نشریه علمی
پژوهش‌های تجربی در مهندسی عمران
جلد ۱، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۳، صص ۴۷ الی۵۶

تاریخ دریافت مقاله: ۹۲/۲/۳۰
تاریخ تصویب نهایی: ۹۲/۷/۲۰
پایگاه نشریه: http://jerce.srttu.edu

روش‌های ژئوتکنیکی و غیرژئودتیکی در اندازه‌گیری‌های جابجایی
(مطالعه موردی آنالیز نتایج ابزار دقیق سد مخزنی مارون بهبهان)

لطف اله عمادعلی

مربی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی ومهندسی، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء، بهبهان، ایران
bemad1390@ut.ac.ir

چکیده: دستگاه‌ها و روش‌های نقشه برداری ژئودتیکی و فتوگرامتری، نمی‌توانند کلیه نیازهای اندازه‌گیری جابجایی را برآورده کنند. از این‌رو، برای جمع‌آوری اطلاعات در جابجایی‌های محلی، دستگاه‌های ژئوتکنیکی و غیرژئودتیکی در داخل جسم تغییر شکل‌پذیر به‌کار گرفته می‌شوند. دستگاه‌های ژئوتکنیکی از قبیل کشش سنج، شیب سنج، آونگ وارونه و سایر دستگاه‌های مشابه می‌توانند برای وصول اطلاعات ،پیوسته و دائم مورد استفاده قرار گیرند. قطعاً با ترکیب نتایج اندازه گیری‌های ژئودتیکی و ژئوتکنیکی و انجام آنالیز جامع جابجایی می‌توان به نتایج بهتری در آشکارسازی و اندازه‌گیری جابجایی اجسام و سازه‌ها دست یافت. در این مقاله، نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های ژئودتیکی (مشاهدات میکروژئودزی) از قبیل اندازه گیری‌های دقیق طول، زاویه و ارتفاع با نتایج حاصل از مشاهدات غیر ژئودتیکی برای سد مخزنی مارون مقایسه شده است.

کلمات کلیدی: روش‌های ژئودتیکی، روش‌های غیر ژئودتیکی، تنش و کرنش، تغییر شکل جسم، سد مخزنی مارون.

Geotechnical and Non-Geodetical Methods in Analyzing Displacement; A Case Study: Analysis of Geotechnical Instruments of Maroon Dam, Behbehan, Iran

L. Emadali

Abstract: Geodetic methods and devices of surveying and photogrammetry cannot meet all the requirements for measuring displacement. Therefore, to collect information from local deformations, geotechnical devices are used inside the deformable objects. Devices such as extensometer, tilt meter, inverted pendulum, and other similar devices can be used to collect continuous data. Certainly, we can achieve to more reliable results in the detection and measurement of moving objects and structures by combining the results of geodetic and geotechnical measurements and comprehensive analysis of movement. In this paper, the results of geodetic measurements, such as precise measurements of length, angle and height have been compared with the results of observations of non-geodetic instruments.

Keyword: Geodetic methods, Geotechnical methods, Stress, Strain, Deformation, Maroon Dam.

۱– مقدمه

روش‌های نقشه‌برداری ژئوتکنیکی از طریق ارتباط بین ایستگاه‌های اندازه‌گیری، اطلاعات مفیدی در مورد وضع جابجایی کلی نقاط مورد نظر، هم چنین انتقال و دوران جسم فراهم می‌کنند. در این روش‌ها، دقت‌های زیر میلی-متر در محدوده‌های کوچک و دقت نسبی 10^{-6} قابل دسترسی می‌باشند. در روش‌های نقشه‌برداری ژئودتیکی و ماهواره‌ای، برقراری دید مستقیم بین ایستگاه‌های نقشه-برداری یا بین ایستگاه نقشه‌برداری و ماهواره ضروری است; لذا این روش‌ها (و هم‌چنین روش‌های فتوگرامتری برد کوتاه) فقط به فضاهای باز محدود می‌شوند و نمی‌توانند در آشکارسازی جابجایی‌های محلی درون جسم تغییر شکل پذیر به‌کار گرفته شوند. برای اندازه‌گیری جابجایی در فونداسیون سازه‌های بزرگ مهندسی مثل سدها و تعیین حرکات نسبی لایه‌های مختلف خاک یا سنگ، در مطالعات پایداری شیب، می‌بایست روش‌های اندازه‌گیری خاص مورد بررسی قرار گیرند. در مقایسه با روش‌های کند نقشه برداری زمینی –که همواره با مشکلات فراوان اجرایی همراه می‌باشند– استفاده از دستگاه‌های ژئوتکنیکی به منظور دست‌یابی به اطلاعات و اندازه‌گیری‌های پیوسته بسیار مفید هستند. با این‌حال، این روش‌ها نیز محدودیت‌ها و معایبی دارند که مهم‌ترین آنها، محلی بودن اندازه گیری‌ها است که باعث می‌شود به شدت تحت تأثیر نویز (سیگنال‌های ناخواسته) قرار گیرند. هم چنین، با توجه به اینکه مشاهدات به ایستگاه‌های کنترل متصل نمی‌شوند،آنالیز جابجایی مشکل‌تر از حالت نقشه‌برداری ژئودتیکی خواهد بود.

قطعاً با ترکیب نتایج اندازه‌گیری‌های ژئودتیکی و ژئوتکنیکی و انجام آنالیز جامع جابجایی، می‌توان به نتایج بهتری در آشکارسازی و اندازه‌گیری جابجایی اجسام و سازه‌ها دست یافت. دستگاه‌های ژئوتکنیکی بر اساس هدف اندازه‌گیری به سه گروه اصلی طبقه‌بندی می‌شوند[۱]:

- تعیین خواص فیزیکی جسم تغییرشکل‌پذیر (تعیین پارامترهای ارتجاعی ماده، ضریب انبساط گرمایی، ضریب ویسکوزیته و . . .)
- تعیین عوامل ایجاد جابجایی(نیروها) و تنش‌های داخلی (فشارسنج‌ها، سنسورهای حرارتی و . . .)
- تعیین تغییرات در بُعد و شکل جسم (جابجایی‌های هندسی)

از نقطه نظر مهندسین نقشه‌بردار، گروه سوم اندازه‌گیری‌ها (تعیین جابجایی هندسی) مورد توجه می‌باشد. دستگاه‌هایی که در این نوع از اندازه‌گیری‌ها به کار گرفته می‌شوند بر اساس نوع کاربرد به شرح ذیل می‌باشند:

