

شبیه سازی زمین لرزه هجدهم اردیبهشت ۱۳۹۹ دماوند تهران با بزرگای گشتاوری ۵ به روش تابع تجربی گرین

نگار سودمند^۱، محمدرضا قیطانچی^{۲*}، سهیلا بوذری^۳

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۱

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۲۰

چکیده

برای شبیه سازی جنبش نیرومند زمین لرزه دماوند از روش تابع تجربی گرین استفاده شده است. یکی از روش های مرسوم شبیه سازی برای تولید جنبش نیرومند زمین استفاده از پس لرزه ها و پیش لرزه های زمین لرزه های بزرگ روش تابع تجربی گرین است؛ در نتیجه ما از الگوریتم شبیه سازی جنبش زمین بر پایه تابع تجربی گرین، برای شبیه سازی شکل موج زمین لرزه دماوند استفاده کردیم. در تاریخ ۱۳۹۹/۰۲/۱۸، زمین لرزه ای با بزرگای گشتاوری ۵ در دماوند واقع در استان تهران به وقوع پیوست. در این مطالعه با هدف برآورد پارامترهای چشمه و نحوه شکستگی در این زمین لرزه، از روش تابع تجربی گرین به منظور شبیه سازی جنبش نیرومند زمین، استفاده گردیده است. برای شبیه سازی زمین لرزه اصلی، پیش لرزه ای با بزرگای ۲٫۹ در نزدیکی رو مرکز زلزله اصلی و همچنین پس لرزه هایی با بزرگای ۳٫۹ و ۴٫۱ که در ایستگاه های شتابنگاری مشا و رودهن ثبت شده اند، به عنوان تابع تجربی گرین در نظر گرفته شده است. طول و عرض شکستگی در این زمین لرزه، به ترتیب ۲ و ۳ کیلومتر، به ترتیب در راستای امتداد و شیب به دست آمده است. محاسبات نشان می دهد که راستا، شیب و ریک گسل مسبب زمین لرزه به ترتیب ۱۹۶، ۷۶ و ۱۵۶٫۵ درجه بوده است. مکانیزم کانونی این زمین لرزه، از نوع معکوس با مولفه امتداد لغز است، که با ساز و کار زمین لرزه ها در این ناحیه همخوانی دارد.

کلمات کلیدی: دماوند، شبیه سازی، جنبش نیرومند زمین، تابع تجربی گرین

^۱ دانشجوی دکتری، گروه ژئوفیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران شمال، ایران. n.soodmand@iau-tnb.ac.ir

^۲ استاد، گروه ژئوفیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران شمال، ایران. mrghchee@ut.ac.ir

^۳ دانشیار، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران شمال، ایران.

*مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

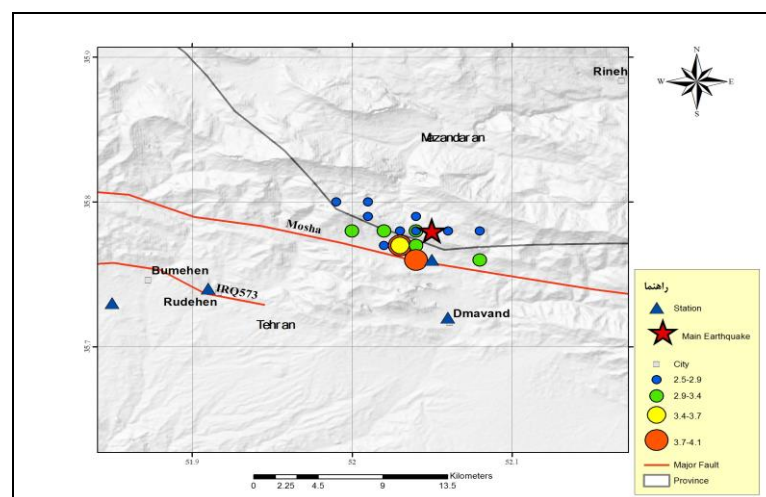
در روز نوزدهم اردیبهشت ماه ۱۳۹۹، ساعت ۰۰:۲۱:۴۸ به وقت محلی زمین‌لرزه‌ای به بزرگای گشتاوری ۵ در دماوند واقع در استان تهران به وقوع پیوست. این زمین‌لرزه در منطقه‌ای نزدیک به گسل مشا روی داد. محاسبات انجام شده نشان می‌دهد که رومرکز این زمین‌لرزه در ۳۵٫۸۶ درجه عرض شمالی و ۵۲٫۱۱ درجه طول شرقی، محدوده ۷ کیلومتری شمال دماوند و در مجاورت روستای مشاء قرار داشت. عمق کانونی زمین‌لرزه دماوند ۷ کیلومتر گزارش شده است (مرکز لرزه نگاری ایران). برای مطالعات زلزله شناسی، مهندسی زلزله و تحلیل خطر لرزه‌ای، تعیین پارامترهای چشمه زمین‌لرزه‌ای کاربردی می‌باشد (Huang and Cheng, 2011). برای شناخت بهتر و تعیین پارامترهای لازم محدوده تهران از شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین برای زمین‌لرزه دماوند، می‌توان استفاده کرد و منطقه را از لحاظ رخداد زمین‌لرزه‌های آینده شناخت (Raghu, 2008). در این مطالعه از داده‌های شتابنگاری میدان نزدیک استفاده شده است، که برگرفته از داده‌های مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن می‌باشند. برای این منظور شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین از روش تابع تجربی گرین استفاده شده است (شکل ۱).

برای شبیه‌سازی رخداد اصلی، پس‌لرزه‌هایی با بزرگای گشتاوری ۳٫۹ و ۴٫۱ به عنوان رخداد‌های کوچک در نظر گرفته شده است. در این روش، بایستی ساز و کار کانونی رخداد کوچک و رخداد اصلی مشابه باشند (Irikura, 1986).

