تحلیل نشست سد شهرچای ارومیه در دوره های ساخت و بهره برداری

کاظم بدو[۱] و محمد امین افخمی فرد[۲]

گروه مهندسی عمران ، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه، صندوق پستی ۱۶۵

پست الکترونیکی : k.badv@urmia.ac.ir

خلاصه

سد شهرچای ارومیه یک سد خاکی– سنگریزه ای با هسته رسی (GC) ، به ارتفاع ۱۱۶ متر از سنگ بستر و طول تاج ۵۵۰ متر ، بر روی رودخانه شهرچای در فاصله ۱۲ کیلومتری جنوب غربی و در بالا دست شهر ارومیه احداث شده است. در این مقاله نتایج تحلیل رفتار ژئوتکنیکی سد از نظر تغییر شکل و نشست در انتهای ساخت و در حین بهره برداری با استفاده از نرم افزار المان محدود Plaxis V8 ارائه گردیده است. در تحلیل ها از مدل های رفتاری سازگار با جنس مصالح سد استفاده شده و مراحل مختلف ساخت و آبگیری مطابق با روند اجرایی سد در نظر گرفته شد. مراحل ساخت بصورت مرحله ای و با گامهای زمانی مختلف ، و شرایط بهره برداری با اعمال تغییرات در تراز آب مخزن سد انجام گردید . تحلیل ها به صورت دو بعدی و کرنش مسطح بوده و برای ارزیابی صحت نتایج ، داده های بدست آمده از تحلیل عددی با نتایج ابزار دقیق مقایسه گردید . نتایج بدست آمده نشان داد که تطابق خوبی بین داده های تحلیل عددی با داده های مشاهده ای وجود دارد .

کلمات کلیدی : سد شهر چای ارومیه، تحلیل نشست، نرم افزار Plaxis ، ابزار دقیق.

مقدمه

برای ارزیابی رفتار سد از نظر نشست، داشتن تغییرشکل های دقیق سد مورد نیاز است و یکی از روشهای تحلیلی که قابلیت پیش بینی پارامترهای تغییر شکل را دارد روش المان محدود است [۱] . نرم افزار Plaxis یکی از برنامه های المان محدود جامع برای مهندسین ژئوتکنیک می باشد که قدرت زیادی در تحلیل مسائل متفاوت ژئوتکنیکی دارد [۲] . از موارد مهم در تحلیل یک مسئله با Plaxis انتخاب صحیح نوع مدل رفتاری برای مصالح مدل می باشد [۳] . در این مقاله با توجه به اهمیت فرضیات آنالیز در نتایج حاصله،خصوصاً پارامترهای مصالح ، ابتدا به تشریح فرضیات آنالیز ، نحوه مدل سازی و روش تعیین پارامترها می پردازیم . در ادامه با استفاده از نرم افزار Plaxis و به کمک آنالیز برگشتی پارامترهای نهایی مصالح بدنه سد شهرچای را بدست آورده و نشست دوره ساخت و بهره برداری سد شهرچای را در مقطع کیلومتر ۱۷۰+ تعیین کرده و در نهایت نتایج مدل عددی با نتایج ابزار دقیق مقایسه شده اند.

معرفی سد شهرچای

سد شهرچای از نوع خاکی-سنگریزه ای با هسته GC می باشد که هدف عمده ساخت آن تأمین آب مورد نیاز شرب و صنعت ارومیه و تأمین نیاز آب کشاورزی اراضی واقع در پایین دست سد شهرچای می باشد [۴] . سد شهرچای ارومیه بر روی رودخانه شهرچای دراستان آذربایجان غربی در فاصله ۱۲