الف) دستگاه‌های اندازه‌گیری کشش و کرنش، شامل نوار اکستنسومتر و استرین متر، میله اکستنسومترو اینترفرومتر (تداخل سنج امواج) لیزری

ب) دستگاه‌های اندازه‌گیری تیلت و شیب، شامل تیلت متر دقیق، شیب‌سنج گمانه‌ای، شاقول‌های معلق و وارونه و ترازیابی هیدرواستاتیک

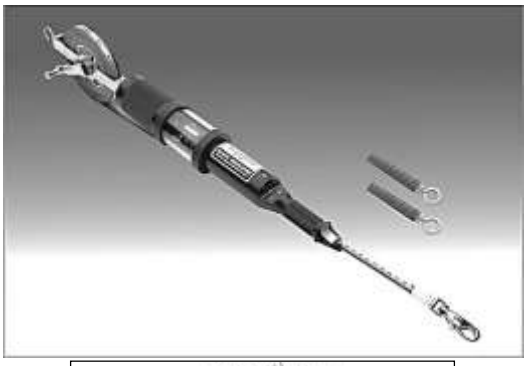
ج) دستگاه‌های اندازه‌گیری تغییرات امتدادی، شامل روش‌های مکانیکی، روش‌های امتداد لیزری و نوری مستقیم و روش تفرق (پراش) لیزری.

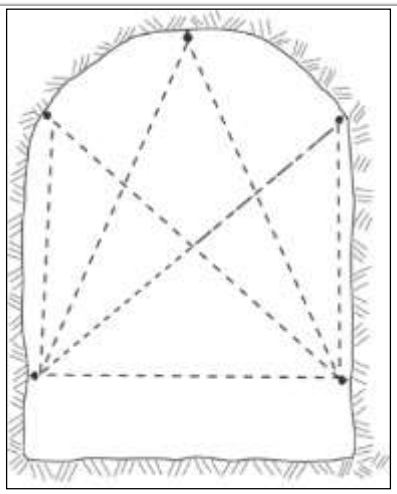
۲– اندازه‌گیری تغییرات فاصله

۲–۱– کلیات

دستگاه‌های اندازه‌گیری تغییر فاصله، عمدتاً از نوع دستگاه-های مکانیکی و الکترومکانیکی هستند. این دستگاه‌ها کاربردهای متعددی در مهندسی عمران دارند؛ از جمله اندازه‌گیری نشست خاک، همگرایی دیواره‌ها، کرنش و تغییرات نسبی طول، جدایی لایه‌های اطراف تونل‌ها، پایداری شیب و حرکات فونداسیون سازه‌ها. این دستگاه‌ها ممکن است با اسامیExtensometer، Strainmeter، Convergencemeter یا Fishermeter نامگذاری شده باشند، ولی به‌طور کلی می‌توان آنها را دستگاه‌های اندازه‌گیری تغییرات طول نامید. بعضی از کاربردهای دستگاه‌های کرنش‌سنج شامل اندازه گیری نشست، جابجایی و تغییر شکل درتونل‌ها، معادن روباز، سازه سدها، معادن زیرزمینی، خاکبرداری در احجام بزرگ و کنترل سازه‌های بزرگ مهندسی است که در شکل ۱ نمایش داده شده است. وجه تمایز این دستگاهها یا در روش اتصال نقاط به هم و یا در نوع سنسورهای مورد استفاده است. اتصال در بیشتر دستگاه‌ها مکانیکی و با استفاده از سیم، لوله یا میله فلزی می‌باشد. سنسورها یااز نوع مکانیکی (مثل پرگارهای اندازه گیری یا صفحات مدرج) و یا از نوع الکترونیکی (مانند ترانسدیوسرها) می‌باشند.

نوع سوم دستگاههای مورد استفاده، اینترفرومترها می‌باشند که جزئیات آنها در بخش‌های بعدی ذکر خواهد شد.





شکل ۱: نمونه‌ای از اکستنسومتر نواری و نحوه بکارگیری آن در مقطعی از تونل

۲-۲- دستگاه کشش‌سنج سیمی و نواری

در این دستگاه‌ها از سیم‌های انوار و دستگاه‌های کششی ثابت استفاده شده که با استفاده از آنها می‌توان به دقت‌های ۰/۰۵ میلیمتریا بهتر برای طول‌های ۱ متر تا ۱۰۰ متر دست یافت. برای دقت‌های پایین‌تر می‌توان از سیم‌های فولادی بجای سیم انوار استفاده نمود.

با نصب یک Extensometer در جسم و اندازه‌گیری تغییرات طول ΔL نسبت به طول L $\left(\frac{\Delta L}{L}\right)$، فشار در جهت اندازه‌گیری شده به دست می‌آید. برای تعیین سنسور فشار کلی در یک مقطع (شامل فشارهای عادی و برشی) لازم است حداقل ۳ اکستنسومتر در سه جهت مختلف می‌بایست نصب گردند. نمونه‌هایی از این اکستنسومترها در شکل ۱ نمایش داده شده است.

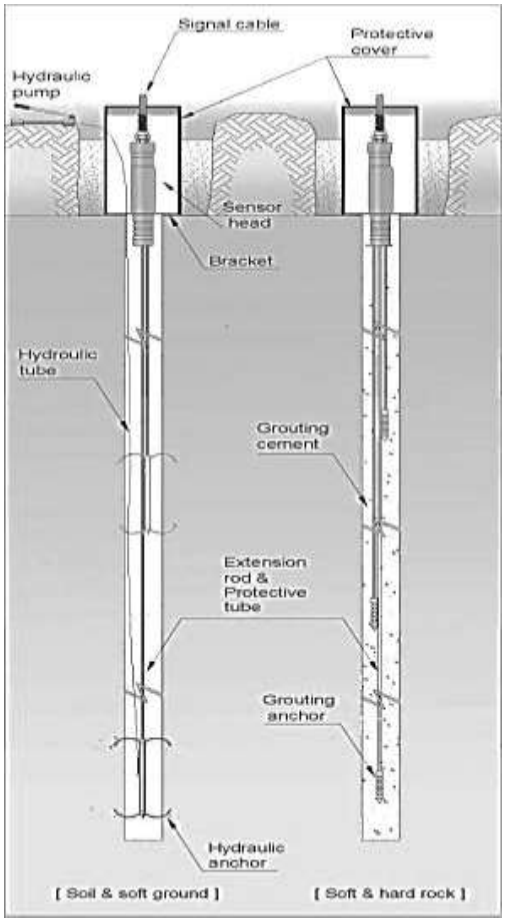
۲-۳-اکستنسومترهای میله‌ای و لوله‌ای

اکستنسومترهای میله‌ای به دو نوع تک‌نقطه‌ای (Single Point) و چند نقطه‌ای (Multiple Point) طبقه‌بندی می‌شوند. در این دستگاه‌ها میله‌هایی از جنس فولاد، انوار، آلومینیوم و فایبرگلاس با طول‌های مختلف به کار گرفته می‌شوند. اکستنسومترهای چند نقطه‌ای به دو صورت در چاههای گمانه مورد استفاده قرار می‌گیرند:

الف) با استفاده از میله‌هایی که به طور موازی در فواصل مختلف از دهانه قرار گرفته‌اند.

