

مدل‌سازی هندسی حرکات زمین‌ساختی مسطحاتی در ژاپن با تحلیل مشاهدات ژئودزی در منطقه

مهدی نجفی علمداری^{۱*}، آرمان طاهری^۲، یحیی جمور^۳ و محمدمین مصباح^۲

۱. دانشیار، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران

۳. دانشیار، آموزشکده نقشه‌برداری، سازمان نقشه‌برداری کشور، تهران، ایران

(دریافت: ۹۴/۱/۲۵، پذیرش نهایی: ۹۴/۷/۱۴)

چکیده

کشور ژاپن از نظر زمین‌ساختی در یک منطقه پیچیده مرزی واقع شده است. حرکت غالب آن منطقه، فرورانش صفحه اقیانوس آرام به زیر صفحه آمریکای شمالی است. در این تحقیق با استفاده از داده‌های GPS شبکه ژئودزی ژاپن، حرکات بین‌لرزه‌ای پوسته در بین دو زلزله سپتامبر سال ۲۰۱۰ و مارس سال ۲۰۱۱ و همچنین حرکات حین‌لرزه‌ای ناشی از زمین‌لرزه‌های ۷/۲ و ۹ ریشتری که به ترتیب در تاریخ‌های ۲۰۱۱/۰۳/۰۹ و ۲۰۱۱/۰۳/۱۱ رخ دادند، مدل‌سازی شد. این مدل‌سازی نشان می‌دهد که پوسته آمریکای شمالی قبل از وقوع این زمین‌لرزه‌ها، رفتارهای متفاوتی را در سه مقطع زمانی از خود نمایش می‌دهد. ویژگی هر کدام از این مقاطع زمانی این است که در هر مقطع، بردارهای جابه‌جایی دارای جهت خاص یکسان هستند، اما مقدار این بردارها از مکانی به مکان دیگر تغییر می‌کنند. در مقطع زمانی دوم، حرکات کوچک و دارای جهتی نامشخص هستند و در مقطع زمانی سوم حرکات متفاوت می‌شوند. تحلیل کرنش جابه‌جایی در مقطع زمانی سوم نشان می‌دهد که انقباض در غرب افزایش می‌یابد. همچنین در این مقطع زمانی انبساط در شرق ژاپن نمایان می‌شود و مقدار آن روزبه‌روز افزایش می‌یابد. تحلیل کرنش در روزهای زلزله نشان می‌دهد و پوسته آمریکای شمالی روی پوسته اقیانوس آرام می‌لغزد و دچار انبساط شدیدی می‌شود. مقطع زمانی دوم را که در آن حرکات پوسته در حال عوض شدن هستند، شاید بتوان یک پیش‌نشانگر برای این زمین‌لرزه‌ها به حساب آورد. همچنین با توجه به لغزش (انبساطی) که در منطقه نمایان می‌شود، می‌توان ناحیه‌ای را که در آینده نزدیک تحت تأثیر زمین‌لرزه قرار خواهد گرفت، شناسایی کرد.

واژه‌های کلیدی: انبساط و انقباض، تحلیل کرنش، جی‌پی‌اس، حرکات زمین‌ساختی.

۱. مقدمه

در ژاپن روش‌های بسیاری برای ثبت داده‌های مربوط به بررسی حرکات پوسته زمین وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به مشاهده طول و زاویه (روش کلاسیک) و همچنین استفاده از سیستم GPS اشاره کرد. در پی فاجعه زمین‌لرزه سال ۱۹۹۵ کوبه (Kobe)، دولت ژاپن نگرش خود را درباره آمادگی در برابر زمین‌لرزه تغییر داد و انواع مختلفی از سیستم‌های پردقت را برای پایش پدیده‌های مربوط به زمین‌لرزه ایجاد کرد. یکی از این سیستم‌ها، شبکه GEONET است که سیستم جامعی برای اندازه‌گیری تغییر شکل پوسته است (هرپ، ۲۰۱۱). از آن زمان ایستگاه‌های این شبکه افزایش یافت؛ به طوری که در سال ۲۰۱۱ به ۱۲۴۰ ایستگاه رسید. متوسط

کشور ژاپن از لحاظ ساختار زمین‌شناسی، آزمایشگاهی طبیعی برای مطالعات تغییر شکل پوسته محسوب می‌شود. این کشور از نظر زمین‌ساختی در یک منطقه پیچیده مرزی واقع شده است؛ به طوری که همگرایی چهار صفحه آمریکای شمالی (North America plate)، صفحه اقیانوس آرام (Pacific plate)، صفحه اوراسیا (Eurasian plate) و صفحه فیلیپین (filipin sea plate) در این منطقه غالب است (ال فیککی و کاتو، ۲۰۰۶). حرکت عمده‌ای که در منطقه شمال شرقی ژاپن وجود دارد، فرورانش پوسته اقیانوس آرام به زیر پوسته آمریکای شمالی است که این حرکت باعث ایجاد عارضه‌ای به نام ترنج ژاپنی شده است (ساگیا، ۲۰۰۴).

حرکات حین لرزه‌ای زلزله ۹ ریشتری مارس ۲۰۱۱، بردارهای جابه‌جایی پوسته و همچنین مقدار اتساع در منطقه در اثر این زمین‌لرزه را محاسبه کردند و نشان دادند که در اثر این زمین‌لرزه، منطقه تحت تأثیر زلزله به شدت منبسط می‌شود.

فان و همکاران (۲۰۱۱) درباره تأثیر زمین‌لرزه ۹ ریشتری ۱۱ مارس ۲۰۱۱ بر مناطق فعال آتشفشانی، تحقیقاتی انجام دادند.

مورای و اراکی (۲۰۱۲) طی مطالعاتی بین ایستگاه‌های GPS را مثلث‌بندی کردند و تمام مثلث‌های ممکن را با استفاده از ایستگاه‌های GPS در منطقه، ایجاد و در نهایت نرخ تغییرات مساحت این مثلث‌ها را بررسی کردند تا ببینند آیا قبل از زمین‌لرزه پیش‌نشانگر خاصی را که نشان‌دهنده زمین‌لرزه باشد، پیدا خواهند کرد یا خیر؛ همچنین تمام طول‌های ممکن را که بین ایستگاه‌ها می‌توان ایجاد کرد، بررسی کردند.