---

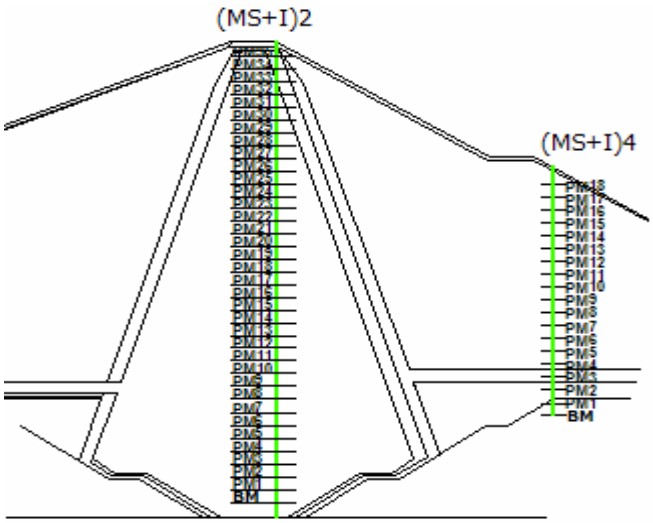
[۱] دانشیار

[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد

www.WikiPG.com

کیلومتری جنوب غربی و در بالادست شهر ارومیه احداث شده است . تراز تاج سد در ارتفاع ۱۵۸۸ متر از سطح آزاد دریا تعیین گردیده است و طول تاج سد جدود ۵۵۰ متر می باشد . مقطع خاکریز بدنه سد شامل هسته آب بند رسی ، لایه های فیلتر و زهکش ، پوسته های سنگریزه ای بالادست و پایین دست و فراز بند که در داخل بدنه سد قرار می گیرد ، می باشد . هسته آببند رسی در مرکز مقطع سد بالاتر از تاج ۱۵۸۶ متر و با ارتفاع حداکثر ۱۱۶ متر از سنگ بستر قرار دارد که نسبت به محور سد متقارن می باشد [۵] .

مطابق شکل ۱ ، برای رفتار نگاری سد شهر چای ، مقطع عرضی ابزار بندی شده CH+170 که مرتفع ترین مقطع سد نیز می باشد ، در نظر گرفته شده است . برای اندازه گیری نشست های قائم ، در داخل هسته و پوسته پایین دست نشست سنج های (MS+I)2 و (MS+I)4 در مقطع CH+170 نصب شده اند که مقادیر نشست هر تراز نسبت به صفحه مبنا را توسط صفحات مغناطیسی که در تراز های مختلف به فاصله حدود ۳ متر از همدیگر نصب شده اند نشان می دهند [۵] . مدل سازی و آنالیز برگشتی انجام شده در این مقاله روی این مقطع انجام شده است .



شکل ۱- ابزار دقیق بکار رفته در مقطع کیلومتر ۱۷۰+ سد شهرچای

معرفی نرم افزار Plaxis V8

PLAXIS نرم افزاری المان محدود پیشرفته برای تحلیل تغییر شکل ها و پایداری در پروژه های مهندسی ژئوتکنیک می باشد .معمولاً در مسائل مهم ژئوتکنیک ، یک مدل رفتاری پیشرفته برای مدل سازی رفتار غیر خطی و وابسته به زمان خاک ها بسته به هدف مورد نظر لازم است . با این نرم افزار میتوان خاکبرداری و خاکریزی مرحله ای با شرایط بارگذاری و شرایط مرزی مختلف را با استفاده از المانهای مثلثی ۶ گرهی و ۱۵ گرهی مدل سازی نمود . در این نرم افزار با استفاده از روشهای ساده گرافیکی ، یک مدل هندسی اجزاء محدود از پروژه مورد نظر ایجاد شده و پس از انجام یک سری عملیات بر روی آن، نتایج حاصل از محاسبات انجام شده با جزئیات کامل در اختیار قرار می دهد . گرافیک ساده ورودی برنامه کاربر را قادر به ساخت مدل های پیچیده المان محدود در زمانی کوتاه می نماید . جهت تحلیل لایه به لایه مراحل ساخت سد در نرم افزار Plaxis از دستور صفر کردن تغییر مکان ها و همچنین دستور ویرایش منحنی بار – تغییر مکان برای ایجاد تنش های اولیه در بارگذاری ها ، در ساخت مرحله ای وزنی سدها استفاده می شود [۲] .

