

## Study of Vertical and Horizontal Displacements of Eyvashan Earth Dam Using Instrumentation and Numerical Analysis

MEHDI KOMASI<sup>\*1</sup>, BEHRANG BEIRANVAND<sup>1</sup>

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Ayatollah ozma Borujerdi, Borujerd, Iran.

(Received: May. 25, 2019- Revised: July. 18, 2019- Accepted: Sep. 7, 2019)

### ABSTRACT

Generally, the safety of a dam is not only related to its design and construction, but also to the complete characterization of its performance during the first dewatering and operation period, as well as regular service during the life of the dam. In this study, the vertical and horizontal displacements of the Eyvashan Dam were analyzed using actual instrument results in an eight-year period in three steps of construction, first dewatering and operation period. The numerical model of the largest section of the dam was prepared by Geostudio and Plaxis software and examined with respect to the behavioral model of Mohr–Coulomb. According to the results of the instrumentation, the settlement of the dam core has increasing trend and sometimes after the construction, it reaches almost constant. The maximum settlement of the dam core at the end of construction phase was 809 mm which is equal to 1.2% of the dam height at the middle level. The horizontal displacements in the longitudinal direction of dam upstream are completely influenced by the reservoir water level and hydrostatic forces. The maximum horizontal displacement in the upper crust of Eyvashan dam is 75.6 mm. After reservoir filling, the amount of settlement from the lower levels to the higher levels (crest of the dam) have had an increasing trend. In order to adapt the observational and predictive data, multivariate regression and determination coefficient were used which showed a consistency result of about 85 percent between observation and prediction data. This indicates that the maximum settlements and their location are agreed well with the technical specifications, revealing the proper operation of the dam in terms of settlement.

**Keywords:** Eyvashan earth dam, Geostudio, Instrumentation, Plaxis, settlement.

## بررسی جابجایی‌های قائم و افقی سد خاکی ایوشان با استفاده از ابزار دقیق و تحلیل عددی

مهدی کماسی<sup>۱\*</sup>، بهرنگ بیرانوند<sup>۲</sup>

(۱) گروه مهندسی عمران، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی (ره)، بروجرد، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۳/۴ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۴/۲۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۶/۱۶)

### چکیده

به طور کلی ایمنی سد تنها به طراحی و ساخت آن مربوط نمی‌شود، بلکه به رفتارنگاری کاملی از عملکرد آن در اولین دوره آبیگری و بهره‌برداری و همچنین سرویس‌دهی منظم در طول عمر سد وابسته است. در این پژوهش جابجایی‌های قائم و افقی سد ایوشان با استفاده از نتایج ابزار دقیق در یک دوره زمانی هشت ساله در سه دوره ساخت، اولین آبیگری و بهره‌برداری تحلیل شده است. مدل عددی بزرگترین مقطع سد توسط نرم‌افزارهای Geostudio و Plaxis تهیه و با لحاظ مدل رفتاری موه‌ر کولمب بررسی گردید. با توجه به نتایج ابزار دقیق، نشست در هسته سد روند افزایشی داشته و بعد از گذشت مدتی از پایان ساخت سد تقریباً به مقدار ثابتی می‌رسد. حداکثر نشست هسته سد در پایان مرحله ساخت به میزان ۸۰۹ میلی‌متر و معادل ۱/۲ درصد ارتفاع سد در تراز میانی رخ داده است. جابجایی‌های افقی در جهت طولی بالادست سد کاملاً تحت تاثیر تراز آب مخزن و نیروهای هیدرواستاتیکی است. بیشینه جابجایی افقی در پوسته بالادست سد ایوشان ۷۵/۶ میلی‌متر می‌باشد. پس از آبیگری سد، مقدار نشست از ترازهای پایین به طرف ترازهای بالا (تاج سد) روند افزایشی داشته است. به منظور تطبیق داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده از رگرسیون چند متغیره و از معیار ضریب تعیین استفاده شد که نتایج هم‌خوانی حدود ۸۵ درصدی بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد و بیانگر اینست که مقادیر نشست حداکثر و محل وقوع آنها با مشخصات فنی موجود مطابقت خوبی دارد و نشان‌دهنده عملکرد مناسب سد از لحاظ نشست می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سد خاکی ایوشان، Geostudio، ابزار دقیق، Plaxis، نشست

### مقدمه

بستر سنگی از مهم‌ترین عوامل نشست ناهمگون به شمار می‌رود. فرآیند تراکم هسته در رطوبتی کمتر از رطوبت بهینه نیز باعث جمع‌شدگی و ترک‌خوردگی در هسته می‌شود. در زمان آبیگری و بهره‌برداری، بدنه سد تمامی بارهای داخلی و خارجی خود را تحمل می‌کند. اعمال این بارها باعث تغییر مکان‌های افقی و قائم می‌شود که به تغییر مکان‌های قائم نشست اطلاق می‌گردد (Iksoo, 2011). روش اجزاء محدود برای مسائل ژئوتکنیکی اولین بار توسط (Clough and Woodward 1967) مطرح گردید، اما استفاده از این روش برای تحلیل سازه‌های خاکی بزرگ، مانند سدها توسط (Duncan and Chang 1970) مطرح گردید. از طرفی (Abhilasha and Balan 2014) نرم‌افزارهای موجود و متداول در مدل‌سازی تراوش سدهای خاکی را مقایسه کردند. نتایج تجزیه و تحلیل با نرم‌افزارهای مختلف نشان داد که مدل‌سازی با نرم‌افزار Seep/w از صحت و دقت قابل قبول و بالایی برخوردار است و می‌تواند برای مسائل پیچیده نیز کارآمد و اقتصادی باشد. هرچند عمده جابجایی‌ها در زمان ساخت سد

رفتارنگاری به معنای بررسی عملکرد یک سازه در دوران ساخت و مرحله بهره‌برداری و تطبیق آن با پیش‌بینی‌های زمان طراحی می‌باشد. رفتارنگاری سدها برای دوره اولین پر شدن دریاچه سد اهمیت ویژه‌ای دارد. به طور کلی ایمنی سد تنها به طراحی و ساخت آن مربوط نمی‌شود، بلکه به رفتارنگاری کاملی از عملکرد آن در سال‌های اولیه بهره‌برداری و همچنین سرویس‌دهی منظم در طول عمر سد وابسته است (Jannati and Mohammadi, 2010). آبیگری سدها باعث اشباع خاکریزها و تکیه‌گاه‌ها و به تبع آن کاهش ضریب اطمینان پایداری خواهد شد. بنابراین برای اینکه یک سد خاکی شرایط جدید را به راحتی و بدون بروز مشکل تحمل نماید، سرعت آبیگری می‌بایست در محدوده مجاز باشد. ترک در هسته عمدتاً ناشی از جریان بیش از اندازه آب و یا تغییر محل ناهمگون پی می‌باشد. نشست ناهمگون عمدتاً ناشی از آماده سازی نامناسب پی (ظرفیت باربری کم) و عدم آب‌بندی کامل پی می‌باشد. در این بین شکل ساختگاه سد از نظر عمق قرارگیری

در دوره طولانی (۲۵ سال >) پرداختند. نتایج آنها نشان داد که بیشترین تغییرات نشست سد مربوط به تحکیم طولانی مدت می باشد و نوسانات آب مخزن تاثیر چندانی در جابجایی های قائم و افقی ندارد. در این پژوهش با جمع آوری و بررسی، صحت سنجی داده های ثبت شده پیژومترهای نشست سنج و حصول اطمینان از عدم مغایرت آنها با تئوری های موجود در ژئوتکنیک، مقایسه ای بین نتایج ابزار دقیق و روش های عددی انجام شده است. با مقایسه نتایج قرائت ابزار دقیق و نرم افزارهای Plaxis و Geostudio جابجایی های قائم و افقی سد ایوشان در سه دوره ساخت، آبیگری اولیه و بهره برداری بررسی شده است.

