

مقایسه روش‌های برآورد مولفه پیچشی جنبش زمین با استفاده از داده‌های شبکه شتاب‌نگاری متراکم

غلامرضا نوری^{۱*}، محمدرضا قائم‌مقامیان^۲ و میر مجید هاشمی‌فرد^۳

^۱ استادیار، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

^۲ دانشیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

nouri@uma.ac.ir, mrgh@iiees.ac.ir, majid_hashemifard@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱۲/۱۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۶/۳۰)

چکیده

به دلیل محدودیت‌های موجود در ثبت مولفه پیچشی جنبش شدید زمین، سعی بر این است که این مولفه برحسب مولفه‌های انتقالی برآورد شود. به‌طور عمده سه روش برای برآورد مولفه پیچشی از مولفه‌های انتقالی وجود دارد که عبارت‌اند از روش مشتق زمانی تک‌ایستگاهی، روش تفاضل محدود و روش ژئودتیک به صورت دو یا چندایستگاهی. در برآورد مولفه پیچشی از مولفه انتقالی محدودیت‌هایی از قبیل فواصل جدایش ایستگاه‌های شتاب‌نگاری و آرایش شتاب‌نگارها دخالت دارند. تحقیقات پیشین نشان داده‌اند که روش ژئودتیک به دلیل استفاده از توابع دارای دقت زیاد و استفاده هم‌زمان از داده‌های چندین ایستگاه، قابلیت بهتری در برآورد مولفه پیچشی دارد. هرچند دقت آن تابع مشخصات شبکه نیز خواهد بود.

در این مقاله با استفاده از داده‌های شبکه شتاب‌نگاری چپا، شتاب‌نگاشت‌های مولفه پیچشی با استفاده از هر سه روش پیش‌گفته، برآورد و مقایسه شده‌اند. همچنین امکان ایجاد رابطه‌ای بین بیشینه شتاب انتقالی و پیچشی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور از داده‌های ثبت شده در شبکه بسیار متراکم در ژاپن به نام شبکه چپا استفاده شده است. از میان داده‌های موجود، داده‌های شتاب‌نگاری ۹ زمین‌لرزه که دارای نسبت سیگنال به نوفه بالاتری بودند، انتخاب شدند. شبکه شتاب‌نگاری متراکم چپا یکی از شبکه‌های منحصر به فرد شتاب‌نگاری است که امکان برآورد مولفه‌های واقعی پیچشی زمین و در نتیجه امکان مقایسه نتایج روش‌های گوناگون را میسر می‌سازد. در این شبکه شتاب‌نگاری، دستگاه‌های شتاب‌نگاری در فواصل بسیار نزدیک، ۵ متر تا حدود ۳۰۰ متر کار گذاشته شده است. مقایسه نتایج این روش‌ها نشان می‌دهد که مقادیر بیشینه شتاب مولفه پیچشی به‌دست آمده از روش مشتق زمانی در مقایسه با روش ژئودتیک که از دقت بالاتری برخوردار است، به‌طور قابل توجهی بزرگ‌تر است. همچنین نتایج حاصله از روش تفاضل محدود نشان داد که با زیاد شدن فواصل بین دو ایستگاه، مقادیر مولفه پیچشی به‌شدت کاهش می‌یابد که در مقایسه با نتایج روش ژئودتیک پایین‌تر است. هرچند در فواصل جدایی کوتاه (کمتر از ۱۵ متر) مقادیر به‌دست آمده از روش تفاضل محدود غالباً بیشتر از نتایج روش ژئودتیک است. این نتایج بیانگر آن است که استفاده از روش مشتق زمانی و یا روش تفاضل محدود با فواصل زوج ایستگاه زیاد در تحقیقات مربوط به تاثیر مولفه پیچشی بر پاسخ سازه‌ها می‌تواند منجر نتیجه‌گیری‌های نادرست شود. همچنین در این مقاله از بررسی تغییرات بیشینه مولفه پیچشی با بیشینه شتاب انتقالی نتیجه گرفته شد که در هر سه روش، بین تغییرات این دو پارامتر رابطه خطی وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: مولفه پیچشی جنبش زمین، شبکه شتاب‌نگاری چپا، روش مشتق زمانی، روش تفاضل محدود، روش ژئودتیک

*Corresponding author:

nouri@uma.ac.ir

*نگارنده رابط:

A comparison among different methods in the evaluation of torsional ground motion

Gholam Reza Nouri^{1*}, Mohammad Reza Ghayamghamian², and Majid Hashemifard³¹Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran²International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran.³Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

(Received: 06 March 2010, accepted 21 September 2010)

Summary

Rotational motions (torsional and rocking) induced by seismic waves have been essentially ignored for a long time, first because rotational effects were thought to be small for man-made structures, and second because sensitive measuring devices were not available until quite recently. The benefits of the determination of rotational motion in seismology and engineering are still under investigation. In seismology, rotational motions can provide accurate data for arrival times of SH waves and, in the near-source distance range, rotational motions might provide more detailed information on the rupture processes of earthquakes. Rotational motions could also be used to better estimate the static displacement from seismic recordings, identifying translational signals caused by rotation. In engineering, the dynamic response estimation of structures subjected to earthquake-induced base excitations is often simplified by ignoring the rotational components. This has been a widely accepted practice in the engineering community, mainly caused by the lack of recorded strong motion accelerograms for these motions. Many structural failures and the damage caused by earthquakes can be linked to differential and rotational ground motions. The torsional responses of tall buildings in Los Angeles during the San Fernando earthquake in 1971 could be ascribed to torsional excitation, while rotational and longitudinal differential motions may have caused the collapse of bridges during the San Fernando (1971), Miyagi-ken-Okii (1978) and Northridge (1994) earthquakes. Several studies have shown the importance of torsional components in seismic analysis and design of structures. The seismic design codes also prescribe 'Accidental Eccentricity' in design force calculations to account for unknown torsional inputs and unpredictable eccentricities. Since then, many researchers have studied the dynamic and accidental eccentricities of structures.

For the first time, Newmark (1969) established a simple relationship between the translational and torsional components of the ground motion. He presented a deterministic procedure for estimating the increase in the displacement of symmetric-plan buildings caused by rotational ground motions at the base due to the horizontal propagation of plane waves with a constant velocity and further explored in the other studies. Three main approaches have been developed to incorporate rotational motions in engineering applications: one is a numerical simulation of the field of radiation from the source mechanism. It requires an appropriate model of the faulting mechanism, without considering the effects of path and local site conditions. The second approach is based on a theoretical formulation of the spatial distribution of ground motion. In this method, some information on the source, path and local layering are required. All of these studies are based on assumed models for ground motion and none of them has the benefit of being tested against field measurements. The third approach is the application of recorded strong motion data from seismic arrays.

In this paper, data were collected from the Chiba dense array, which consists of 44 accelerometers with inter-station spacing in the range of 5 to 300 meters, located 30 Km east of Tokyo, that are employed to estimate the torsional ground motion. This provides a

unique opportunity to examine accuracy in the estimation of torsional motion. To this end, three methods, namely, time derivation, finite difference and geodetic methods were employed. The geodetic method could be used as the criterion for accuracy of torsional motion, since it has second order accuracy for an array with regular accelerogram patterns. The results showed that the peak torsional ground motion as computed by the time derivation method is larger than those computed by the geodetic method. Peak torsional ground motion values estimated by the finite difference method show smaller values than those computed by time derivation for long separation distances (>20). However, they showed close values for short separation distances. Finally, the effects of peak ground acceleration and magnitude of earthquake on the torsional motions have been investigated. The results reveal that there is a linear relationship between peak horizontal ground acceleration and peak torsional acceleration.

Key words: Torsional motion, Chiba dense array, time derivation method, finite difference method; geodetic method

۱ مقدمه

جنبش‌های دورانی ایجاد شده با موج‌های لرزه‌ای به دو دلیل عمده برای مدت طولانی نادیده گرفته شده‌اند؛ اولاً به دلیل کوچک بودن دامنه مولفه‌های دورانی، دستگاه‌های استاندارد لرزه‌نگاری قادر به ثبت این مولفه‌های جنبش شدید زمین نبودند و تجهیزات حساس اندازه‌گیری برای دامنه‌های کوچک تا سالیان اخیر در اختیار قرار نداشتند، ثانیاً تأثیرات جنبش دورانی روی سازه‌های ساخته بشر ناچیز انگاشته می‌شد (بوشون و آکی، ۱۹۸۲).