ب) به صورت یک رشته سیم با سنسورهایی که در اعماق مختلف نصب شده‌اند.

قدرت تفکیک و دقت این اکستنسومترها در حد ۰/۰۱ میلیمتر است که البته به تصحیحات درجه حرارت بستگی دارد. نمونه‌ای از این دستگاه‌ها در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲: اکستنسومتر میله‌ای

۲-۴-اندازه‌گیری اینترفرومتری (تداخل‌سنجی) و جابجایی‌های خطی

در این روش، از پرتو لیزر و پدیده تداخل سنجی امواج جهت اندازه‌گیری دقیق جابجایی‌های خطی استفاده می‌شود. پرتو لیزر ارسالی با طول موج λ پس از تفکیک به

دو پرتو S_1 و S_2 و با استفاده از دو آینه ثابت و متحرک تشکیل یک نمونه فریزهای تداخلی را می‌دهد. حرکت آینه متحرک به اندازه $\lambda/4$ باعث شیفت نمونه فوق به اندازه یک فریز می‌شود؛ بنابراین تغییر فاصله تا آینه متحرک به وسیله شمارش پی در پی فریزها محاسبه می‌گردد. حد تفکیک در این روش $10^{-4}\lambda$ می‌باشد که بستگی به دقت تعیین دانسیته هوا در طول مسیر اندازه‌گیری فاصله دارد. حداکثر برد عملی روش اینترفرومتری لیزری در هوای آزاد، ۱۰۰ متر است.

در نمونه‌های دیگری از دستگاه‌های اینترفرومتری لیزری، از دو سیگنال با فرکانس‌های f_1 و f_2 استفاده می‌شود. در این دستگاه‌ها، اندازه‌گیری جابجایی‌های خطی با استفاده از روش داپلر شیفت امکان پذیر است. با مشخص بودن فرکانس داپلر شیفت، سرعت حرکت رفلکتور و در نتیجه فاصله پیموده شده به وسیله رفلکتور، محاسبه می‌شود. مزیت اینترفرومترهای دو فرکانسه نسبت به نمونه‌های تک فرکانسه این است که تأثیر پذیری آنها از هوای آشفته کمتر است. در بعضی از مدل‌های اینترفرومترهای لیزری، اندازه‌گیری پیچش زاویه‌ای با دقت ۰/۱ ثانیه نیز امکان‌پذیر است[۲].

۳- اندازه‌گیری تیلت و شیب

۳-۱- تیلت‌مترها و شیب‌سنج‌ها

منظور از اندازه‌گیری تیلت، تعیین انحراف از سطح افق است؛ در حالی که شیب به انحراف از امتداد قائم تعبیر می‌شود؛ بنابراین تیلت و شیب را می‌توان با یک دستگاه اندازه گرفت. از نظر اصول کار، تیلت‌مترها به گروه‌های زیر طبقه بندی می‌شوند:

- نوع مایع (شامل حباب الکلی)
- نوع پاندول قائم
- نوع پاندول افقی

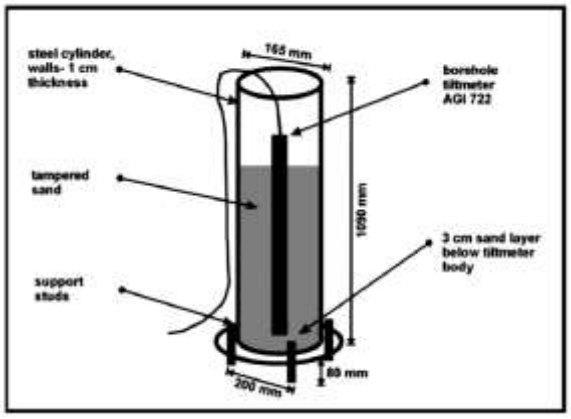
از نظر حساسیت و دقت، تیلت‌مترها به گروه‌های زیر طبقه بندی می‌شوند:

الف) تیلت‌مترهای ویژه ژئودتیکی یا ژئوفیزیکی با قدرت تفکیک 10^{-8} تا 10^{-9} رادیان

ب) تیلت‌مترهای مهندسی با قدرت تفکیک ۰/۱ ثانیه تا چند ده ثانیه (بسته به دامنه تغییرات تیلت)

گروه الف شامل دستگاه‌هایی است که بیشتر برای مطالعات ژئوفیزیکی پدیده جزر و مد زمین و حرکات تکتونیکی استفاده می‌شوند. یکی از کاربردهای مهم این نوع دستگاه‌ها، اندازه‌گیری جابجایی حاصل از حفاری‌های زیرزمینی، جهت ذخیره‌سازی زباله‌های هسته‌ای است. در نمونه‌های پیشرفته این دستگاه‌ها، قدرت تفکیک 10^{-9} رادیان قابل دسترسی بوده که متناسب با جابجایی قائم نسبی 6×10^{-7} mm در طول مبنای ۵۸۷ میلی متر می‌باشد. در تیلت‌مترهای الکترونیکی، حرکات پاندول (افقی یا قائم) (که در اثر نیروی جاذبه در جهت تیلت حرکت می‌کند) به وسیله سنسورهای موقعیت به یک سیگنال ورودی برای آمپلی فایر الکترونیکی تبدیل شده و جریان خروجی به یک موتور دورانی اعمال می‌شود. گشتاور تولید شده توسط موتور متناسب با سینوس زاویه تیلت است.

دقت تیلت‌مترها تا حدود زیادی به تغییرات درجه حرارت بستگی دارد؛ زیرا می‌تواند باعث تغییر ابعاد اجزای مکانیکی تیلت‌مترها، تغییر ویسکوزیته مایع (در تیلت‌مترهای الکترولیتی)، تغییر رطوبت روغن (در تیلت مترهای پاندولی) و هم چنین تغییر خصوصیات الکتریکی گردد.



