

تهیه راهبردی (استراتژی) جهت انجام تکرارهای ترازیبی دقیق به صورت محلی برای مقاصد ژئودینامیک ارتقاعی و جایگزینی آن با روند موجود در ایران

نویسندگان:

دکتر مسعود مشهدی حسینی

عضو هیات علمی دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

hossainali@kntu.ac.ir

دکتر یحیی جمشور

عضو هیات علمی آموزشکده نقشه برداری، سازمان نقشه برداری کشور

djamour@ncc.org.ir

مهندس یعقوب حاتم چوری

کارشناس ترازیبی اداره کل نقشه برداری زمینی، سازمان نقشه برداری کشور

yaghouhatam@yahoo.com

پروفسور پیتر ونیچک

استاد دانشگاه نیو برانزویک کانادا

vanicek@unb.ca

دکتر حمید نظری

معاون پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین شناسی کشور

nazari@yahoo.com

مهندس معصومه آمیغ پی

کارشناس ترازیبی اداره کل نقشه برداری زمینی، سازمان نقشه برداری کشور

amighp@ncc.org.ir

چکیده

روشن است که بایستی مشاهدات بسیار کند و پرهزینه ترازیبی دقیق را برای مقاصد ژئودینامیک ارتقاعی به صورت قطره چکانی و بر حسب ضرورت به مصرف رساند. یعنی نخست بایستی تخمینی از خصوصیات اصلی تغییرات ارتقاعی موجود در یک منطقه را داشته باشیم و سپس بالحاظ این خصوصیات به انجام مشاهدات تکراری ترازیبی دقیق مبادرت نماییم. دست یافتن به اطلاعات اولیه و شناسایی محدوده‌هایی با تغییرات ارتقاعی، قبل از انجام مشاهدات تکراری ترازیبی دقیق، کاری ممکن است و هدف اصلی این تحقیق می‌باشد. از داده‌های مختلف مربوط به زمین شناسی، ژئوفیزیک، لرزه نگاری، ژئودزی و تراکم جمعیت جهت ساخت استراتژی مورد بحث استفاده شده است.

۱. مقدمه

زمین نظیر ژئودزی، زمین شناسی، ژئوفیزیک و سازه‌های مهندسی طی دهه‌های متمادی و حتی بیشتر در این کشورها بسیار علم مدار و در نتیجه درخشان بوده است، و نتایج ارزشمند حاصل از کارهای علمی زیربنایی و مستمر این علوم به انحای مختلف وارد زندگی انسان‌ها شده و حیات آنها را ایمن نموده است. این در

جانی چند ده هزار نفری زلزله‌های بم و رودبار و موارد دیگر هنوز از خاطرها نرفته‌اند. این در حالیست که زلزله‌های با شدت‌های یکسان و حتی بیشتر در جاهای دیگر دنیا مثل ژاپن به سختی به تعداد انگشتان یک یا دو دست کشته می‌گیرد. دلیل روشن این تناقض غم‌انگیز این است که کارنامه فعالیت‌های علوم مختلف

ایران از نظر فعالیت‌های ژئودینامیکی و سوانح طبیعی نظیر زلزله، رانش، سیل، فرونشست، خشک‌سالی،... و تلفات انسانی و تخریب ساختمانی حاصل از آنها، بدون شک یکی از مخاطره‌آمیزترین کشورهای موجود در دنیا است. خسارات

گردآوری مشاهدات گنجانده شود. هدف در این بررسی، پرداختن به طور جدی به یکی از مهم ترین مشاهدات پایه ای فوق مشاهدات انجام تکرارهای ترازیبی دقیق است و به دیگر مشاهدات فقط اشاره خواهد شد.

۳. نحوه انجام تکرارهای ترازیبی دقیق در کشورهای مختلف دنیا

انجام مشاهدات تکراری ترازیبی دقیق، که به منظور مدل سازی تغییرات ارتفاعی سطح زمین صورت می گیرند، در کشورهای مختلف دنیا بر اساس شناخت اولیه از خصوصیات اصلی تغییرات ارتفاعی موجود و منشاء و اهمیت این تغییرات دنبال می گردد. در فرانسه که دارای ثلث مساحت ایران می باشد، مشاهدات ترازیبی دقیق قدمتی در حدود ۲۰۰ سال دارد و بیش از ۳۰۰ هزار کیلومتر ترازیبی دقیق برای مقاصد ایستا (تعیین موقعیت ارتفاعی) انجام شده و مشاهدات تکراری ترازیبی دقیق با این توجیه که در این کشور تغییرات ارتفاعی وجود ندارد، اصلا انجام نشده است (M.Casser,2008;H.Duqenne,2005).

در آمریکا تکرارهای ترازیبی دقیق به صورت کاملا محلی و گسسته، در هر کجا که شواهدی از تغییر وجود داشته، صورت گرفته است؛ مثل مدل سازی چهاربعدی مربوط به حرکات ارتفاعی اخیر در ناحیه بالا آمدگی کالیفرنیا جنوبی با منشاء فعالیت های گسل San Andreas

تفکیک حرکات ارتفاعی سطح زمین به حرکات خطی نسبت به زمان (همانند نشست کف اقیانوس ها، دریاها و رودخانه ها به دلیل بارهای رسوبی) و حرکات غیرخطی و شتاب دار (همانند تغییرات ارتفاعی قبل از وقوع زلزله به عنوان پیش نشانگرهای آن) در بررسی های علمی مختلف مفید خواهد بود.

داده های مختلف مورد استفاده در ژئودزی جهت تعیین حرکات ارتفاعی از ماهیت متفاوتی برخوردارند. این اطلاعات می تواند به صورت گسسته یا پیوسته نسبت به زمان، مطلق یا نسبی، و متعلق به یک نقطه یا یک خط یا یک سطح گردآوری شوند. همچنین داده های ذکر شده که از طیف متنوعی از دقت ها برخوردار هستند، می توانند به طور خاص برای هدف آشکارسازی و تعیین مقادیر حرکات ارتفاعی فراهم شوند، و یا برای مجموعه ای از اهداف تهیه گردند.

انواع مشاهدات پایه ای مختلف که برای تعیین حرکات ارتفاعی مناسب می باشند؛ عبارتند از:

- ۱- تکرارهای موقعیت ارتفاعی (ترازیابی دقیق، GPS، تصاویر InSAR)
- ۲- تغییرات سطح آب دریا
- ۳- تغییرات تیلت
- ۴- تغییرات ثقل.