۲. روش تابع تجربی گرین (EGF)

۲-۱- مروری بر مطالعات انجام شده

اولین کوشش در زمینه تولید زمین‌لرزه‌های مصنوعی توسط آکی (Aki, 1968) و هاسکل (Haskell, 1969) صورت گرفت. هنکس و مک‌گور (Hanks and McGuire, 1981) و بور (Boore, 1983) تکانه‌های قوی زمین را با استفاده از سری زمانی ارتعاشی تصادفی و با کمک مدل طیفی دور از گسل که اثرات گسترش هندسی و کاهندگی را در نظر می‌گیرد، تولید کردند. هاکنینگ (Hutchings, 2007) پیشنهاد استفاده از توابع گرین تجربی برای در نظر گرفتن اثرات مسیر انتشار و ... را با بکار بردن محدوده‌ای از مدل گسیختگی برای مدل سازی چشمه در پیش‌بینی تکانه‌های قوی زمین ارائه داد. هم اکنون



شکل ۱. توزیع پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه ۵ دماوند به همراه ایستگاه‌های شتابنگاری میدان نزدیک

ثبت شده اصلی، به دست آورد. سپس با جمع آثار کلیه قطعات، حرکت کلی زمین در ایستگاه مورد نظر محاسبه می‌گردد. برای شبیه‌سازی از روش ایریکورا (Irikura, 1986) استفاده شده است. رابطه میان پارامترهای دو زمین‌لرزه بزرگ و کوچک بر اساس قوانین کاناموری (Kanamori, 1975) به دست می‌آید.

۲-۳- نتایج شبیه‌سازی

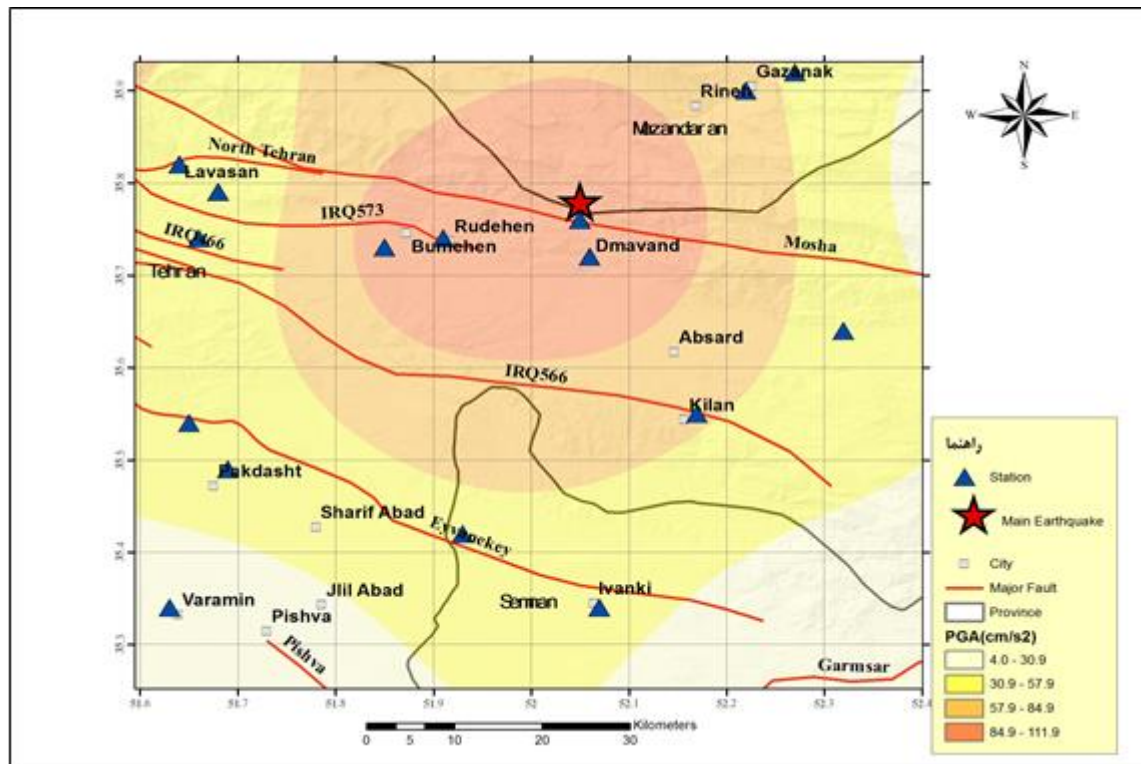
در این مطالعه از داده‌های ثبت شده توسط ۱۲ ایستگاه شتاب‌نگاری میدان نزدیک استفاده شده است بر روی داده‌ها پردازشی شامل تصحیح خط مبنا و محتوای فرکانسی انجام شده است. با هدف تعیین افت تنش در این رخداد، از طیف فوریه در مقیاس لگاریتمی استفاده شده است، با تعیین فرکانس گوشه و ممان لرزه ای، به این ترتیب افت تنش از این دو پارامتر به دست می‌آید. با استفاده از بیشینه شتاب‌های ثبت شده در ۱۲ ایستگاه میدان نزدیک، نقشه PGA (بیشینه شتاب زمین) در این منطقه، برای این زمین‌لرزه رسم شده است (شکل ۲). در این مطالعه شکستگی از کانون به صورت یک طرفه و با سرعتی برابر با ۰/۸ سرعت موج برشی گسترش یافته است. در این روش، رخداد اصلی شامل مجموعه‌ای از رخداد‌های کوچک در نظر گرفته می‌شود، صفحه گسل رخداد اصلی را به تعدادی زیر گسل با ابعاد یکسان تقسیم می‌کنیم، ابعاد گسل اصلی و زیر گسل به ترتیب متناسب با گسیختگی مربوط به رخداد اصلی و رخداد کوچک می‌باشند. در این مطالعه، رخداد کوچک، بزرگترین پس‌لرزه این زمین‌لرزه با بزرگای گشتاوری ۴،۱ و ۳،۹ در نظر گرفته شده است؛ با استفاده از روابط ولز و کوپراسمیت (Wells and Coppersmith, 1994)، طول گسل در زمین‌لرزه دماوند در حدود ۲ کیلومتر در راستای امتداد و عرض گسل ۳ کیلومتر در راستای شیب به دست آمده است. برای تعیین ابعاد المان از قانون تشابه زمین لرزه‌ها ایریکورا (Irikura, 1986) و استفاده از روابط مربوط به قانون تشابه زمین‌لرزه‌ها کاناموری (Kanamori, 1975)، استفاده شده است. در زمین‌لرزه مذکور،