در این تحقیق، حرکات بین‌لرزه‌ای پوسته آمریکای شمالی بین دو زمین‌لرزه ۶ ریشتری و ۹ ریشتری شمال شرقی ژاپن که به ترتیب در سپتامبر ۲۰۱۰ و مارس ۲۰۱۱ به وقوع پیوستند، مدل‌سازی می‌شود. همچنین حرکات حین‌لرزه‌ای در اثر زمین‌لرزه‌های ۷/۲ و ۹ ریشتری که به ترتیب در ۲۰۱۱/۰۳/۰۹ و ۲۰۱۱/۰۳/۱۱ به وقوع پیوستند، بررسی می‌شوند. با توجه به اینکه در سپتامبر سال ۲۰۱۰ زمین‌لرزه‌ای با قدرت حدود ۶ ریشتر در منطقه مورد مطالعه رخ داده است و زمین‌لرزه بعدی در مارس سال ۲۰۱۱ با قدرت ۹ ریشتر در همان منطقه به وقوع پیوسته و با توجه به اینکه زمین‌لرزه بزرگ خاصی در این بازه زمانی در آن منطقه رخ نداده است، بازه زمانی مورد بررسی حدود ۱۲۸ روز در نظر گرفته شد (البته با صرف نظر از داده‌های یک ماه بعد از زلزله ۶ ریشتری به دلیل کاهش تأثیرات پس‌لرزه‌های ناشی از این زمین‌لرزه در محاسبات) و در نهایت چگونگی حرکت پوسته در این ۱۲۸ روز بررسی شد. همچنین مقدار حرکات حین‌لرزه‌ای در اثر زمین‌لرزه‌های ۷/۲ و ۹ ریشتری که در شمال ژاپن به وقوع پیوستند، با استفاده از داده‌های GPS بررسی شد.

فاصله ایستگاه‌های این شبکه از هم حدود ۲۰ کیلومتر است و به‌طور مداوم تغییرات پوسته زمین را پایش می‌کند.

تکرار اندازه‌گیری‌های ژئودتیک در محدوده‌ای مشخص، به ما امکان خواهد داد که درباره توزیع دگرشکلی زمین‌ساختی در مقاطع زمانی بین دو زلزله (Inter-seismic)، هنگام زلزله (Co-seismic) و پس از زلزله (Post-seismic) اظهار نظر کنیم (بننت و همکاران، ۱۹۹۶؛ بارگمن و همکاران، ۱۹۹۷؛ بارگمن و همکاران، ۲۰۰۲).

در این منطقه تحقیقات زیادی درباره حرکات زمین‌ساخت ژاپن انجام گرفته است. بیشتر کارهای صورت گرفته برای مطالعه حرکات و دگرشکلی پوسته با استفاده از داده‌های GPS یا به‌صورت بلندمدت بوده است که در این صورت مقدار دگرشکلی پوسته را در چند سال محاسبه می‌کنند یا اینکه با استفاده از این داده‌ها مقدار لغزش گسل، در حین و بعد از زلزله را محاسبه می‌کنند. از جمله تحقیقات صورت گرفته می‌توان به این موارد اشاره کرد؛ نیشیمورا و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از ایستگاه‌های شبکه ژئونت مقدار لغزش گسل را در حین زمین‌لرزه‌های ۷ ریشتری و ۹ ریشتری که به ترتیب در ۹ و ۱۱ مارس ۲۰۱۱ رخ داده بودند، محاسبه کردند و نتیجه گرفتند که در اثر زمین‌لرزه ۹ ریشتری مناطق ساحلی نزدیک به کانون زلزله در حدود ۵ متر در جهت مسطح‌ت‌ها جابه‌جا شده است.

تاکاشی (۲۰۱۱) در مطالعه‌ای روی حرکات حین لرزه‌ای زلزله ۹ ریشتری مارس ۲۰۱۱، مقدار اتساع و همچنین ماکزیمم کرنش برشی را در حین زمین‌لرزه ۹ ریشتری، محاسبه کرد و نتیجه گرفت که در اثر این زمین‌لرزه منطقه نزدیک به کانون زلزله به شدت منبسط شده و ماکزیمم کرنش برشی در منطقه‌ای در نزدیکی کانون رخ داده است. همچنین در ادامه، اتساع و تنش کلمب را در حین زمین‌لرزه ۶/۴ ریشتری که در ۱۵ مارس ۲۰۱۱ در کنار آتشفشان فوجی ژاپن رخ داد، تعیین کرد. ازونو و همکاران (۲۰۱۲) با تحقیق در زمینه مقدار

۲. ساختار داده‌های استفاده‌شده

داده‌های استفاده‌شده در این تحقیق، مختصات سه‌بعدی ایستگاه‌های GPS شبکه ژئوت در دستگاه مختصات ITRF2005 هستند (ناکاگاو و همکاران، ۲۰۰۵).

داده‌های ژئوت ناشی از تجزیه و تحلیل به سه روش مختلف در دسترس هستند (F3, R3, Q3) که هر کدام بسته به هدف کاربران استفاده می‌شوند. نوع F3 این داده‌ها از دقیق‌ترین آن‌هاست؛ به طوری که موقعیت مطلق هر ایستگاه را به ما می‌دهد. GSI (Geographical Survey Institute) نوع F3 از داده‌ها را «مختصات روزانه ایستگاه‌های مشاهداتی ژئوت» نامیده است. با این حال تجزیه و تحلیل داده‌ها برای رسیدن به داده‌هایی از نوع F3 حدود دو هفته زمان نیاز دارد، زیرا انواع مختلفی از محاسبات با استفاده از اطلاعات دقیق مدار ماهواره‌ها روی داده‌ها اجرا می‌شود (کامیا و همکاران، ۲۰۱۲؛ یاماگیوا و همکاران، ۲۰۰۶).

با توجه به اینکه در این تحقیق داده‌های استفاده‌شده از نوع F3 بود، آثار مختلفی همچون جزرومد زمین جامد، بار ناشی از جزرومد اقیانوس، تأخیر یونسفر و اتمسفر و... از داده‌ها جدا و با نرم‌افزار علمی برنیز (BERNIS) پردازش شده‌اند، اما آثاری مانند تأثیرات آب‌وهوایی، نزولات جوی و خطاهای اتفاقی روی داده‌ها باقی می‌مانند.