بدیهی است که در یک مطالعه جامع برای مدل سازی تغییرات ارتفاعی، بایستی با توجه به ماهیت تغییرات ارتفاعی موجود در یک منطقه، نقش و سهم هر یک از مشاهدات پایه ای فوق به درستی تعیین شده و در روند

حالیست که در ایران هنوز هم مشکلات عدیده آزاردهنده به دلیل عدم انجام و یا انجام ناقص کارهای زیربنایی مختلف وجود دارد. در این رابطه، یکی از اندازه گیری های مهم در حیطه ژئودزی، مشاهدات تکرارهای ترازیبی دقیق است که به کمک آنها می توان تغییرات ارتفاعی پوسته زمین را در یک منطقه به طور نسبی تعیین نمود. ظهور فنون جدید نظیر GPS و InSAR سبب شدند تا در تعیین تغییرات ارتفاعی پوسته زمین، توانایی بیشتری به وجود آید. در این پژوهش، هدف، پیشنهاد یک استراتژی جدید و ارائه یک راه حل نو جهت بهینه سازی نحوه گردآوری مشاهدات تکراری ترازیبی دقیق برای مقاصد ژئودینامیک ارتفاعی در ایران است.

۲. معرفی انواع تغییرات ارتفاعی

تغییرات ارتفاعی پوسته زمین می تواند به طور مکانی پیوسته (همانند بالا آمدن سطح زمین در بخش وسیعی از دنیا به دلیل حذف (ذوب) بارهای یخی بعد از دوره یخبندان)، و یا گسسته (همانند لغزش و حرکت آرام دو صفحه تکتونیکی مجاور نسبت به هم) باشد. همچنین تغییرات ارتفاعی پوسته زمین به طور زمانی نیز می تواند پیوسته باشد (همانند فرونشست سطح زمین ناشی از استخراج آب های زیرزمینی) و یا ناپیوسته و ایزودیک (همانند حرکات سطح زمین به هنگام وقوع زلزله). از طرف دیگر،

شده است. دلیل اصلی تکرار مشاهدات ترازیبی دقیق از نظر سازمان نقشه برداری کشور دستیابی به یک شبکه ارتفاعی مطمئن تر با بهره گیری از تجارب تکرار اول و لحاظ نمودن یک سری اطلاعات اضافی مانند گرادینت تغییرات دمایی برای کاهش خطاهای سیستماتیک نظیر انکسار می باشد. آرایش مسیرهای این شبکه در سطح ایران در شکل ۱ به رنگ قرمز نمایش داده شده است (به همراه شبکه های درجات ۲ و ۳).

اشکال اصلی استراتژی در حال دنبال این است که بدون لحاظ هیچ گونه شناخت اولیه از ماهیت و سنخیت تغییرات ارتفاعی و خصوصیات مهم آن در ایران، نظیر محدوده تغییر، نرخ تغییر ارتفاعی، منشاء تغییر، میزان اهمیت این تغییرات، با توجه به تراکم جمعیت و وجود سازه های حساس و غیره؛ تصمیم گیری و اقدام به انجام مشاهدات تکراری ترازیبی دقیق به میزان بیش از ۳۰۰۰۰ کیلومتر در امتداد کل مسیرهای شبکه درجه یک ترازیبی دقیق ایران شده است. در احداث شبکه درجه یک، هیچ معیاری مبنی بر پوشش یا عدم پوشش مناطق دارای تغییرات ارتفاعی لحاظ نشده است. بنابراین مسیرهای مختلف ترازیبی دقیق درجه یک با پراکندگی در سطح ایران، مناطق مختلفی را که دارای تغییرات ارتفاعی یا عاری از این تغییرات اند، پوشش می دهد. منطقی نیست که مناطق بدون تغییرات ارتفاعی را دوباره مشاهده نماییم. از طرف دیگر، برای تکرار مناطق با تغییرات ارتفاعی، می بایست یک نسبت منطقی بین مدت زمان بین مشاهدات دو وهله زمانی، میزان تغییرات ارتفاعی، دقت مشاهدات ترازیبی

کیلومتر با فاصله زمانی بیش از ۴۰ سال بین هر دو اپک متوالی (با اپک های مرکزی ۱۹۰۲، ۱۹۴۶ و ۱۹۸۶) مدل سازی تغییرات ارتفاعی سطح زمین انجام شده و مقادیر بالآمدگی از ۲ تا ۸ میلی متر در سال برای مناطق مختلف فنلاند محاسبه شده است. (J. Makinen et al. 1998).

۴. معرفی استراتژی کنونی و در حال انجام تکرارهای ترازیبی دقیق در ایران

هدف اصلی ایجاد شبکه درجه یک ترازیبی دقیق و انجام نخستین مرحله از مشاهدات ترازیبی دقیق بر روی آن، دست یافتن به یک تراکم مناسب از نقاط کنترل ارتفاعی دقیق (ارتومتریک) در سراسر کشور بوده است. پیوستگی مکانی مشاهدات مرحله اول و اتصال آنها به ایستگاه جزر و مدی از ضروریات اجتناب ناپذیر برای مشاهدات این مرحله محسوب می شود. شبکه ملی ترازیبی دقیق درجه یک ایران، در امتداد راه های اصلی در سراسر کشور احداث گردیده و شامل حدود ۹۰ لوپ با متوسط طول محیط برای هر لوپ ۶۳۰ کیلومتر و دارای طول کل بیش از ۳۰۰۰۰ کیلومتر است.

در استراتژی کنونی و در حال انجام؛ تکرار مشاهدات ترازیبی دقیق که نزدیک به ده سال است دنبال می شود، در نظر است کل شبکه درجه یک ترازیبی دقیق ایران با طول بیش از ۳۰۰۰۰ کیلومتر به طور مجدد و کامل مشاهده شود. هم اکنون حدود ۲۵۰۰۰ کیلومتر از این شبکه برای بار دوم مشاهده

(ونیچک و همکاران ۱۹۷۸). در کانادا هم تکرارهای ترازیبی دقیق به صورت محلی و گسسته دنبال شده و نخستین نقشه حرکات ارتفاعی کانادا از روی ۵۰۴۶ قطعه منفصل و پراکنده مشاهدات تکراری ترازیبی دقیق و به همراه داده های جزر و مدی انجام شده است (ونیچک و همکاران ۱۹۸۰). در هندوستان که دارای دو برابر مساحت ایران می باشد ۱۳۵ سال سابقه ترازیبی دقیق دارد، طی سال های ۱۹۹۹-۲۰۰۲ به میزان ۴۹۰۰ کیلومتر مشاهدات تکراری ترازیبی دقیق برای مقاصد ژئودینامیک و مطالعات زلزله در ۱۳ پروژه محلی و به طور منفصل از هم انجام گرفته است، که ۷۰٪ آن یعنی بیش از ۳۴۰۰ کیلومتر به صورت یک طرفه مشاهده شده است (IUGG, 2003). در ژاپن، با مساحتی چهار و نیم برابر کوچکتر از ایران، مشاهدات تکراری ترازیبی دقیق به صورت محلی و گسسته، فقط روی بخشی از پنج مارک های درجه یک و در مناطقی که تغییرات ارتفاعی وجود دارد، با هدف ژئودینامیک و پیش بینی زلزله به میزان ۲۰۰۰ کیلومتر در سال انجام می شود، (Makiire et al, (T. 2000) و (Government of Japan, 2003). در فنلاند، دارای خمس مساحت ایران و سابقه بیش از یک قرن ترازیبی دقیق، به دلیل این که سراسر این کشور دارای بالآمدگی با منشاء ذوب (حذف) بارهای یخی بعد از دوره یخبندان است، با استفاده از مشاهدات پیوسته شبکه ترازیبی دقیق فنلاند به میزان ۱۷ لوپ و به طول حدود ۴۹۰۰ کیلومتر در سراسر کشور و با سه بار تکرار مشترک ترازیبی دقیق به میزان ۹ لوپ و حدود ۳۶۰۰



شکل ۱. شبکه های ملی ترازیبی دقیق ایران. شبکه درجه ۱ به رنگ قرمز و با طول بیش از ۳۰۰۰۰ کیلومتر، شبکه درجه ۲ به رنگ سبز و شبکه درجه ۳ به رنگ بنفش. طول شبکه های درجات ۲ و ۳ مجموعاً بیش از ۵۰۰۰۰ کیلومتر است.