نیز تحقیقات وسیعی برای اصلاح روش‌های تولید زمین‌لرزه موجود و در حال انجام است که از جمله آنها می‌توان به تحقیقات ایریکورا و موراماتو (Irikura and Muramatsu, 1982) و نیز هاکنینگ و همکارانش (Hutchings et al., 2007) اشاره کرد. ایده مطالعه زمین‌لرزه‌های بزرگ با استفاده از نگاشت‌های زمین لرزه‌های کوچک که به عنوان تابع تجربی گرین (EGF) شناخته می‌شوند، برای نخستین بار توسط هاتزل (Hartzell, 1978) معرفی گردید.

۲-۲- روش شبیه‌سازی با استفاده از تابع تجربی گرین

در یک ساختگاه مشخص از حاصل جمع یک سری حرکت بدست می‌آید، که این حرکت‌ها ناشی از شکست‌های منفرد قطعات کوچک روی صفحه گسل با تأخیر زمانی مشخص است. فرض مهم این روش نقطه‌ای بودن منبع در رخداد‌های کوچک می‌باشد. مراحل ساخت حرکت مصنوعی زمین را می‌توان بدین صورت خلاصه کرد: ابتدا الگوی مناسب از سرچشمه و بزرگی زمین‌لرزه هدف در ساختگاه مورد نظر انتخاب می‌شود. این مدل باید با توجه به مستندات زمین‌شناسی محل انتخاب شود. سپس خردلرزه ثبت شده در ایستگاهی که زمین‌لرزه اصلی ثبت شده است را برای سرچشمه‌مورد نظر انتخاب می‌شوند. این خردلرزه، ویژگی‌های اصلی ساز و کارهای زمین‌لرزه‌های بزرگتر را در بردارند و نیز اثرات ساختار زمین‌شناختی بین منبع و ایستگاه نیز در آن لحاظ شده است. در مرحله بعد اندازه زمین‌لرزه را می‌توان بر حسب گشتاور لرزه‌ای انتخاب کرد. سپس سطح گسل، بر حسب یک شبکه مقدماتی از اجزا محدود معین می‌شود. تابع تجربی گرین که در بالا به آن اشاره شد با ترتیب خواسته شده به هر یک از اجزا شبکه اثر داده می‌شود تا سرعت گسیختگی مناسب در تمام سطح گسل بدست آید و ضمناً گشتاور کلی خاص برای زمین‌لرزه بزرگتر حفظ شود. بر هم نهش را می‌توان بر حسب طیف‌های دامنه و فاز، به کمک برنامه‌ی رایانه‌ای تهیه شده انجام داد و شتاب‌نگاشت مصنوعی را در نقطه‌ای سطحی در مجاورت تابع تجربی گرین

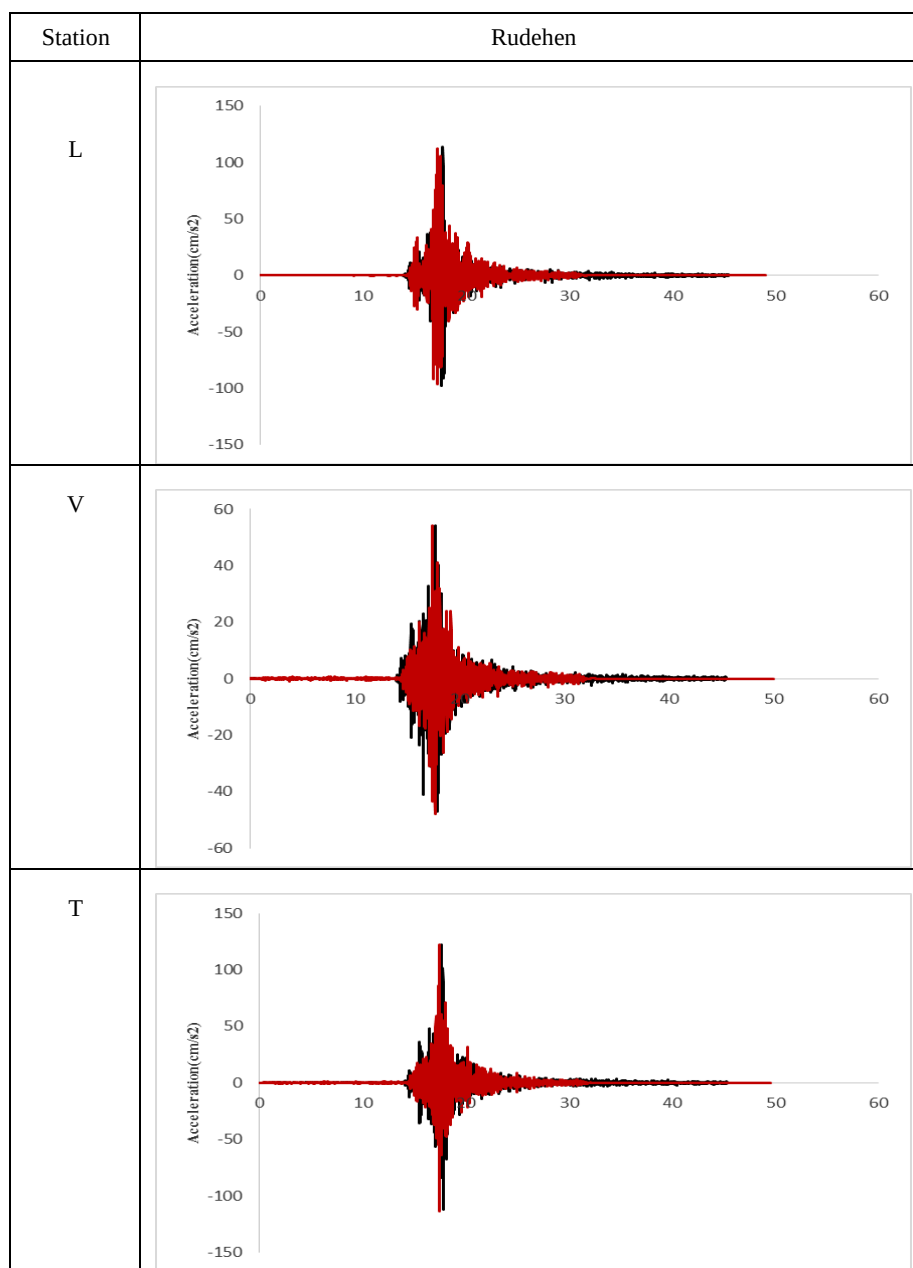
۴ المان در راستای امتداد و ۶ المان در راستای شیب تعیین شد.