شکل ۳: نحوه قرارگیری و نصب تیلت‌متر در سیلندر استوانه‌ای و پر کردن سیلندر از ماسه

تیلت مترها کاربردهای وسیعی دارند؛ به عنوان نمونه می‌توان با نصب یک سری تیلت‌متر در امتداد یک پروفیل از یک معدن، تیلت سنجی را جایگزین ترازیابی ژئودتیکی برای تعیین نشست زمین کرد. هم چنین جابجایی سازه‌های بلند را می‌توان با نصب تیلت متر در سطوح مختلف سازه تعیین کرد. در مهندسی ژئوتکنیک از تیلت‌مترها در مطالعات پایداری شیب و سدهای خاکی استفاده می‌شود. به این منظور، از شیب سنج‌های دو محوری جهت اسکن کردن چاه‌های گمانه، استفاده می‌شود.

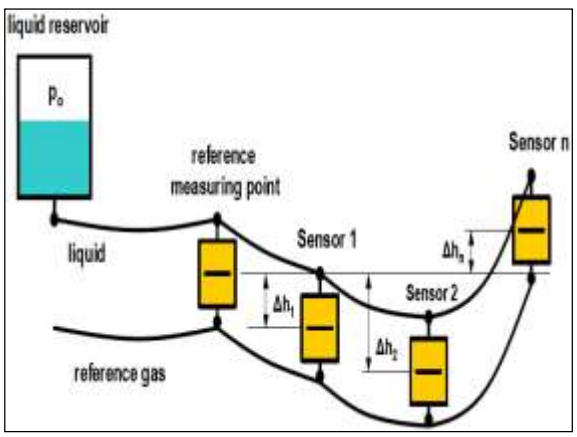
با پایین آوردن شیب سنج (به وسیله یک کابل) و قرائت شیب سنج در ارتفاعات مختلف، یک مقطع (پروفیل) کامل از چاه گمانه ترسیم می‌شود. با انجام نقشه برداری‌های تکراری می‌توان تغییرات چاه گمانه را بررسی کرد.

۳-۲- ترازیابی هیدرواستاتیکی

در این روش، چنان چه دو ظرف با یک مایع ارتباط داده شوند و ارتفاع مایع‌ها در دو ظرف برابر با h_1 و h_2 باشد، فرمول هیدرواستاتیکی عبارت است از:

$$h_1 + \frac{P_1}{(g_1\rho_1)} = h_2 + \frac{P_2}{(g_2\rho_2)} = Constant \qquad (۱)$$

در این رابطه P فشار بارومتری، g شتاب ثقل و ρ چگالی مایع می‌باشد (شکل ۴). درجه حرارت مایع باید ثابت نگهداشته شود ؛زیرا تغییر دمای مایع به اندازه ۱/۲ درجه منجر به بروز خطای ۰/۰۵ میلیمتر در اختلاف ارتفاع تعیین شده می‌شود. در بعضی از مدل‌های ترازیاب‌های هیدرواستاتیکی، از یک سوزن متحرک استفاده شده که تماس نوک سوزن با سطح بالایی مایع ،باعث بسته شدن مدار جریان الکتریکی می‌گردد. در مدل‌های دیگر، از ترانسدیوسرهای القایی استفاده شده است که حرکات بالا و پایین شناور را به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل می‌کند. با توجه به محدودیت دستگاه‌های اندازه‌گیری مستقیم سطوح مایع از نظر ارتفاع ظرف، می‌توان به جای اندازه‌گیری تغییرات ارتفاعی سطوح آب از اندازه‌گیری فشار مایع استفاده نمود. نقاط اندازه‌گیری از طریق رابط و شیلنگ به نقطه مبنا (مخزن مایع) متصل شده و تغییرات فشار اندازه-گیری شده با استفاده از رابطه فوق به تغییر ارتفاع تبدیل می‌شود. با توجه به ابعاد کوچک این تجهیزات، امکان نصب آنها در گالری‌های باریک و کم عرض نیز وجود دارد[۳].



شکل ۴: اصول ترازیابی هیدرواستاتیک

۳-۳- شاقول‌های معلق و وارونه

دو نوع از شاقول‌های مکانیکی جهت کنترل سازه‌ها در امتداد قائم مورد استفاده قرار می‌گیرند:

۱. شاقول وارونه

۲. شاقول شناور که معکوس نیز نامیده می‌شود.

کاربرد عمده این شاقول‌ها در کنترل سدها و نیروگاه‌های سدها و کنترل ثبات پیلارهای مرجع نقشه برداری است. شاقول‌های معلق معمولاً در کارهای نقشه برداری به منظور تعیین جهت در معدن و کنترل ثبات بدنه معدن استفاده می‌شوند. استفاده از شاقول‌های شناور در سدهای بزرگ رایج بوده و مزیت آنها بر شاقول‌های معلق این است که امکان کنترل مطلق جابجایی‌های سازه‌ها به کمک نقاطی که در بدنه سنگی سازه مورد نظر ثابت شده‌اند، وجود دارد. این نقاط ثابت می‌بایست در اعماق فونداسیون (پی) سازه (۳۰ متر یا بیشتر پایین‌تر از فونداسیون) قرار داشته باشند تا بتوان آنها را ثابت در نظر گرفت و لذا مشکل اصلی در مورد شاقول‌های شناور، حفر چاه‌های گمانه قائم است؛ به گونه‌ای که سیستم شاقول آزادی حرکت داشته باشد.

جابجایی‌های اندازه‌گیری شده توسط شاقول‌های قائم را می‌توان از طریق دستگاه‌های ثبت مختلف از جمله میکرومترهای مکانیکی یا الکترومکانیکی و یا میکروسکوپ‌های متحرک ثبت نمود. دقت این دستگاه‌ها در حدود ۰/۲mm ± یا بهتر است. در نمونه‌های دیگر، از دوربین‌های الکترونیکی ثابت به منظور کنترل حرکات شاقول با قدرت تفکیک حدود ۳ میکرومتر استفاده شده است که نمونه این سیستم در سد Monticello در حوالی کالیفرنیا کار گذاشته شده است.

دو منبع خطا ممکن است بر روی اندازه‌گیری‌های‌شاقولی تأثیر بگذارند که عبارت از تأثیر جریان‌های هوا و شکل مارپیچی سیم می‌باشند.