ارتفاعی پوسته زمین محسوب می شود. بنابراین به کمک مشاهدات منفصل و پراکنده، به صورت اختلاف ارتفاع های تکرار شده بین پنج مارک های مجاور، به درستی می توان بحث مدل سازی ژئودینامیک ارتفاعی را به سرانجام رساند و اصلاً نیازی نیست که مسیرهای طولانی ترازیبی دقیق با مسافت چند صد یا چند هزار کیلومتر را به طور پیوسته تکرار نماییم. طبق تاکید پرفسور ونیچک، اصلاً صحیح نیست که مشاهدات بسیار کند و پرهزینه ترازیبی دقیق را در سراسر یک کشور مثل ایران روی شبکه درجه یک

به صورت یک پارچه تکرار کنیم، که شاید در یک جا به طور اتفاقی تغییرات ارتفاعی موجود باشد و بخواهد آن را نشان دهد و در عوض ممکن است در خیلی جاها تغییر ارتفاعی وجود نداشته باشد و این یعنی دور ریختن زمان و بودجه. طبق راه حل پیشنهادی پرفسور ونیچک بر اساس آنچه در همه جای دنیا مرسوم است، بایستی ابتدا معیارها و شواهد متعدد مربوط به علوم مختلف زمین، نظیر زمین شناسی، ژئوفیزیک، لرزه نگاری و ژئودزی را که بیانگر وجود تغییرات ارتفاعی در یک منطقه می باشند فراهم کرده و بر اساس این شواهد

دقیق و نیز اهمیت و اولویت منطقه مورد اندازه گیری (مثلاً از لحاظ تراکم جمعیت و وجود سازه های حساس) وجود داشته باشد. به این ترتیب اختلاف بین مشاهدات دو وهله زمانی به صورت معنی داری آشکار کننده تغییرات ارتفاعی واقعی و سکولار پوسته زمین خواهد بود، و با بررسی این تغییرات می توان نتایج مطلوبی را برای استفاده های مختلف مهیا کرد.

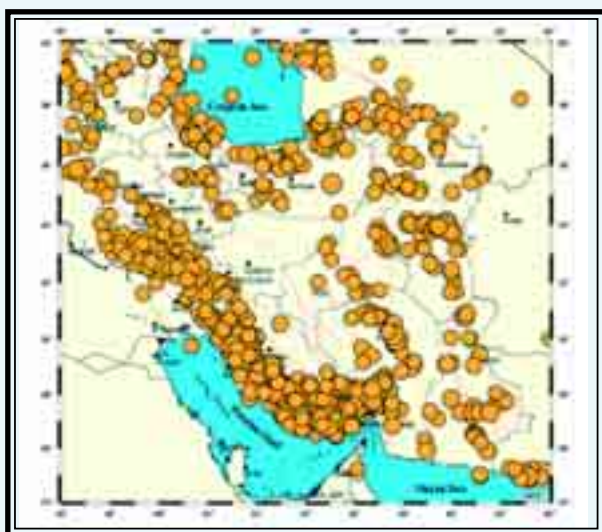
۵. شرح استراتژی جدید برای گردآوری مشاهدات تکرارهای ترازیبی دقیق و معرفی معیارها

از طریق مشاهدات ترازیبی دقیق، تنها می توان به اختلاف ارتفاع دست یافت. همچنین با تکرار مشاهدات ترازیبی دقیق، می توان تنها به اختلاف ناشی از اختلاف ارتفاع رسید. برای بحث های ژئودینامیکی، تقریباً در همه حالت ها، کمیت اختلاف ارتفاع یک پارامتر مناسب و مورد نیاز است و در حقیقت تغییرات ارتفاعی یک نقطه نسبت به نقطه مجاور یا نسبت به یک نقطه مقایسه مورد علاقه است. این نکته کلیدی بیان می دارد که در بحث های ژئودینامیکی مبتنی بر مشاهدات تکراری ترازیبی دقیق، هیچ احتیاجی به پیوستگی مکانی مشاهدات تکراری ترازیبی دقیق نیست. در حقیقت، هر قطعه ۲-۳ کیلومتری مشاهدات ترازیبی دقیق تکرار شده بین دو پنج مارک یک سان در دو وهله زمانی مختلف، که یک تغییر اختلاف ارتفاع را نمایش می دهد، به عنوان یک کمیت مناسب برای مدل سازی تغییرات



شکل ۲. آرایش گسل های فعال در ایران، حسامی و همکاران (۲۰۰۳)

اساس آن می توان به تخمینی از تغییرات ارتفاعی در یک محدوده دست یافت. این تغییرات به سه حالت مختلف به صورت تغییرات قبل از زلزله، به هنگام وقوع زلزله (اپیزودیک) و بعد از زلزله دسته بندی می شوند. شکل ۳ آرایش زلزله های رخ داده با شدت



شکل ۳. آرایش زلزله های با شدت بزرگتر از ۵ ریشتر در ایران از ۱۹۰۰ تا ۲۰۰۸ به تعداد ۸۰۹ زلزله (IEES2008)

محدوده های محلی مربوطه را مشخص نموده و سپس در این محدوده های محلی، با اولویت بندی از لحاظ اهمیت و نقشی که در ایمن سازی زندگی انسان ها و محیط زیست دارند، مشاهدات تکراری ترازیبی دقیق را، آن هم به صورت کنجکاوانه در جهت تعیین دقیق تر فاصله های مکانی و زمانی مناسب برای انجام تکرارهای مشاهدات، گردآوری نماییم.