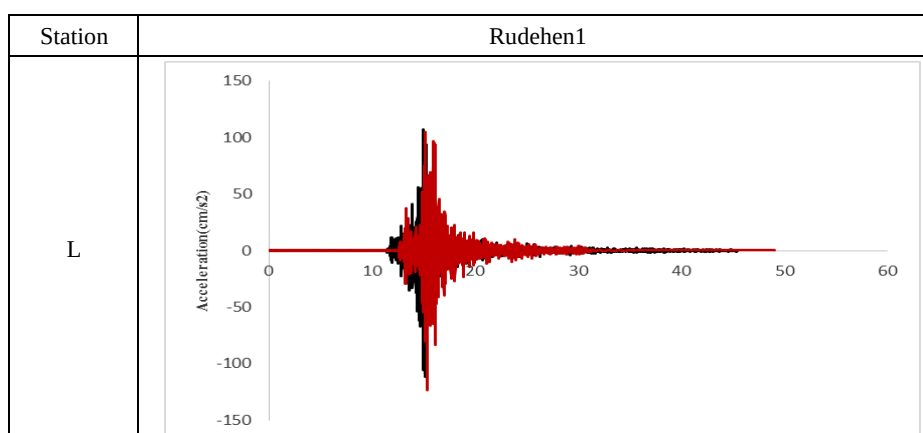
شکل ۲. نقشه بیشینه شتاب‌های ثبت شده در ۱۲ ایستگاه شتابنگاری میدان نزدیک در زمین‌لرزه دماوند

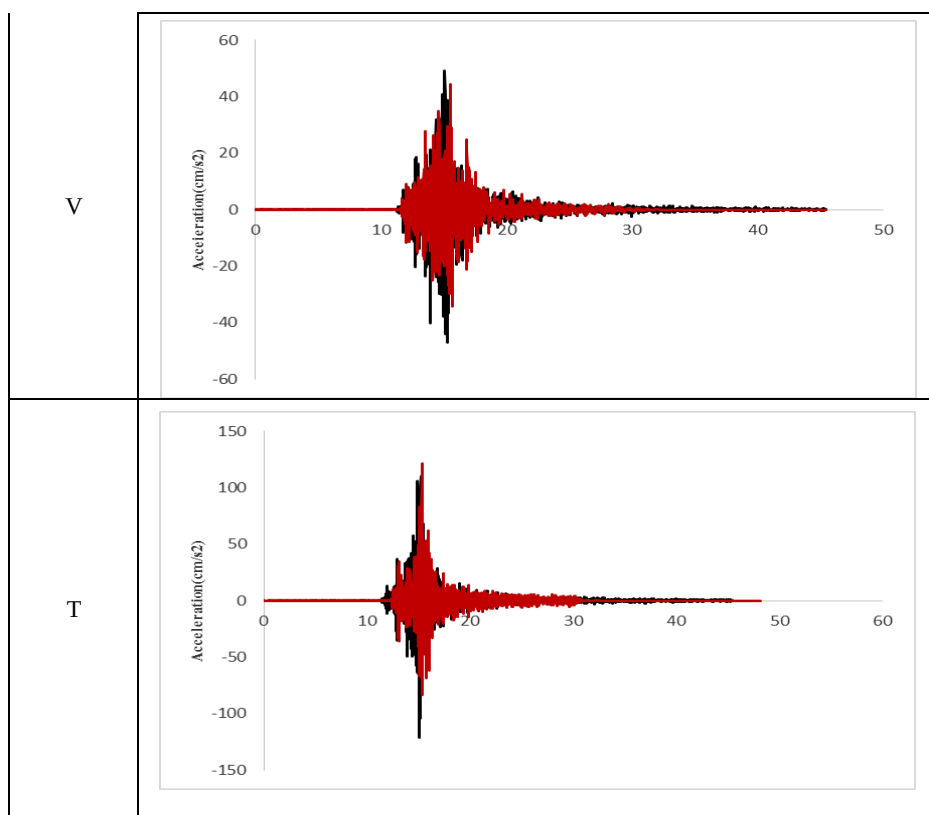
جدول ۱. مقادیر بیشینه نمودارهای مولفه‌های L و V و T مشاهده‌ای و شبیه سازی شده زمین‌لرزه با Mw=5 در سه ایستگاه

component	Station	RDH			RDH1			MOSHA3		
	Parameter	PGA (cm/s ²)	PGV (cm/s)	PGD (cm)	PGA (cm/s ²)	PGV (cm/s)	PGD (cm)	PGA (cm/s ²)	PGV (cm/s)	PGD (cm)
L	Obs	113.661	1.628	0.066	111.577	1.69	0.066	88.048	2.069	0.087
	Syn	112.319	1.524	0.042	110.976	1.664	0.068	88.048	2.085	0.117
V	Obs	54.085	0.785	0.032	49.044	0.749	0.031	30.465	0.706	0.038
	Syn	54.053	0.596	0.015	44.478	0.809	0.05	30.498	0.732	0.048
T	Obs	122.159	1.635	0.041	121.41	1.639	0.042	104.983	2.172	0.002
	Syn	122.129	1.667	0.032	121.021	1.773	0.043	104.184	3.862	0.003