مولفه‌های دورانی جنبش شدید زمین از دو جنبه لرزه‌شناسی و مهندسی سازه حائز اهمیت‌اند. در زلزله‌شناسی، جنبش‌های دورانی می‌توانند اطلاعات دقیقی از زمان رسیدن امواج SH فراهم آورند و همچنین در فواصل نزدیک به چشمه لرزه‌ای، جزئیات بیشتری از روند گسلش زمین لرزه‌ها به دست دهند (تاکئو و ایتو، ۱۹۹۷). همچنین این مولفه‌ها می‌توانند در برآورد دقیق جابه‌جایی ایستایی از داده‌های لرزه‌نگاری ثبت شده مفید باشد. در مهندسی سازه، تعیین جنبش دورانی به منظور شناسایی اهمیت و چگونگی تأثیر این مولفه‌ها بر پاسخ سازه‌ها، نحوه اعمال اثر این مولفه‌ها در طراحی سازه‌ها و روابط آیین‌نامه‌ای اهمیت دارد. هرچند تحلیل دینامیکی سازه‌ها اغلب با صرف نظر کردن از مولفه‌های دورانی جنبش

جنبش شدید زمین شامل سه مولفه حرکت انتقالی، سه مولفه حرکت دورانی و همچنین شش مولفه کرنش است. مولفه‌های انتقالی شامل دو مولفه افقی (در راستای محور x و y) و یک مولفه قائم (در راستای محور z) و مولفه‌های دورانی جنبش شدید شامل دو مولفه گهواره‌ای (حول محورهای افقی) و یک مولفه پیچشی (حول محور قائم) هستند.

مولفه‌های دورانی حرکت توانمند زمین در طول سال‌های متمادی مورد توجه بوده است، به طوری که اولین بار در ۱۹۵۸ تغییر مکان‌های دورانی مشاهده شده در سنگ‌های قبر، صخره‌های بزرگ و قسمت بالای دودکش‌ها به مولفه‌های دورانی جنبش شدید زمین نسبت داده شد (ریشر، ۱۹۵۸). در مهندسی زلزله مرسوم، سازه‌ها برای مقاومت در برابر اثرات ساده شده جنبش شدید زمین طراحی می‌شوند به این صورت که فقط مولفه‌های افقی شتاب زمین در نظر گرفته می‌شود. البته در برخی موارد در طراحی سازه‌های مهم با دهانه‌های بلند، مولفه قائم نیز مد نظر قرار می‌گیرد. با وجود این، تحریک دورانی تقریباً هیچ‌گاه در طراحی در نظر گرفته نمی‌شود و این عمل به صورت وسیعی در جامعه مهندسی پذیرفته شده است.

شرایط محلی خاک نیست. بدین ترتیب این روش در جنبش‌های حوزه نزدیک که بیشتر به سازوکار چشمه وابسته است، دارای دقت قابل قبول خواهد بود. همچنین این روش برای مدل‌سازی امواج در بسامد پایین، کاربرد دارد (کاستلانی و بوفی، ۱۹۸۹).

دسته دوم تحقیقات براساس استفاده از مولفه‌های انتقالی در برآورد مولفه پیچشی صورت می‌گیرند. این اندازه‌گیری غیرمستقیم جنبش‌های دورانی از سوی محققان زیادی بررسی شده است. در تحقیقات اولیه سعی بر ایجاد رابطه بین مولفه پیچشی و مولفه انتقالی در یک نقطه بود (نیومارک، ۱۹۶۹؛ غفوری آشتیانی و سینگ، ۱۹۸۶). گروه دیگری از تحقیقات بر پایه استفاده از مولفه‌های انتقالی ثبت شده در شبکه‌های شتاب‌نگاری و روش تفاضلی در برآورد مولفه پیچشی استوار است. هرچند در ابتدا از داده‌های شبکه‌های شتاب‌نگاری خطی بهره گرفته شد (نیازی، ۱۹۸۶؛ اولیویرا و بولت، ۱۹۸۹) اما با ایجاد چند شبکه شتاب‌نگاری متراکم، دقت برآورد مولفه پیچشی و همچنین شناخت مشخصات و ویژگی‌های مولفه‌های دورانی نیز افزایش یافت (اسپودیچ و همکاران، ۱۹۹۵؛ بودین و همکاران، ۱۹۹۷؛ لی و همکاران، ۲۰۰۴؛ هوانگ، ۲۰۰۳؛ قائم‌میان و نوری، ۲۰۰۷). با توجه به محدودیت‌های موجود در ثبت مولفه‌های دورانی، داده‌های شبکه‌های شتاب‌نگاری متراکم از جمله منابع منحصربه‌فردی هستند که امکان تولید مولفه‌های واقعی دورانی زمین و به تبع آن امکان بررسی اثرات مولفه‌های دورانی زمین را فراهم می‌کنند.

دسته سوم تحقیقات، مربوط به ثبت مستقیم داده‌های مولفه پیچشی با به کارگیری ابزار اپتیکی است. علاقه‌مندی به ثبت جنبش‌های دورانی زمین در سال‌های اخیر به واسطه پیشرفت حس‌گرها و تجهیزات نوری از قبیل ژيروسکوپ‌های حلقه‌لیزری افزایش یافته است.

اولین کاربرد ایده آکی (۱۹۶۸) و هسکل (۱۹۶۹) در

زمین، ساده‌سازی می‌شود که این ساده‌سازی به علت نبود شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده جنبش شدید زمین برای مولفه‌های دورانی، مقبولیت زیادی دارد اما مولفه‌های دورانی می‌توانند اثرات قابل توجهی بر رفتار سازه و به تبع آن خسارت‌ها و خرابی‌های سازه‌ای داشته باشند.

نیومارک (۱۹۶۹) اولین بار رابطه‌ای بین مولفه پیچشی و مولفه‌های انتقالی جنبش زمین عرضه کرد و تاثیر مولفه پیچشی بر پاسخ سازه را مورد بررسی قرار داد. با ایده‌ای مشابه روش نیومارک، محققان دیگری نیز اقدام به تولید مولفه‌های پیچشی جنبش زمین کردند (استرادا و گریولد ۱۹۷۶؛ ناتان و مکزی، ۱۹۷۵). از آن پس، در مهندسی زلزله علاقه‌مندی بیشتری به در نظر گرفتن اثرات مولفه‌های دورانی حرکت زمین به وجود آمد. پاسخ‌های پیچشی ساختمان‌های بلند در لس‌آنجلس را می‌توان به تحریک پیچشی طی زلزله سن فرناندو (۱۹۷۱) نسبت داد (تیسیره و همکاران، ۲۰۰۶). علاوه بر آن، تغییرات مکانی و مولفه‌های دورانی جنبش زمین هنگام وقوع زلزله‌های سن فرناندو (۱۹۷۱)، میاگی‌کن‌اوکی (۱۹۷۸) (بایکرافت، ۱۹۸۰) و نورث‌ریچ (۱۹۹۴) (تریفونک و همکاران، ۱۹۹۶) ممکن است باعث واژگونی پل‌ها شده باشند. تاثیر مولفه پیچشی بر پاسخ سازه‌ها و بررسی ضوابط آیین‌نامه‌ای در خصوص اعمال مولفه پیچشی با استفاده از داده‌های شبکه شتاب‌نگاری متراکم را قائم‌میان و همکاران (۲۰۰۹) بررسی کرده‌اند.

به طور کلی مطالعات صورت گرفته در زمینه برآورد مولفه‌های دورانی جنبش شدید زمین در سال‌های اخیر را می‌توان در سه بخش دسته‌بندی کرد: گروه اول تحقیقاتی هستند که بر پایه مدل‌سازی الگوی انتشار امواج به استفاده از سازوکار گسلش در منبع لرزه استوارند. این ایده را اولین بار آکی (۱۹۶۸) و هسکل (۱۹۶۹) مطرح کردند. در این گونه تحقیقات به یک مدل متناسب در خصوص سامانه گسلش نیاز است، اما این روش دربرگیرنده مدل و

به‌خصوص استفاده از لیزر در توسعه دستگاه‌های اندازه‌گیری مولفه پیچشی نقش زیادی داشته است. استدمن و همکاران (۱۹۹۵) اولین بار از لیزر در ثبت مولفه‌های پیچشی جنبش شدید زمین استفاده کردند. ساریانتو و همکاران (۲۰۰۶) با نصب یک حلقه لیزری در کنار یک شبکه لرزه‌نگاری، مولفه پیچشی حاصل از اختلاف تفاضلی مولفه‌های انتقالی و مولفه پیچشی ثبت شده در شبکه لیزری را مورد مقایسه قرار دادند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که در حالت کلی، بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر حاصل از شبکه لرزه‌نگاری، تطابق بسیار خوبی وجود دارد. حداکثر ضریب همبستگی بین این دو مقدار برابر با ۹۴٪ است. همچنین در این بررسی‌ها نسبت به تاثیر عواملی نظیر نوفه در مولفه‌های انتقالی، نبود اطمینان در واسنجی (کالیبراسیون) دستگاه‌ها و مطمئن نبودن از مختصات دقیق ایستگاه‌ها بر میزان دوران تولید شده، بررسی‌هایی صورت گرفت. باید به این نکته اشاره کرد که این نتیجه صرفاً برای سیگنال بلنددوره حاصل شده است و قطعاً برای زمین‌لرزه‌های دارای محتوای بسامدی زیاد و همچنین فاصله کوتاه خط‌هایی به‌وجود خواهد آمد. در سال ۲۰۰۴ لرزه‌نگارهای دورانی در ایستگاه HGSD در تایوان نصب شد که تاکنون موفق به ثبت مولفه دورانی مربوط به چند زلزله محلی شده‌اند جمع‌آوری نتایج مربوط به ثبت‌های شتاب‌نگارهای انتقالی و لرزه‌نگارهای دورانی بین سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ نشان می‌دهد که بین بیشینه شتاب انتقالی و بیشینه سرعت دورانی، رابطه خطی وجود دارد (لیو و همکاران، ۲۰۰۹). لین و همکاران توانستند مولفه پیچشی مربوط به دو انفجار بزرگ را که در شمال تایوان رخ داده بود، ثبت کنند (لین و همکاران، ۲۰۰۹).