معرفی شواهد و معیارهای مختلف در انتخاب یک محدوده برای انجام تکرارهای ترازیبی دقیق:

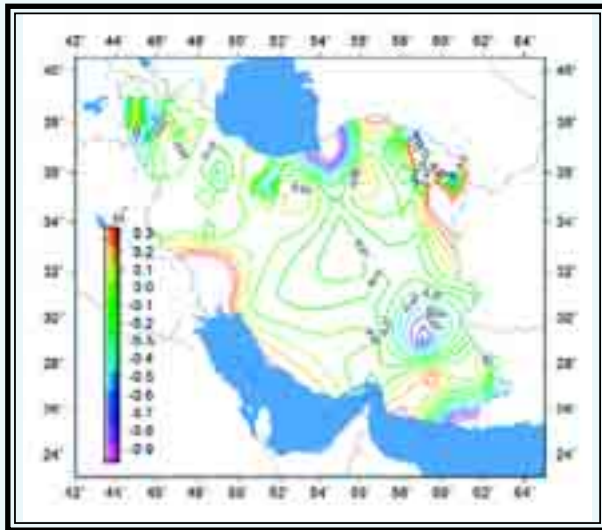
۱.۵. معیار اول: مکان هندسی گسل های فعال

به طور روشن یکی از شواهد مهم علمی که نشانگر تغییرات ارتفاعی در یک محل خاص است، وجود گسل فعال است.

بنابراین، دانستن مکان هندسی گسل های فعال، یک قدم اساسی در راستای مشخص کردن محدوده های با تغییرات ارتفاعی احتمالی است. اگرچه در دسته بندی گسل ها، گسل های با تغییرات مسطحاتی (راستا لغز، Strike-sleep) و گسل های با تغییرات ارتفاعی (Thrust) دسته بندی می شوند، ولی معمولاً هر گسل فعالی هر دو نوع تغییر ارتفاعی و مسطحاتی را با هم انجام می دهد. البته بررسی گسل های با تغییرات ارتفاعی، به دلیل دارا بودن تغییرات ارتفاعی بزرگتر، مقدم می باشند. شکل ۲ آرایش گسل های فعال در ایران را نمایش می دهد. ساز و کار کانونی زمین لرزه های منسوب به این گسل ها در این شکل، ماهیت ترکیبی رفتار گسل های فعال را در ایران تایید می کند.

۲.۵. معیار دوم: مکان هندسی زلزله های شدید رخ داده ظرف حدود یک قرن اخیر

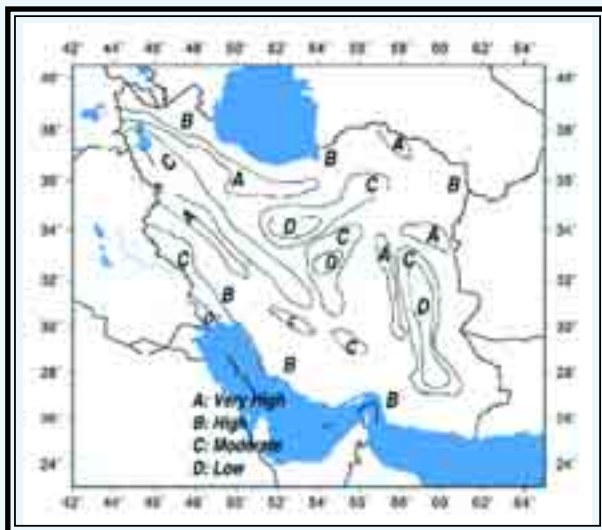
بدیهی است که زلزله ها به دلیل فعالیت گسل ها رخ می دهند. بنابراین دانستن آرایش زلزله های رخ داده و تعداد آنها در یک بازه زمانی نسبتاً طولانی، می تواند نشانگر وجود تغییرات ارتفاعی احتمالی در یک منطقه باشد. این دومین شاهد علمی است که بر



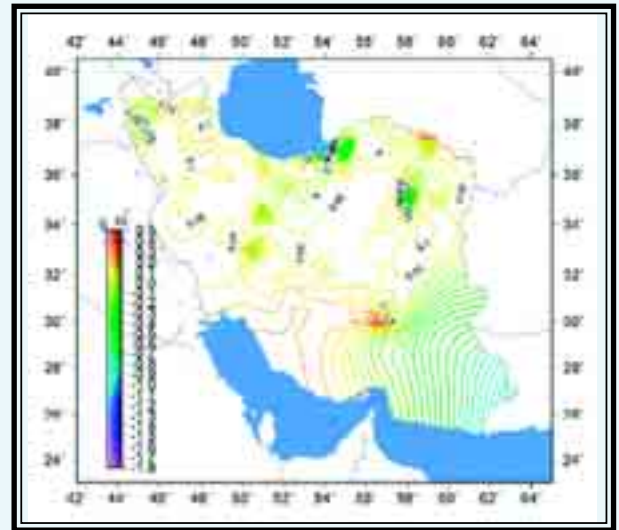
شکل ۵. تغییرات انحناء محاسبه شده از روی مشاهدات شبکه ایستگاه های دائم GPS ایران (به m^{-1})

۴.۵. معیار چهارم: پهنه بندی خطر زلزله در ایران

بر اساس بررسی انجام شده توسط مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، از لحاظ میزان خطر نسبی زلزله، ایران به چهار پهنه خیلی پرخطر، پرخطر، خطر متوسط، و کم خطر تقسیم بندی می شود و به ترتیب با حروف A، B، C و D معرفی شده اند. شکل ۶ این پهنه بندی ها را نمایش می دهد. بدیهی است که پهنه ها و محدوده های با خطر ریسک بیشتر زلزله، بایستی سهم بیشتری از مشاهدات تکرارهای ترازیبی دقیق را به خود اختصاص دهند.



شکل ۶. مناطق مختلف پهنه بندی خطر زلزله



شکل ۴. تغییرات انحناء محاسبه شده از روی مشاهدات دو مرحله ترازیبی دقیق شبکه درجه یک ایران (به m^{-1})

بزرگتر از ۵ ریشتر را در ایران ظرف حدود یک قرن اخیر (دستگاهی و غیر دستگاهی) نشان می دهد.

۳.۵. معیار سوم: تغییرات انحناء (یا تغییرات اختلاف ارتفاع) حاصل از مشاهدات ارتفاعی موجود در ژئودزی (ترازیابی دقیق و GPS)

تغییرات انحناء یا تغییرات اختلاف ارتفاع حاصل از مشاهدات وهله های زمانی مختلف و موجود در ژئودزی می تواند به صورت شاهد علمی سوم برای حضور تغییرات ارتفاعی در یک محل خاص در نظر گرفته شود، که بایستی تکرار مشاهدات ترازیبی دقیق را در آن محل استمرار بخشید. بدیهی است وجود مقادیر تغییر انحناء بیشتر (و یا مقادیر تغییر اختلاف ارتفاع بزرگتر) در یک منطقه نشانه اختصاص سهم بیشتری از مشاهدات تکراری در آنجا است. باید محدودیت تراکم های نامناسب داده ها را در استفاده از این شاهد علمی لحاظ نمود. روشن است که این شاهد در کنار و به همراه شواهد علمی قبلی و بعدی تواما برای انتخاب منطقی مناطق مختلف جهت انجام تکرارهای ترازیبی دقیق استفاده می شوند. شکل های ۴ و ۵ مقادیر تغییر انحناء یا تغییر شکل ارتفاعی را در ایران بر اساس مشاهدات دو مرحله ترازیبی دقیق و مشاهدات ایستگاه های دائم GPS نمایش می دهند (با دیمانسیون عکس فاصله).