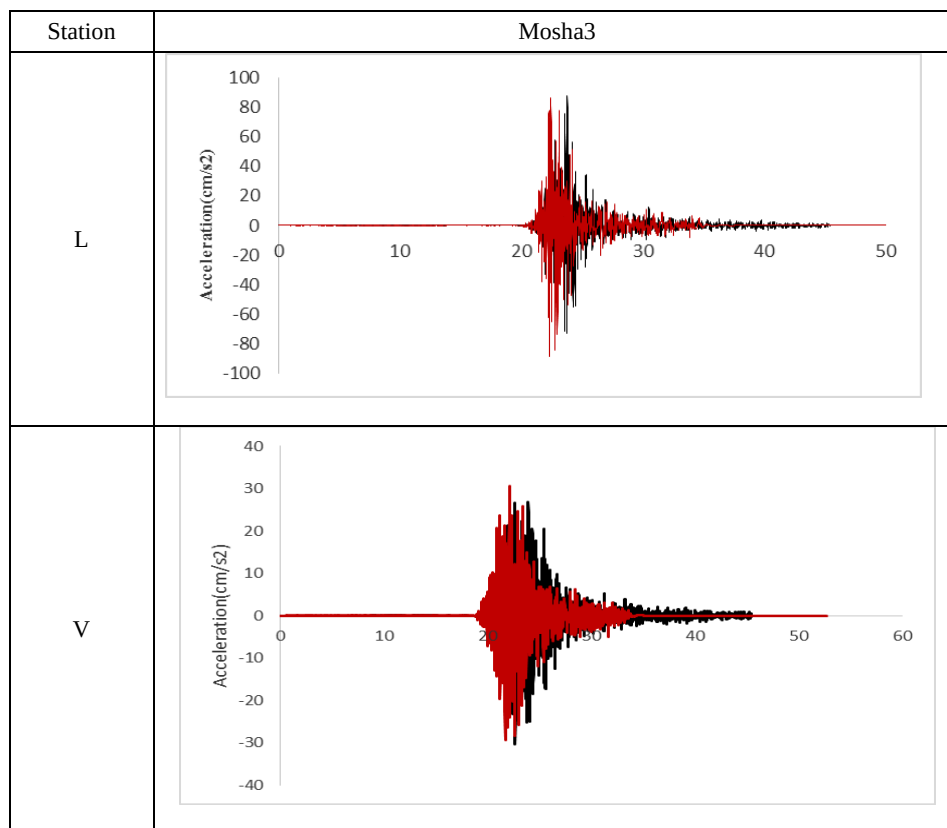


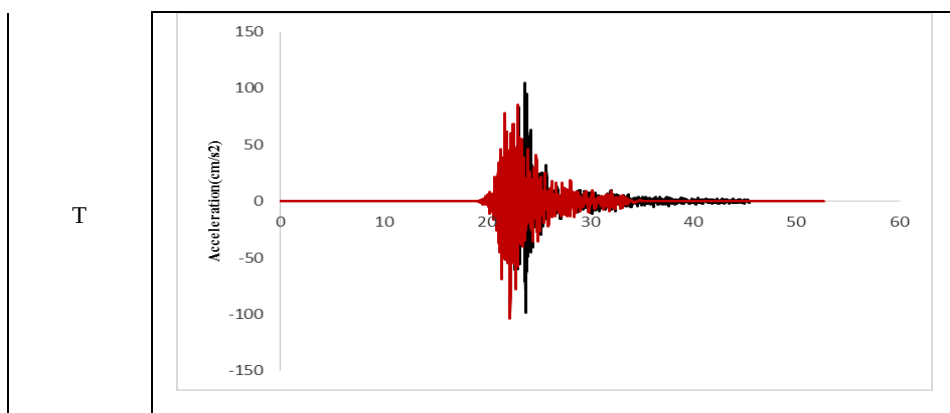
شکل ۴. مقایسه رکوردهای PGA مولفه V، L و T ایستگاه رودهن (رنگ قرمز و مشکی شتاب مصنوعی و شتاب مشاهده‌ای)