۴- روش‌های امتدادی

۴-۱- اظهارات عمومی

تعیین امتدادهای دقیق در نقشه برداری، کاربردهای بسیار زیادی علی‌الخصوص در نقشه‌برداری‌های صنعتی دارند. در روش‌های امتدادی برای تعیین جابجایی سازه‌های مهندسی، از اندازه‌گیری تغییرات فاصله (افست) نقاط مشخصی از سازه نسبت به امتداد خط مرجع استفاده

می‌شود. امتدادهای نقشه برداری بر اساس روش ایجاد خط مرجع به گروه‌های زیر طبقه بندی می‌شوند:

۱. روش‌های ژئودتیکی که خط مرجع آنها از طریق مختصات دو نقطه مرجع در دو سر امتداد تعریف می‌شود.
۲. روش‌های مکانیکی که خط مرجع آنها به وسیله سیم کشیده شده (از جنس فولاد، نایلون و غیره) ایجاد می‌گردد.
۳. روش نوری مستقیم که خط دید آنها به وسیله وسایل نوری یا لیزر ایجاد می‌شود.
۴. روش تفرق که خط مرجع آنها به صورت یک سری شکاف‌ها و از طریق پدیده تفرق ایجاد می‌گردد.

یکی از معایب روش‌های نوری مستقیم و تفرق ،این است که همانند سایر روش‌های نقشه برداری که بر مبنای استفاده از سیستم‌های اپتیکی کار می‌کنند، این روش‌ها نیز تحت تأثیر انکسار اتمسفری قرار می‌گیرند. تأثیر انکسار جانبی در هوای آزاد و در مؤلفه افقی خیلی کمتر از مؤلفه قائم است. به عنوان مثال، در کاربردهای صنعتی، هنگامی‌که روش امتداد گذاری را برای یک نیروگاه برق آبی (هیدروالکتریک) استفاده می‌کنیم، گرمای حاصل از ژنراتور ممکن است باعث تغییرات شدید درجه حرارت در عرض خط مرجع (رفرانس) نوری و در نتیجه انحراف امتداد مبنا گردد. اگر تغییرات درجه حرارت در طول مسیر امتداد گذاری را با $\frac{dT}{\mathrm{dy}}$ نمایش دهیم، بیشترین خطای امتداد گذاری از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta y_{\max} = S^2\, P \left(\frac{dT}{dy}\right) {}^{10^{-5}}\!/_{T^2} \qquad (۲)$$

که در این رابطه، P فشار بارومتریک $(mbar)$، T درجه حرارت $(^{\circ}k)$ و $\frac{dT}{\mathrm{dy}}$ بر حسب $^{\circ}c/m$ می‌باشد.

روش‌های مکانیکی گرچه تحت تأثیر انکسار قرار نمی‌گیرند؛ ولی ممکن است شرایط محیطی دیگر از جمله جریان هوا و شکل مارپیچی سیم آنها را تحت تأثیر قرار دهند. بنابراین، انتخاب روش امتداد گذاری مناسب نیاز به تجزیه و تحلیل و آنالیز دقیق شرایط محیطی دارد[۵].

۴-۲-روش‌های مکانیکی

در این روش‌ها، خط مرجع به صورت یک سیم کشیده شده بین دو نقطه است و به علت سادگی، دقت بالا و انطباق ساده جهت کنترل مداوم جابجایی‌ها در فواصل بالای چند صد متر مورد استفاده قرار می‌گیرند. فواصل نقاط میانی از خط مرجع (افست) با استفاده از سنسورهای القایی الکتریکی اندازه‌گیری می‌شوند. هم چنین، به منظور جلوگیری از حرکات ارتعاشی سیم، از یک شناور قرار داده شده در روغن استفاده می‌شود. برای ایجاد خط مرجع می‌توان از سیم فولادی یا نایلون (با قطرهای ۰/۲ تا ۱ میلیمتر) استفاده نمود. دقت‌هایی در حد mm ۰/۱ ± با استفاده از این روش قابل دست یابی بوده و رسیدن به دقت‌هایی در حد ۰/۰۵ میلیمتر برای فواصل زیر صد متر در شرایط جوی آرام با استفاده از نخ نایلونی و میکروسکوپ و میکرومتر امکان پذیر است. این نوع وسایل در گالری سدها و دیگر سازه‌های بزرگ مهندسی و مراکز تحقیقات هسته-ای، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۴-۳-روش امتدادگذاری مستقیم نوری

در این روش، از تلسکوپ نوری و تارگت‌های متحرک و یا از یک منبع مولد اشعه لیزر و تارگت‌های فتو سنترینگ متحرک استفاده می‌شود. عوامل ایجاد خطا در این روش شامل انکسار جوی، خطای نشانه روی و خطای متمرکز کردن (*Focousing*) می‌باشند. میزان خطای نشانه‌روی با استفاده از تارگت‌های مناسب بین $15''/M$ (در شرایط جوی آرام در شب) تا $60''/M$ (در شرایط جوی نا آرام در روز) می‌باشد (M بزرگ نمایی تلسکوپ است). خطای متمرکز کردن در صورتی که نقشه برداری به صورت دو طرفه در دو انتهای امتدادگذاری صورت پذیرد، حذف می‌شود. تلسکوپ‌های مورد استفاده دارای بزرگنمایی بالا (تا X۱۰۰) هستند.

چنان چه به جای خط دید نوری از اشعه لیزر و آشکار سازهای لیزر (از نوع *Self Centering*) استفاده شود، دقت نشانه روی به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. در این حالت، جمع‌آوری پیوسته اطلاعات امکان‌پذیر می‌باشد؛ به شرطی که ثبات منبع تولید کننده لیزر تضمین گردد[۴].