ویژگی‌های مولفه‌های دورانی و همچنین ارتباط بین مولفه انتقالی و پیچشی با استفاده از داده‌های شبکه شتاب‌نگاری متراکم جیبا را قائم‌میان و نوری (۲۰۰۷)

ارتباط با گسل امپریال ولی که زلزله ۱۹۷۹ را موجب شد، بوشون و آکی (۱۹۸۲) عرضه کردند. آنها گسل شیب‌لغزی را که دارای جابه‌جایی نسبی یک متری بود، به صورت تحلیلی مدل‌سازی و با این عمل، کرنش نقاط گوناگون را محاسبه کردند و مولفه‌های پیچشی و گهواره‌ای را در فواصل متفاوت از گسل به‌دست آوردند. نتایج، نشانگر کاهش شدید بیشینه دوران‌ها با زیاد شدن فاصله از گسل بود. آنها همچنین متوجه شدند که این کاهندگی به نوع موج و ناهمگنی جانبی پوسته‌ای بستگی دارد.

نیازی (۱۹۸۶) با استفاده از شتاب‌نگارهای انتقالی شبکه شتاب‌نگاری خطی السنترو (شامل ۵ ایستگاه با فواصل ۱۸ متری) در زمان وقوع زلزله امپریال ولی (۱۹۷۹) و روش تفاضلی، مقادیر دوران زمین را با دقت تقریبی به‌دست داد. مقایسه بین نتایج تحقیقات بوشون و آکی (۱۹۸۲) و نیازی (۱۹۸۶) نشان می‌دهد که مقادیر برآورد شده برای مولفه پیچشی با استفاده از مدل‌سازی گسلش در مقایسه با میزان دوران حاصل از داده‌های شبکه شتاب‌نگاری بسیار کم است.

اولین بار نیگبور (۱۹۹۴) در زمان اجرای آزمایش انفجار شیمیایی در صحرای نوادا موفق شد که جنبش انتقالی و پیچشی را با استفاده از یک حس‌گر دورانی جدید اندازه‌گیری کند. در این آزمایش حجم زیادی از مواد منفجره شیمیایی (یک کیلو تن) مورد استفاده قرار گرفته بود. تاکنو (۱۹۹۸) برای ثبت فوج‌های زمین‌لرزه در ایزوژاپن حس‌گر مشابهی را به کار برد. همچنین تیسیرره و همکاران (۲۰۰۳)، دستگاه لرزه‌نگاری دورانی را به منظور ثبت زمین‌لرزه‌های کوچک در هلند و ایتالیا به کار بردند. کاربرد چنین دستگاه‌هایی در لرزه‌شناسی در محدوده‌های گوناگون بزرگ و فاصله، دارای دقت بسیار کمی است.

در چند سال اخیر استفاده از دستگاه‌های اپتیکی،

است. شبکه چپا از این لحاظ یکی از شبکه‌های منحصر به فرد شتاب‌نگاری است. این شبکه را موسسه علوم صنعتی دانشگاه توکیو در ۱۹۸۲ در منطقه چپا واقع در ۳۰ کیلومتری شهر توکیو نصب کرد که جزء شبکه‌های شتاب‌نگاری متراکم سه‌بعدی است. شرایط توپوگرافی و زمین‌شناسی ساختگاه عموماً ساده و سطح زمین تقریباً هموار است. سیگنال‌های همه لرزه‌نگارها و کرنش‌سنج‌ها هر ۰/۰۰۵ ثانیه ثبت می‌شوند. این شبکه شامل ۱۵ گمانه (C0-C4, P0-P9) و ۴۴ شتاب‌نگار سه مولفه‌ای است که نه ایستگاه (گمانه) آن به صورت متمرکز در نظر گرفته شده‌است. ایستگاه‌های C1 تا C4 و ایستگاه‌های P1 تا P4 به ترتیب روی حلقه‌هایی با شعاع ۵ و ۱۵ متری حول ایستگاه C0 که در مرکز این دو حلقه قرار گرفته، تعبیه شده‌اند (شکل ۱).

در این تحقیق، از میان ۱۶۰ رخداد ثبت شده، ۹ زمین‌لرزه که نسبت نوبه به سیگنال (NSR) آنها کم است و همچنین طیف وسیعی از لحاظ بزرگا و بیشینه شتاب زمین را پوشش می‌دهند، انتخاب شده‌اند (فائزق‌میان و نوری، ۲۰۰۷). مشخصات ثبت شده در ایستگاه C0 برای زمین‌لرزه‌های منتخب در جدول ۱ آورده شده است.

۳ برآورد مولفه پیچشی برحسب مولفه‌های انتقالی

جنبش شدید زمین

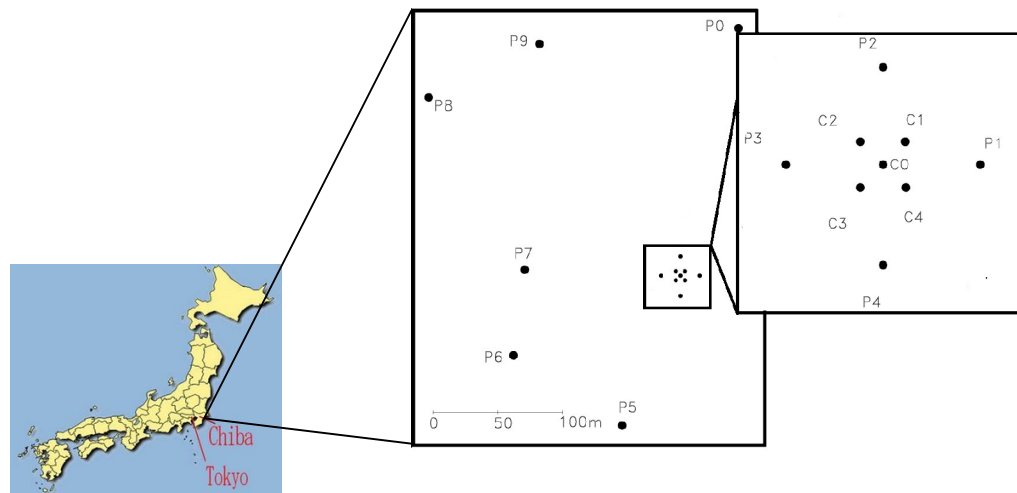
محققان گوناگون با اعمال برخی فرضیات ساده‌کننده، روابطی را به منظور برآورد مولفه پیچشی براساس دو مولفه انتقالی ثبت شده در یک نقطه عرضه کرده‌اند. اولین پیشنهاد بر چگونگی برآورد مولفه پیچشی را نیومارک (۱۹۶۹) داد و رابطه ساده‌ای بین مولفه‌های انتقالی و پیچشی جنبش زمین برقرار کرد. وی روند معینی برای برآورد افزایش جابه‌جایی در ساختمان‌های دارای پلان متقارن به‌واسطه موج‌های سطحی عرضه کرد که در تحقیقات دیگر مورد بررسی بیشتری قرار گرفت (ناتان و

مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی آنها نشان داد دامنه مولفه‌های دورانی (مولفه پیچشی و گهواره‌ای) با افزایش بزرگا و حداکثر شتاب افقی زمین‌لرزه به شدت افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش فواصل جدایش شتاب‌نگارها، کاهش ناگهانی در مقدار مولفه پیچشی و گهواره‌ای مشاهده شد.

به دلیل مشکلات موجود در ثبت مولفه پیچشی، در بیشتر تحقیقات، ایجاد ارتباط بین مولفه انتقالی و پیچشی از جمله موارد قابل توجه است. در تحقیقات پیشین، روش‌ها و روابط گوناگونی به‌منظور برآورد مولفه پیچشی برحسب مولفه انتقالی عرضه شده است. در این مقاله با استفاده از داده‌های شبکه شتاب‌نگاری متراکم چپا که یکی از شبکه‌های منحصر به فرد شتاب‌نگاری از لحاظ تعداد، چیدمان و فواصل جای‌گذاری شتاب‌نگارها است، شتاب‌نگاشت‌های مولفه پیچشی از سه روش متفاوت مشتق زمانی تک‌ایستگاهی، تفاضل محدود مولفه‌های انتقالی دو ایستگاه شتاب‌نگاری و روش ژئودتیک برآورد و مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همچنین امکان وجود رابطه بین حداکثر شتاب مولفه انتقالی و مولفه پیچشی در روش‌های گوناگون و تغییرات مولفه پیچشی با بزرگای زمین‌لرزه‌ها بررسی شده است.