داده‌های تجربی معمولاً از دو قسمت سیگنال و نویز تشکیل شده‌اند. برای پردازش این داده‌ها لازم است آن‌ها نرم شوند؛ بنابراین باید خطاهای اتفاقی کاهش پیدا کنند (هانتا و همکاران، ۲۰۱۲). تنها راه برای کاهش این خطاها تشکیل سری‌های زمانی و استفاده از فیلترهای عددی به منظور

کاهش اثر این خطاها و دستیابی به نحوه حرکت پوسته است.

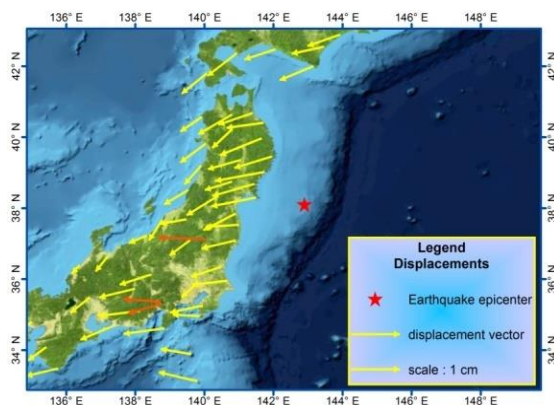
۳. بررسی حرکات بین‌لرزه‌ای در منطقه

هدف اصلی از این تحقیق مدل‌سازی حرکات بین‌لرزه‌ای در بین دو زمین‌لرزه ۶ و ۹ ریشتری است که به ترتیب در سپتامبر سال ۲۰۱۰ و مارس ۲۰۱۱ در یک منطقه به وقوع پیوست. در ادامه حرکات حین لرزه‌ای ناشی از زمین‌لرزه‌های ۷/۲ و ۹ ریشتری که به ترتیب در ۹ و ۱۱ مارس ۲۰۱۱ در شمال شرقی ژاپن رخ داده‌اند، مدل‌سازی می‌شود.

برای این منظور مختصات روزانه ایستگاه‌های GPS شبکه ژئوت بررسی شدند. براساس بررسی‌های صورت گرفته، آخرین زلزله در این منطقه در سپتامبر سال ۲۰۱۰ رخ داده است؛ بنابراین برای دستیابی به حرکات بین‌لرزه‌ای و برای جلوگیری از وارد شدن آثار این زمین‌لرزه (ناشی از پس‌لرزه‌ها)، از داده‌های یک ماه بعد از این زمین‌لرزه صرف‌نظر شد و سپس حرکات پوسته آمریکای شمالی از ۲۰۱۰/۱۱/۰۱ تا ۲۰۱۱/۰۳/۰۸ که حدود ۱۲۸ روز تا قبل از اولین زمین‌لرزه به طول می‌انجامد، بررسی شد.

بررسی حرکات مسطحانی در ایستگاه‌های GPS منتخب در منطقه ژاپن در این ۱۲۸ روز، نشان می‌دهد که حرکات مسطحانی در تمامی ایستگاه‌ها از سه مقطع زمانی متفاوت تشکیل شده است.

مقطع زمانی اول از اول نوامبر ۲۰۱۰ شروع شده و تا دسامبر ۲۰۱۰ ادامه پیدا می‌کند. در این مقطع تمامی بردارهای جابه‌جایی نشان می‌دهند که پوسته اقیانوس آرام، پوسته ژاپن را به سمت غرب می‌راند (شکل ۱).



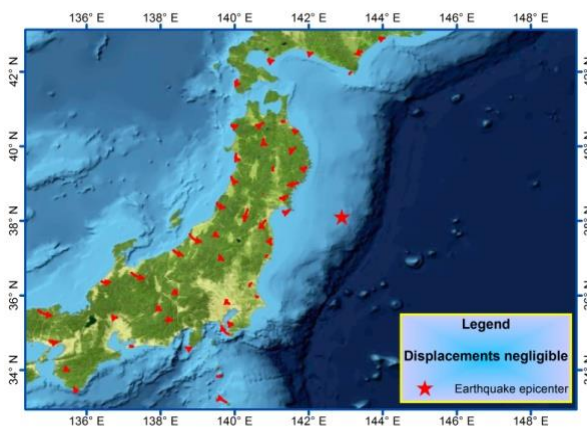
شکل ۱. نحوه حرکت پوسته ژاپن در مقطع زمانی اول (اول نوامبر ۲۰۱۰ تا دسامبر ۲۰۱۰)

آمریکای شمالی قصد دارد جهت حرکت خود را عوض کند.

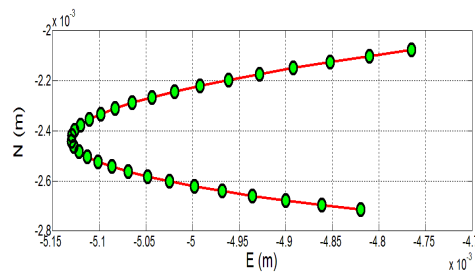
در نهایت بعد از اتمام این مقطع، مقطع زمانی سوم شروع می شود و تا ۸ مارس ۲۰۱۱، دقیقاً یک روز قبل از اولین زمین لرزه، ادامه پیدا می کند. در این مقطع بردارهای جابه جایی در خلاف جهت حرکت در مقطع زمانی اول شروع به حرکت کرده و هم جهت با حرکت پوسته در زمان زمین لرزه به پیش می روند (شکل ۴).

مقطع زمانی دوم، بعد از اتمام مقطع زمانی اول شروع می شود و تا ۲۰ ژانویه ۲۰۱۱ ادامه پیدا می کند. در این مقطع بردارهای جابه جایی دارای مقادیر بسیار کوچکی هستند و جهتی مشخصی از خود نشان نمی دهند (شکل ۲).