۴-۴- امتدادگذاری با استفاده از شبکه‌های پراش

در این روش، روزنه نور (دیافراگم) لیزر تک رنگ، مرکز صفحه پراش و مرکز نوری (سنسور فتو الکتریک) سه نقطه اصلی امتداد می‌باشند. اگر دو نقطه از سه نقطه فوق در جایشان ثابت باشند، نقطه سوم را می‌توان به کمک متمرکز نمودن مدل تداخل امواج (که به وسیله شبکه‌های پراش به وجود می‌آید) بر روی صفحه رتیکول ثابت نمود. در این

روش، لیزر فقط به عنوان یک منبع نور تک‌رنگ و نه به عنوان خط مبنا مورد استفاده قرار می‌گیرد؛لذا حرکت‌های لیزر و خروجی آن ، تأثیری بر دقت روش امتداد گذاری ندارند و از هر نوع لیزر می‌توان در این روش استفاده کرد. عموماً دو نوع شبکه‌های پراش مورد استفاده قرار می‌گیرند:

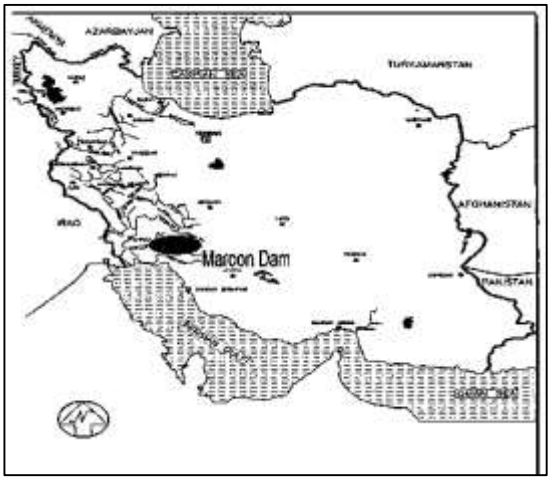
- شبکه‌های دایره‌ای شکل متحدالمرکز متساوی‌الفاصله (برای مقاصد تجاری)؛
- صفحات فرسنل.

شبکه‌های دایره‌ای شکل، صفحه پراش فریزهای تداخلی تولید می‌کند که به وسیله یک تلسکوپ مجهز شده به تار رتیکول دایره‌ای شکل مشاهده می‌شود و دقت‌های 10^{-6} را نتیجه می‌دهد. یکی از معایب این روش، تشخیص مرکز فریزهای تداخلی در فواصل بلند و در هوای آشفته است که در نتیجه آن، ماکزیمم فاصله قابل اندازه‌گیری در هوای آزاد ۱۰۰ متر می‌باشد. در مورد صفحات فرسنل باید بدانیم، تصویری که توسط این صفحات تشکیل می‌شود، دارای یک نقطه خیلی روشن در مرکز با نوارهای خیلی کم رنگ در اطراف آن است. این روش برای فواصل بلند دقت بالای 10^{-7} را در خلأ نتیجه می‌دهد. هم چنین، آشفتگی گرمایی هوا در این روش ،تأثیر کمتری نسبت به حالت امتداد گذاری نوری دارد[۶].

۵- سد مخزنی مارون

۵-۱- معرفی

سد مخزنی مارون، بر روی رودخانه مارون در فاصله ۱۹ کیلومتری شمال شرق بهبهان احداث گردیده است. این سد از نوع سنگریزه‌ای شنی با هسته رسی به ظرفیت مخزن ۱/۲ میلیارد متر مکعب در دسته سدهای بزرگ قرار می‌گیرد و هدف از اجرای آن تأمین آب مورد نیاز کشاورزی جهت آبیاری حدود ۵۵۰۰۰ هکتار از اراضی پایین دست سد از طریق تنظیم جریان آب رودخانه مارون و همچنین کنترل سیلاب و بهره‌گیری جهت تولید انرژی برق آبی است. با توجه به روند رو به گسترش ساخت سدهای خاکی در کشور در ساله ای اخیر و همچنین وضعیت بالای لرزه خیزی کشور، ضروری است که رفتار و حرکات این گونه سدها در طول زمان و در اثر نیروهای تکتونیکی و غیرتکتونیکی بررسی شده و اقدامات لازم برای جلوگیری از حوادث احتمالی به عمل آید. در همین راستا و به منظور رفتار نگاری بدنه سد در طول دوره بهره برداری، مشاهدات دوره‌ای به منظور کنترل حرکات انجام گرفته است که شامل چند مرحله نقشه برداری‌های میکروژئودزی و نیز قرائت ابزار دقیق نصب شده در داخل بدنه سد بوده است.



شکل ۵: سایت پلان سد مخزنی مارون

۵-۲- مشاهدات میکروژئودزی

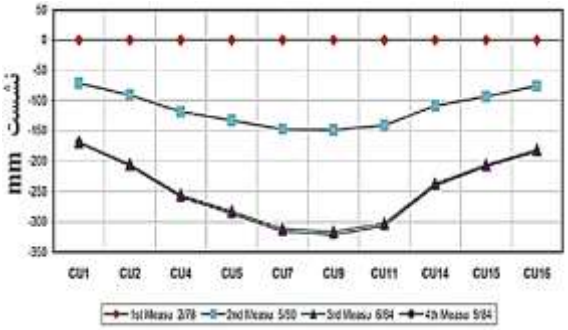
در جدول ۱ خلاصه‌ای از مراحل انجام نقشه‌برداری‌های میکروژئودزی سد ارائه شده است. همان گونه که از جدول پیداست، روال انجام اندازه‌گیری‌های میکروژئودزی منظم نبوده، در حالی که می‌بایست برای چنین سد جوانی بیشینه فاصله زمانی یک ساله برای اندازه‌گیری‌ها در نظر گرفته می‌شد. بر اساس نتایج اندازه‌گیری‌ها، بیشینه نشست در مقایسه با اولین اندازه گیری در سال ۱۳۷۸ بعد از ساخت در میانه تاج سد به میزان ۳۲۰ میلی متر رخ داده در حالی که هیچ تغییر شکل قائمی‌برای سرریز رخ نداده است. بیشینه جابجایی افقی بین سال‌های ۷۸ تا ۸۴ به حدود ۱۰۰ میلی متر مربوط به نقطه *U151* واقع شده در مرکز سد می‌باشد.

جدول ۱: نقشه برداری‌های میکروژئودزی سد مارون

عملیات	تاریخ شمسی	تراز مخزن
۱	۱۳۷۸/۸/۲	۳۸۹/۱
۲	۱۳۸۰/۵/۴	۴۳۸/۲
۳	۱۳۸۴/۶/۱۵	۴۹۰/۸
۴	۱۳۸۴/۹	۴۷۶/۳
۵	۱۳۸۵/۳	۵۰۷

تغییر شکل‌های افقی سرریز بسیار کم‌تر از بدنه سد بوده و به جز یک نقطه با بیشینه جابه جایی افقی ۱۰ میلی متر

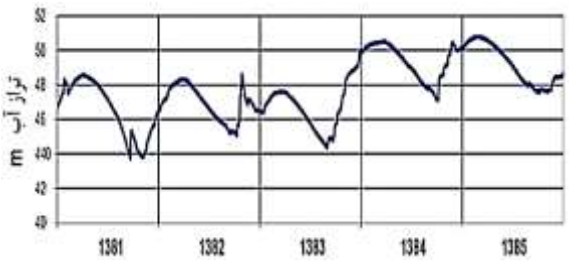
در سرریز، جابه جایی سایر نقاط عمدتاً در محدوده بیضی خطا باقی مانده است. تغییرات نشست تاج سد با استفاده از مشاهدات ترازیابی دقیق در بازه زمانی بین سال‌های ۷۸ تا ۸۴ در شکل ۶ آمده است.