۲ شبکه شتاب‌نگاری متراکم چپا

برقراری و ایجاد شبکه جهانی لرزه‌نگاری استاندارد در ۱۹۶۱ بر درک مفاهیم زمین‌لرزه و بررسی روند زمین‌ساختی زمین اثر بسزایی داشت. شبکه‌های شتاب‌نگاری گوناگونی در دنیا در حال فعالیت هستند که با توجه به هدف مشاهدات، روش‌های متعددی برای چیدمان لرزه‌نگارها و شتاب‌نگارها دارند. عمدتاً در این شبکه‌ها فاصله شتاب‌نگارها از هم زیاد است درحالی‌که اندازه‌گیری تغییرات مکانی جنبش زمین برای کاربردهای مهندسی زلزله نیازمند ثبت داده‌ها توسط شبکه متراکم



شکل ۱. موقعیت ساختگاه چیبا در نقشه ژاپن و چیدمان سامانه شبکه شتاب‌نگاری مترکم چیبا.

$$u_{g\theta} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_{gx}}{\partial y} - \frac{\partial u_{gy}}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$(u_{g\theta})_o = (\dot{u}_{gy})_o / c \quad (2)$$

$$(\dot{u}_{g\theta})_o = (\ddot{u}_{gy})_o / c$$

$$(\ddot{u}_{g\theta})_o = (\dddot{u}_{gy})_o / c$$

که در آنها $u_{g\theta}$ برابر با پیچش زمین، u_{gy} برابر با جابه‌جایی زمین در راستای y ، u_{gx} برابر با جابه‌جایی در راستای x ، $(\dot{u}_{gy})_o$ بیشینه سرعت انتقالی، $(\ddot{u}_{gy})_o$ بیشینه شتاب انتقالی، $(\ddot{u}_{gy})_o$ بیشینه تغییرات شتاب نسبت به زمان و c سرعت موج در طول پی سازه است.

با توسعه روابط پیشین در حال حاضر سه روش عمده برای برآورد مولفه پیچشی برحسب مولفه‌های انتقالی جنبش شدید زمین وجود دارد که عبارت‌اند از:

(۱) روش مشتق زمانی (Time derivation method)

(۲) روش تفاضل محدود (Finite difference method)

(۳) روش ژئودتیک (Geodetic method)

که در ادامه، این روش‌ها با جزئیات بیشتری تشریح می‌شوند.

مکنزی، ۱۹۷۵؛ مورگان و همکاران، ۱۹۸۳؛ روتنبرگ و هایدبرخت، ۱۹۸۵).

نیومارک (۱۹۶۹) تاکید کرد که مولفه دورانی حرکت زمین در طراحی سازه‌های مهندسی دارای نقش و اهمیت بسزایی است. ایده او بر پایه مفهوم انتشار امواج صفحه‌ای هارمونیک که با سرعت ظاهری ثابت و برابر با سرعت موج برشی در سنگ بستر یا لایه خاکی منتشر می‌شود، استوار بود. برای شرایط خاک نرم، با سرعت‌های برشی در محدوده ۱۰۰ الی ۳۰۰ m/s، این مدل به دوران‌هایی به اندازه 10^{-3} رادیان منجر می‌شود که در انواع خاصی از سازه‌ها می‌تواند تنش‌های بزرگی ایجاد کند (اولیویرا و بولت، ۱۹۸۹). وی در بررسی خود چرخش پی ساختمان را با چرخش به وجود آمده در یک المان کوچک واقع در سطح زمین که تحت تاثیر امواج با مولفه‌های $U_{gx}(y-ct)$ و $U_{gy}(x-ct)$ قرار گرفته است، برابر دانست و رابطه (۱) را برای مولفه پیچشی استخراج کرد. وی همچنین رابطه (۲) را برای محاسبه حداکثر پیچش $(u_{g\theta})_o$ ، سرعت زاویه‌ای $(\dot{u}_{g\theta})_o$ و شتاب زاویه‌ای $(\ddot{u}_{g\theta})_o$ دوران زمین بر حسب حداکثر مقادیر مولفه‌های انتقالی به دست آورد:

۱-۳ روش مشتق زمانی

دورانی را با دقت بیشتری محاسبه کرد. در چارچوب معادلات کلاسیک کشسانی و با فرض تغییر شکل‌های بی‌نهایت کوچک، جابه‌جایی نقطه r با رابطه زیر به جابه‌جایی نقطه مجاور آن $r + \delta r$ مرتبط می‌شود:

$$\begin{aligned} u(r + \delta r) &= u(r) + G \delta r \\ &= u(r) + \varepsilon \delta r + \omega \times \delta r \end{aligned} \quad (5)$$

که در آن G ، ε و ω به ترتیب ماتریس گرادیان جابه‌جایی، کرنش و دوران‌اند. با استفاده از ماتریس گرادیان جابه‌جایی G می‌توان کرنش‌ها و دوران‌ها را مشخص کرد. ماتریس G بدین صورت است:

$$G = \begin{pmatrix} \partial_x u_x & \partial_y u_x & \partial_z u_x \\ \partial_x u_y & \partial_y u_y & \partial_z u_y \\ \partial_x u_z & \partial_y u_z & \partial_z u_z \end{pmatrix} \quad (6)$$

که در آن ∂u با اندیس‌های گوناگون بیانگر گرادیان‌های جابه‌جایی در راستای سه‌گانه است. رابطه بین دوران و جابه‌جایی بواسطه اعمال اپراتور کرل ($\nabla \times$) به جابه‌جایی حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} &= \frac{1}{2} \nabla \times u(r) \\ &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \partial_x u_z - \partial_z u_y \\ \partial_z u_x - \partial_x u_z \\ \partial_x u_y - \partial_y u_x \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

که در آن ω_x ، ω_y و ω_z به ترتیب دوران حول محور x ، y و z است.

اگر در یک شبکه $\mathbf{r}^i = (x^i \ y^i \ z^i)^T$ ، $i = 0, 1, \dots, N$ مختصات $N + 1$ ایستگاه و $\mathbf{R}^i = \mathbf{r}^i - \mathbf{r}^0$ بردار موقعیت ایستگاه‌های $i = 1, \dots, N$ نسبت به ایستگاه مبنا (\mathbf{r}^0) باشد، نشان‌دهنده جابه‌جایی ایستگاه i در لحظه t از ایستگاه \mathbf{r}^0 است. برای تغییر شکل‌های بزرگ با استفاده از بردار موقعیت \mathbf{R}^i رابطه (۵) به صورت زیر

غفوری-آشتیانی و سینگ (۱۹۸۶) با استفاده از رابطه (۱) رابطه ساده‌ای را برای محاسبه مولفه دورانی زمین ارائه دادند. ایشان با فرض حرکت زمین به صورت رابطه $X_i = A_i f(\sum_{j=1}^3 k_j x_j - \omega t)$ که در آن k_j عدد موج و ω بسامد موج است، رابطه (۳) را برای برآورد مولفه پیچشی عرضه کردند:

$$\psi_k(t) = -\frac{1}{c_j} \frac{d}{dt} [\ddot{X}_j(t) - \dot{X}_i(t)], \quad (3)$$

که در آن $\psi_k(t)$ دوران حول محور k ، X_i و X_j جابه‌جایی در جهت i و j و c_j سرعت موج برشی منتشر شده در راستای x_j است.

۲-۳ روش تفاضل محدود

میانگین مولفه پیچشی جنبش شدید زمین بین دو نقطه برحسب مولفه‌های انتقالی در دو نقطه پیش گفته با استفاده از روش تفاضل محدود به شرح زیر قابل محاسبه است:

$$\psi_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\ddot{u}_2(t) - \ddot{u}_1(t)}{\Delta y} - \frac{\ddot{v}_2(t) - \ddot{v}_1(t)}{\Delta x} \right), \quad (4)$$

که در آن $\psi_z(t)$ مولفه پیچشی شتاب، $\ddot{u}_j(t)$ ($j=1,2$) مولفه انتقالی شتاب جنبش شدید زمین در راستای محور x ، $\ddot{v}_j(t)$ مولفه انتقالی شتاب در راستای محور y . این روش در تحقیقات متعددی به منظور برآورد مولفه پیچشی مورد استفاده قرار گرفته است (هوانگ، ۲۰۰۳؛ قائم‌مقامیان و نوری، ۲۰۰۷؛ قائم‌مقامیان و موتوسکا، ۲۰۰۳؛ هائو، ۱۹۹۶).

۳-۳ روش ژئودتیک

اسپودیچ و همکاران (۱۹۹۵) روشی را مطرح کردند که در آن می‌توان با به‌کارگیری چندین ایستگاه، مولفه

$$p = \text{inv}(A).d \quad (۱۳)$$

با توجه به رابطه (۷) و گرادیان‌های جابه‌جایی به‌دست آمده، می‌توان دوران حول محور Z (پیچش) را محاسبه کرد:

$$\omega_z = \frac{1}{2}(\partial_x u_y - \partial_y u_x) \quad (۱۴)$$

در این روش باید حداقل سه ایستگاه برای تعیین گرادیان جابه‌جایی افقی به‌کار گرفته شود. این روش برای بررسی تغییر شکل ایجاد شده ناشی از زلزله لندرز (M7.4، 1992) که از سوی شبکه لرزه‌ای پارکفیلد (UPSAR) در کالیفرنیا ثبت شده است به‌کار رفت (اسپودیچ و همکاران، ۱۹۹۵). پس از آن سوریتو و همکاران (۲۰۰۶) این روش را برای مقایسه مولفه پیچشی به‌دست آمده از شبکه و اندازه‌گیری مستقیم آن با حلقه لیزری مورد استفاده قرار دادند و تطابق خوبی بین آنها مشاهده کردند.