نحوه مدل سازی و تحلیل

برای تحلیل عددی رفتار سد شهرچای ارومیه نرم افزار المان محدود PLAXIS V8 بکار گرفته شده است . جهت انجام تحلیل واقعی از شرایط موجود سد ، می بایست مراحل مختلف ساخت و آبگیری سد بر اساس برنامه زمانی واقعی مدل سازی شود تا بدین ترتیب میزان تغییر شکل های واقعی دورهٔ ساخت و بهره برداری قابل تعیین باشد [۶] . تحلیل عددی بدنه سد شهرچای همراه با پی آن بصورت تحلیل تنش مؤثر همراه با آنالیز تحکیم صورت گرفت [۶] . در این تحلیل برای مقطع ابزارگذاری شده شکل ۱ به صورت زیر عمل گردید .

www.WikiPG.com

دوره ساخت :

- تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح سد.
- شبکه بندی بدنه و پی سد به وسیله المانهای مثلثی ۱۵گرهی (کرنش صفحه ای) .
- محاسبه تنش های برجا در پی ، قبل از ساخت سد .
- مدل سازی فراز بند ادغامی در چهار لایه به ضخامت های ۲ تا ۷ متر در مدت زمان ۳۵۰ روز.
- مدل سازی خاکبرداری فونداسیون آبرفتی جهت اتصال هسته به سنگ بستر در۳ مرحله با لایه هایی به ضخامت ۹ متر در مدت زمان ۲۴۰ روز.
- مدل سازی ساخت بدنه اصلی سد بصورت لایه ای در ۱۶ مرحله ودر مدت زمان ۹۲۵ روز مطابق شکل ۲.

پس از ساخت هر لایه آنالیز تحکیم برای لایه های زیرین انجام گردید .

www.WikiPG.com

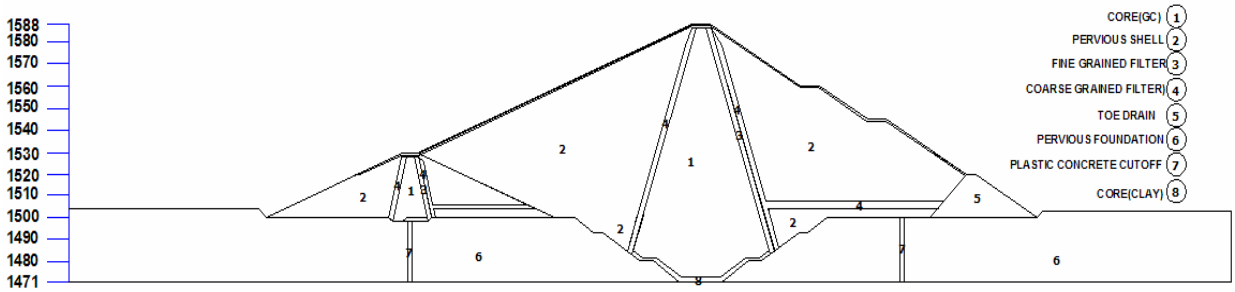
مدل رفتاری مصالح

برای مدل سازی پی و بدنه سد شهرچای از مدل خاک سخت شونده[1] که در نرم افزار Plaxis وجود دارد استفاده گردید . از رفتار الاستیک نیز جهت مدل سازی پرده آببند بتنی استفاده گردید [۳] . مدل خاک سخت شونده یک مدل الاستو – پلاستیک پیشرفته برای شبیه سازی رفتار انواع خاک های مختلف شامل هردو خاک های نرم و خاک های سخت می باشد . درمدل خاک سخت شونده که توسط فار [2] جایگزین مدل هذلولی شد ،اولاً استفاده از تئوری پلاستیک بیشتر از تئوری الاستیک است .ثانیاً اتساع خاک در نظر گرفته می شود .ثالثاً یک کلاهک تسلیم[3]ارائه می شود [۳] . بعضی مشخصه های اصلی مدل عبارتند از:

- تنش وابسته به سختی بر طبق قانون توان پارامتر ورودی : m
- کرنش پلاستیک ناشی از بارگذاری تفاضلی اولیه پارامتر ورودی : E_{50}^{ref}
- کرنش پلاستیک ناشی از فشردگی اولیه پارامتر ورودی : E_{oed}^{ref}
- باربرداری-بارگذاری مجدد الاستیک پارامتر ورودی : E_{ur}^{ref}, ν_{ur}
- گسیختگی بر طبق مدل موهر – کولمب پارامتر ورودی : c, φ, ψ