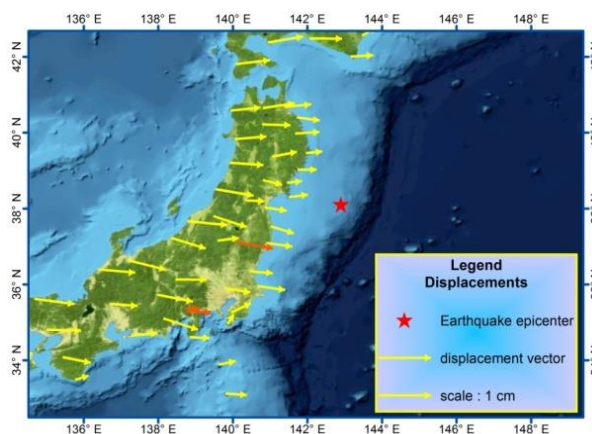
به منظور درک رفتار پوسته در این مقطع، جابه جایی یکی از ایستگاه ها در شکل ۳ نمایش داده شده است. این حرکت در تمامی ایستگاه های منتخب در منطقه دیده می شود. به نظر می رسد که در این مقطع پوسته



شکل ۲. نحوه حرکت پوسته ژاپن در مقطع زمانی دوم



شکل ۳. نحوه حرکت یکی از ایستگاه های GPS در مقطع زمانی دوم



شکل ۴. نحوه حرکت پوسته ژاپن در مقطع زمانی سوم

۴. تحلیل چندمرحله‌ای حرکات بین‌لرزه‌ای

همان‌طور که در بخش ۳ گفته شد، منطقه مورد مطالعه قبل از زمین‌لرزه حرکات متفاوتی را از خود نمایش می‌دهد؛ بنابراین برای پایش این حرکات به یک تحلیل چندمرحله‌ای نیاز است. در گام اول آزمون میانگین حرکت پوسته در مقاطع زمانی اول و سوم، محاسبه و سپس تمامی بردارهای جابه‌جایی در جهت آزمون میانگین، تصویر می‌شود. به‌منظور محاسبه آزمون میانگین، نقاط فعال آتشفشانی مانند آتشفشان کوه ناسو و آتشفشان کوه فوجی (سایت ولکنو دیسکاور) بررسی شدند. با توجه به شکل‌های ۱ و ۴ و با توجه به حرکات متفاوتی که این آتشفشان‌ها از خود نشان دادند (بردارهای نارنجی‌رنگ) این نقاط فعال آتشفشانی از روند محاسبات خارج شدند تا محاسبات را تحت تأثیر قرار ندهند.

شکل ۵ جابه‌جایی‌های تصویرشده در جهت آزمون

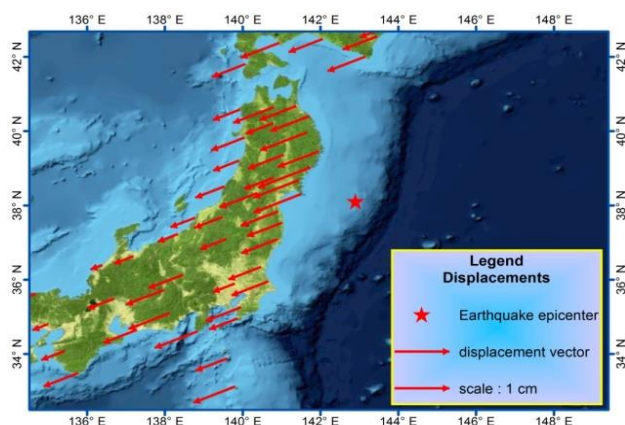
میانگین در مقطع زمانی اول را نشان می‌دهد.

شکل ۶ جابه‌جایی‌های تصویرشده در جهت آزمون

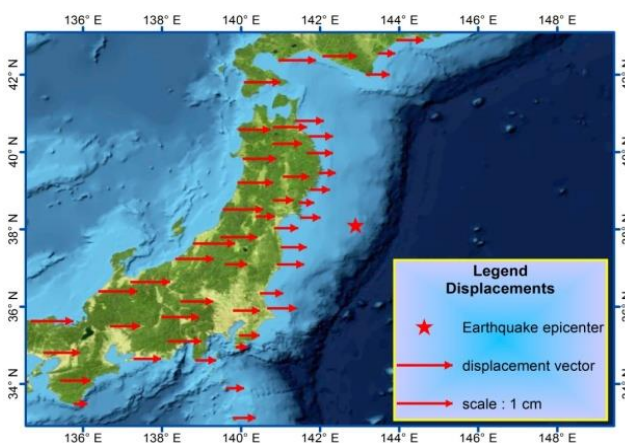
میانگین در مقطع زمانی سوم را نشان می‌دهد.

۴.۱. تحلیل کرنش (نرخ تغییرات مکانی) میدان جابه‌جایی مسطحانی

برای تعیین مقدار تغییر شکل از نگرش لاگرانژی استفاده می‌شود. با استفاده از نرخ تغییرات جابه‌جایی‌ها و معادلات حرکتی تغییر شکل، می‌توان تانسور کرنش را محاسبه و پارامترهای تغییر شکل را از آن استخراج کرد. برای به‌دست آوردن این پارامترها از فرم خطی توزیع کرنش در فاصله نزدیک (همسایگی) و معادلات مربوطه استفاده می‌شود. مدل‌های غیرخطی جابه‌جایی به خاطر مشکلات محاسباتی که ایجاد می‌کنند، تقریباً هیچ‌وقت استفاده نمی‌شوند.



شکل ۵. نحوه حرکت پوسته ژاپن در مقطع زمانی اول، تصویرشده در جهت آزمون میانگین



شکل ۶. نحوه حرکت پوسته ژاپن در مقطع زمانی سوم تصویرشده در جهت آزمون میانگین

(components) را به دست آورد:

$$\sigma = \frac{1}{2}(e_{xx} + e_{yy}) \quad (5) \text{ اتساع}$$

$$\omega = \frac{1}{2}(e_{xy} - e_{yx}) \quad (6) \text{ دوران}$$

$$\tau = \frac{1}{2}(e_{xx} - e_{yy}) \quad (7) \text{ کشش}$$

$$\nu = \frac{1}{2}(e_{xy} + e_{yx}) \quad (8) \text{ برش}$$

یکی دیگر از پارامترهایی که از تانسور کرنش محاسبه می‌شود، ماکزیمم کرنش برشی (max shear strain) است که به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$\text{maximum shear strain} = \frac{1}{2}(e_{xy}^2 + \frac{(e_{xx} - e_{yy})^2}{4}) \quad (9)$$

برای محاسبه این تانسورها در هر ایستگاه، بردار جابه‌جایی در آن نقطه و در ایستگاه‌های اطراف آن به روش اختلافات محدود (finite differences) تعیین می‌شود.

۴.۱.۱. فرم خطی توزیع کرنش (روش اختلافات محدود)

به منظور محاسبه تانسور کرنش در هر ایستگاه، در گام اول مقدار جابه‌جایی‌ها در ایستگاه‌های منتخب، محاسبه و سپس از روش اختلافات محدود برای محاسبه تانسور کرنش استفاده می‌شود.