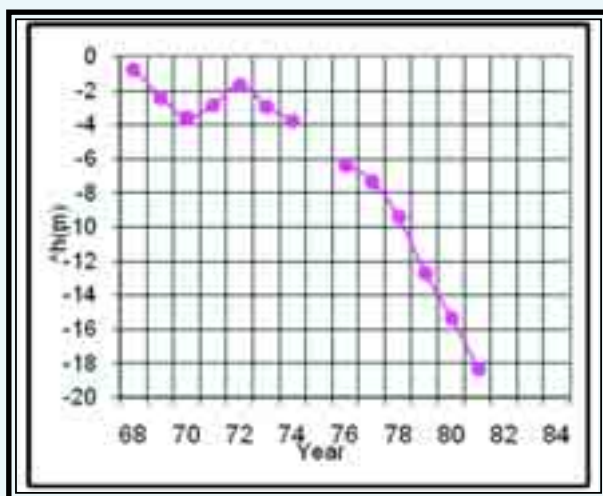
بالا آمدگی های سطح زمین ناشی از تغییرات آب های زیرزمینی مقادیر بزرگ می باشند و در حد چند سانتی متر و چند دسی متر می شوند. در این حالت، مناسب ترین روش برای تعیین این تغییرات استفاده از روش InSAR است، که به صورت پیوسته و در دو بعد می تواند به کمک تصاویر ماهواره ای تغییرات ذکر شده را با دقتی در حدود یک سانتی متر تعیین نماید. البته وجود تعدادی نقاط کنترل ارتفاعی (GPS یا ترازبایی با مشاهدات تکراری)، به نتایج حاصل از InSAR اطمینان و کیفیت بیشتری می بخشد. شکل ۸ تغییرات سطح آب های

زیرزمینی را در آبخوان ورامین در یک بازه زمانی چهارده ساله نمایش می دهد. این اطلاعات به طور مستمر توسط وزارت نیرو بر اساس چاه های پیزومتریک برای مناطق مختلف کشور فراهم می شود. تغییرات ارتفاعی سطح زمین به صورت فرو نشست و ورامین و تهران (حاصل از InSAR، معتق و همکاران، ۲۰۰۸) در شکل ۹ نمایش شده است.

۷.۵. معیار هفتم: شبکه ایستگاه های سنگی چندمنظوره

فیزیکال ژئودزی و ژئودینامیک ایران

این شبکه شامل حدود ۷۰۰ ایستگاه سنگی با تراکم ۵۵ در ۵۵ کیلومتر، سراسر ایران را پوشش می دهد (شکل ۱۰) و یک بار تقریباً کل شبکه، مشاهده شده است (Hatam et al., 2008). با تکرار مشاهدات این شبکه (ثقل، GPS و ترازبایی دقیق) به صورت محلی می توان به تخمین مناسب تری از تغییرات اخیر ارتفاعی رسید و



شکل ۸. نمودار میانگین تجمعی تغییرات سطح آب زیرزمینی در آبخوان ورامین (به متر)

۵.۵. معیار پنجم: تراکم نسبی جمعیت

میزان تراکم نسبی جمعیت در یک منطقه به عنوان پنجمین معیار معرفی می شود. منطقی است که مناطق با تراکم جمعیت بیشتر برای انجام تکرارهای ترازبایی دقیق در اولویت بوده و سهم بیشتری نسبت به مناطق با جمعیت کمتر داشته باشند. در شکل ۷ میزان تراکم نسبی جمعیت در سراسر ایران نمایش شده است.

از این رو، منطقه تهران و مناطق شمال، شمال غربی و غرب ایران با بیشترین تراکم جمعیت دارای بالاترین اهمیت هستند و بایستی مشاهدات تکراری ترازبایی دقیق به میزان به مراتب بیشتری در این مناطق انجام شود.

۶.۵. معیار ششم: تغییر سطح آب های زیرزمینی (ونفت و گاز و

دیگر موارد) و InSAR

کاهش سطح آب های زیرزمینی که از طریق استخراج و پمپاژ آب برای مصارف کشاورزی و صنعتی صورت می گیرد، سبب تغییرات ارتفاعی (و تغییرات ثقل) روی سطح زمین به صورت فرو نشست می شود. همچنین افزایش سطح آب های زیرزمینی با پر شدن سفره های زیرزمینی از طریق باران، برف، ...، سبب تغییرات ارتفاعی و تغییرات ثقل روی سطح زمین می گردد. این تغییرات ارتفاعی از روش های مختلف قابل اندازه گیری می باشند. مفیدترین روش، استفاده از داده های تکراری ثقل (زمینی و ماهواره ای) است، که می توان به مدل سازی میزان تغییرات آب های زیرزمینی دست یافت. در غالب مواقع فرو نشست ها و



شکل ۷. تراکم نسبی جمعیت به تفکیک استان در سال ۱۳۸۵ (نفر در کیلومتر مربع)

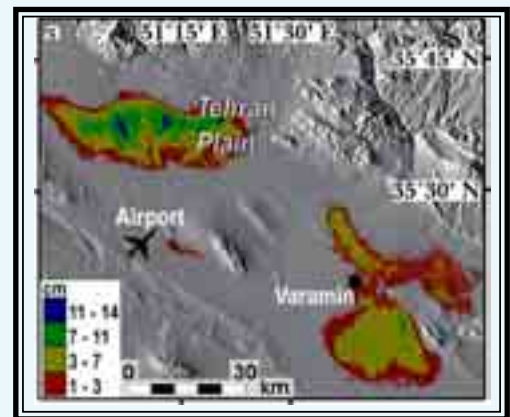


شکل ۱۰. شبکه ایستگاه های سنگی چند منظوره فیزیکی ژئودزی و ژئودینامیک ایران

سپس بر اساس کلیه معیارهای ارائه شده طرح بهینه تکرارهای ترازبایی دقیق را تعیین نمود. تراکم مناسب نقاط اندازه گیری و تنوع مشاهدات (ثقل، GPS و ترازبایی دقیق) با دقت بالا، در حدود یک سانتی متر برای اختلاف ارتفاع بین ایستگاه های مجاور ۵۵ کیلومتری و معادل آن برای ثقل، در این شبکه فرصت ایده آلی را برای کشف و مدل سازی تغییر شکل های ارتفاعی فراهم می کند. بدیهی است تکرار مشاهدات این شبکه به ویژه مشاهدات ترازبایی وقت گیر و هزینه بر است ولی با توجه به نوع ساختمان ایستگاه ها و توزیع سراسری آن نتایج حاصل از تکرار اندازه گیری ها در ارزیابی وضعیت ژئودینامیک ارتفاعی پوسته کشور بسیار ارزشمند و قابل اعتماد خواهد بود.