استخراج پارامترهای ژئوتکنیکی برای مدل رفتاری مورد استفاده در تحلیل عددی

با بررسی آزمایشهای پارامتریک بزرگ مقیاس انجام شده توسط شرکت سهامی آب منطقه ای آذربایجان غربی روی مصالح بدنه سد شهرچای (شکل ۳) و مقایسه آن با آزمایشهای انجام شده روی منابع قرضه مقادیر اولیه پارامترهای مورد نیاز نرم افزار تعیین گردید[۸] . با توجه به اینکه در تحلیل استاتیکی سد آنالیز تنش مؤثر با در نظر گرفتن فشار آب حفره ای انجام شده است ، پارامترهای مؤثر مصالح که از آزمایش CU بر روی نمونه اشباع بدست آمده ، در مدلس‌ازی به کار گرفته شد . از آنجا که مشخصات مصالح در شرایط دست نخورده آزمایشگاهی با مشخصات آن در محل سد دارای تغییراتی خواهد بود ، پس از مدل سازی سد در نرم افزار ، به کمک آنالیز برگشتی در شرایط ساخت و بهره برداری پارامتر های نهایی مصالح سد به گونه ای انتخاب گردید که خروجی های نرم افزار حداکثر انطباق را با داده های ابزار دقیق داشته و از طرفی پارامترها به لحاظ تئوریکی و منطقی حداکثر تأثیر را در پارامتر خروجی مورد نظر داشته باشند . مقادیر نهایی حاصل از آنالیز برگشتی برای این پارامترها در جدول ۲ آمده است .



شکل ۳- مرتفع ترین مقطع سد شهرچای (مقطع کیلومتر ۱۷۰+)

نتایج تحلیل عددی

دوره ساخت و پایان ساخت

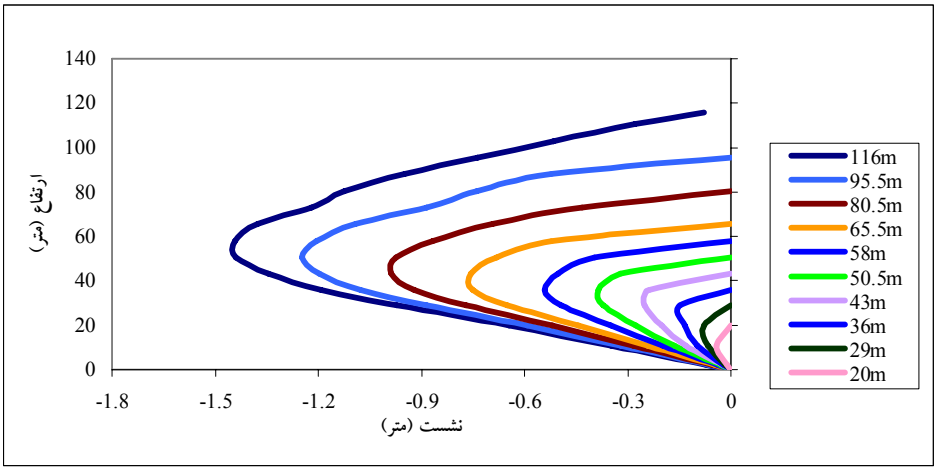
بررسی نشست ها در مقطع کیلومتر ۱۷۰+ نشان می دهد که در ضمن ساخت بیشترین تغییر شکل ها در هسته روی داده است . در شکل ۴ نمودار نشست بر حسب ارتفاع برای ارتفاع های مختلف ساخته شده سد برای هسته سد در مقطع کیلومتر ۱۷۰+ رسم گردیده است [۹] .