معادلات مربوط به تانسور کرنش به شکل زیرند:

$$u_j = u_i + \frac{\partial u}{\partial x_i}(x_j - x_i) + \frac{\partial u}{\partial y_i}(y_j - y_i) \quad (10)$$

$$v_j = v_i + \frac{\partial v}{\partial x_i}(x_j - x_i) + \frac{\partial v}{\partial y_i}(y_j - y_i) \quad (11)$$

در روابط (۱۰) و (۱۱)، u_i ، v_i و u_j و v_j مشاهدات و x_i ، y_i ، x_j و y_j مختصات هستند و در نهایت $\frac{\partial u}{\partial x_i}$ ، $\frac{\partial u}{\partial y_i}$ ، $\frac{\partial v}{\partial x_i}$ و $\frac{\partial v}{\partial y_i}$ گرادیان‌های جابجایی به عنوان مجهولات هستند. در ادامه به دلیل اینکه در این معادلات چهار مجهول وجود دارد، برای حل آن‌ها در یک نقطه، حداقل نیاز به دو نقطه در همسایگی داریم (در این تحقیق برای حل این معادلات در یک نقطه، از پنج نقطه در همسایگی استفاده شده است).

تغییر شکل بیانگر تغییر موقعیت اجزای یک جسم نسبت به وضعیت اولیه آن است. به بیان ریاضی کرنش، گرادیان میدان جابه‌جایی است؛ یعنی جابه‌جایی دو نقطه در یک فاصله دیفرانسیلی (و نیچک و کاراکی و سکی، ۱۹۸۶).

در مطالعه تغییر شکل با استفاده از محاسبات کرنش، به علت اینکه وابستگی به سیستم مختصات حذف شده است، می‌توان به نتایج بیشتر از سایر روش‌های تعیین تغییر شکل اعتماد کرد؛ در نتیجه تحلیل کرنش بهترین روش در مطالعه تغییر شکل قلمداد می‌شود (و نیچک و کاراکی و سکی، ۱۹۸۶).

با توجه به تعریفی که برای کرنش ارائه شد، برای تعیین آن کافی است از مدل جابه‌جایی گرادیان بگیریم که نتیجه آن ماتریسی به نام ماتریس کرنش (E) است.

اگر بردار جابه‌جایی در نقطه با موقعیت r را با $u(r) = \begin{bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{bmatrix}$ و تانسور کرنش را با $E(r)$ نشان دهیم، رابطه دیفرانسیلی $u(r) = E(r)dr$ بین آن‌ها برقرار است. به عبارتی:

$$E(r) = \begin{bmatrix} e_{xx} & e_{xy} \\ e_{yx} & e_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u(x, y)}{\partial x} & \frac{\partial u(x, y)}{\partial y} \\ \frac{\partial v(x, y)}{\partial x} & \frac{\partial v(x, y)}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (1)$$

تانسور کرنش می‌تواند خود به دو تانسور متقارن (S) و پادمقارن (A) به شکل زیر تجزیه شود:

$$E(r) = S(r) + A(r) \quad (2)$$

$$S(r) = \frac{1}{2}(E + E^T) = \begin{bmatrix} e_{xx} & \frac{1}{2}(e_{xy} + e_{yx}) \\ \frac{1}{2}(e_{yx} + e_{xy}) & e_{yy} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$A(r) = \frac{1}{2}(E - E^T) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2}(e_{xy} - e_{yx}) \\ \frac{1}{2}(e_{yx} - e_{xy}) & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

ماتریس متقارن S دربرگیرنده اطلاعاتی راجع به برش، انبساط و انقباض است. عناصر ماتریس پادمقارن A بیانگر دوران یا تغییر شکل چرخشی هستند.

با استفاده از تانسور کرنش می‌توان پارامترهای مختلفی از جمله اتساع (dilatation)، دوران (differential rotation)، کشش و برش (tensor shear)

مسطحاتی صفر) مقدار جابجایی خود را حفظ کرده باشد. نمونه‌ای از چگونگی تعریف یک دستگاه مختصات محلی در شکل (۸) نشان داده شده است:

به‌منظور انتقال مختصات ایستگاه‌های GPS به این دستگاه مختصات محلی از روابط (۱۲) و (۱۳) استفاده شده است:

$$x = R \cos \varphi_0 (\lambda - \lambda_0) \quad (12)$$

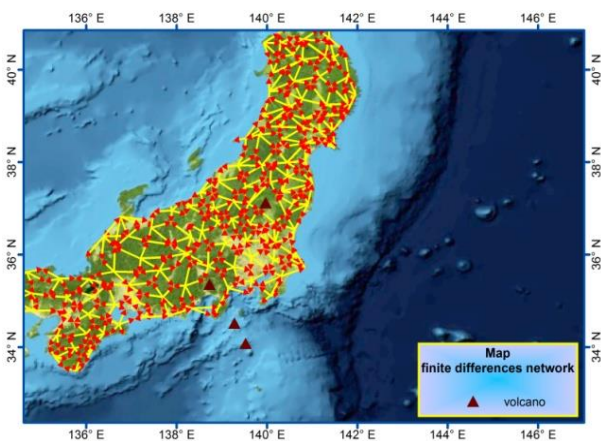
$$y = R (\varphi - \varphi_0) \quad (13)$$

به‌طوری که در روابط (۱۲) و (۱۳)، λ_0 و φ_0 مختصات مبدأ دستگاه مختصات محلی در نظر گرفته شده در منطقه است. λ و φ مختصات ایستگاه‌های GPS در دستگاه مختصات ژئوستریک و x و y مختصات ایستگاه‌های GPS در دستگاه مختصات محلی هستند. R نیز شعاع متوسط زمین است.