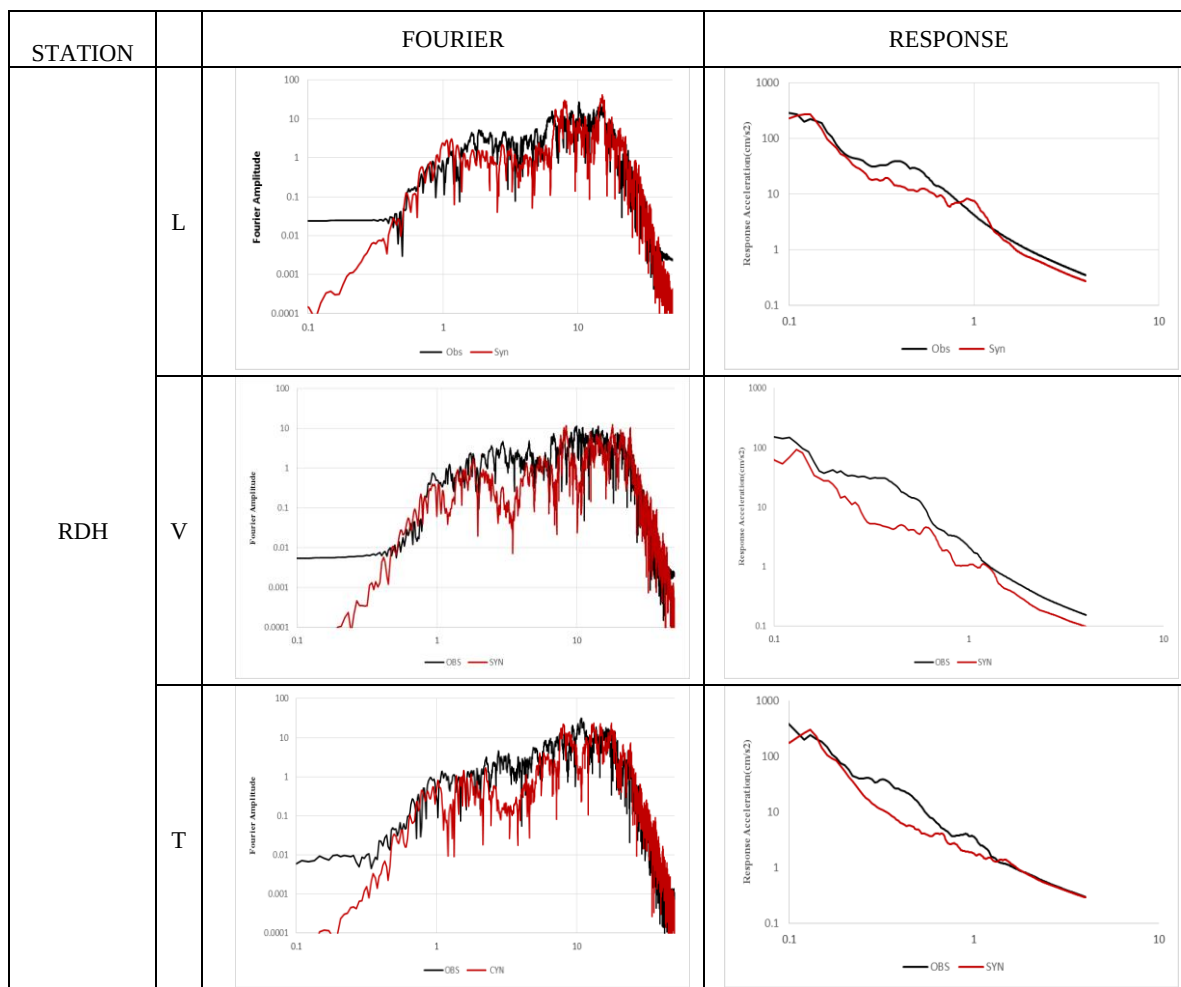


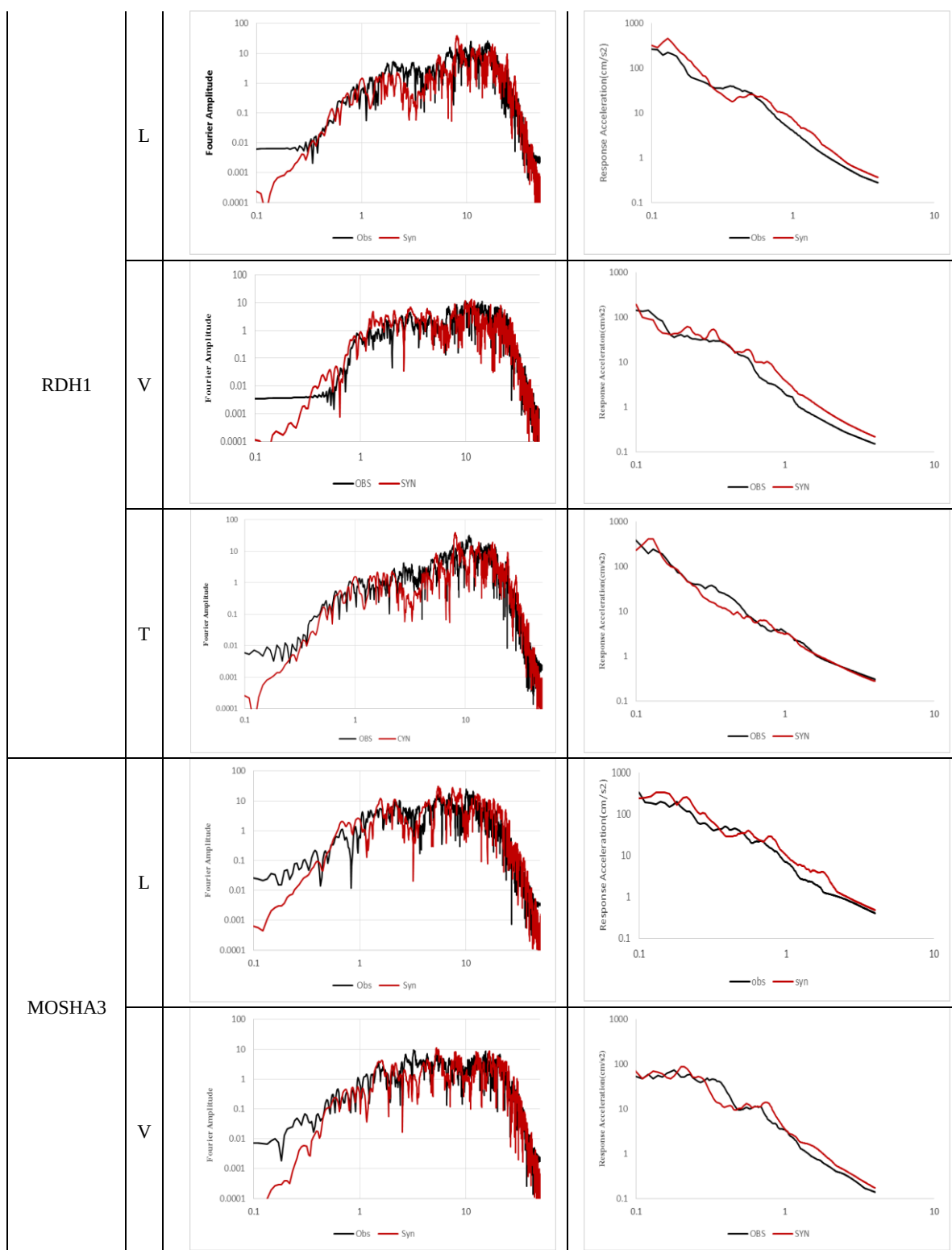
شکل ۵. مقایسه رکوردهای PGA مولفه V، L و T ایستگاه رودهن^۱ (رنگ قرمز و مشکی شتاب مصنوعی و مشاهده‌ای)