بالا گردآوری می شود، به هر صورت منطقی که بتواند این روند را تسریع نماید یک نکته مثبت و مهم محسوب می شود و می توان میزان بیشتری از کار ترازبایی دقیق را در شرایط یک سان امکانات به انجام رساند. عقیده متخصصان زیادی بر این است که میزان ترازبایی دقیق که هر ساله در ایران انجام می گیرد (حدود ۵۰۰ کیلومتر) نیازهای اساسی ژئودزی و ژئودینامیک ارتفاعی موجود در ایران را برآورده نمی کند. در حقیقت با توجه به پدیده های ژئودینامیکی متعدد و امکان تغییر شکل های پوسته زمین با منشاء های مختلف در ایران، انجام اندازه گیری های ژئودتیکی زیادتیر و به صورت مستمر در مقایسه با مناطق دیگر دنیا امری اجتناب ناپذیر است. با توجه به تجارب کشورهای دیگر، نظیر آمریکا و هندوستان، و مطالعات انجام شده می توان از ترازبایی دقیق یک طرفه (با لحاظ تمهیداتی خاص) به جای ترازبایی دقیق دوطرفه (رفت و برگشت) برای انجام تکرارهای ترازبایی دقیق به منظور مطالعات ژئودینامیک ارتفاعی سود جست و بدین وسیله راندمان کار صحرا را تا میزان ۸۰٪ افزایش داد.

دلیل اصلی استفاده از روش ترازبایی دقیق دوطرفه (به صورت رفت و برگشت)، امکان بررسی خطاهای سیستماتیک در قطعه های ۲-۳ کیلومتری و نیز در مسیرهای طولانی تر و همچنین



شکل ۹. فرونشست در ورامین و تهران

۶. بهینه سازی روش مشاهدات تکرارهای ترازبایی دقیق برای اهداف ژئودینامیک ارتفاعی: جایگزینی ترازبایی دقیق دو طرفه (رفت و برگشت) با ترازبایی دقیق یک طرفه

با توجه به اینکه مشاهدات ترازبایی دقیق بسیار کند و با هزینه

برآورد صحت و دقت اندازه‌گیری‌ها می‌تواند به خوبی بر اساس خطاهای بست مربوط به تعداد لوپ‌های زیاد با محیط نسبتاً کوچک انجام گیرد. این روش به صورت هوشیارانه‌ای اقتصادی تعریف شده و قویا می‌تواند برای ترازایی تکراری یک کشور با مساحت بزرگ به کار گرفته شود.

۷. نتیجه‌گیری

۱.۷. خلاصه استراتژی جدید

به‌طور روشن روند تغییرات ارتفاعی در ایران به صورت محلی، ناهمگون، چندگانه و غیر یک‌پارچه است. بنابراین مشاهدات تکرارهای ترازایی دقیق بایستی به صورت گسسته و محلی گردآوری شود. مهم‌ترین عامل تغییرات ارتفاعی پوسته‌ای، جنب و جوش گسل‌های فعال و پراکنده است. پس، تک‌تک گسل‌ها بایستی به‌طور جداگانه مورد مشاهده تکراری و مورد مدل‌سازی قرار گیرد، تا در نهایت با کنار هم گذاشتن این مدل‌ها، بتوان به مدل جامع و پیچیده‌تر تغییرات ارتفاعی برای ایران دست یافت. دوره تکرار مشاهدات هر گسل، محدوده فعالیت و تغییرات آن، اهمیت و میزان این حرکات،...، بایستی به کمک داده‌ها و متخصصان زمین‌شناسی، ژئوفیزیک و لرزه‌نگاری تخمین زده شود. در قدم‌های بعدی با انجام کنجکاوانه روند مشخص شده در اجرا، بایستی تخمین‌های ذکر شده را تقویت نمود. برای تعیین فرونشست‌ها و تغییرات ارتفاعی بزرگتر از یک سانتی‌متر، مناسب‌ترین روش استفاده

محدوده مطالعه را به خوبی پوشش دهند نیاز می‌باشد، در حقیقت ما با لوپ‌های کوچک ترازایی دقیق در ابعاد چند ده کیلومتر سروکار خواهیم داشت. بنابراین یک روش کنترل مشاهدات اشتباه می‌تواند بر اساس کنترل خطای بست لوپ‌های کوچک ترازایی دقیق صورت گیرد. روش دوم این است که ۲۰-۱۰ درصد از قطعه‌های ۲-۳ کیلومتری را به صورت اتفاقی و یا قطعه‌های قرائت شده در شرایط نامناسب را به صورت دوطرفه قرائت نمود. روش سوم، به‌کارگیری مشاهدات مراحل زمانی قبل می‌باشد. به هر حال مشاهدات اشتباه با شکل تغییرات ژئودینامیکی غالباً تفاوت‌های آشکاری دارند. بنابراین با مقایسه مشاهدات مربوط به چند مرحله زمانی می‌توان مشاهدات اشتباه را کشف کرد. شایان ذکر است روش ترازایی دقیق یک‌طرفه به صورت جایگزین برای اهداف تکرارهای ترازایی دقیق و ژئودینامیک ارتفاعی دارای سابقه استفاده در دنیا می‌باشد. به‌عنوان مثال (Bossler, 1984) و (Bomford, 1983)، (Vanicek, 2005) و (Gupta et al, 2003). همچنین در آمریکا مشاهدات یک‌طرفه ترازایی دقیق تکراری برای اهداف ژئودینامیک ارتفاعی به صورت جایگزین جهت مواجهه با خطاهای سیستماتیک اجرایی شده و برای کنترل اشتباهات بخشی از قطعات ۲-۳ کیلومتری به صورت دوطرفه قرائت شد، با تاکید بر استفاده از مشاهدات مرحله قبل و ثبت الکترونیکی مشاهدات و نیز مقایسه اتوماتیک مشاهدات دو مرحله هنگامی که به کنترل نیاز باشد. در این حالت