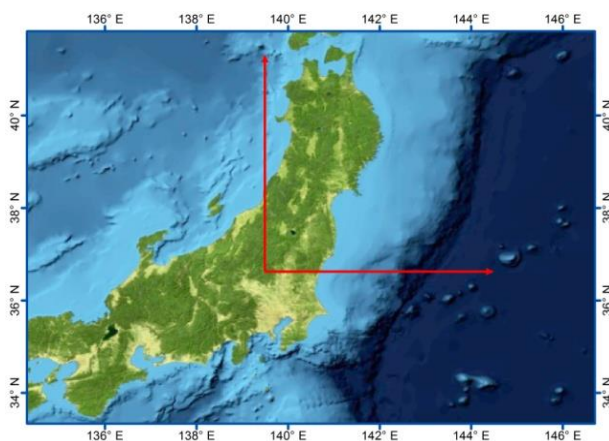
در ادامه به‌منظور محاسبه تانسور کرنش، باید شبکه‌ای از این نقاط و نقاط اطرافشان روی منطقه به روش اختلافات محدود طراحی شود. طراحی این شبکه باید به‌گونه‌ای باشد که تمامی نقاط به‌صورت یکپارچه به همدیگر متصل شده باشند.

شکل ۷ شبکه طراحی شده به روش اختلافات محدود است که نقاط فعال آتشفشانی را که از روند محاسبات خارج شده اند، نشان می‌دهد (در این شبکه از ایستگاه‌های ژئوت ژاپن استفاده شده است).

در ادامه به‌منظور محاسبه گرادیان‌های جابه‌جایی باید مختصات‌های ژئوستریک ایستگاه‌های GPS به یک دستگاه مختصات محلی تعریف شده در منطقه انتقال یابد. این دستگاه مختصات باید به‌گونه‌ای تعریف شود که مبدأ آن در مرکز منطقه مورد مطالعه واقع شده باشد؛ با در نظر گرفتن اینکه مبدأ مختصات انتخابی (مختصات



شکل ۷. شبکه طراحی شده به روش اختلافات محدود به‌منظور محاسبه تانسور کرنش



شکل ۸. تعریف یک دستگاه مختصات محلی در مرکز منطقه مورد مطالعه

۲.۱.۴. محاسبه و بررسی توزیع اتساع منطقه، قبل از وقوع زمین لرزه‌ها

در این قسمت اتساع در مقطع زمانی سوم محاسبه شد. نتایج به شکل (۹) است.

شکل ۹ نقشه اتساع یک روز قبل از اولین زمین لرزه در انتهای مقطع زمانی سوم را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در غرب ژاپن انقباض زیاد است و همچنین در شرق ژاپن انبساط نمایان می‌شود. بررسی‌ها روی منطقه نشان می‌دهد که انقباض موجود در غرب نشان‌دهنده فشارهای وارده ناحیه غرب به ناحیه شرق ژاپن است و همچنین انبساط نمایان شده در شرق نشان‌دهنده شروع لغزش پوسته آمریکای شمالی روی پوسته اقیانوس آرام می‌باشد.

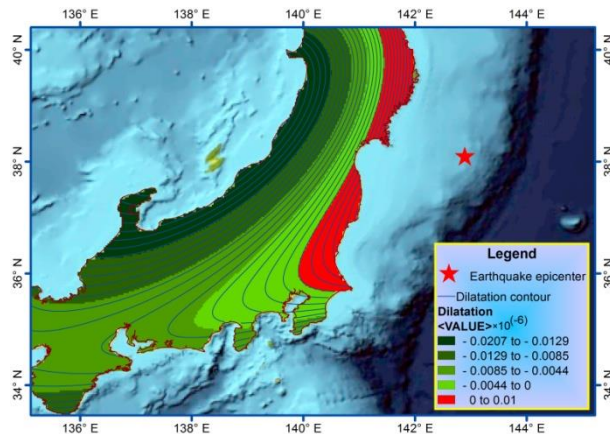
در ادامه نقشه اتساع یک روز مانده به اولین زمین لرزه، با نقشه موقعیت تمام کانون‌های زمین لرزه‌های

به وقوع پیوسته از تاریخ ۹ مارس تا ۳۱ مارس ۲۰۱۱ هم‌پوشانی شد (شکل ۱۰).

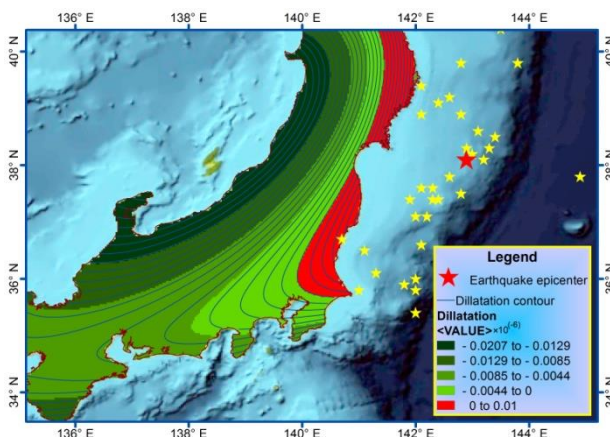
همان‌طور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، تمام کانون‌های زمین لرزه (پیش‌لرزه‌ها، زمین لرزه اصلی و پس‌لرزه‌ها) دقیقاً در منطقه‌ای اتفاق افتاده‌اند که ژاپن در حال انبساط بوده است.

۳.۱.۴. محاسبه و بررسی توزیع اتساع منطقه، به‌هنگام وقوع زمین لرزه‌ها

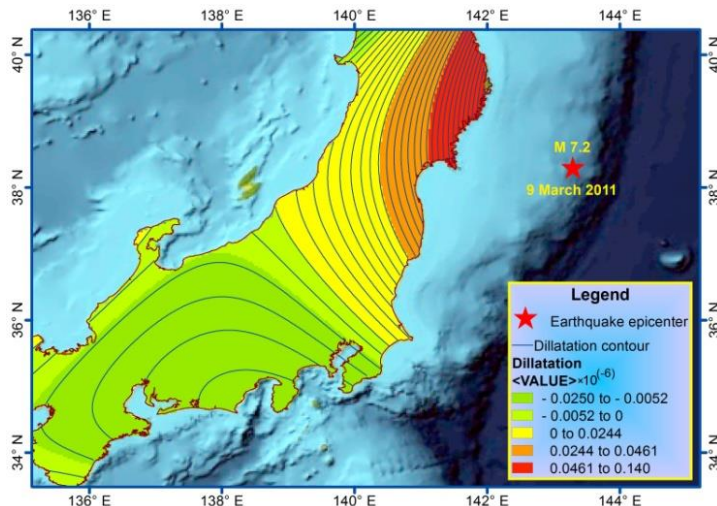
در مرحله بعد، اثر زمین لرزه‌های ۷/۲ و ۹ ریشتری (که به ترتیب در ۹ و ۱۱ مارس ۲۰۱۱ در شمال ژاپن رخ دادند) بر روی منطقه، بررسی و توزیع اتساع در این مناطق محاسبه شد. شکل ۱۱ اتساع ایجاد شده در منطقه در اثر زمین لرزه ۷/۲ ریشتری و شکل ۱۲ اتساع ایجاد شده در منطقه در اثر زمین لرزه ۹ ریشتری را نشان می‌دهد.