۴ مقایسه نتایج روش‌ها

در این بخش براساس داده‌های شبکه شتاب‌نگاری چپا، شتاب‌نگاشت‌های مولفه پیچشی جنبش شدید زمین با روش‌های سه‌گانه محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. بدین‌منظور حداکثر شتاب مولفه پیچشی و مقادیر انحراف معیار مربوط به تاریخچه‌های زمانی شتاب‌نگاشت‌ها محاسبه شده و به‌منزله پارامتر مبنایی که بیانگر خصوصیات شتاب‌نگاشت باشد، مورد استفاده قرار گرفته است (لائومی و لابه، ۲۰۰۲).

تاریخچه زمانی شتاب‌نگاشت‌های مولفه پیچشی جنبش شدید زمین برحسب مولفه انتقالی هر تک‌ایستگاه شتاب‌نگاری، زوج ایستگاه‌ها با فواصل جدایی گوناگون و همچنین دو حلقه داخلی و خارجی به‌ترتیب برای روش مشتق زمانی، تفاضل محدود و ژئودتیک محاسبه شده‌اند. در شکل (۲) انحراف معیار و بیشینه شتاب مولفه پیچشی

بازنویسی می‌شود:

$$u^i = u^0 + GR^i \quad (۸)$$

d^i بردار تفاضل جابه‌جایی ایستگاه i از رابطه (۸) حاصل می‌شود:

$$d^i = u^i - u^0 = GR^i \quad (۹)$$

با فرض رابطه تنش- کرنش و صفر بودن تانسور تنش در سطح آزاد بردار d^i به شکل رابطه (۱۰) به‌دست می‌آید:

$$d^i = \begin{pmatrix} \partial_x u_x & \partial_y u_x & \partial_z u_x \\ \partial_x u_y & \partial_y u_y & \partial_z u_y \\ -\partial_z u_x & -\partial_z u_y & -\eta(\partial_x u_x + \partial_y u_y) \end{pmatrix} R^i \quad (۱۰)$$

که در آن $\eta = \frac{\lambda}{\lambda + 2\mu}$ و λ و μ ضرایب لامه هستند.

با توجه به رابطه (۱۰) شش گرادیان جابه‌جایی مجهول هستند. اگر این گرادیان‌های جابه‌جایی در قالب یک ماتریس ستونی $p = (\partial_x u_x, \partial_y u_x, \partial_z u_x, \partial_x u_y, \partial_y u_y, \partial_z u_y)^T$ نوشته شود، رابطه (۱۱) حاصل می‌شود:

$$d^i = \begin{pmatrix} R_x^i & R_y^i & R_z^i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_x^i & R_y^i & R_z^i \\ -\eta R_z^i & 0 & -R_x^i & 0 & -\eta R_z^i & -R_y^i \end{pmatrix} p \quad (۱۱)$$

اگر ماتریس رابطه (۱۱) را با A^i نشان داده شود، در حالت کلی برای N ایستگاه حول ایستگاه مبنا خواهیم داشت:

$$d = \begin{pmatrix} d^1 \\ d^2 \\ \vdots \\ d^N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A^1 \\ A^2 \\ \vdots \\ A^N \end{pmatrix} p = Ap \quad (۱۲)$$

برای محاسبه گرادیان‌های جابه‌جایی و به تبع آن محاسبه دوران‌ها و کرنش‌ها، باید ماتریس p را به‌دست آورد که از رابطه (۱۳) حاصل خواهد شد:

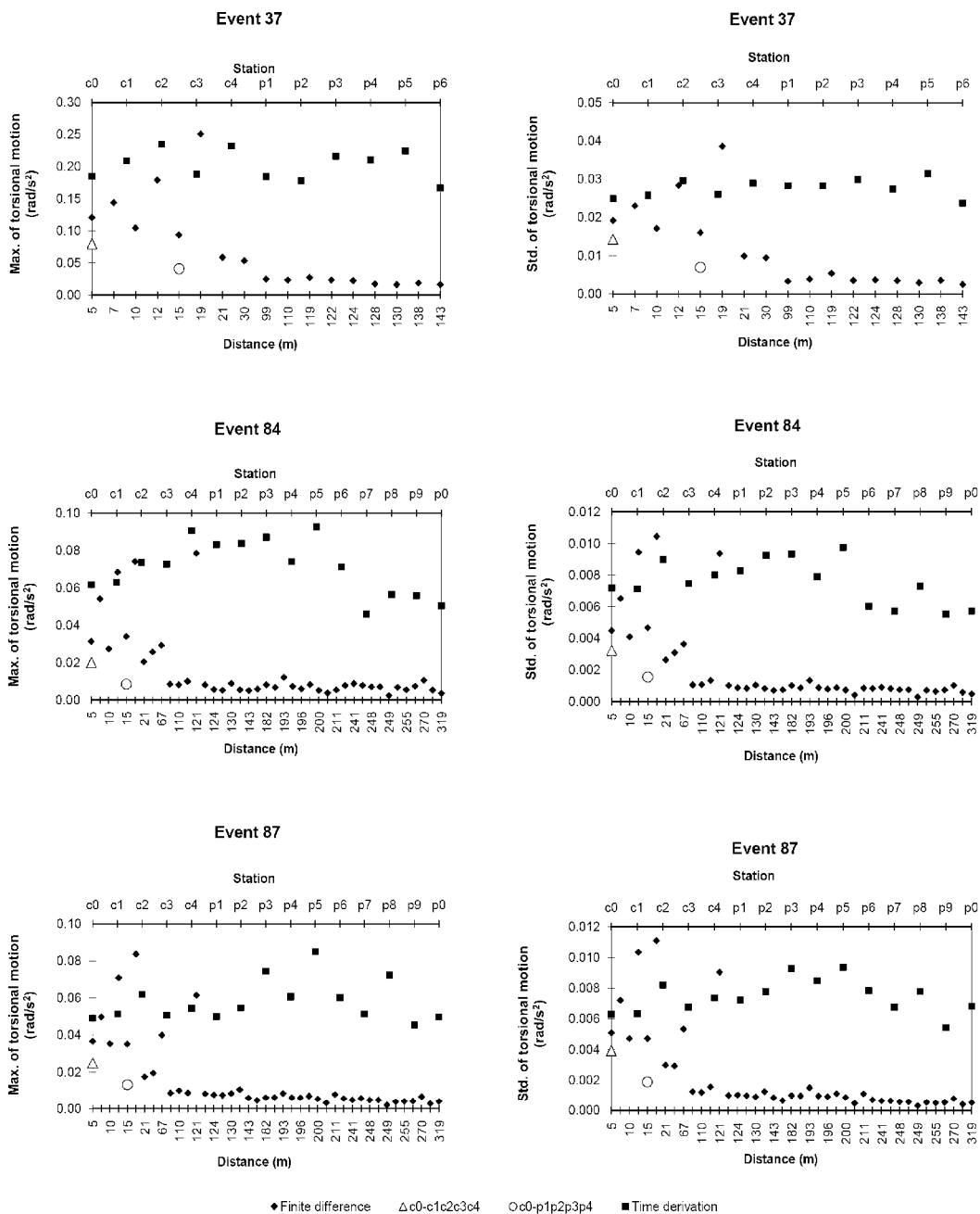
است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر حاصل از روش مشتق زمانی در همه ایستگاه‌ها از نتایج به‌دست آمده از روش تفاضل محدود در فواصل جدایی بیشتر از حدود ۲۰ متر، مقادیر بزرگ‌تری را نشان می‌دهد. نسبت بین مقادیر این دو روش در فواصل زیاد به ۶ الی ۸ برابر نیز می‌رسد. در فواصل کمتر، مقادیر این دو روش تطابق قابل قبولی دارند. این در حالی است که مقادیر محاسبه شده با روش ژئودتیک کمتر از مقادیر به‌دست آمده از روش مشتق زمانی است. در مقایسه نتایج روش تفاضل محدود و ژئودتیک می‌توان گفت در فواصل جدایی زیاد، روش تفاضل محدود دامنه‌های کوچک‌تری نسبت به روش ژئودتیک به‌دست می‌دهد.

حاصل از روش‌های مشتق زمانی، تفاضل محدود و ژئودتیک برای زمین‌لرزه‌های منتخب مورد مقایسه قرار گرفته است. مقایسه نتایج زمین‌لرزه‌های گوناگون نشان می‌دهد که دامنه مولفه پیچشی به‌شدت تابع مشخصات زمین‌لرزه‌ها است. بیشینه پیچش و همچنین بیشترین مقدار انحراف معیارمتعلق به زمین‌لرزه شماره ۳۷ است که دارای بیشترین بزرگسای ($M_{JMA} = 6.7$) و بیشینه شتاب انتقالی ($PGA = 400 \text{ gal}$) است.