## مواد و روش ها

### مشخصات سد مخزنی ایوشان

سد مخزنی ایوشان در فاصله ۱/۵ کیلومتری بالادست روستای ایوشان گلستان و حدود ۵۷ کیلومتری شهر خرم آباد در مختصات جغرافیایی ۴۸ درجه و ۴۹ دقیق طول شرقی و ۳۳ درجه ۲۸ دقیقه عرض شمالی بر روی رودخانه هرود واقع شده است. مساحت حوضه آبریز رودخانه هرود تا محور سد مخزنی ایوشان ۱۲۰ کیلومتر مربع است. سد از نوع خاکی-سنگریزه ای با هسته قائم رسی می باشد که ارتفاع آن از بستر ۶۲ متر (تراز ۱۸۰۴ متر از سطح دریا)، تراز تاج سد ۱۸۶۸ متر و رقوم نرمال بهره برداری از سد ۱۸۶۴ متر از سطح دریا می باشد. حجم مخزن در رقوم نرمال بهره برداری از سد ۵۲ میلیون مترمکعب و وسعت دریاچه در تراز نرمال ۲/۳ کیلومتر مربع است شکل (۱).



شکل ۱- سد خاکی ایوشان

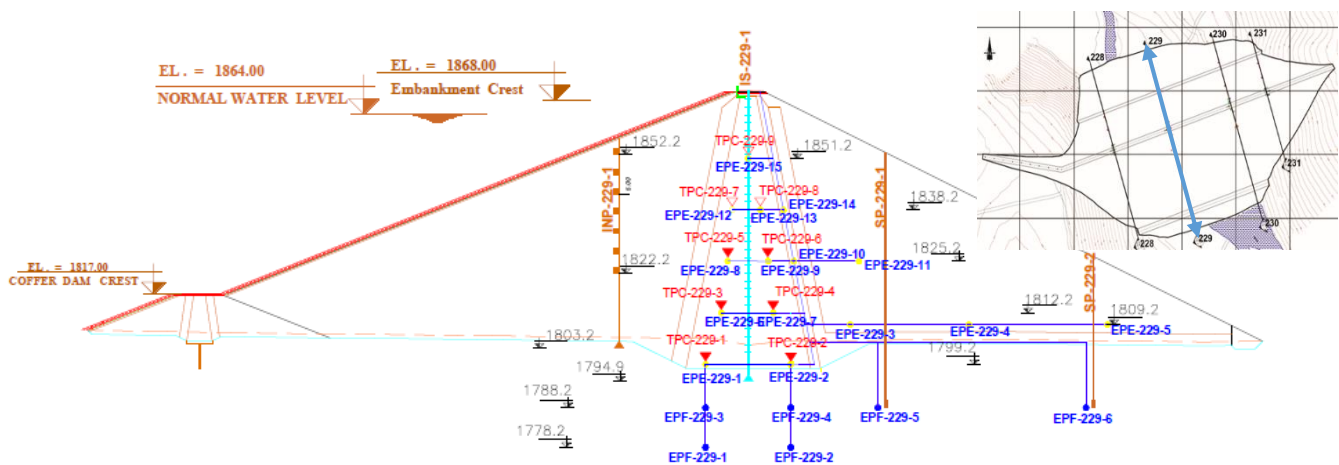
ساختمان سد مخزنی ایوشان از دیدگاه زمین شناسی در محدوده بستر سنگی مشتمل بر سنگ های کنگلومرانی است که در محدوده کوله ها این سنگ ها دارای رخنمون بوده ولی در کف دره رسوبات آبرفتی جوان درشت دانه، بر روی سنگ کنگلومرا نهشته شده است. از نظر سنگ شناسی کنگلومرای محدوده محور

صورت می گیرد اما مطالعه نشست های سدهای خاکی و پاره سنگی بعضاً به نتایج موثری منجر می شود. به طور کلی حداکثر نشست سد در نقاط میانی آن است و به تدریج کم شده تا در پنجه ها به صفر می رسد. در اثر نشست، سازه سد به تدریج تحت نوعی کشش قرار می گیرد و فاصله بین پنجه دامنه های سد در امتداد قاعده، اندکی افزایش می یابد (Gikas and Sakellario, 2008). مطالعات بسیاری در مورد رفتارنگاری و نشست سدها صورت گرفته است. (Ebrahimnejad Sedigh et al. (2000) به رفتارسنجی نشست پی و بدنه سد خاکی علویان در دوران بهره برداری پرداختند و حداکثر نشست و مقطع بحرانی سد را مشخص نمودند. نشست پی در طول زمان ساخت با ضریب همبستگی خوبی (بیش از ۰/۹۸) تابعی از مجذور ارتفاع خاکریز می باشد. (Dinashinia and Arab (2008) به بررسی تغییر شکل- های قائم (نشست) سد مخزنی کرخه با استفاده از ابزارهای نصب شده پرداختند. بررسی و مطالعات انجام شده بر روی نتایج نشست سد کرخه، نشانگر روند منطقی رفتار سد داشت. (Sharifi (2011) et al. با شبیه سازی سد ۱۵ خرداد با نرم افزار Plaxis به ارزیابی رفتارنگاری سد در دوره پس از آبیگری و بهره برداری سد پرداخت. نتایج به دست آمده نشان داد که تطابق نسبتاً خوبی بین تحلیل عددی و داده های مشاهده ای (با ضریب همبستگی بیش از ۰/۹۶) وجود دارد. (Beiranvand Yeganeh et al. (2014) در پژوهشی به بررسی پی سد خاکی زیبا محمد خرم آباد با استفاده از نرم افزارهای Plaxis و Geostudio پرداختند و با توجه به نشست های قابل توجه پی راهکار تزریق را ارائه نمودند. (2016) Mousavi Azar et al. به بررسی نشست سد خاکی زنوز و مقایسه داده های ابزار دقیق و تحلیل عددی پرداختند. تحقیقات ایشان نشان داد که بیشترین نشست در پوسته پایین دست و به میزان ۵۴۷ میلی متر رخ داده است. همچنین متوسط نشست در هسته رسی ۳۴۴ میلی متر در بزرگترین مقطع در سد اتفاق افتاده است. همچنین (Rashidi and Haeri (2017) با ارزیابی فشار آب حفره ای و نشست سد خاکی گاوشان و مقایسه داده های ابزار دقیق و مدل سازی عددی با استفاده از نرم افزار FLAC(2D) به این نتیجه رسیدند که عملکرد سد از نظر فشار آب حفره ای و نهایتاً پایداری سد مثبت می باشد. در پژوهشی دیگر (Rashidi et al. (2018) با بررسی و مقایسه نتایج نشست ابزار دقیق سد سنگ سیاه و تحلیل عددی با مدل موهر-کولمب نشان دادند که سد مورد مطالعه از نظر شکست هیدرولیکی در مرحله پایان ساخت و اولین دوره آبیگری در مقایسه با سایر سدهای سنگریزه ای در دنیا ایمن تر می باشد. (Pelecanos et al. (2018) در مطالعه ای با استفاده از تحلیل عددی به بررسی جابجایی های افقی و قائم سدهای خاکی

مقاطع ابزارگذاری در سد مخزنی ایوشان

ابزاربندی سد ایوشان در ۴ مقطع با شماره‌های ۲۲۸-۲۲۸، ۲۲۹-۲۲۹، ۲۳۰-۲۳۰ و ۲۳۱-۲۳۱ به ترتیب در کیلومتر ۲۴۹+۰، ۳۵۶+۰، ۴۷۷+۰ و ۵۴۶+۰ در نظر گرفته شده است. در پژوهش حاضر رفتارنگاری ابزار نصب شده در مقطع ۲۲۹ سد مخزنی ایوشان مورد ارزیابی قرار گرفته است. در شکل (۲) موقعیت مقاطع عرضی ابزاردقیق و مقطع ابزاربندی ۲۲۹ سد خاکی ایوشان نشان داده شده است. بیشترین تراز ابزاربندی مربوط به مقطع ۲۲۹-۲۲۹ با ۷ تراز و کمترین تعداد تراز ابزاربندی مربوط به مقطع ۲۳۱-۲۳۱ با ۵ تراز می‌باشد.

و دریاچه از قطعات رادیولاریتی، ماسه سنگ، اسلیت، سنگ‌های ماسورف و قطعات سنگ آذرین با یک ماتریس سیلتی-ماسه‌ای و گاهاً سیلتی-رسی تشکیل شده است. در بررسی‌های صورت گرفته در محدوده دریاچه و محور سد، درزه یا سیمای تکتونیکی واضحی مشاهده نشده است. آب‌بند بودن (مقادیر لوژن در حد صفر) این رسوبات کنگلومرانی، ناشی از عدم وجود شکستگی و درزه و شکاف بارز در توده سنگ ساختگاه سد ایوشان است. از نظر زمین‌شناسی سنگ کنگلومرای مخزن و محور سد با ضخامت چند صد متر یک نوع کنگلومرای جوان از نوع کنگلومرای بختیاری محسوب می‌شود (مهندسین مشاور آبدان فراز).



شکل ۲- موقعیت مقاطع ابزارگذاری سد ایوشان (مهندسین مشاور آبدان فراز)

مدل‌سازی و تحلیل نشست سد ایوشان با نرم‌افزارهای

Plaxis و Geostudio

افزایش فشار آب منفذی درون هسته رسی سدهای خاکی-سنگریزه‌ای، در حین ساخت و اولین آبیگری، موجب وقوع نشست‌های تحکیمی در این ناحیه می‌گردد. برای تحلیل تنش-کرنش سدهای خاکی معمولاً از روش اجزاء محدود به صورت دو بعدی و در شرایط کرنش صفحه‌ای، که موجب ساده شدن محاسبات می‌گردد، استفاده می‌شود. در این پژوهش به منظور محاسبه مقادیر نشست و صحت‌سنجی دقیق‌تر از نرم‌افزارهای Plaxis2D و Geostudio استفاده شده است. نرم‌افزار Plaxis2D که با عنوان Plaxis نیز شناخته می‌شود به سفارش مدیریت منابع آب کشور هلند در دانشگاه صنعتی Delft در سال ۱۹۸۷ تهیه و سپس در سال ۱۹۹۳ قابلیت‌های آن گسترش داده شد. همچنین نرم‌افزار Geostudio که به خاطر شرکت سازنده آن به Geoslope نیز معروف است، یک برنامه‌ی کامل ژئوتکنیکی برای تحلیل و طراحی است که قادر است تحلیل پایداری، تراوش، تنش/کرنش و لرزه‌ای را در انواع شیب‌های خاکی مسلح و غیرمسلح و به

نتایج نشست سد ایوشان توسط ابزاردقیق

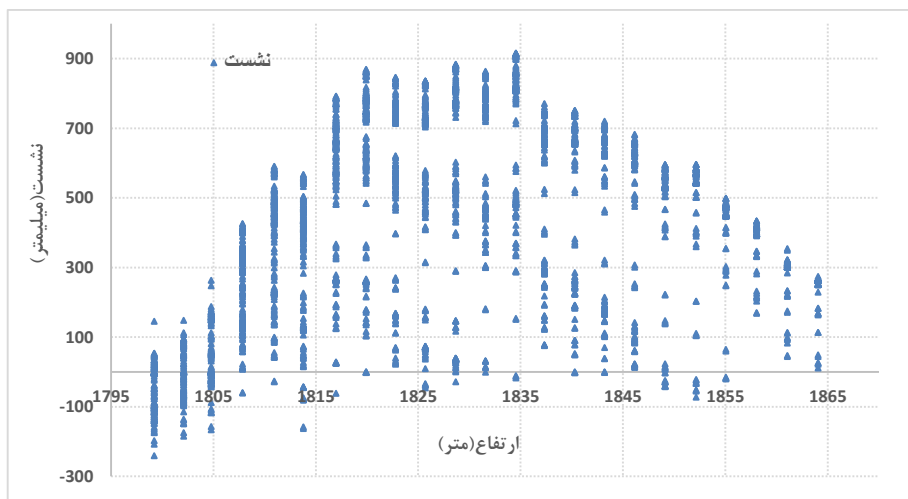
در مقطع ۲۲۹-۲۲۹ نشست سد بر اساس دستگاه نشست‌سنج نصب شده در محور هسته رسی سد محاسبه می‌شود. تعداد ۲۲ مگنت در فواصل منظم برای اندازه‌گیری مقدار نشست در ابزار IS229 نصب شده است. جهت بررسی تغییرات میزان نشست سد ایوشان از نتایج ابزاردقیق مربوط به سال ۱۳۸۷ شروع عملیات اجرایی ساخت بدنه سد لغایت سال ۱۳۹۵ دوران پس از آبیگری و بهره‌برداری سد استفاده شده است (شکل ۳). بیشینه مقدار نشست هسته سد در آخرین قرائت و در پایان مرحله ساخت در ترازهای میانی با حداکثر ۸۰۹ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است که در تراز ۱۸۳۵ متر ارتفاع از سطح دریا می‌باشد. در ترازهای بالایی و نزدیک تاج سد (۱۸۶۴-۱۸۳۵) مقدار نشست محاسبه شده از ۶۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر متغیر بوده و این مقدار در تراز انتهایی (۱۸۱۰) به ۲۰۰ میلی‌متر رسیده است (شکل ۴). جابجایی‌های افقی پوسته بالادست سد در ارتفاع یک سوم بالایی (شکل ۵) به سمت بالادست و پایین‌دست در حال نوسان است. بیشینه جابجایی افقی در سد ایوشان ۷۵/۶ میلی‌متر می‌باشد.

تحکیمی و نفوذپذیری مصالح و شرایط زهکشی دارد، بلکه تا حد زیادی بستگی به چگونگی و ترتیب اجرای کار نیز دارد. در این شرایط هنوز زه در بدنه سد وجود ندارد و کم شدن آب به علت خشک شدن نیز ناچیز است و تنها به علت وزن لایه‌های بالاتر، آب منفذی تحت فشار قرار می‌گیرد. همچنین در مدل Plaxis برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، مش‌بندی توسط عناصر ۱۵-گره‌ای و المان‌ها به صورت مثلثی مدل شده است (شکل ۷). جهت تحلیل سد ایوشان از آنالیز پلاستیک بر اساس مدل رفتاری موهر-کولمب در هر دو نرم‌افزار استفاده شده است. در تحلیل سد ایوشان ابتدا و در گام نخست پرده آب‌بند ایجاد شده است. فاز بعدی مربوط به بدنه سد است و مرحله اولیه تحلیل مربوط به اجرای لایه اول خاکریز می‌باشد که در جهت تطبیق با شرایط واقعی در ۱۶۰ روز ایجاد شده است. البته باید توجه داشت که همزمان با اجرای لایه‌های خاکریز، در لایه‌های زیرین پدیده تحکیم رخ می‌دهد. بنابراین در تحلیل انجام شده یک فاز جداگانه از نوع تحلیل تحکیمی ایجاد می‌گردد. به‌طور کلی برنامه به صورت خودکار بر اساس نفوذپذیری‌های وارد شده برای مصالح و ابعاد مش انتخاب شده، برای مدل یک زمان بحرانی را برای تحلیل تحکیمی محاسبه می‌کند که برای قابل اعتماد بودن تحلیل، زمانی که برای تحلیل اختصاص می‌دهیم می‌بایست از این زمان بزرگتر باشد. هرچه ابعاد مش‌ها ریزتر باشد زمان بحرانی که برنامه محاسبه می‌کند کمتر خواهد بود. به همین ترتیب فاز دوم تحلیل برای لایه دوم خاکریزی ۳۲۰ روز و تا انتهای فاز هشتم که ۱۲۸۰ روز اختصاص یافته، تحکیم کل خاکریز مدل‌سازی می‌گردد.

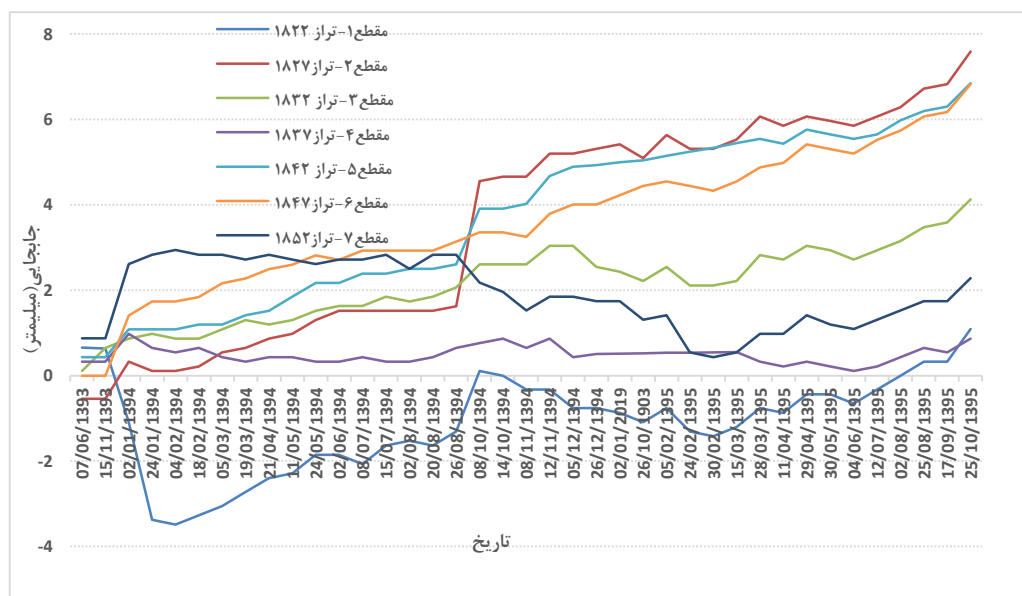
خصوص سدهای خاکی در شرایط استاتیکی، شبه استاتیکی و دینامیکی انجام دهد. این نرم‌افزارها بر اساس روابط اجزاء محدود نوشته شده است و قادر به شبیه‌سازی رفتار غیر خطی و وابسته به زمان خاک و نیز تحلیل سد در دوران آبیگری و بهره‌برداری با در نظر گرفتن فشار آب منفذی می‌باشد. به‌وسیله این نرم‌افزارها می‌توان ساخت لایه به لایه و مرحله‌ای سد و پدیده تحکیم را مدل‌سازی نمود. در این بخش نیز مقطع ۲۲۹ سد به عنوان مقطع بحرانی و بیشینه انتخاب و مدل‌سازی گردیده است. در مدل‌سازی به روش اجزاء محدود، لزوماً در موارد زیر ایده‌آل‌سازی ضروری است: ۱- هندسه مدل ۲- روند ساخت و بارگذاری ۳- رفتار مصالح. در شکل (۶) مدل سد ایوشان و نشست آن در نرم‌افزار Geostudio نشان داده شده است. لازم به ذکر است که برای مدل‌سازی نشست تحکیمی مراحل ساخت سد در نظر گرفته شده است و خاکریزی به صورت لایه به لایه و در ۸ مرحله در ۱۲۸۰ روز انجام شده است. در هر مرحله از اجرای سد، خاک لایه مورد نظر به ارتفاع تقریباً ۱۰ متر فعال شده و وزن این لایه در محاسبه تنش‌ها و تغییر مکان‌ها لحاظ می‌گردد. پارامترهای مصالح مورد استفاده در آنالیز نشست، در جدول (۱) نشان داده شده است. علت مدل‌سازی ساخت لایه به لایه سد و در نظر گرفتن زمان ساخت برای هر لایه مطابق با واقعیت، این است که در ضمن ساخت سد و بلافاصله پس از آن در بخش‌های ریزدانه و کم نفوذپذیر (هسته رسی) فشار آب منفذی حبس شده، ابتدا افزایش می‌یابد و به تدریج کاسته می‌گردد و لایه‌های پایین‌تر تحکیم می‌یابند. بنابراین شدت و چگونگی توزیع فشار آب منفذی نه فقط بستگی به مشخصات



شکل ۳- نشست قائم سد ایوشان نسبت به زمان در سه مرحله ساخت، اولین آبیگری و بهره‌برداری (ابزار IS229)



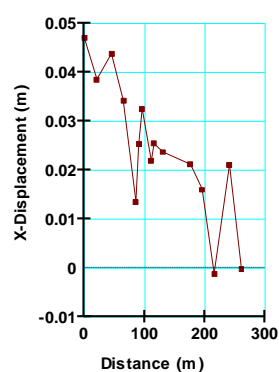
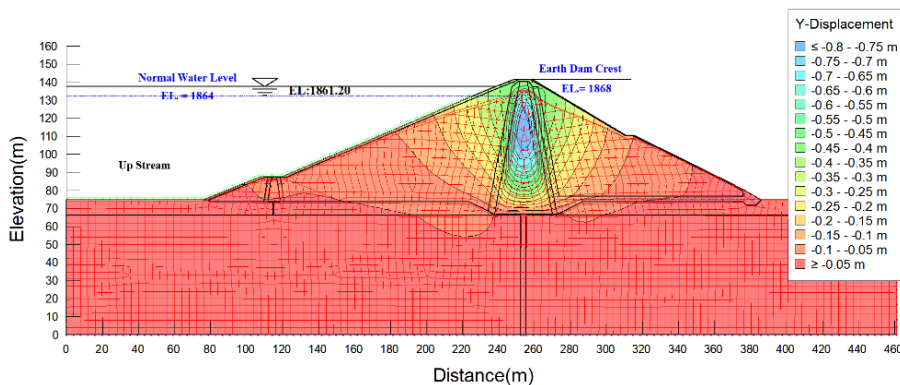
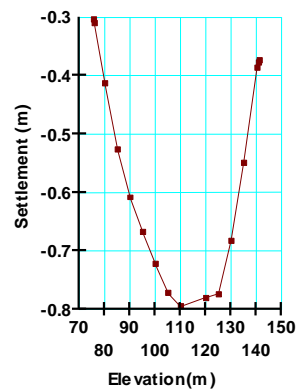
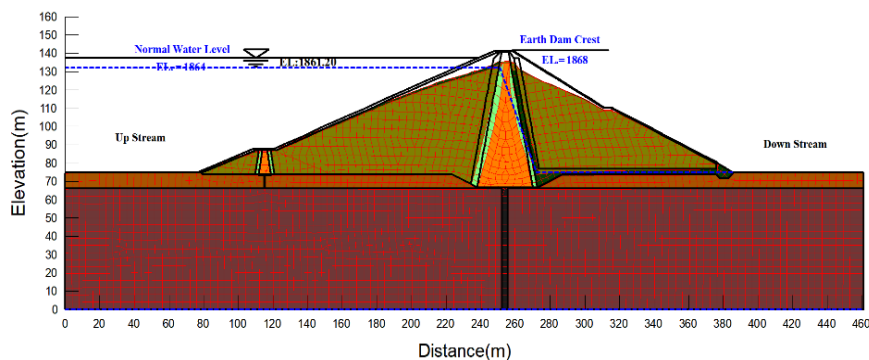
شکل ۴- تغییرات نشست قائم نسبت به ارتفاع هسته سد ایوشان (ابزار IS229)



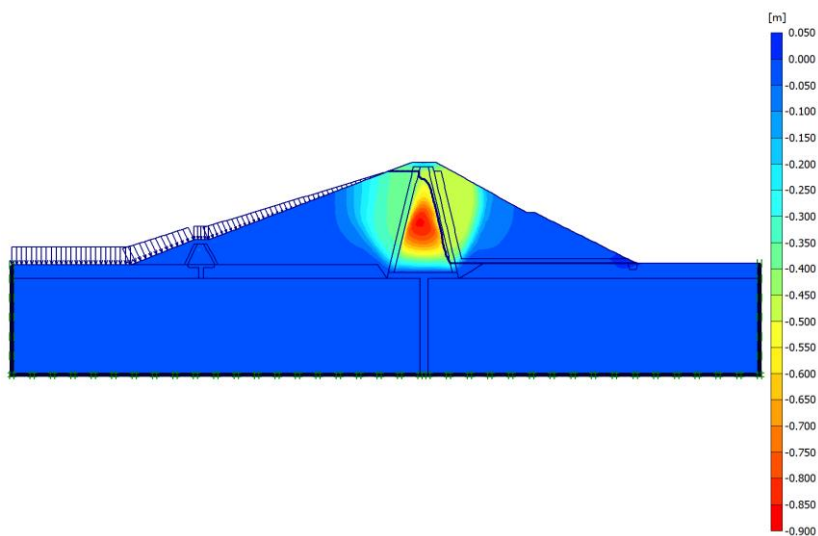
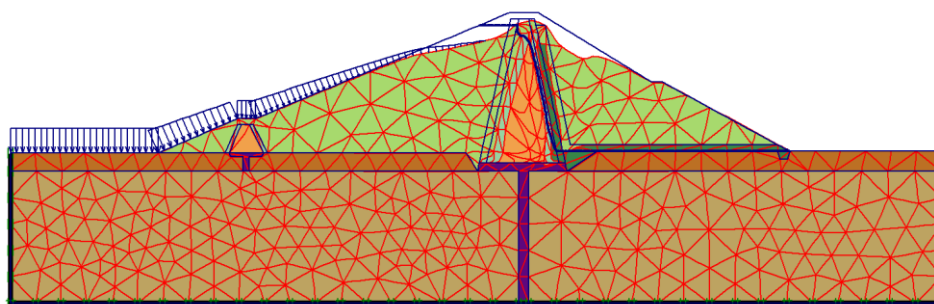
شکل ۵- تغییرات جابجایی‌های افقی در پوسته بالادست سد ایوشان (ابزار INP229)

جدول ۱- پارامترهای مصالح مورد استفاده در آنالیز نشست

مصالح	مدل موهر کولمب	نوع مصالح	Kx(m/sec)	Ky/Kx	E (Mpa)	$\gamma_{dry}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{wet}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	C,C' (kPa)	f,f' (°)
هسته	پلاستیک	زهکشی نشده	$2/5 \times 10^{-10}$	۰/۲	۳۵	۱۷	۲۰	۲۱	۶۳	۱۱
		زهکشی شده							۲۸	۲۴
پوسته	پلاستیک	زهکشی شده	$1 \times 10^{-10}$	۱	۷۰	۲۲/۵	۲۳/۸	۲۴/۵	-	-
فیلتر	پلاستیک	زهکشی شده	$1 \times 10^{-10}$	۰/۵	۴۵	۱۹	۲۱	۲۲	-	-
زهکش	پلاستیک	زهکشی شده	$2 \times 10^{-10}$	۱	۵۵	۲۰/۵	۲۲	۲۳	-	-
آبرفت	پلاستیک	زهکشی شده	$5 \times 10^{-10}$	۱	۵۰۰	۲۱/۵	-	۲۳/۲	-	-
پی	پلاستیک	زهکشی شده	$1 \times 10^{-10}$	۱	۵۰۰۰	۲۵	-	۲۵/۵	-	-
دیوار آبند	پلاستیک	زهکشی شده	$1 \times 10^{-10}$	۱	۲۵۰۰	۲۱	-	۲۱	-	-



شکل ۶- شبکه تغییر شکل یافته و کانتورهای تغییر مکان قائم در نرم افزار Geostudio



شکل ۷- مدل تغییر شکل یافته و کانتورهای تغییر مکان قائم در نرم افزار Plaxis

## نتایج و بحث

## بررسی نتایج مربوط به نشست ابزار دقیق و نرم افزارهای

## Plaxis و Geostudio

نتایج نشست سد ایوشان نشان می‌دهد که با شروع ساخت بدنه، مقادیر نشست با توجه به ادامه خاکریزی و بارگذاری روی لایه‌های قبلی دائماً و به صورت افزایشی در حال تغییرند. عدم افزایش یکنواخت شیب نمودار نشست در برخی از مقاطع و در زمان ساخت ناشی از توقف عملیات خاکریزی به دلایل مختلف در آن بازه زمانی می‌باشد. قسمت عمده نشست‌های زمان ساخت را نشست آبی یا الاستیک تشکیل می‌دهند. نشست‌های آبی تحت تاثیر رفتار الاستیک مصالح ناشی از بارگذاری متوالی لایه‌های جدید بر روی لایه‌های زیرین در مدت زمان کوتاهی اتفاق می‌افتند. پدیده تحکیم در بلند مدت اتفاق می‌افتد و سرعت وقوع نشست‌های تحکیمی به سرعت زهکشی فشارهای آب منفذی ایجاد شده در طول ساخت سد بستگی دارد. با توجه به اینکه در پوسته سدهای خاکی به دلیل نفوذپذیری بالای آنها، فشار آب منفذی ایجاد نمی‌شود میزان نشست‌های تحکیمی ایجاد شده در پوسته مقدار ناچیزی می‌باشد. به دلیل نفوذپذیری پایین هسته رسی، زهکشی فشار آب منفذی هسته در طول دوران ساخت در طولانی مدت صورت می‌گیرد. از این رو نشست‌های تحکیمی هسته رسی بیشتر از نشست‌های پوسته می‌باشد. در حالت کلی میزان نشست‌های آبی به مقدار قابل توجهی بیشتر از نشست‌های تحکیمی می‌باشد و با گذشت زمان شدت افزایش نشست‌های تحکیمی کاهش یافته و به مقدار ثابتی می‌رسد. در انتهای مرحله ساخت و به دنبال اولین آگیری مخزن سد، با توجه به اینکه معمولاً لایه‌های تحتانی نسبت به لایه‌های بالاتر از تراکم بیشتری برخوردارند، بیشترین حرکات ناشی از رمبندگی در قسمت‌های فوقانی و نزدیک تاج سد رخ داده است. در واقع در این بازه زمانی نشست‌ها دچار تغییرات افزایشی (البته بسیار ناچیز) شده است. با شروع آگیری، نشست‌ها به سمت کف هسته بوده اما با گذشت زمان و افزایش تراز آب از میزان شدت نشست‌ها کاسته شده و حرکاتی رو به بالا در جهت تاج سد البته بسیار جزئی و در حدود چند سانتی‌متر در هسته دیده می‌شود. در مرحله بهره‌برداری نیز مقادیر نشست روند نسبتاً یکنواختی را نشان می‌دهند. از نظر پایداری سد، میزان نشست بعد از ساخت از اهمیت بیشتری برخوردار است. زیرا در زمان ساخت سد حجم آب دریاچه یا صفر و یا حداقل است و ترمیم خسارات ناشی از نشست غیرهمگن در

حین ساخت ارزان‌تر و عملی‌تر می‌باشد. همچنین عامل نوسان جابجایی‌های افقی پوسته بالادست سد ایوشان در ارتفاع یک سوم بالایی را می‌توان تغییرات تراز آب مخزن دانست به طوری که در اثر آگیری سد و اعمال نیروی هیدرواستاتیکی به سمت پایین دست حرکت می‌کند، با تخلیه آب مخزن در نتیجه عدم اعمال نیروی هیدرواستاتیکی بار پوسته بالادست و وجود جریان خروجی آب موجود در پوسته سد به طرف بالادست، به سمت بالادست جابجا می‌شود. در جدول (۲) مقادیر نشست پیش‌بینی شده توسط نرم افزار و مقادیر نشست اندازه‌گیری شده توسط ابزار دقیق (IS 229-1) در ترازهای مختلف از محور قائم مرکزی هسته سد ایوشان آورده شده است. این نتایج جهت مقایسه بهتر در شکل‌های (۸ و ۹ و ۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشینه تغییر مکان قائم بدنه سد در میانه ارتفاع هسته اتفاق افتاده است. اگر تحلیل بدنه سد به صورت لایه به لایه انجام شود، حداکثر تغییر مکان قائم بدنه سد در میانه ارتفاع و در هسته اتفاق خواهد افتاد. این در حالی است که در تحلیل یک مرحله‌ای همواره حداکثر نشست و تغییر مکان قائم مربوط به تاج سد است.

همان‌طور که در شکل‌های (۸ تا ۱۰) مشاهده می‌گردد، با توجه به اینکه میزان وقوع نشست‌ها در یک نقطه مورد نظر تابعی از ارتفاع خاک روی آن (سربار) و ارتفاع خاکریزی آن می‌باشد بنابراین بیشینه نشست‌ها تقریباً در تراز میانی سد، اتفاق می‌افتد. در واقع در یک توده خاک مانند سد خاکی با حرکت از پایین‌ترین تراز به طرف بالا، از طرفی مقدار خاک زیر نقطه مورد بررسی (مقدار مصالح تراکم‌پذیر زیر نقطه که عامل افزایش نشست است) بیشتر می‌شود، از طرف دیگر مقدار سربار (باری که منجر به تراکم و نشست توده شده و عامل افزایش نشست است) کاهش می‌یابد، این دو اثر در یک توده خاک همگن تقریباً در حدود ترازهای میانی آن به تعادل می‌رسند. همچنین نمودارها از نظر روند کلی دارای تطابق نسبتاً خوبی هستند و اختلاف موجود میان مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده می‌تواند ناشی از اختلاف میان مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی در شرایط کارگاهی و طراحی باشد. همچنین مشاهده می‌شود که ماکزیمم نشست هسته تقریباً در تراز میانی آن رخ می‌دهد. زیرا در یک توده خاک با حرکت از پایین‌ترین تراز توده به طرف بالا، از طرفی مقدار خاک زیر نقطه مورد بررسی (مقدار مصالح تراکم‌پذیر زیر نقطه که عامل افزایش دهند نشست است) بیشتر می‌شود، از طرف دیگر مقدار سربار (باری که منجر به تراکم و نشست توده شده و عامل افزایش



بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده تا چه مقدار به خط رگرسیون با شیب یک، نزدیک است. در محاسبات هرچقدر مقدار  $R^2$  به عدد یک نزدیکتر باشد کارایی بیشتر مدل را نشان می‌دهد. در واقع چنانچه مقدار  $R^2$  معادل یک گردد برآزش کاملی را نشان می‌دهد و بیانگر انطباق کامل بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده است. با اعمال رابطه (۱) بر روی داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده مقدار ضریب تعیین برای نرم‌افزار Geostudio و Plaxis به ترتیب  $0/۸۳۵۲$  و  $0/۸۸۶۷$  به دست آمد که نشانگر هم‌خوانی نتایج مربوط به نشست برای مقادیر ابزار دقیق و مقادیر نرم‌افزارها می‌باشد شکل (۱۱).

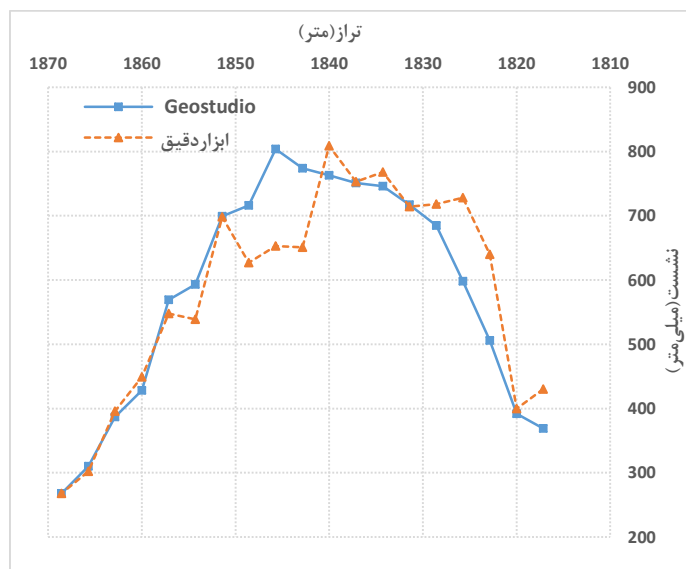
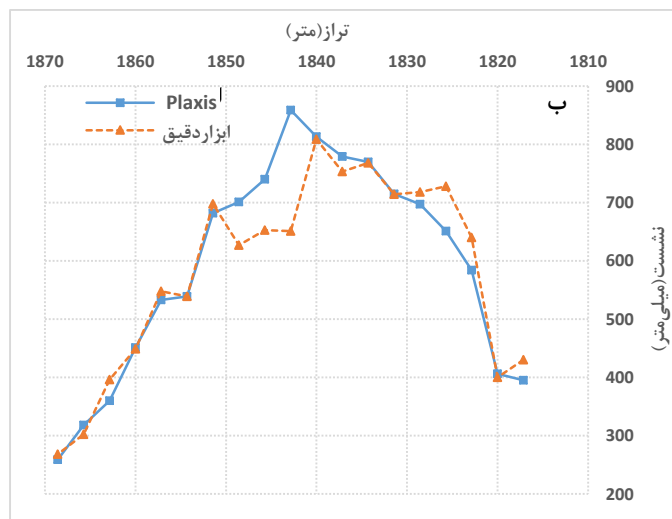
نشست است) کاهش می‌یابد، این دو اثر در یک توده خاک همگن تقریباً در حدود ترازهای میانی آن به تعادل می‌رسند. به منظور ارزیابی و مقایسه دقیق عملکرد نتایج ابزار دقیق و مدل Geostudio و Plaxis از رگرسیون چند متغیره از معیار ضریب تعیین (رابطه ۱) استفاده شده است.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - O_{ave})^2} \quad (\text{رابطه ۱})$$

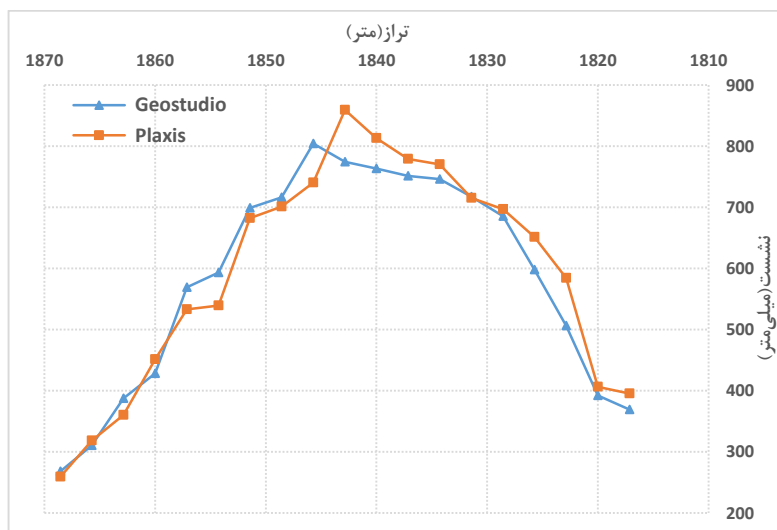
در رابطه (۱) n تعداد نمونه‌هاست، P و O به ترتیب مقادیر مشاهده‌ای و مقادیر پیش‌بینی شده و  $O_{ave}$  میانگین مقادیر مشاهداتی است. ضریب تعیین، نشان می‌دهد که خط رگرسیون

جدول ۲- مقادیر تحلیل عددی و ابزار دقیق نشست در ترازهای مختلف از محور مرکزی هسته

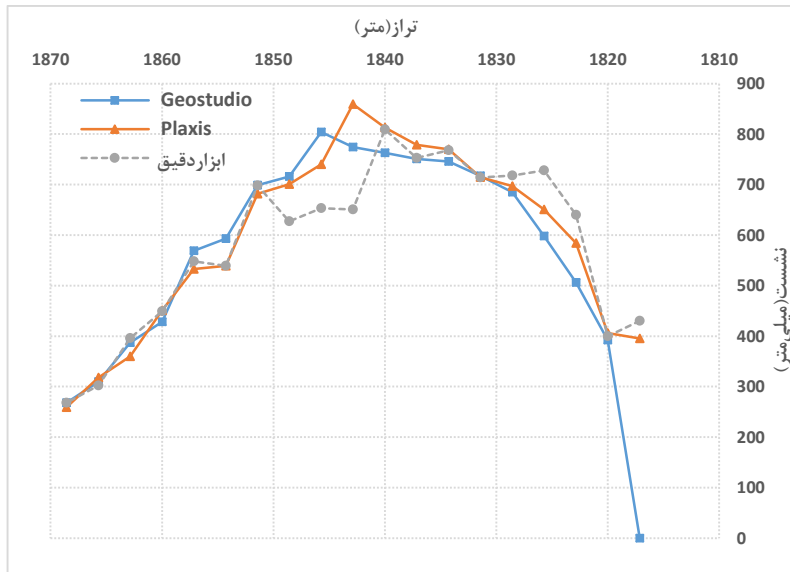
نشست سنج	نشست Geostudio (میلی‌متر)	نشست Plaxis (میلی‌متر)	نشست ابزار دقیق	
			ارتفاع از سطح دریا (متر)	(میلی‌متر)
PL4	۳۶۹	۳۹۵	۱۸۱۰	۴۳۰
PL5	۳۹۲	۴۰۶	۱۸۱۳	۴۰۰
PL6	۵۰۶	۵۸۴	۱۸۱۶	۶۴۰
PL7	۵۹۸	۶۵۱	۱۸۱۹	۷۲۸
PL8	۶۸۵	۶۹۷	۱۸۲۲	۷۱۸
PL9	۷۱۷	۷۱۵	۱۸۲۵	۷۱۴
PL10	۷۴۶	۷۷۰	۱۸۲۸	۷۶۸
PL11	۷۵۱	۷۷۹	۱۸۳۱	۷۵۳
PL12	۷۶۳	۸۱۳	۱۸۳۴	۸۰۹
PL13	۷۷۴	۸۵۹	۱۸۳۷	۶۵۱
PL14	۸۰۴	۷۴۰	۱۸۴۰	۶۵۳
PL15	۷۱۶	۷۰۱	۱۸۴۳	۶۲۷
PL16	۶۹۹	۶۸۲	۱۸۴۶	۶۹۸
PL17	۵۹۳	۵۳۹	۱۸۴۹	۵۳۹
PL18	۵۶۹	۵۳۳	۱۸۵۲	۵۴۸
PL19	۴۲۸	۴۵۱	۱۸۵۵	۴۴۹
PL20	۳۸۷	۳۶۰	۱۸۵۸	۳۹۶
PL21	۳۱۰	۳۱۸	۱۸۶۱	۳۰۲
PL22	۲۶۸	۲۵۹	۱۸۶۴	۲۶۸



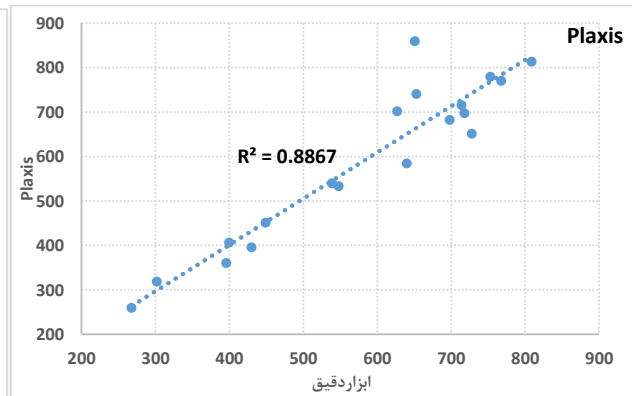
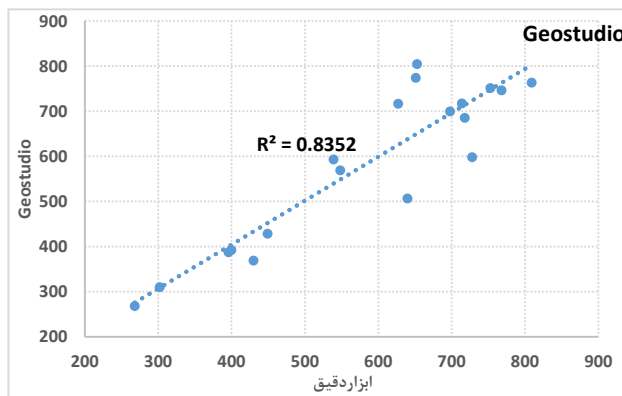
شکل ۸-مقایسه مقادیر نشست ابزار دقیق و تحلیل عددی، الف: Geostudio ب: Plaxis