شکل ۹. نقشه توزیع اتساع در انتهای مقطع زمانی سوم



شکل ۱۰. نقشه همپوشانی توزیع اتساع یک روز مانده به اولین زلزله با تمامی کانون‌های زمین لرزه (پیش‌لرزه، زمین لرزه اصلی و پس‌لرزه‌ها)



شکل ۱۱. نقشه توزیع اتساع در اثر زمین‌لرزه ۷/۲ ریشتری (پیش‌لرزه)

$$l = Ax \quad ; \quad C_l = \sigma^2 I \quad (14)$$

$$\hat{x} = (A^T C_l^{-1} A)^{-1} A^T C_l^{-1} l \quad (15)$$

$$\rightarrow \hat{x} = \begin{cases} \frac{\partial u}{\partial x} = e_{xx} \\ \frac{\partial u}{\partial y} = e_{xy} \\ \frac{\partial v}{\partial x} = e_{yx} \\ \frac{\partial v}{\partial y} = e_{yy} \end{cases}$$

مشاهدات l جابه‌جایی‌های محاسبه‌شده از مختصات و مدل ریاضی مورد استفاده در سرشکنی روابط تیب (۱۰) و (۱۱) هستند. دقت مجهولات بعد از سرشکنی از رابطه (۱۶) قابل محاسبه است.

$$C_{\hat{x}} = (A^T C_l^{-1} A)^{-1} \quad (16)$$

با توجه به اینکه مقدار اتساع از رابطه $\sigma = \frac{1}{2}(e_{xx} + e_{yy})$ محاسبه می‌شود، می‌توان واریانس و دقت اتساع محاسبه‌شده را به صورت رابطه (۱۷) محاسبه کرد.

$$\sigma_{\sigma}^2 = \frac{1}{4}\sigma_{e_{xx}}^2 + \frac{1}{4}\sigma_{e_{yy}}^2 + \frac{1}{2}\sigma_{e_{xy}}^2 \rightarrow \quad (17)$$

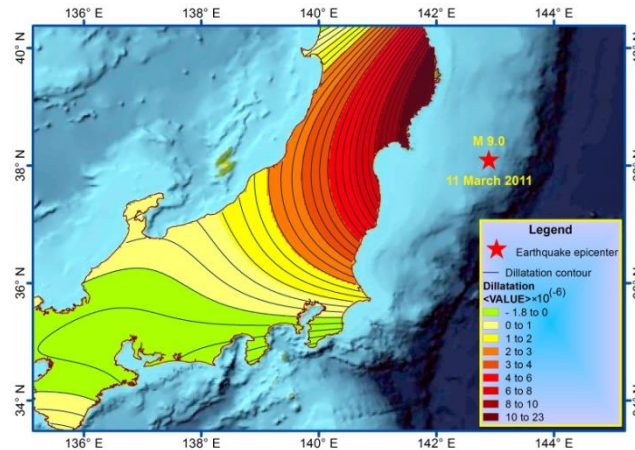
$$\sigma_{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{4}\sigma_{e_{xx}}^2 + \frac{1}{4}\sigma_{e_{yy}}^2 + \frac{1}{2}\sigma_{e_{xy}}^2}$$

نتایج عددی محاسبات، دقت اتساع را در منطقه و در مقطع زمانی سوم به طور متوسط در حدود $\pm 3/5 \times 10^{-1}$ نشان می‌دهد. با مقایسه این خطا با مقدار متوسط اتساع نتیجه می‌شود که خطاها در حدود یک‌صدم مقادیر اتساع هستند.

با توجه به شکل ۱۱ در اثر وقوع اولین زمین‌لرزه در منطقه (که یک پیش‌لرزه محسوب می‌شود) کل منطقه شمال ژاپن دچار انبساط می‌شود، اما دو روز بعد زمین‌لرزه اصلی با قدرت ۹ ریشتر در منطقه اتفاق می‌افتد و منطقه را دچار انبساط شدیدتری می‌کند و نشان می‌دهد که پوسته آمریکای شمالی با شدت روی پوسته اقیانوس آرام می‌لغزد. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ طیف رنگ‌های قرمز، نارنجی و زرد نشان‌دهنده انبساط در منطقه‌اند. همان‌گونه که در نقشه‌ها دیده می‌شود، مناطق نزدیک به کانون زمین‌لرزه، بیشتر منبسط شده‌اند و هرچه از کانون زمین‌لرزه دور می‌شویم، انبساط کاهش می‌یابد.

۵. اعتبارسنجی نتایج

داده‌های استفاده‌شده، موقعیت‌های روزانه ایستگاه‌ها در منطقه با خطای متوسط حدود ۲ میلی‌متر در جهت مسطحات هستند و جابه‌جایی‌های محاسبه‌شده از مختصات نیز دقتی در حدود ۲ میلی‌متر دارند. برای حل معادلات روش اختلافات محدود و محاسبه تانسور کرنش از جابه‌جایی‌های محاسبه‌شده برای مقطع زمانی سوم، از روش کمترین مربعات استفاده شد که در ادامه به حل این معادلات به روش کمترین مربعات و محاسبه ماتریس واریانس کوواریانس مجهولات اشاره می‌شود. با در نظر گرفتن σ^2 به عنوان واریانس مشاهدات:



شکل ۱۲. نقشه توزیع اتساع در اثر زمین‌لرزه ۹ ریشتری (زلزله اصلی)