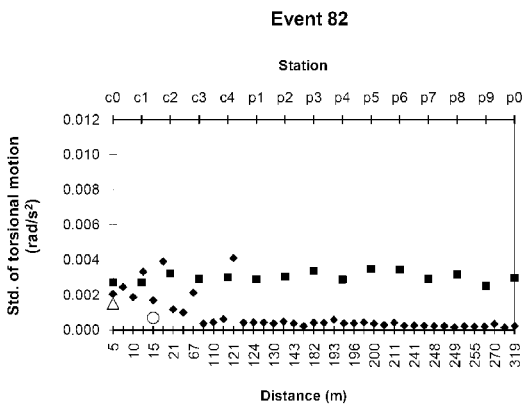
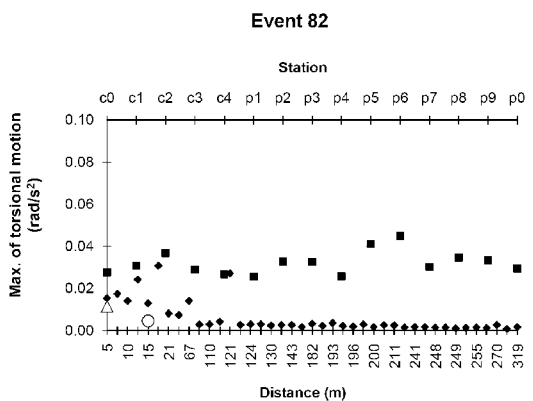
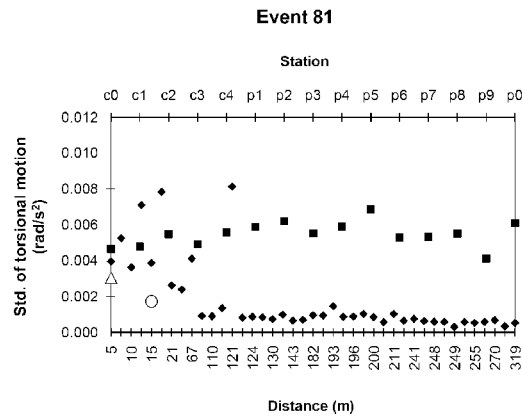
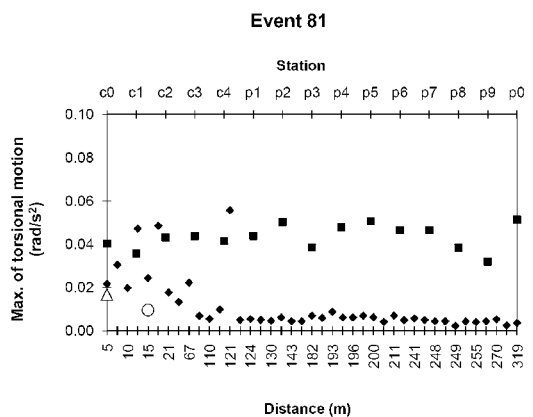
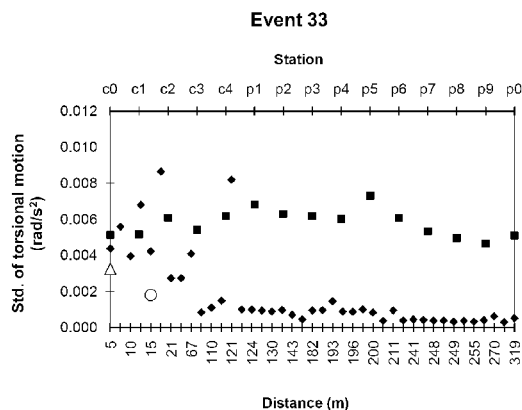
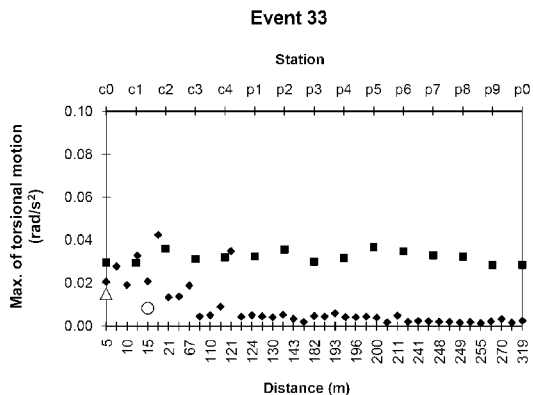
مقادیر انحراف معیار و همچنین بیشینه شتاب‌نگاشت‌های مولفه‌های پیچشی در روش تفاضل محدود حساسیت زیادی به فواصل بین شتاب‌نگارها دارد و با افزایش فاصله به سرعت کاهش می‌یابد. این روند فارغ از درجه بزرگی و بیشینه شتاب انتقالی زمین‌لرزه‌ها

جدول ۱. مشخصات زمین‌لرزه‌های منتخب از شبکه شتاب‌نگاری جیبا (فانمقامیان و نوری، ۲۰۰۷).

No.	Event No.	Focal Depth (km)	Distance (km)	PGA (cm/s ²)		M_{JMA}	Noise/ Signal NS at C0	Noise/ Signal EW at C0
				NS	EW			
1	33	73.3	104.5	52	60	6.5	0.030	0.028
2	37	57.9	44.7	400	293	6.7	0.005	0.007
3	42	47.6	37.9	117	79.18	5.2	0.028	0.047
4	46	55.3	47.7	57	71	5.6	0.031	0.043
5	47	55.7	55.2	32	34	6.0	0.041	0.058
6	81	96.0	42.2	71	86	6.0	0.028	0.032
7	82	69.0	62.4	38	51	5.3	0.059	0.056
8	84	50.0	40.2	91	121	5.4	0.026	0.025
9	87	92	52.4	91	94	5.9	0.022	0.029

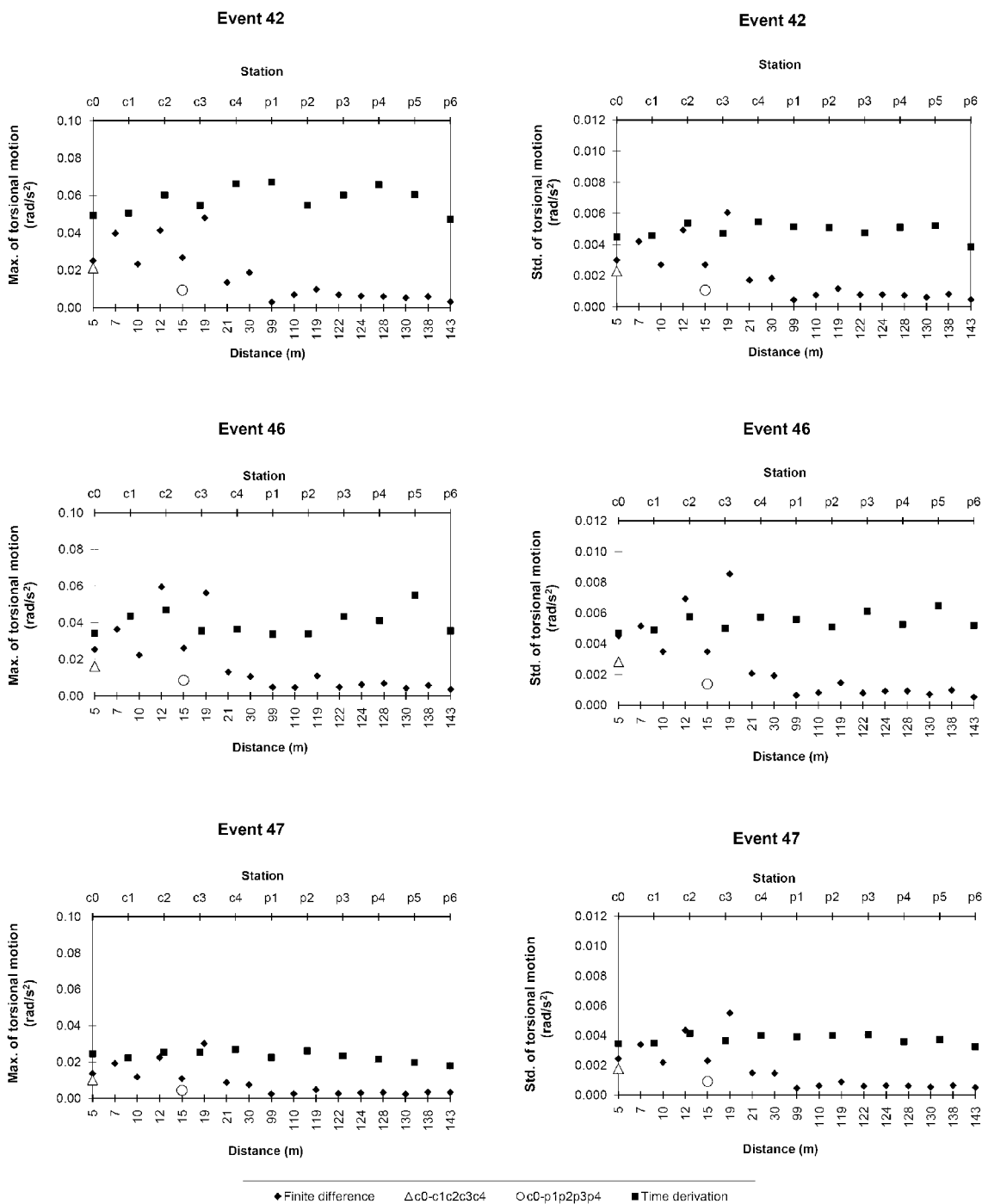


شکل ۲. مقایسه بیشینه شتاب (Max.) و انحراف معیار (Std.) مولفه پیچشی در روش‌های متفاوت برای زمین‌لرزه‌های منتخب.



