است. همچنین نتایج فشارسنج نصب شده در ارتفاع ۵۳ متری (تراز ۱۷۴۳) در هسته سد و مقطع حداکثر آن در این نمودار نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می شود که تنشهای بدست آمده از آنالیز بسیار کمتر از مقادیر γh در مقطع مذکور می باشد که این بیانگر انتقال نیرو از مصالح هسته به پوسته می باشد. همچنین مدل الاستیک بدلیل در نظر گیری سختی بالا برای هسته، انرژی بیشتری در خود ذخیره نموده است و تنشهای بیشتری را نشان می دهد.



شکل ۱۴ - مقایسه نتایج آنالیز با ابزار های اندازه گیری تنش (الف) $Eh\ 1-4$; (ب) $Eh\ 1-5$ در هسته.



شکل ۱۵ - مقایسه نتایج آنالیز با ابزار های اندازه گیری تنش در تراز ۱۷۴۳ در هسته.



نتیجه گیری:

در این تحقیق رفتار سد خاکی-سنگریز طالقان با استفاده از روش اجزا محدود مورد بررسی قرار گرفت. آنالیز همبسته اجزا محدود توالی ساخت سد را با دو مدل رفتاری الاستیک و الاستو-پلاستیک دو سطحی مدلسازی نموده است. نتایج هر دو آنالیز بیانگر انتقال نیرو از هسته سد به پوسته آن در اثر اختلاف نشست بین دو مصالح می باشد. همچنین نحوه ایجاد و زائل شدن فشار آب حفره ای در هسته سد توسط مصالح پی و فیلتر در پروسه ساخت مدلسازی شده و اثر زمان در زوال فشار آب حفره ای در نظر گرفته شده است. مجزا سازی کرنشهای پلاستیک در مدل چند سطحی مورد استفاده در هسته نشان می دهد که تغییر شکل‌های پلاستیک ایجاد شده در این قسمت عمداً از نوع پلاستیک بدون خرابی و رسیدن سطح تنش به Cap بوده است و در طول پروسه ساخت، هسته از خود کرنشهای پلاستیک منجر به خرابی نشان نمی دهد و در واقع سطح تنش به سطح گسیختگی دراکر پراگر اصلاح شده نمی رسد.

با مقایسه نتایج ابزار دقیق موجود در سد با نتایج آنالیزهای انجام شده می توان به ناکارآمدی مدل الاستیک خطی (و مدل‌های الاستو-پلاستیک تک سطحی) در تعیین میزان تغییر شکل و تنش در سدهای خاکی و سنگریز بخصوص برای مصالح هسته پی برد. همچنین با توجه به مقایسه های انجام گرفته می توان دریافت که نتایج بدست آمده از مدل *Modified Drucker-Prager/Cap* در مجموع تطابق مناسبی با رفتار واقعی هسته سد نشان داده است.

قدردانی

این پروژه در دانشگاه صنعتی شریف و با حمایت مالی شرکت سهامی توسعه منابع آب ایران وابسته به وزارت نیرو صورت پذیرفته است که بدینوسیله مراتب تشکر و قدردانی مولفین اعلام می شود. همچنین از جناب آقای مهندس فرهادی از شرکت مشاور لار برای در اختیار گذاشتن اطلاعات سد طالقان تشکر می گردد.

مراجع:

اکبری گرکانی، ا. (۱۳۸۴) بررسی عددی اثر لغزش تکیه گاه بر مقادیر تنش و تغییر شکل در سدهای سنگریز، مطالعه موردی: سد گتوند، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، به راهنمایی دکتر سید محسن حائری، دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شریف.

قمصری، م. (۱۳۸۴) مدلسازی عددی آبیگری اولیه سدهای سنگریز، مطالعه موردی: سد گتوند، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، به راهنمایی دکتر سید محسن حائری، دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شریف.

Biot, Maurice A. (1955), Theory of Elasticity and Consolidation for porous anisotropic solid, *J. Appl. Phys. Vol. 26, No 2, pp. 182-185.*

Bishop, A. W. (1957) Some factors controlling the pore pressure set up during the construction of earth dams. *Proceedings of the 4th international Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London, Butterwoths Scientific Publications, London. Vol. 2, pp. 294-300.*

Dounias G.T. and Potts, D.M. and Vaughan, P.R. (1996). Analysis of Progressive failure and Cracking in old British dams- *Geotechnique, Vol.46(4), pp. 621-640*

Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993). Soil mechanics for unsaturated soils. *John Wiley & Sons, New York, pp. 517.*

Fredlund, M. D. and Wilson, G. W. and Fredlund, D. G., (1997), Prediction of the Soil-Water Characteristic Curve from Grain-Size Distribution and Volume-Mass Properties. *3rd Brazilian Symposium on Unsaturated Soils, Rio de Janeiro, Brazil, April 22-25.*

Gdoutos, E.E. (1984). Engineering Applications of Fracture Mechanics, Vol. II. *Martinus, Netlands*

Gens, A., Alonso, E.E. and Delage, P. (1997) Computer modeling and applications to unsaturated soils. *Computer modeling and applications, pp 299-330.*

Helwany, S. (2007). Applied Soil Mechanics, With ABAQUS Applications. *Copyright © 2007 by JOHN WILEY & SONS, Inc., Hoboken, New Jersey.*

Hilf, J.W. (1948). Estimating construction pore pressure in rolled earth dams. *Proceedings, 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam, Vol. 3, pp.234-240.*

Khalili, N., Fell, R. and Tai, K.S. (1996). A simplified method for estimating failure induced deformation in embankments. *Proceedings, Seventh International Symposium on Landslides, (Senmeset Ed.) Trondheim, Norway, Balkema, Rotterdam. Vol. 2, pp. 1263-1268.*

Lu, N. and Likos, W. J., (2004). Unsaturated Soil Mechanics. *Copyright © 2004 by JOHN WILEY & SONS, Inc., Hoboken, New Jersey.*

Naylor, D.J. (1997) Collapse settlement some development. *Applications of Computational mechanics in geotechnical engineering, 1997*

Ng, K. L. and Small, J. C., (1999) A case study of hydraulic fracturing using finite element methods. *Can. Geotech. J. 36: 861-875.*

Nonveiller, E. and Anagnosti, P. (1961) Stresses and deformations in cores of rockfill dams. *Proceedings, 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, pp. 673-680.*