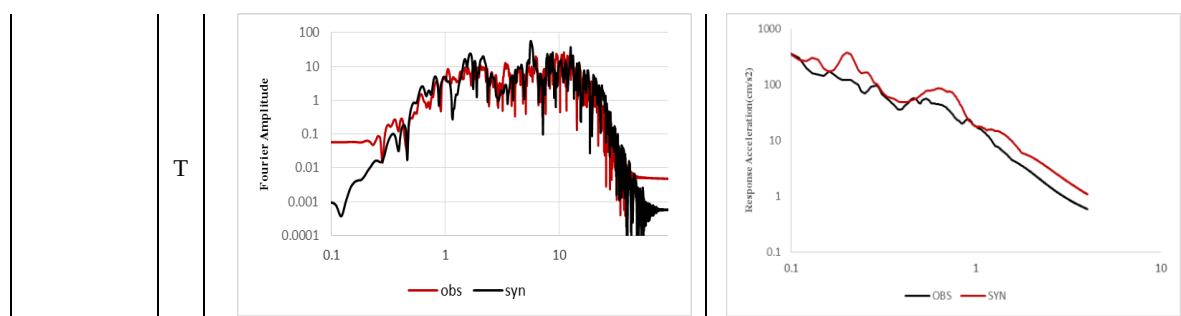




شکل ۶. مقایسه رکوردهای PGA مولفه V، L و T ایستگاه مشا^۳ (رنگ قرمز و مشکی شتاب مصنوعی و مشاهده‌ای)







شکل ۷. مقایسه طیف‌های فوریه و پاسخ مولفه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده V، L و T ایستگاه‌های رودهن، رودهن ۱ و مشا ۳

۳. بحث و نتیجه گیری

آمده از شتاب‌نگاشت‌ها پارامترهای چشمه زمین‌لرزه نوزدهم اردیبهشت ۱۳۹۹ دماوند تهران و همچنین مشخصات گسیختگی آن، با استفاده از این روش، تعیین گردید. با استفاده از این روش، تعداد المان‌ها در راستای امتداد و نقطه شروع گسیختگی و عمق کانون زمین‌لرزه با استفاده از روش تابع تجربی گرین، بر روی صفحه گسل به دست آمد (جدول ۲).

با توجه به پارامترهای شبیه‌سازی شده، بیشینه شتاب در ایستگاه‌ها به روش تابع تجربی گرین برآورد و با بیشینه شتاب مشاهده‌ای مقایسه گردید (شکل‌های ۴ و ۵ و ۶) برای انتخاب بهترین نقطه به منزله کانون زمین‌لرزه، سطح گسل با استفاده از قانون تشابه زمین لرزه‌ها، به تعدادی زیرگسل تقسیم شده است. با استفاده از داده‌های جنبش نیرومند زمین به دست

جدول ۲. مشخصات صفحه گسیختگی

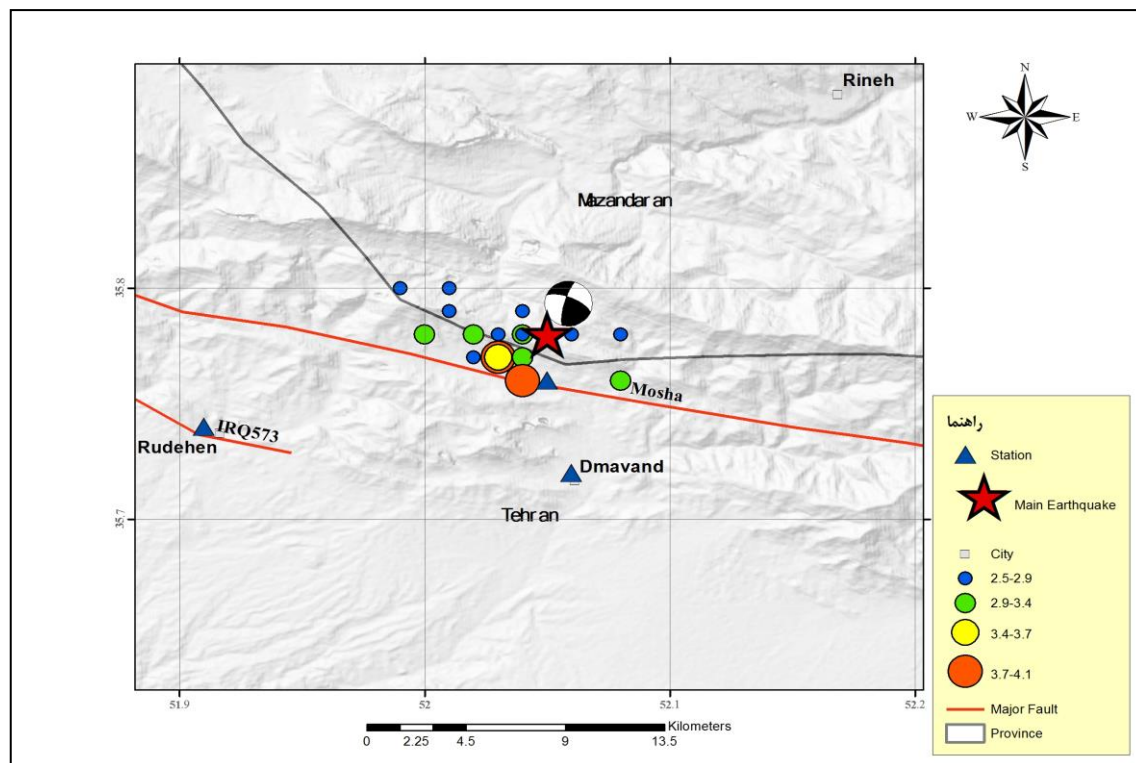
fault length	2 Km
fault width	3 Km
The number of elements along the length	4
The number of elements along the width	6
The starting point of rupture	(1,1)
depth	27 Km