◆ Finite difference △ c0-c1c2c3c4 ○ c0-p1p2p3p4 ■ Time derivation

ادامه شکل ۲. مقایسه بیشینه شتاب (Max.) و انحراف معیار (Std.) مولفه پیچشی در روش‌های متفاوت برای زمین‌لرزه‌های منتخب.



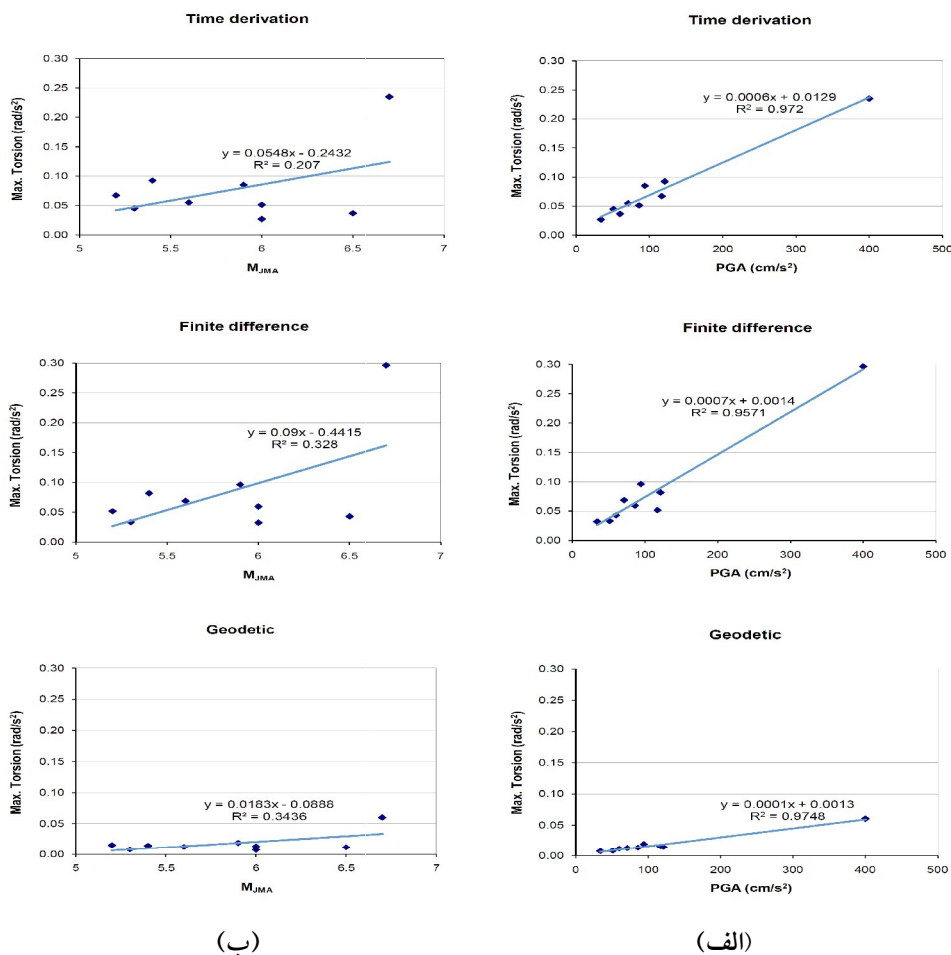
ادامه شکل ۲. مقایسه بیشینه شتاب (Max.) و انحراف معیار (Std.) مولفه پیچشی در روش‌های متفاوت برای زمین‌لرزه‌های منتخب.

۵ اثر بیشینه شتاب انتقالی و بزرگای زمین‌لرزه‌ها

با توجه به مشکلات موجود در ثبت مولفه پیچشی، سعی بر ایجاد رابطه بین مشخصات مولفه انتقالی و پیچشی است. در این بخش تغییرات مقادیر بیشینه شتاب مولفه پیچشی با بیشینه شتاب انتقالی زمین‌لرزه‌ها، در هر سه روش، بررسی شده است. در روش ژئودتیک از میانگین مقادیر محاسبه شده در دو حلقه داخلی و خارجی استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۳-الف مشاهده می‌شود با افزایش بیشینه شتاب انتقالی، بیشینه شتاب پیچشی نیز افزایش می‌یابد. البته در زمین‌لرزه‌های با بیشینه شتاب‌های انتقالی کوچک این تغییرات کم است و با افزایش شتاب انتقالی مقدار بیشینه مولفه پیچشی نیز افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند. چنانچه رابطه بین مقادیر بیشینه مولفه انتقالی و پیچشی مورد بررسی قرار گیرد، ملاحظه می‌شود که در هر سه روش با دقت قابل قبولی می‌توان رابطه خطی بین بیشینه دامنه‌های دو مولفه انتقالی و پیچشی برقرار کرد. ضریب R^2 نزدیک به یک در نمودارها بیانگر این است که مقادیر حاصل از روابط، به مقادیر داده‌های موجود نزدیک خواهد بود.

بزرگای زمین‌لرزه‌ها نیز یکی از مشخصه‌های آنها است و با توجه به اینکه داده‌های شبکه شتاب‌نگاری چیا محدود و وسیعی از بزرگا را پوشش می‌دهد، تغییرات مقادیر بیشینه مولفه پیچشی با بزرگای زمین‌لرزه‌ها در شکل ۳-ب برای هر سه روش مشاهده می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که تا بزرگی ۶/۵ روند تغییرات بیشینه شتاب پیچشی جزئی است اما بعد از آن به یک‌باره شاهد افزایش قابل توجهی هستیم. در بررسی وجود رابطه بین بزرگی زمین‌لرزه و بیشینه مولفه پیچشی برای روش‌های گوناگون ضریب R^2 پایینی قابل مشاهده است که با توجه به آن استفاده از روابط به‌دست آمده، توصیه نمی‌شود.

مولفه‌های پیچشی به‌دست آمده از شبکه‌های شتاب‌نگاری دارای محدودیتی است که به سبب آن، لرزه‌نگارها باید به اندازه کافی نزدیک به هم باشند، تا تقریب‌های خطی محاسبه شده، نزدیک به گرادیان‌های جابه‌جایی واقعی زمین باشد. بودین و همکاران (۱۹۹۷) روشن ساختند که برای به‌دست آوردن دقت برآورد تا ۹۰٪ گرادیان‌های واقعی، ابعاد شبکه شتاب‌نگار باید تقریباً کمتر از یک چهارم طول موج انرژی غالب در قطار موج باشد. پس از آن لنگستون (۲۰۰۷a,b) اشاره کرد که مرتبه دقت برآورد تفاضل محدود به هندسه شبکه نیز بستگی دارد. بررسی‌های وی نشان داد که برای حصول دقت ۹۰٪، فاصله ایستگاه‌ها باید برابر ۱۰٪ طول موج افقی باشد و همچنین برآورد روش‌های تفاضل محدود برای شبکه نامنظم و منظم به ترتیب دارای دقت مرتبه اول و دوم است (برحسب مرتبه مشتق‌ها). با توجه به بالاترین سرعت موج بررشی برآورد شده در ساختگاه شبکه چیا (یامازاکی و تورکر، ۱۹۹۲) و فاصله بسیار کم دستگاه‌های لرزه‌نگاری در آن، مولفه‌های پیچشی را می‌توان با دقت مناسب برای دو حلقه (C0, C1-C4) و (C0, P1-P4) در محدوده بسامدهای زیاد (11 Hz) محاسبه کرد (قائم‌میان و نوری، ۲۰۰۷). همان‌گونه که در بخش ۳ نیز اشاره شد تطابق بسیار خوبی بین مولفه پیچشی ثبت شده با برآورد به‌دست آمده از روش ژئودتیک در تحقیقات سوریتو و همکاران (۲۰۰۶) مشاهده شد. لذا می‌توان نتیجه‌گیری کرد که استفاده از روش مشتق زمانی موجب مقادیر دست‌بالا در برآورد مولفه پیچشی خواهد شد و همچنین روش تفاضل محدود نیز در فواصل جدایی زیاد، برآورد دست‌پایینی از مولفه پیچشی به‌دست خواهد داد. بدیهی است که به‌کارگیری این دو روش در بررسی اثر مولفه پیچشی بر سازه‌ها موجب برآورد نادرست خواهد شد.