به طوری که بردارهای جابه‌جایی روزبه‌روز بزرگ‌تر می‌شوند و در نهایت بعد از اتمام این ۴۸ روز، اولین زمین‌لرزه با قدرت ۷/۲ ریشتر در تاریخ ۲۰۱۱/۱۱/۰۹ به وقوع می‌پیوندد و دو روز بعد از آن، زمین‌لرزه اصلی با قدرت ۹ ریشتر در ۲۰۱۱/۳/۱۱ در همان منطقه رخ می‌دهد. تحلیل کرنش در مقطع زمانی سوم نشان می‌دهد که غرب ژاپن را انقباض فرا گرفته است و در شرق ژاپن انبساط نمایان می‌شود. انبساط نمایان شده در مقطع زمانی سوم می‌تواند به دلیل لغزش پوسته آمریکای شمالی روی پوسته اقیانوس آرام در آینده‌ای نزدیک باشد؛ بنابراین با توجه به انبساط نمایان شده در مقطع زمانی سوم در شرق ژاپن می‌توان منطقه تحت تأثیر زمین‌لرزه را شناسایی کرد. همچنین مقطع زمانی دوم را که در آن بردارهای جابه‌جایی جهت مشخصی ندارند و در حال تغییر جهت هستند شاید بتوان یک پیش‌نشانگر برای وقوع این زمین‌لرزه‌ها در نظر گرفت. در نهایت تحلیل کرنش در روزهای زمین‌لرزه نشان می‌دهد که منطقه در اثر زمین‌لرزه منبسط شده و به شدت روی پوسته آمریکای شمالی می‌لغزد. بیشترین مقدار این انبساط (لغزش) در نزدیک کانون زمین‌لرزه رخ می‌دهد.

مراجع

Bennet, R. A., Rodi, W. and Reilinger, R. E., 1996, Global Positioning System constraints on fault slip rates in southern California and northern Baja, Mexico, *J. Geophys. Res.*,

۶. نتیجه‌گیری

با بررسی‌های انجام گرفته در ۱۲۸ روز قبل از زمین‌لرزه‌ها سال ۲۰۱۰ ژاپن متوجه شدیم که حرکت پوسته ژاپن در این ۱۲۸ روز از سه مقطع زمانی متفاوت تشکیل شده است.

در مقطع زمانی اول که از ۲۰۱۰/۱۱/۰۱ شروع شده و تا ۲۰۱۰/۱۲/۲۰ ادامه می‌یابد، پوسته اقیانوس آرام، پوسته آمریکای شمالی را به سمت غرب می‌راند. در این مقطع زمانی بردارهای جابه‌جایی که در نزدیکی تریج ژاپنی و کانون زمین‌لرزه هستند، بزرگ‌ترند و هرچه از این ناحیه فاصله می‌گیریم، بردارهای جابه‌جایی کوچک‌تر می‌شوند. در مقطع زمانی دوم که از ۲۰۱۰/۱۲/۲۰ شروع شده و تا ۲۰۱۱/۰۱/۱۹ ادامه می‌یابد، بردارهای جابه‌جایی بسیار کوچک شده و هیچ‌کدام جهت مشخصی را نشان نمی‌دهند. به نظر می‌رسد علت این توقف آماده‌شدن پوسته آمریکای شمالی برای تغییر جهت حرکت باشد. در مقطع زمانی سوم که از ۲۰۱۱/۰۱/۲۰ شروع شده و تا ۲۰۱۱/۰۳/۰۸ (دقیقاً یک روز قبل از رخداد اولین زمین‌لرزه) ادامه پیدا می‌کند، جهت حرکت پوسته آمریکای شمالی کاملاً برعکس شده و با حرکت پوسته در زمان زمین‌لرزه هم‌جهت می‌شود. این حرکت تا ۴۸ روز ادامه پیدا می‌کند؛

101(B10), 21943-60.

Bürgmann, R., Segall, P., Lisowski, M. and Svarc, J. P., 1997, Post-seismic strain following the 1989 Loma Prieta earthquake from repeated

- GPS and leveling measurements, *J. Geophys. Res.*, 102, 4933-55.
- Bürgmann, R., Ergintav, S., Segall, P., Hearn, E. H., McClusky, S., Reilinger, R. E., Woith, H. and Zschau, J., 2002, Time-dependent distributed afterslip on the deep below the Izmit earthquake rupture, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 92(1), 126-137.
- El-Fiky, G. and kato, T., 2006, Study of periodic vertical crustal movement in the Omaezaki peninsula, Central Japan, and its tectonic implications, *Earth Planets Space*, 52, 25-35.
- Fan, W., ZhengKang, S., YanZhao, W. and Min, W., 2011, Influence of the March 11, 2011 Mw 9.0 Tohoku-oki earthquake on regional volcanic activities, *J. Geophysics.*, 56(20), 2077-2081.
- Hanta, V., Poživil, J. and Friess, K., 2012. Digital processing of noise experimental sorption data using Savitzky-Golay filter, Department of Computing and Control Engineering.
- Herp, 2011, The headquarters for earthquake research promotion, Home Page, <http://www.k-net.bosai.go.jp/>
- Kamiyama, M., Sugito, M. and Kuse, M., 2012, Precursor of crustal movements before the 2011 great east Japan earthquake, Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, March 1-4, 2012, Tokyo, Japan.
- Murai, S. and Araki, H., 2012, Crustal movment before and after the Great east Japan Earthquake, coordinates magazine.
- Nishimura, T., Munekane, H. and Yarai, H., 2011, The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake and its aftershocks observed by GEONET. *LETTER Earth Planets Space*, 63, 631-636.
- Nakagawa, H., Miyahara, B., Iwashita, C., Toyofuku, T., Kotani, K., Ishimoto, M., Munekane, H. and Hatanaka, Y., 2005, New analysis strategy of GEONET, Geographical Survey Institute.
- Ohzono, M., Yabe, Y., Iinuma, T., Ohta, Y., Miura, S., Tachibana, K., Sato, T. and Demachi, T., 2012, Strain anomalies induced by the 2011 Tohoku earthquake (M_w 9.0) as observed by a dense GPS network in northeastern Japan, *Earth Planets Space*, 64, 1231-1238.
- Sagiya, T., 2004, A decade of GEONET: 1994-2003 The continuous GPS observation in Japan and its impact on earthquake studies, *Earth Planets Space*, 56, xxix-xli.
- Takahashi, H., 2011, Static strain and stress changes in eastern Japan due to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, as derived from GPS data, *LETTER Earth Planets Space*, 63, 741-744.
- Vanicek, P. and Krakiwsky, E., 1986, *Geodesy the concepts*, Elsevier science publishers B.V.P.O. Box 1991, 1000 BZ Amsterdam the Netherlands.
- Yamagiwa, A., Hatanaka, Y., Yutsudo, T. and Miyahara, B., 2006, Real-time capability of GEONET system and its application to crust monitoring, *Bulletin of the Geographical Survey Institute*, 53, 27-33.