امکان کنترل و کشف مشاهدات اشتباه می‌باشد. حال اگر ترازایی دقیق یک‌طرفه را برای انجام تکرارهای ترازایی دقیق در نظر بگیریم که هدف تعیین تغییرات ارتفاعی در یک منطقه است، با انجام مشاهدات به صورت جایگزین یعنی قطعه‌های فرد به صورت رفت و قطعه‌های زوج به صورت برگشت قرائت شوند، در این صورت یک مواجهه موثر اجرایی با خطاهای سیستماتیک مختلف وابسته به جهت مسیر ترازایی خواهیم داشت. این کمابیش نظیر همان روشی است که به صورت قرائت دوطرفه با خطاهای سیستماتیک مواجه و آنها را کاهش می‌دهیم. از طرف دیگر، برای کنترل و کشف مشاهدات اشتباه گزینه‌های مختلفی برای روش ترازایی دقیق یک‌طرفه برای اهداف ژئودینامیک ارتفاعی وجود دارد. با توجه به اینکه پدیده‌های با تغییرات ژئودینامیک ارتفاعی مورد بررسی با روش ترازایی دقیق، به صورت محلی می‌باشند، مثلاً با ابعاد حدود ۵۰×۵۰ کیلومتر (برای بررسی پدیده‌های با تغییرات ژئودینامیک ارتفاعی در ابعاد بزرگتر روش منطقی استفاده از روش‌های سریع‌تر، ارزان‌تر و دقیق‌تر مثل GPS است، زیرا دقت ارتفاعی GPS در این حالت از دقت ترازایی دقیق بالاتر است، زیرا خطای اختلاف ارتفاع حاصل از ترازایی دقیق وابستگی بیشتری به فاصله بین نقاط اندازه‌گیری دارد تا خطای اختلاف ارتفاع حاصل از GPS) و با توجه به اینکه برای بررسی مناسب این پدیده‌ها با ابعاد چند ده کیلومتر به وسیله مشاهدات ترازایی دقیق به تراکم مناسبی از مسیرهای ترازایی دقیق که

می‌باشند و رفتارسنجی آنها برای شهر تهران حائز اهمیت فراوان است (مورد تاکید پرفسور ونیچک و زمین شناس). تغییرات ارتفاعی گسل‌ها، بر اساس داده‌های زمین‌شناسی و در بازه‌های زمانی طولانی، غالباً کمتر از یک میلی‌متر در سال است. ولی با توجه به اینکه این تغییرات ارتفاعی،

گسل‌های فعال در البرز مرکزی را به همراه توپوگرافی نشان می‌دهد (نظری و همکاران ۱۳۸۷).

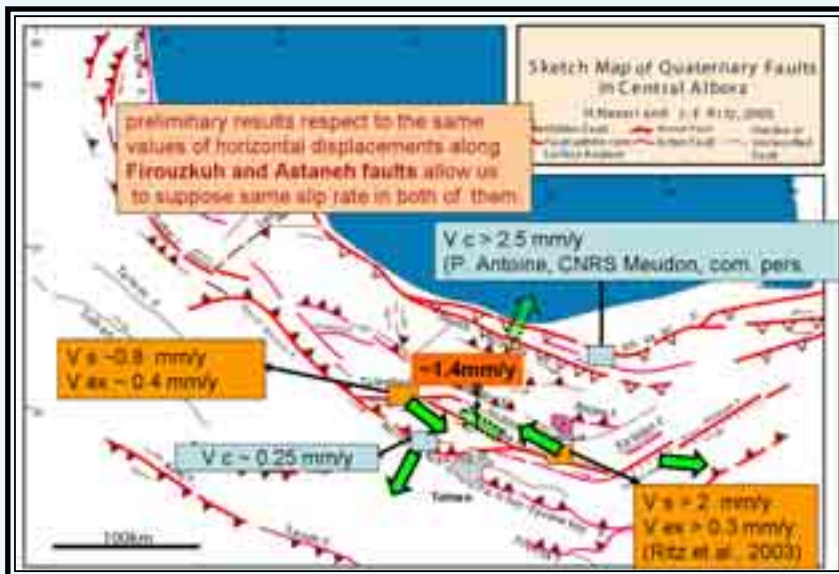
به عنوان مثال، گسل‌های پارچین، سیستم گسل شمال تهران، گسل میلاد (واقع در زیر برج میلاد)، و بخشی از گسل طالقان دارای تغییرات ارتفاعی مسلم

از فن InSAR است. از طرف دیگر، برای تعیین تغییرات ارتفاعی دو ایستگاه نسبت به هم برای فواصل بزرگتر از ۵۰ کیلومتر، روش GPS دقیق‌تر و ضمناً سریع‌تر و ارزان‌تر از ترازیبی دقیق است. خطاهای سیستماتیک متعدد، مخصوصاً در نواحی کوهستانی، سبب افت شدید کیفیت و دقت مشاهدات ترازیبی دقیق می‌شوند. مشاهدات تکراری ترازیبی دقیق در سه وهله زمانی (۱۳۷۳، ۱۳۷۶ و ۱۳۸۰) در مسیر کرج-چالوس نشان می‌دهد که یک خطای سیستماتیک فاحش به صورت ترند، دارای وابستگی شدید با توپوگرافی، به میزان ۱۵ میلی‌متر در فاصله حدود ۸۰ کیلومتر در اختلاف مشاهدات دو وهله زمانی موجود است (Djamour, 2004).

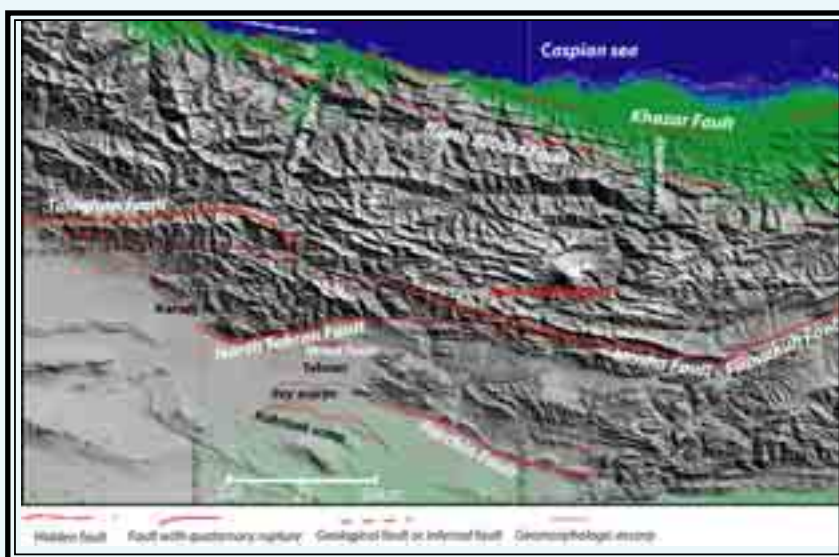
۲.۷. پیشنهاد شروع استقرار استراتژی محلی ساخته شده برای تکرارهای ترازیبی دقیق در البرز مرکزی

با در نظر گرفتن تمامی معیارهای معرفی شده در بخش ۵ کشف تغییرات ارتفاعی در محدوده البرز مرکزی، با لحاظ اشراف بر این منطقه شدیداً کوهستانی بر دو ناحیه پرجمعیت تهران و شمال کشور از دو سمت، به طور آشکار حائز اهمیت فراوان است. از این رو در نخستین قدم از استقرار استراتژی محلی ساخته و معرفی شده، پیشنهاد می‌شود که این استراتژی محلی ابتدا در البرز مرکزی استقرار یابد. شکل ۱۱ مکان هندسی کلیه گسل‌های شناخته شده کواترنری در البرز مرکزی به همراه خصوصیات مهم گسل‌های فعال را نمایش می‌دهد (نظری و همکاران ۱۳۸۵).