- با مقایسه طیف‌های فوریه و پاسخ شتاب زمین حاصل از نگاشت‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده می‌توان دریافت که نتایج حاصل، در بازه فرکانسی ۲ تا ۲۵ هرتز با یکدیگر هم‌خوانی دارند. این هم‌خوانی نشان دهنده انتخاب صحیح پارامترهای ورودی برنامه شبیه‌سازی EGF است.

- با توجه به موقعیت استراتژیک شهر تهران، توجه به خصوصیات جنبش نیرومند زمین در این رخداد برای شناخت منطقه از لحاظ رخداد زمین‌لرزه‌های آینده و انجام طراحی‌های مناسب برای ساخت و ساز در منطقه حائز اهمیت است.

- سازوکار زمین‌لرزه به دست آمده در این پژوهش از نوع معکوس با مؤلفه کوچک امتداد لغز است و ساز و کار به دست آمده در این پژوهش با گزارش مرکز هاروارد هم‌خوانی دارد.

- شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین با استفاده از داده‌های میدان نزدیک و با استفاده از روش تابع تجربی گرین انجام شد و مقادیر امتداد، شیب و ریک مربوط به زمین‌لرزه دماوند پس از بهینه‌سازی مقادیر گزارش شده توسط مرکز هاروارد، به ترتیب ۱۹۶، ۷۶ و ۱۵۶،۵ درجه به دست آمد (شکل ۸).



شکل ۸. ساز و کار کانونی زمین لرزه دماوند به عنوان تابع تجربی گرین و نحوه توزیع پس لرزه های مربوط به این زمین لرزه به همراه ایستگاه های انتخاب شده برای انجام شبیه سازی

قدردانی

بدینوسیله از مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی به دلیل در اختیار گذاشتن داده های استفاده شده در این پژوهش و مرکز لرزه نگاری کشوری وابسته به موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران به دلیل حمایت و کمک در امر این تحقیق قدردانی می شود. ضمناً از سرکار خانم حسانه محمدی دانشجوی دکتری ژئوفیزیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال برای راهنمایی های ارزشمندشان بسیار سپاسگزارم.

منابع

آنلز، ر. ن؛ اترتون، ر. س؛ بیزلی، ر. آ. و دیویس، ر. ج. ۱۹۷۵ نقشه و گزارش زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ رشت - قزوین، سازمان زمین شناسی ایران.
بربریان، م؛ قرشی، م؛ ارژنگ روش، ب و مهاجر اشجعی، ا. ۱۳۶۴ پژوهش و بررسی ژرف نوزمین ساخت، لرزه زمین ساخت و خطر زمین لرزه گسلش در گستره تهران و پیرامون، گزارش ۵۶، سازمان زمین شناسی و اکتشاف معدنی کشور.
حسامی، خ؛ جمالی، ر و طبسی، ا. ۱۳۸۲ نقشه گسل های فعال ایران. پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله.

- Aki, K., 1968. Seismic Displacements near a Fault, *Geophys. Res.*, 73, pp 5359-5376
Boore, DM., 1983. Stochastic Simulation of High-Frequency Ground Motion Based on Seismological Mod of the Radiated Spectra, *Bull. Seis. Soc. Of Am*, Vol. 73, No. 6: 1865-1894
Cheng, F., Huang, H., 2011. Strong ground motion simulation of the October 22, 1999 Chiay earthquake using Hybrid Green function method: 4th IASPEI international symposium, University of California Santa Barbara.

- Hanks, TC., and McGuire, RK., 1981. The character of high frequency Strong ground motion , Bull. Seism. Soc. Am., 71: 2071-2095
- Hartzell, SH., 1978. Earthquake aftershocks as Green's functions, Geophys. Res. Lett. 5: 1-4
- Haskell, NA., 1969. Elastic Displacements in the Near-Field of a Propagating Fault", Bull. Seism. Soc. Am., 59: 865-908
- Hutchings, L., 1991. Prediction of strong ground motion for the 1989 Loma Prieta earthquake using empirical Green's functions, Bull. Seism. Soc. Am., 81: 88-121
- Hutchings, L and Ioannidou, E, Foxall W and Voulgaris N., 2007. A physically based strong ground motion prediction methodology; application to PSHA and the 1999 Mw = 6.0 Athens earthquake, Geophys. J. Int., 168: 659-680
- Irikura, K., 1986. Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function. Proc. 7th Japan Earthquake Engineering Symposium, Tokyo, 151-156
- Irikura, K and Muramatu, I., 1982. Synthesis of strong ground motion from large earthquakes using observed seismograms as small events, Paper presented at 3rd International Earthquake Microzonation Conference, National Science Foundation
- Kanamori, HK and Anderson, DL., 1975. Theoretical basis of some empirical relations in seismology, Bull. Seism. Soc. Am. 65: 1073-1095
- Raghu, STG., 2008. Modeling and synthesis of strong ground motion: Department of civil engineering, Indian institute of technology, Madras, India.
- Wells, DL and Coppersmith, KJ., 1994. New empirical relationships among Magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, Bull. Seismol. Soc. Am., 84: 974-1002