[1] Hardening Soil Model
[2] Far
[3] Yield Cap

www.WikiPG.com

جدول ۲- مقادیر نهایی مشخصات مصالح بدنه سد شهرچای حاصل از آنالیز برگشتی

	پی آبرفتی	هسته مخلوط	هسته رسی	پوسته	فیلتر درشت دانه	فیلتر ریزدانه	زهکش
نوع مصالح	GM-SM	GC	CL	GW-GP	G	S	G
نوع مدل خاک	خاک سخت شونده	خاک سخت شونده	خاک سخت شونده	خاک سخت شونده	خاک سخت شونده	خاک سخت شونده	خاک سخت شونده
γdry(KN/m3)	۱۷	۱۶	۱۷	۲۱	۱۹	۱۸	۲۰
γsat(KN/m3)	۱۸	۱۷	۱۸	۲۲	۲۰	۱۹	۲۱
Kx(m/day)	۱۰۰	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۱	۰/۵	۰/۸	۰/۱	۶۰
Ky(m/day)	۶۰	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۹	۰/۳۶	۰/۶۰	۰/۰۸	۴۰
E_{50}^{ref} (kpa)	۸۰۰۰۰	۳۲۰۰۰	۲۲۰۰۰	۱۱۵۰۰۰	۸۰۰۰۰	۷۵۰۰۰	۸۰۰۰۰
E_{oed}^{ref} (kpa)	۸۵۰۰۰	۳۵۰۰۰	۲۴۰۰۰	۱۲۵۰۰۰	۸۵۰۰۰	۸۰۰۰۰	۸۵۰۰۰
E_{ur}^{ref} (kpa)	۲۴۰۰۰۰	۹۶۰۰۰	۶۶۰۰۰	۳۴۵۰۰۰	۲۴۰۰۰۰	۲۲۵۰۰۰	۲۴۰۰۰۰
C' (kpa)	۱	۲۸	۳۳	۱	۱	۱	۱
φ' (°)	۳۷	۳۴	۲۸	۴۵	۴۲	۴۱	۴۳
ψ(°)	۷	۴	۰	۱۵	۱۲	۱۱	۱۳
υ_{ur}	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲
p_{ref} (kpa)	۸۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۸۰۰	۸۰۰	۸۰۰	۸۰۰
m	۰/۵	۰/۷	۰/۷۵	۰/۳۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵
R_f	۰/۹	۰/۷	۰/۷	۰/۹	۰/۸	۰/۸	۰/۹



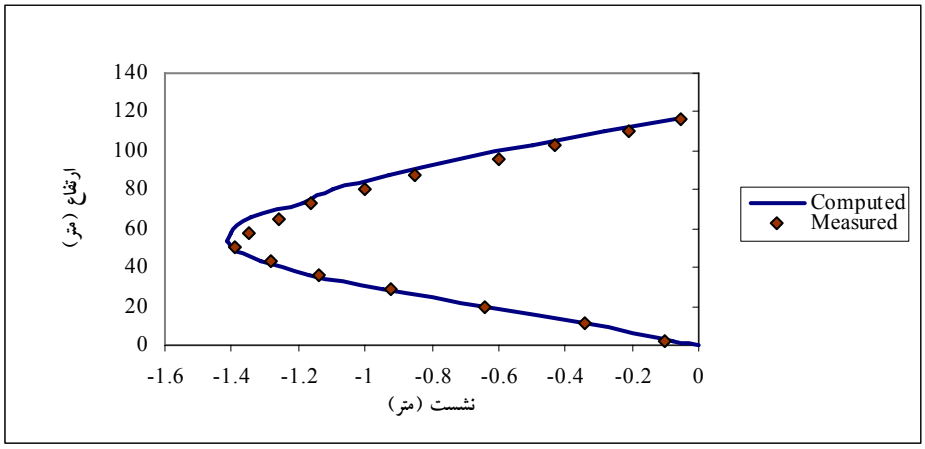
شکل ۴- پروفیل های محاسبه شده نشست دوره ساخت سد برای هسته در مقطع کیلومتر ۱۷۰+

همانطور که از شکل ۴ پیداست حداکثر نشست در ناحیه مرکزی هسته رخ داده است و با دور شدن از این ناحیه ، از میزان نشست ها کم می شود . شکل و فرم تغییر شکل های زمان ساخت دلالت بر درست بودن هندسه سد دارد . .مطابق پروفیل نشست شکل ۴ محل نشست ماکزیمم با افزایش ارتفاع خاکریزی پایین تر می آید و یا به عبارتی درصد محل نشست بیشینه به ارتفاع خاکریزی کاهش پیدا می کند [۹] .

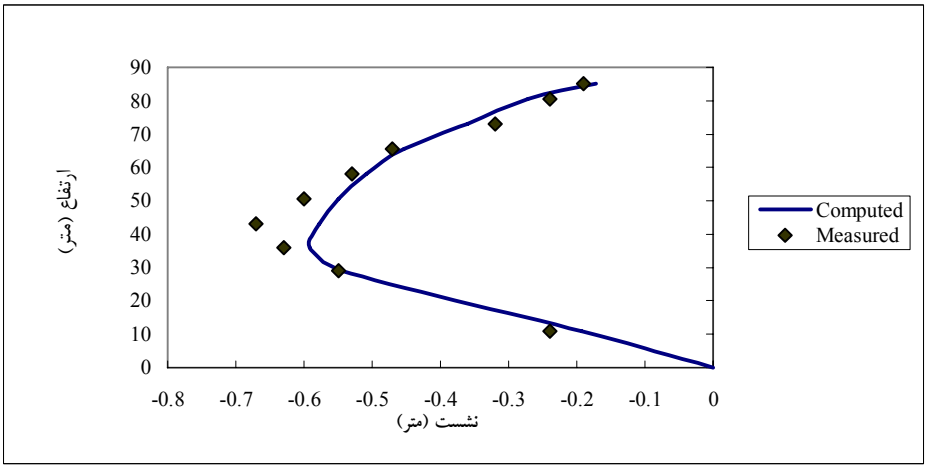
مطابق شکل ۴ بیشینه نشست قائم هسته در مقطع CH+170 پس از اتمام عملیات ساخت سد حدود ۱/۴۴۳ متر و در ارتفاع ۵۸ متر و در ۵۰٪ ارتفاع سد روی داده است . بر اساس نتایج فوق مقدار نشست هسته در دوره ساختمان حدود ۱/۲درصد ارتفاع سد می باشد که این مقدار با توجه به مقادیر نشست

www.WikiPG.com

سدهای دیگر مقدار معقولی می باشد . در اشکال ۵ و ۶ نتایج تحلیل با مقادیر اندازه گیری شده ابزار دقیق رسم شده اند و در ادامه در جدول ۳ مقدار و محل نشست حداکثر حاصل از تحلیل عددی و ابزار دقیق در هسته ، پوسته پایین دست و پی آبرفتی با هم مقایسه شده است .



شکل ۵- منحنی نشست-ارتفاع ابزاردقیق (MS+I)2 و مقایسه آن با نتایج تحلیل در مقطع کیلومتر ۱۷۰+



شکل ۶- منحنی نشست-ارتفاع ابزاردقیق (MS+I)4 و مقایسه آن با نتایج تحلیل در مقطع کیلومتر ۱۷۰+

جدول ۳- مقایسه نتایج ابزار دقیق و تحلیل عددی در پایان ساخت سد

	مقدار نشست حداکثر(متر)		محل نشست حداکثر	
	Plaxis	ابزاردقیق	Plaxis	ابزاردقیق
هسته	۱/۴۰۳	۱/۳۹	٪۵۰	٪۴۴
پوسته پایین دست	۰/۵۹۱	۰/۶۷	٪۴۱	٪۴۹
پی آبرفتی	۰/۵۴۵	۰/۵۸	-	-