شکل ۳. تغییرات و رابطه بیشینه شتاب مولفه پیچشی: (الف) نسبت به بیشینه شتاب انتقالی و (ب) نسبت به بزرگای زمین‌لرزه‌ها.

۶ نتیجه‌گیری

روش مشتق زمانی، تفاضل محدود و ژئودتیک برآورد و بیشینه شتاب پیچشی و انحراف معیار، در حکم معیاری از مشخصات تاریخچه‌های زمانی مولفه‌های پیچشی مورد مقایسه قرار گرفتند.

همان‌گونه که در بخش ۴ اشاره شد، معیارهای متفاوتی در برآورد مولفه پیچشی باید مدنظر قرار گیرد؛ از جمله فواصل بین ایستگاه‌ها و آرایش شبکه. براساس تحقیقات صورت گرفته، روش ژئودتیک برای شبکه‌های منظم دارای دقت مرتبه دوم در برآورد مولفه پیچشی

اهمیت مولفه‌های دورانی جنبش شدید زمین از دو دیدگاه مهندسی سازه و لرزه‌شناسی در سالیان اخیر مورد توجه قرار گرفته‌است. به دلیل توسعه ناکافی و هزینه زیاد ساخت تجهیزات ثبت مولفه پیچشی جنبش شدید زمین، استفاده از مولفه‌های انتقالی در برآورد مولفه‌های پیچشی یکی از روش‌های مورد استفاده است. در این مقاله با استفاده از داده‌های شبکه شتاب‌نگاری متراکم چیبا، تاریخچه‌های زمانی مولفه پیچشی جنبش شدید زمین با سه

- Bycroft, G. N., 1980, Soil-foundation interaction and differential ground motions: *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **8**, 397-4042.
- Castellani, A., and Boffi, G., 1989, On the rotational components of seismic motion: *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **18**, 785-797.
- Ghafory-Ashtiany, M., and Singh, M. P., 1986, Structural response for six correlated earthquake components: *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **14**, 103-119.
- Ghayamghamian, M. R., and Motosaka, M., 2003, The effects of torsion and motion coupling in site response estimation: *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **32**, (5), 691-709.
- Ghayamghamian, M. R., and Nouri, G. R., 2007, On the characteristics of ground motion rotational components using Chiba dense array data: *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **36**, 1407-142.
- Ghayamghamian, M. R., Nouri G. R., Igel, H., and Tobita, T., 2009, Measuring the effect of torsional ground motion on structural response-code recommendation for accidental eccentricity: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **99**, (2B), 1261-1270.
- Hao, H., 1996, Characteristics of torsional ground motion: *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **25**, 599-610.
- Haskell, N. A., 1969, Elastic displacements in the near-field of a propagating fault: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **59**, 865-908.
- Huang, B. S., 2003, Ground rotational motions of the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake as inferred from dense array observations: *Geophysical Research Letters*, **30**, 1307-1310.
- Langston, A., 2007a, Spatial gradient analysis of linear seismic array: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **97**, 268-280.
- Langston, A., 2007b, Wave gradiometry in two dimensions: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **97**, 401-416.
- Laouami, N., and Labbe, P., 2002, Experimental analysis of seismic torsional ground motion recorded by the LSST-Lotung array: *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **31**, 2141-2148.
- Li, H., Sun, L., and Wang, S., 2004, Improved approach for obtaining rotational components
- است. این موضوع در مطالعات دیگر همچون سورینتو و همکاران (۲۰۰۶) به صورت تطابق خوب بین مولفه پیچشی ثبت شده با دستگاه رینگ لیزری و محاسبه شده از روش ژئودیتیک در شبکه شتاب‌نگاری نشان داده شده است. لذا در مقایسه با نتایج روش ژئودیتیک، مقادیر مولفه پیچشی به دست آمده از روش مشتق زمانی دست‌بالا و همچنین مقادیر مولفه پیچشی که از روش تفاضل محدود حاصل می‌شود، در فواصل جدایش زیاد، دست‌پایین خواهد بود. هرچند در فواصل کم، نتایج دو روش تفاضل محدود و مشتق زمانی به یکدیگر نزدیک است. این نکته باید در بررسی تاثیر مولفه پیچشی بر پاسخ سازه‌ها مورد توجه قرار گیرد تا به نتایج نادرستی منجر نشود.
- بررسی ارتباط بین مولفه پیچشی و مولفه انتقالی روشن ساخت که برای هر سه روش محاسبه، می‌توان یک رابطه خطی بین بیشینه شتاب انتقالی و بیشینه شتاب مولفه پیچشی برقرار کرد. همچنین بررسی نتایج تغییرات بیشینه شتاب‌نگاشت مولفه پیچشی با بزرگای زمین‌لرزه‌ها بیانگر این است که در بزرگای کم، تغییرات جزئی است اما در بزرگای ۶/۵ که مربوط به زمین‌لرزه شماره ۳۷ است، بیشینه مولفه پیچشی در مقایسه با سایر زمین‌لرزه‌ها دارای افزایش ناگهانی است.

منابع

- Aki, K., 1968, Seismic displacement near a fault: *Geophysics Research*, **73**, 5359-5376.
- Bodin, P., Gombert, J., Sing, S. K., and Santoyo, M., 1997, Dynamic deformations of shallow sediments in the valley of Mexico, part I: three-dimensional strains and rotations recorded on a seismic array: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **87**, 528-539.
- Bouchon, M., and Aki, K., 1982, Strain, tilt and rotation associated with strong ground motion in the vicinity of earthquake faults: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **72**, 1717-1738.

- Spudich, P., Steck, L. K., Hellweg, M., Fletcher, J. B., and Baker, L. M., 1995, Transient stresses at Parkfield, California, produced by the M7.4 Landers earthquake of June 28, 1992: observations from the UPSAR dense seismograph array: *J. Geophys. Res.*, **100**, 675-690.
- Stedman, G. E., Li, Z., and Bilger, H. R., 1995, Side band analysis and seismic detection in a large ring laser: *Applied Optics*, **34**, 7390-7396.
- Stratta, J. L., and Griswold, T. F., 1976, Rotation of footing due to surface waves: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **66**, 105-108
- Suryanto, W., Igel, H., Wassermann, J., Cochard, A., Schuberth, B., Vollmer, D., Scherbaum, F., Schreiber, U., and Velikoseltsev, A., 2006, First comparison of array-derived rotational ground motions with direct ring laser measurements: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96**, 2059-2071.
- Takeo, M., 1998, Ground rotational motions recorded in near-source region of earthquakes: *Geophysics Research Letter*, **25**, 789-792
- Takeo, M., Ito, H. M., 1997, What can be learned from rotational motions excited by earthquakes?: *Geophysical Journal International*, **129**, 319-329.
- Teisseyre, R., Suchcicki J., Teisseyre K. P., Wiszniowski J., and Palangio P., 2003, Seismic rotation waves: basic elements of theory and recording: *Annali di Geofisica*, **46**, 671-685.
- Teisseyre, R., Takeo, M., Majewski, E., 2006, Earthquake source asymmetry structural media and rotation effects: Springer press.
- Trifunac, M. D., Todorovska, M. I., and Ivanovic, S. S., 1996, Peak velocities and peak surface strains during Northridge, California earthquake of 17 January 1994: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **15**, 301-310.
- Yamazaki, F., and Turker, T., 1992, Spatial variation study on earthquake ground motion observed by the Chiba array: *Proceeding of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, 651-656.
- of seismic motion: *Nuclear Engineering and Design*, **232**, 131-137.
- Liu, C. C., Huang, B. S., Lee, W., and Lin, C. J., 2009, Observation rotational and translational ground motions at the HGSD station in Taiwan from 2007 to 2008: *Bulletin of Seismological Society of America*, **99**, 1228-1236
- Lin, C. J., Liu, C. C., and Lee W., 2009, Recording rotational and translational ground motion of two TAIGER explosions in northeastern Taiwan on 4 March 2008: *Bulletin of Seismological Society of America*, **99**, 1237-1250.
- Morgan, J. R., Hall, W. J., and Newmark, N. M., 1983, Seismic response arising from traveling waves: *ASCE Journal of the Structural Division*, **109**, 1010-1027.
- Nathan, N. D., and MacKenzie, J. R., 1975, Rotational components of earthquake motions: *Canadian Journal of Civil Engineering*, **2**, 430-436.
- Newmark, N. M., 1969, Torsion in Symmetrical Buildings: *Proceeding of the 4th World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago, Chile; A3, 19-32.
- Niazi, M., 1986, Inferred displacements, velocities and rotations of a long rigid foundation located at el centro differential array site during the 1979 imperial valley, California, earthquake: *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **14**, 531-542.
- Nigbor, R. L., 1994, Six-degree-of-freedom ground-motion measurement: *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**, 1665-1669.
- Oliveira, C. S., and Bolt, B. A., 1989, Rotational components of surface strong ground motions: *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, **18**, 517-528.
- Richter, C. F., 1958, *Elementary seismology*: W. H. Freeman, San Francisco.
- Rutenberg, A., and Heidebrecht, A. C., 1985, Rotational ground motion and seismic codes: *Canadian Journal of Civil Engineering*, **12**, 583-592.