مطالعه گسل‌ها با مدل توپوگرافی منطقه واقع بینانه‌تر است. شکل ۱۲ مکان هندسی



شکل ۱۱. نمایش گسل‌های شناخته شده کواترنری در البرز مرکزی به همراه مشخصات گسل‌های فعال در این منطقه



شکل ۱۲. نمایش گسل‌های فعال در البرز مرکزی با توپوگرافی

- Lambert A., and P. Vanicek (1978), Contemporary Crustal Movements in Canada, *Can. J. Sci.*, 16, pp.647-668.
- Makinen, J., and V. Saaranen (1998), Determination of post-glacial land uplift from the 3 precise levellings in Finland.
- Masson, F., Y. Djamour, S. Van Gorp, J. Chéry, M. Tatar, F. Tavakoli, H. Nankali, P. Vernant (2006), Extension in NW Iran driven by the motion of the South Caspian Basin, *Earth and Planetary Science Letters*, doi:10.1016/j.epsl.2006.09.038
- Masson, F., M. Anvari, Y. Djamour, A. Walpersdorf, F. Tavakoli, M. Daignieres, H. Nankali and S. Van Gorp (2007), Large-scale velocity field and strain tensor in Iran inferred from GPS measurements: new insight for the present-day deformation pattern within NE Iran, *Geophys. J. Int.* 170, 436-440, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03477.x
- Motagh, M., T. R. Walter, M. A. Sharifi, E. Fielding, A. Schenk, J. Anderssohn, and J. Zschau (2008), land subsidence in Iran caused by widespread water-reservoir overexploitation, *Geophys. Res. Lett.*, 35,
- Nazari, H., J.F. Ritz (2008), Neotectonic in central Alborz. Special issue, GSI-2008.
- Nazari, H., J.F. Ritz (2005), Sketch map of Quaternary Faults in Central Alborz. GSI.
- Nilforoushan F., F. Masson, P. Vernant, C. Vigny, J. Martinod, M. Abbassi, H. Nankali, D. Hatzfeld, R. Bayer, F. Tavakoli, A. Ashtiani, E. Doeringer, M. Daignières, P. Collard, and J. Chéry (2003), GPS network monitors the Arabia-Eurasia collision deformation in Iran, *J. of Geodesy* (77), 411-422, DOI 10.1007/s00190-003-0326-5.
- Nankali H. R., and Djamour, Y. (2006): Establishment of Permanent GPS Network for Crustal Deformation Monitoring in Iran. *GIS Development*, april.
- Smith, W. H. F. and P. Wessel, (1990), Gridding with continuous curvature splines in tension, *Geophysics*, 55, 293-305.
- Terada, T., and N. Miyabe (1929), Deformation of the Earth's Crust in Kwansai District and its Relation to Orographic Features: *Bull. Earthquake Res. Ins. U. of Tokyo* 7, part 2, pp. 223-241.
- Vanicek and Christodulidis (1973), A Model for the Evaluation of Vertical Crustal Movements from Scattered Geodetic Relevelings, *Can. J. of Earth Sci.*, 11, pp. 605-610.
- Vanicek, P. (1976), Patteen of Recent Vertical Crustal Movements in Maritime Canada, *Can. J. Sci.*, 13, pp.661-667.
- Vanicek, P., Elliott, M. R., and R. Castel (1978), Four Dimensional Modeling Of Recent Vertical Movements in the Area of the Southern California Uplift, *Tectonophysics*, 52, pp. 287-300.
- Vanicek P., and D. Nagy (1980), On the Compilation of the Map of Contemporary Vertical Crustal Movements in Canada, *Tectonophysics*, 70, pp. 75-86.
- Vernant P., F. Nilforoushan, D. Hatzfeld, M. Abbassi, C. Vigny, F. Masson, H. Nankali, J. Martinod, A. Ashtiani, R. Bayer, F. Tavakoli, and J. Chéry (2004a), Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and northern Oman, *Geophys. J. Int.*, 157, doi: 10.1111/j.1365-246X.204.02222.x, 381-398.
- Vanicek P. (2005-8), Personal Communications.

مخصوصاً در زمان‌های نزدیک به وقوع زلزله، می‌تواند شتاب‌دار باشد، تکرارهای ترازبایی دقیق می‌تواند یک تصویر واقعی‌تر از تغییرات تخمینی ذکر شده را نمایش دهد.

۸. تقدیر و تشکر

جا دارد مراتب قدردانی و تشکر گروه کاری را به سازمان نقشه‌برداری کشور که حمایت مالی این کار را در قالب یک طرح تحقیقاتی به عهده داشته است، ابراز نمایم.

۹. منابع

- توکلی، فرخ و حمید رضا نانکلی، گزارش طرح ژئودینامیک سراسری، اداره کل نقشه‌برداری زمینی، سازمان نقشه‌برداری کشور، ۱۳۸۳.
- جموری، یحیی و حمید رضا نانکلی، گزارش پیشرفت طرح ژئودینامیک سراسری، نشریه سازمان نقشه‌برداری کشور، دی ماه ۱۳۸۴.
- کردی، کبری (۱۳۸۷)، آنالیز دو بعدی شبکه ژئودینامیک ایران به روش آنالیز روبااستنس، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.
- Altiner, Y. (1999), *Analytical Surface Deformation Theory*, Springer.
- Bomford G. (1983), *Geodesy*, Oxford University Press, 3Rev Ed.
- Bossier J.D. (1984), *Standards and Specifications for Geodetic Control Networks*, Federal Geodetic Control Committee, Maryland.
- Casser, M., (2008), Presented in NCC Geomatics.
- Djamour, Y., Nankali, H.R., and Rahimi, Z. (2006): Iranian Permanent GPS Network (IPGN), September.
- Djamour, Y., (2004), These de Doctorat.
- Duquenne, H. (2005). Personal meeting in Paris.
- Government of Japan (2003), *Spacial Data Infrastructure Work in Japan*.
- Gupta H.K., S. Niwas, A. Bhaattachayra, S.W.A. Naqvi, B.N. Goswami (2003), *Indian National Report for 23rd General Assembly of IUGG, Sapporo, Japan*, pages 9-10.
- Hossainali, M. M. (2005), *A Comprehensive Approach to the Analysis of the 3D-Kinematics of Deformation*, Ph.D. Thesis, Darmstadt University of Technology, Germany.
- Hatam, Y. Djamour, R. Bayer, P. Vanicek, A. M. Abolghasem, J. Hinderer, M. Mohammad Karim, M. Najafi Alamdari, H. Cheraghi, R. Saadat, A. Soltanpour, M. Sedighi, H. Nankali, S. Arabi, N. Azizian, S. Rafiey (2008), *Designing and Implementation of the Multi-purpose Physical Geodesy and Geodynamics Network of Iran (MPGGNI2005)*, EGU 2008, Vienna.
- Imakiire, T., and E. Hakoiva (2000), the new height system of Japan. JGD2000 (vertical).