شکل ۶: جابجایی قائم (نشست) تاج سد

۵-۳ رفتارنگاری بدنه سد

در طول دوره قرائت بین سال‌های ۱۳۸۲ الی ۱۳۸۶ قرائت ابزارهای نصب شده در بدنه سد از جمله پیزومترهای الکتریکی، لوله‌ای و سنگ پی، همچنین سلول‌های اندازه‌گیری فشار کل خاک و نشست سنج‌ها و کشیدگی سنج‌ها انجام شده که در زیر به خلاصه‌ای از نتایج به دست آمده اشاره می‌شود. تغییرات سالیانه تراز آب مخزن نیز از سال ۷۸ تا ۸۵ اندازه گیری شده که الگویی مشابه سال‌های قبل و تابع تغییرات فصلی را نشان می‌دهد. شکل ۷ تغییرات تراز مخزن را در بازه زمانی سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۵ نمایش می‌دهد[۷ و ۸].



شکل ۷: تغییرات تراز آب مخزن بین سال‌های ۸۱ تا ۸۵

۵-۳-۱ نشست‌سنج‌ها

تعداد ۱۳ انحراف - نشست سنج نصب شده در بدنـه سد شامل لوله‌های p.v.c سه متری با اتصالات تلسکوپی بوده که در دو جهت عمود بر هم جهت هدایت اژدر انحراف سنج شیارداده شده و جهت یکی از این شیارها در طول سد است. همچنین صفحات مغناطیسی در تـرازهای مختلف خاکریزی اطراف لوله قرار گرفته که از تغییرات تـراز آن جهت نشست‌سنجی استفاده می‌شود. حد مجاز تغییرات انحراف سنج در جهت بالادست - پایین دست (۵+) تا (۵-) است که ٪ ۹۳/۵ از کل قرائت‌های ابزار را شامل می‌شود. تفسیر این روند رفتاری بدین شرح است که با شروع خاکریزی و رسیدن به تراز سر لوله‌های نشست سنج، در اثر بارگذاری و تراکم ناشی از آن پوسته سد نشست کرده و جابجایی قائم به صورت نشست دیده می‌شود. بیش از ٪۷۵ نشست کل ایجاد شده از شروع خاکریزی بدنه سد تا آخرین قرائت‌ها در زمان ساخت بدنه سد به وجود آمده است. این امر بیانگر این واقعیت است که اصلی‌ترین بارهای وارده بر بدنه سد بارگذاری ناشی از خاکریزی در زمان ساخت بوده است و بارگذاری بعدی یعنی آبگیری سد اثر کمتری داشته است.

۵-۳-۲- کرنش سنج‌ها

در مورد نتایج حاصل از اندازه‌گیری تغییرات طول با استفاده از کرنش سنج‌ها، به طور کلی تغییرات کرنش ناچیز بوده و بیشینه مقدار آن مربوط به یکی از نقاط به میزان ۰/۰۵ میلی متر می‌باشد. با توجه به تغییرات کرنش در جهت میانه سد و کشش در جهت تکیه گاه‌های سد، تغییر شکل فرورفته بدنه سد ایجاد می‌شود که مقدار کلی آن بسیار کوچک است. با مقایسه اندازه‌گیری‌های میکروژئودزی و کرنش سنج‌ها، ملاحظه می‌شود که نتایج با یکدیگر سازگار بوده و نشست اندک بدنه سد را طی سال‌های گذشته نشان می‌دهند. با توجه به اینکه اکثر انحراف سنج‌های بدنه سد از کار افتاده و تعمیر یا جایگزینی آنها امکان پذیر نمی‌باشد (در بدنه سد نصب شده‌اند)، لذا مقایسه‌ای بین اندازه‌گیری‌های میکروژئودزی و انحراف سنج‌ها انجام نشده است.

شکل ۸: نحوه کارگذاری کرنش سنج‌ها در بدنه سد

۵-۳-۳-پیزومترها

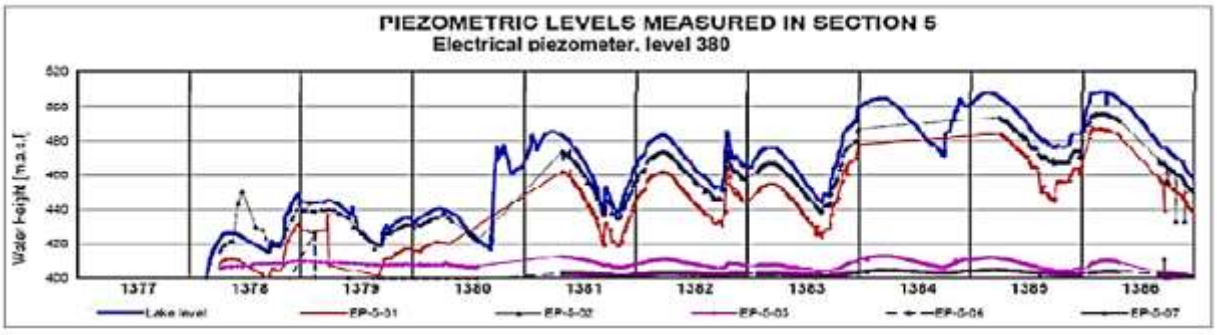
داده‌های فشار آب منفذی اندازه‌گیری شده توسط پیزومترها به صورت تراز آب برداشت شده مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است .فشار آب اندازه گرفته شده تبدیل به ارتفاع معادل ستون آب شده است و سپس به ارتفاع قرارگیری ابزار دقیق اضافه گردیده است. پیزومترهای واقع در بالای تراز آب، ارتفاع قرارگیری خودشان را نشان می‌دهند؛ زیرا فشار آب صفر است که در برخی موارد می‌تواند چالش برانگیز باشد. دو نوع پیزومتر در ساختمان سد نصب گردیده است:

پیزومترهای الکتریکی که فقط در هسته رسی استفاده شده‌اند.

پیزومترهای لوله‌ای که در هسته رسی، بدنه سد و پی نصب شده‌اند.