شکل ۹-مقایسه مقادیر پیش بینی شده نشست توسط نرم افزارهای Geostudio و Plaxis



شکل ۱۰- مقایسه مقادیر نشست ابزار دقیق و مقادیر تحلیل عددی توسط نرم افزارهای Geostudio و Plaxis



شکل ۱۱. نمودار پراکنش برای مقادیر مشاهداتی و پیش بینی شده. الف: Geostudio ب: Plaxis

اتفاق می افتد که این مقدار نشست معادل ۱/۲ درصد ارتفاع سد می باشد و در محدوده مجاز و قابل قبولی قرار دارد. بیشینه جابجایی افقی نیز به میزان ۷۵/۶ میلی متر است که با توجه به مقدار ناچیز آن خطری متوجه سد نمی باشد. بررسی نتایج داده های ابزار دقیق و مدل سازی عددی نشانگر اینست که مقادیر نشست حداکثر و محل وقوع آنها با مشخصات فنی موجود مطابقت خوبی دارد و نشان دهنده عملکرد مناسب سد از لحاظ نشست می باشد. دلیل اختلاف میان قرائت های ابزار دقیق و نتایج برآمده از نرم افزار می توان ناشی از محدودیت های مدل های اجزا محدود و همچنین عدم تطابق پارامترهای ورودی با مشخصات واقعی بدنه سد خاکی باشد. چراکه در حالت واقعی مدول الاستیسیته به درصد رطوبت و درصد تراکم بستگی داشته ولی به ناچار از مدول الاستیسیته متوسط در انجام تحلیل های عددی استفاده می شود. همچنین اختلاف بین مقادیر نشست محاسباتی و اندازه گیری شده می تواند به دلیل خطای قرائت و عدم دقت اپراتور یا خطای نصب و نگهداری دستگاه های اندازه گیری نشست

### نتیجه گیری کلی

روند تغییرات نشست بدنه سد از آغاز عملیات ساختمانی سد تا سال ۱۳۹۵ به این صورت است که نشست ها در ابتدا با سرعت بیشتری اتفاق می افتد و بعد از اتمام ساخت از شدت وقوع نشست ها کاسته شده و در نهایت تقریباً به مقدار ثابتی می رسند. نتایج نشان می دهد که اکثر نشست ها (بیش از ۹۰ درصد) قبل از آبرگیری رخ داده است و پس از آن نشست تحکیمی ثانویه روی داده است. اثر اولین آبرگیری سد بر نشست ها با حرکت از ترازهای پایین سد به سمت ترازهای بالاتر به دلیل نبود زمان کافی برای تحکیم در ترازهای بالاتر نسبت به ترازهای پایین تر، افزایش می یابد. به طوری که در ترازهای بالاتر در اثر آبرگیری نشست ها به میزان ۳ سانتی متر افزایش یافته ولی تغییر در نشست های ترازهای پایین اتفاق نمی افتد. تغییرات نشست نسبت به ارتفاع، در بدنه سد به صورت سهمی شکل بوده و حداکثر میزان نشست تا سال ۱۳۹۵ به میزان ۸۰۹ میلی متر تقریباً در تراز میانی هسته

نتیجه گرفت که تحلیل انجام شده گویای رفتار واقعی سد بوده و نتایج حاصله می‌تواند در تامین اطلاعات مربوط به بخش‌هایی از سد که در آنها ابزار رفتارنگاری تعبیه نشده به کار رود.

باشد. اما به طور کلی با توجه به انطباق مناسبی که نتایج ابزار دقیق و مدل عددی دارند این مساله مشخص می‌شود که مدل رفتاری خاک در نرم‌افزار درست انتخاب شده و همچنین فرضیات اولیه طراحی سد به خوبی صورت گرفته است. همچنین می‌توان

## REFERENCES

- Abdan Faraz Consulting Engineers Co. (2003). Report on the project of the Eyvashan Reservoir Dam.
- Abhilasha, P.S. and Balan, T.G. (2014). Numerical Analysis of Seepage in Embankment Dams. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 13-23.
- Beiranvand Yeganeh, N., Mushrefifar, M.R., Mehrnehad, H.R. and Kazempour, S. (2014). Study on the settlement of the Ziba Mohammad earth dam of Khorramabad with the software Plaxis and Geostudio. *1<sup>th</sup> national conference on soil mechanics and foundation engineering*, Iran. (In Farsi).
- Clough, R.W. and Woodward, R. J. (1967). Analysis of Embankment Stresses and Deformations. *Journal of Soil Mechanics and Found.* 529-549.
- Dinashinia, M.B. and Arab, Y. (2008). Study of settlement of Karkheh Dam. *2<sup>th</sup> National Conference on Hydroelectric Power Plants*, Iran. (In Farsi)
- Duncan, J.M. and Chang, C.Y. (1970). Nonlinear analysis of stress and strain. *Soil Mechanics and Foundations Division*. 1657-1673.
- Ebrahimnejad Sedigh, E., Emami Tabrizi, M. and Barari, S.A. (2000). Measurement of settlement of the Alavian Dam during the exploitation period. *4<sup>th</sup> Iranian Dam Construction Conference*, Iran. (In Farsi).
- Gikas, V. and Sakellario, M. (2008). Horizontal deflection Analysis of a large earth dam by means of geodetic and geotechnical methods. *13<sup>th</sup> FIG international symposium on deformation measurements and analysis and 4<sup>th</sup> IAG symposium on geodesy for geotechnical and structural engineering*.
- Jannati, P. and Mohammadi, M. (2010). Investigation of excess pore pressure of pore water generated by earthquake in the clay core of soil dams under the influence of nucleus shape. *9<sup>th</sup> Iranian Hydraulic Conference*, Tehran, Iran. (In Farsi).
- Mousavi Azar, S.R., Asadi Anbardan, M. and Akhlaghi, M. (2016). Zenoz earth dam settlement behavior from view point by comparing instrumental data and numerical results", *4<sup>th</sup> National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management*, Iran. (In Farsi)
- Pelecanos, L., Skarlatos, D. and Pantazis, G. (2018). Finite element analysis of the monitored long-term settlement behaviour of Kouris earth dam in Cyprus, *9<sup>th</sup> European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering - Porto*, Portugal.
- Rashidi, M. and Haeri, M. (2017). Evaluation of behaviors of earth and rock fill dams during construction and initial impounding using instrumentation data and numerical modeling. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 709-725.
- Rashidi, M., Haeri, M. and Azizyan Gh. (2018). Numerical analysis and monitoring of an embankment dam during construction and first impounding Case study: Siah Sang Dam. *Scientia Iranica A*, 25(2), 505-515
- Sharifi, A.M., Ghaderi, K. and Rahnama, M.B. (2011). Analysis of the 15 Khordad earth dam during the exploitation period using instrumentation data and sign points. *11<sup>th</sup> national irrigation and evaporation reduction seminar*, Iran. (In Farsi).