www.WikiPG.com

دوره بهره برداری

بعد از اولین مرحله آبگیری سد شهرچای جابجایی های قائم هسته سد تا ارتفاع ۵۰ متر از سنگ بستر به سمت بالا (تورم) بوده و حداکثر مقدار آنها ۱ سانتیمتر می باشد . از ارتفاع ۵۰ متری به بالا جابجایی های قائم به سمت پایین (نشست) تغییر جهت داده و حداکثر مقدار آن ۸ سانتیمتر ودر ارتفاع ۱۱۲ متر از سنگ بستر می باشد . در پایان مرحله چهارم آبگیری سد شهرچای ، جابجایی های قائم هسته سد فقط در قسمت پایین دست هسته سد و تا ارتفاع ۳۰ متری از سنگ بستر به سمت بالا (تورم) بوده و در بقیه نواحی هسته سد جابجایی های قائم به سمت پایین (نشست) بوده و حداکثر مقدار آنها ۲۰/۴ سانتیمتر ودر ارتفاع ۱۱۲ متری می باشد . با توجه به نتایج نشست هسته سد در پایان مرحله چهارم آبگیری مشاهده می شود که نشست بالادست هسته بیشتر از نشست میانه هسته و پایین دست هسته می باشد . و سرعت نشست بالادست هسته با آبگیری افزایش یافته است و این پدیده ناشی از اعمال وزن آب روی مصالح بالادست است . نرخ تغییرات نشست دردوره آبگیری از بالادست به پایین دست هسته کاهش می یابد و در واقع ، آبگیری در نرخ تغییرات نشست درقسمت پایین دست هسته اثر چندانی ندارد . در شکل های ۷ و ۸ نتایج تحلیل عددی و ابزار دقیق در مقطع کیلومتر۱۷۰+ در هسته سد با هم مقایسه گردیده است .

در جدول ۴ حداکثر نشست محاسبه شده توسط نرم افزار Plaxis وحداکثر نشست اندازه گیری شده توسط ابزار دقیق در هسته سد شهر چای در مقطع CH+170 بلافاصله پس از اولین آبگیری و بعد از چهارمین مرحله آبگیری با هم مقایسه شده است .

جدول ۴ – مقدار حداکثر نشست حاصل ازابزاردقیق و نرم افزار در مراحل مختلف آبگیری در هسته و پی سد شهرچای

		هسته		پی آبرفتی	
		ابزار دقیق	Plaxis	ابزار دقیق	Plaxis
حداکثر نشست (متر)	مرحله اول آبگیری	۰/۰۵۶	۰/۰۵۹	۰/۰۰۳	۰/۰۰۷
	مرحله دوم آبگیری	۰/۱۱۱	۰/۱۲۱	۰/۰۱۴	۰/۰۱۱
	مرحله سوم آبگیری	۰/۱۹۵	۰/۱۸۵	۰/۰۲۱	۰/۰۱۵۰
	مرحله چهارم آبگیری	۰/۲۰۸	۰/۱۹۱	۰/۰۲۴	۰/۰۲

همانطور که مشاهده می شود نتایج ابزار دقیق با مدل عددی تطابق خوبی دارد . نزدیکی مقادیر اندازه گیری شده توسط ابزار دقیق با نتایج مدل عددی در واقع نشانگر دقت محاسبات و مطابقت اجرای بدنه با استانداردهای طراحی است و با انطباق خوب ابزار دقیق و مدل عددی در دوره ساخت و بهره برداری میتوان رفتار حقیقی سد را در آینده با دقت مناسبی پیش بینی کرد .

خلاصه و نتیجه گیری

در این مقاله با بررسی تغییر مکان های قائم بخش های مختلف سد در دوره ساخت و بهره برداری و مطالعه پروفیل های نشست سد با ارتفاع در دوره ساخت ونهایتاً مقایسه نتایج تحلیل عددی با ابزار دقیق ، نتایج زیر حاصل می شود .

– بر اساس نتایج رفتار سنجی و تحلیل های عددی صورت گرفته ، اکثر نشست ها در دوره ساخت سد رخ داده است وتمرکز آنها در مرکز هسته می باشد.

– شکل و فرم تغییر شکل های زمان ساخت دلالت بر درست بودن هندسه سد دارد .

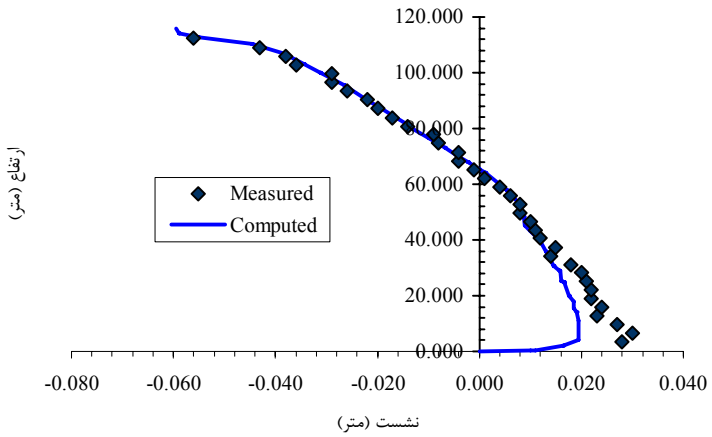
– مقدارحداکثر نشست هسته سد در پایان ساخت حدود ۱/۲٪ ارتفاع است و این مقدار نسبتا قابل قبول می باشد .

– نزدیکی مقادیر اندازه گیری شده توسط ابزار دقیق با نتایج مدل عددی در دوره های ساخت و بهره برداری واقع نشانگر دقت محاسبات و مطابقت اجرای بدنه با استانداردهای طراحی است .

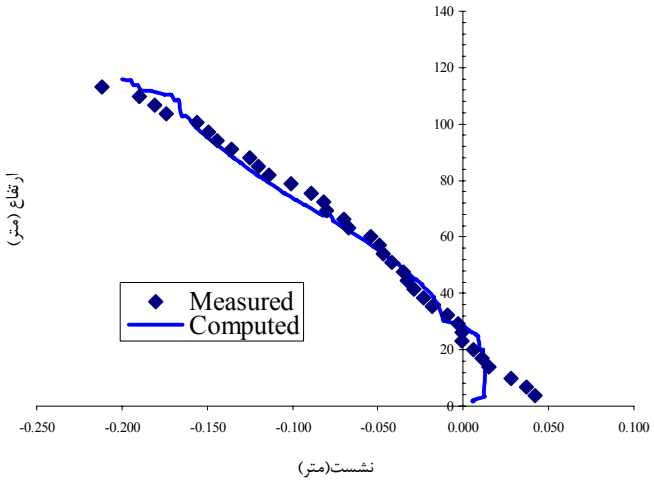
– با تحلیل برگشتی ، پارامترهای واقع بینانه تری برای رفتار مصالح سد وهمچنین تعیین رفتار قسمت هایی که هیچ اطلاعی از رفتار آنها در دست نیست به دست آمده است وبا انطباق خوب ابزار دقیق و مدل عددی در دوره ساخت و بهره برداری میتوان رفتار حقیقی سد را در آینده با دقت مناسبی پیش بینی کرد.

– سد در وضعیت ایمن قرار دارد و رفتار تنش– کرنش مصالح، قابل قبول و طبیعی است .

www.WikiPG.com



شکل ۷- منحنی نشست – ارتفاع ابزار دقیق 2(MS+I) ومقایسه آن با نتایج تحلیل بعد از اولین مرحله آبگیری



شکل ۸- منحنی نشست–ارتفاع ابزار دقیق 2(MS+I) ومقایسه آن با نتایج تحلیل بعد از چهارمین مرحله آبگیری

مراجع

۱. رحیمی ، حسن (۱۳۸۲) *سدهای خاکی* . چاپ اول . انتشارات دانشگاه تهران .

2. Plaxis incorporation (1998) *Refrence and Scientific Manual*.

3. Plaxis incorporation (1998) *Material Models Manual*.

۴. سازمان آب منطقه ای شهرستان ارومیه (۱۳۷۸) *گزارش سیمای طرح شهرچای ارومیه* .

۵. سازمان آب منطقه ای شهرستان ارومیه (۱۳۷۸) *گزارش مشخصات فنی و اختصاصی سد شهرچای ارومیه* .

۶. صدر نژاد، سید امیرالدین (۱۳۸۴) *سدهای خاکی و تحلیل عددی آن*، چاپ اول، انتشارات دانشگاه شهید رجایی تهران .

۷. شرکت مهندسین مشاور سکو (۱۳۸۵) *گزارشات نتایج ابزاردقیق سد شهرچای از ابتدای نصب تا تاریخ ۱۳۸۵/۴/۱۸*.

۸. شرکت سهامی آب منطقه ای آذربایجان غربی (۱۳۸۵) *گزارش نهایی از نتایج آزمایشات پارامتریک بزرگ مقیاس مربوط به سد شهرچای ارومیه* .

9. Pagano, L., Desideri, A. and Vinale, F. (1998) Interpreting settlement profiles of earth dams. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **124**(10), 923-932.

www.WikiPG.com