در بدنه و پی سد مجموعاً تعداد ۳۳ عدد پیزومتر لوله‌ای قائم (*SP*) در ۱۹ محل نصب شده است.پیزومترهای الکتریکی الگویی با تغییرات جزیی ناشی از نوسانات فصلی تراز مخزن را نشان می‌دهند. پیزومترهای واقع در بالادست هسته، فشار آب منفذی بیشتر و تغییرات فصلی بارزتر ناشی از تغییرات تراز مخزن را در قیاس با پیزومترهای واقع در پایین دست هسته نشان می‌دهند. این موضوع نشان دهنده کارکرد مناسب هسته رسی می‌باشد. به طور کلی، پیزومترهای الکتریکی مقادیر پایداری را نشان می دهد که تغییرات ناگهانی در اندازه‌گیری‌های آن‌ها به چشم نمی‌خورد. هیچ فشارمنفذی چشم گیری در هسته به چشم نمی‌خورد و رس تحکیم یافته است. بنابر این با استفاده از قرائت‌های پیزومترهای الکتریکی نشانه‌ای از کارکرد معیوب هسته به چشم نمی‌خورد. غالباً پیزومترها متناسب با تغییرات فصلی و به صورت تابعی از تراز آب مخزن، رفتار پایدار و منظمی از خود نشان می‌دهند. در بالادست هسته، پیزومترها تغییرات فصلی بارزتر تراز آب مخزن را در مقایسه با پیزومترهای پایین دست که دارای ترازهای آب نسبتاً ثابتی هستند، نشان می‌دهند. هیچ پیزومتری در پنجه سد و یا در زیر سرریز به منظور بررسی این که آیا فشار برکنش در برخی از بخش‌های سد مشکل‌ساز می‌شود یا خیر، نصب نشده است. به‌علاوه ابزار بیشتری در مناطقی که بالقوه مشکل‌ساز هستند، نیاز می‌باشد تا بتوان در مورد فشار برکنش اظهار نظر نمود.

شکل ۹: نصب پیزومتر لوله‌ای قائم



شکل ۱۰: تغییرات تراز پیزومتری رقوم اندازه‌گیری پیزومترها در مقطع ۵

۶- نتیجه‌گیری

تصمیم‌گیری در مورد اینکه کدام یک از دستگاه‌های فوق الذکر در اندازه‌گیری‌ها به‌کار گرفته شده و در کدام نقطه از جسم تغییر شکل پذیر جایگذاری و نصب گردند، می‌بایست توسط افراد متخصص انجام پذیرد که به هر دو روش ژئودتیکی و ژئوتکنیکی آشنا بوده و شناخت خوبی از رفتار جسم تغییر شکل پذیر داشته باشند. قطعاً این کار نیاز به تجزیه و تحلیل اولیه و بهینه سازی طرح مورد نظر داشته تا بهترین ترکیب ممکن از وسایل اندازه‌گیری مورد استفاده قرار گیرد. امروزه امکان ترکیب نتایج حاصل از اندازه‌گیری های ژئودتیکی و ژئوتکنیکی در یک آنالیز همزمان جابجایی فراهم است. با توجه به دقت بالای اندازه‌گیری‌های غیر ژئودتیکی و نیز امکان انجام بسیاری از این مشاهدات در نقاطی از سازه که نقشه‌برداری‌های ژئودتیکی امکان پذیر نمی‌باشند، می‌توان با ترکیب نتایج دو سری اندازه گیری با اطمینان بیشتری در مورد رفتار جابجایی سازه اظهار نظر نمود. با توجه به مشاهدات انجام شده و نتایج حاصله، به نظر می‌رسد که سد در وضعیت مناسبی به سر برده و رفتار کلی متعارف و پایداری دارد. با این حال، نظر به خرابی و یا از بین رفتن بخش بزرگی از تجهیزات ابزار دقیق سد، امکان انجام مشاهدات و ارزیابی نتایج و مقایسه آنها با سایر روش‌های ژئودتیکی وجود ندارد. لذا ارزیابی دقیق نتایج نیاز به بازبینی و کالیبراسیون دستگاه‌ها دارد تا بتوان با قاطعیت در مورد جابجایی‌های احتمالی مشاهده شده نظر خود را بیان نمود و در صورت نیاز اقدامات لازم برای حفاظت از بدنه سد را بعمل آورد. متأسفانه تصمیم‌گیری در مورد انجام نقشه‌برداری‌های جابجایی، زمانی انجام می‌پذیرد که اتفاق خطرناکی به وقوع پیوسته باشد و در چنین شرایطی، نقاطی که بتوان به عنوان مبنا به آنها اتکا نمود، به ندرت یافت می‌شوند. بدیهی است در این شرایط، انجام اصولی یک نقشه‌برداری جابجایی با وجود استفاده از تجهیزات دقیق و گران قیمت غیر ممکن می‌باشد.

تشکر و قدردانی

لازم می‌دانم از همکاری‌های کارشناسان محترم سد مارون علی‌الخصوص آقای مهندس کریمی‌بهبهانی مدیر محترم بخش ابزار دقیق سد، آقای مهندس شهرویی کارشناس بخش و نیز آقای مهندس کوشا کارشناس بخش میکروژئودزی که اطلاعات لازم را در اختیار بنده گذاشتند، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم.

مراجع

[1] Xiaoye He, *Zuping Liu, Some Experiments on a New Hydrostatic Levelling System Developed for Bepcii,* IWAA2004, CERN, Geneva, 4-7 October **2004**.

[2] National Synchrotron Radiation Laboratory, USTC, Hefei, PRC, **2009.**

[3] Shigeru Takeda, KEK, Tsukuba-shi, *Development of New Hydrostatic Levelling Equipment for Large Next Generation Accelerator*, Proceedings of EPAC 2004, Lucerne, Switzerland, **2004**

[4] Tape Extensometer, a Document from *SLOPE INDICATOR* Co. Website: www.slopeindicator.com, **2009**.

[5] Digital Inclinometer Probe, a Document from *SLOPE INDICATOR* Co. Website: www.slopeindicator.com, **2009**.

[6] Hydrostatic leveling system using pressure measurement for the continuous monitoring of changes in height of buildings, a Document from *SLOPE INDICATOR* Co. Website: www.slopeindicator.com, **2009**.

[۷] گزارش سالانه شرکت اشتوکی پارس سال‌های۸۴، ۸۵ و ۸۶ مربوط به اندازه گیری تجهیزات ابزار دقیق.

[۸] گزارش مشاهدات میکروژئودزی سال‌های ۷۸، ۸۰، ۸۴ و ۸۵ شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس.