

شبیه‌سازی زلزله سال ۱۳۸۱ آوج با روش تابع نیمه تجربی گرین

سید علی مقدسی موسوی^۱؛ حسین حمزه‌لو^۲؛ حمزه شکیب^۳

چکیده

زمین‌لرزه‌ی آوج در تاریخ ۱۳۸۱/۴/۱ با بزرگی $M_w = 6.5$ بخشی از شمال غربی ایران را لرزاند. پس از استخراج مشخصات لازم برای مدلسازی جنبش نیرومند زمین، از قبیل طول و عرض صفحه‌ی گسل، امتداد و شیب گسل، محل چشمه، مختصات ایستگاه ثبت و غیره، رکوردهای مصنوعی به دو روش کاتوره‌ای و تابع نیمه تجربی گرین برای ایستگاه‌های آوج، بهار، کبودرآهنگ، شیرین‌سو و باکندی ایجاد شد و پارامترهایی مانند بیشینه شتاب زمین، مدت دوام مؤثر، طیف پاسخ شتاب و مقدار جذر متوسط مجذور خطا برای رکوردهای شبیه‌سازی شده و رکوردهای واقعی ثبت شده، با هم مقایسه گردیده است. در این مقاله روش تابع نیمه تجربی گرین برای شرایط ایران اصلاح شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که این روش می‌تواند برای نواحی دیگر مانند گسل‌های تهران با سازوکاری مشابه گسل آوج بکار رود.

کلمات کلیدی

زلزله مصنوعی، تابع نیمه تجربی گرین، زلزله آوج.

Simulation of the Avaj earthquake 2002 by semi-empirical Green's function

A. Moghaddasi M.; H. Hamzehloo; H. Shakib

ABSTRACT

The Avaj earthquake in June 22, 2002 with a magnitude of $M_w=6.5$ occurred in western north of Iran. The requirement characteristics for modelling of strong ground motion such as length and wide of fault plate, strike, dip, focal position, stations position and etc. is defined by field study. These parameters are used in order to generate artificial earthquake based on the semi-empirical Green's function methods for Avaj, Bahar, Kabudar Ahang, Shirin Su and Bakandi stations. Then, some parameters such as peak ground acceleration, effective duration, acceleration response spectrum and root mean square error of the generated earthquake compared with the real records.

In this paper, semi-empirical Green's function method is further developed for Iran condition. The results of the study are shown that the method can be applied for the other region with the fault of same mechanism such as Tehran faults.

KEYWORDS

Synthetic earthquake, semi-empirical Green's function, Avaj earthquake

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه تربیت مدرس Email: moghad_a@modares.ac.ir

^۲ دانشیار پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله Email: hhamzehloo@iiees.ac.ir

^۳ استاد دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی، بخش مهندسی عمران Email: shakib@modares.ac.ir



حمزه‌لو و کمالیان نیز در سال ۱۳۸۰ هـ ش به معرفی روش جدیدی با نام روش پیوندی موجک، پوش موج نقشها و نوفه سفید فیلتر شده پرداختند [۱]. شکیب و همکاران در سال ۱۹۹۱ با استفاده از روشی با نام مونت کارلو شتابنگاشت‌هایی مصنوعی ایجاد نمودند [۲۵]. رفویی، آقابابایی و احمدی در سال ۲۰۰۱ به شبیه‌سازی زلزله مصنوعی با استفاده از مدلی به نام Kanai-Tajimi پرداختند [۲۴].

برخی از روشهای شبیه‌سازی رکورد مصنوعی، نیازمند داشتن رکورد ثبت شده‌ای است تا بتوان با استفاده از آن رکورد، شتابنگاشت‌های مصنوعی را ایجاد نمود. روش تابع تجربی گرین از این دسته روشهاست. این روشها برای مناطقی که رکورد ثبت شده‌ای برای آنها در دست نیست، مناسب نمی‌باشند زیرا در صورت شبیه‌سازی شتابنگاشت خرد لرزه‌ها، نیاز به چند بار شبیه‌سازی است که باعث وارد شدن خطای زیاد در این شبیه‌سازی می‌شود [۲۹]. در این تحقیق با توجه به مشخصات منطقه و گسل مسبب زلزله‌ی آوج، این زلزله به دو روش کاتوره‌ای و تابع نیمه تجربی گرین، شبیه‌سازی گردیده و سپس نتایج این دو شبیه‌سازی با رکوردهای واقعی مقایسه می‌شوند. این شبیه‌سازی‌ها برای موقعیت ایستگاههای آوج، کبودرآهنگ، شیرین‌سو، بهار و باکندی انجام پذیرفته است. این ایستگاهها به گونه‌ای انتخاب شده که از پراکندگی مناسبی در اطراف مرکز زلزله برخوردار بوده و همچنین دارای فواصل و بیشینه شتابهای مختلفی باشند.

از آنجا که روش تابع نیمه تجربی گرین توسط نگارندگان برای شرایط ایران اصلاح شده است، باید به نتایجی نزدیکتر به واقعیت منجر شود که این امر، در نتایج دیده می‌شود.

۲- روش شبیه‌سازی

در اینجا از روشی استفاده می‌شود که تا میزان لازم برای شرایط ایران اصلاح گردیده است. بعلت آنکه روشهای کاتوره‌ای بکار گرفته شده در این تحقیق، همان روشهای ارائه شده در مراجع اصلی آن است (مانند مرجع شماره ۱۰) و هیچگونه تغییر و اصلاحی بر روی آن صورت نگرفته است، از شرح آن روشها در این مقاله خودداری شده است. روش تابع نیمه تجربی گرین را می‌توان به سه مرحله‌ی ایجاد نوفه سفید، فیلتر کردن و اعمال تابع پوش^۱ زلزله تقسیم نمود.

الف) ایجاد نوفه سفید

نوفه سفید، موجی است که تمامی فرکانسها را در خود دارد و برای تولید آن از یک سری زمانی تصادفی که بطور نرمال توزیع شده باشد، استفاده می‌گردد. این سری زمانی تصادفی،

زمین‌لرزه‌ی ۸۱/۴/۱ آوج (چنگوره) بر اساس گزارش NEIC با بزرگی‌های $M_w = 6/5$ ، $M_s = 6/1$ و $m_b = 6$ در شمال غربی ایران و در نزدیکی ۲۵۰ کیلومتری غرب تهران بوقوع پیوست [۴]. این زمین‌لرزه، گسیختگی‌های گسلی سطحی را در دو منطقه‌ی آبدره و چنگوره بوجود آورده است. بیشترین جابجایی شاقولی این دسته از گسیختگی‌های گسلی، ۶۵ سانتیمتر در نقطه‌ای در باختر روستای آبدره اندازه‌گیری شده است [۲]. این دسته از گسیختگی، منطبق بر گسله‌های کهن‌تر و پیامد جنبش دوباره آنها می‌باشد [۳]. مرکز این زمین‌لرزه در مختصات جغرافیایی ۲۵/۶۳۶ درجه شمالی و ۴۹/۱۹۹ درجه شرقی در عمق کانونی به میزان ۱۰ کیلومتر [۲۷] در منطقه مرزی بین پهنه‌های ساختاری ایران مرکزی و سنندج - سیرجان (زاگرس) روی داد.

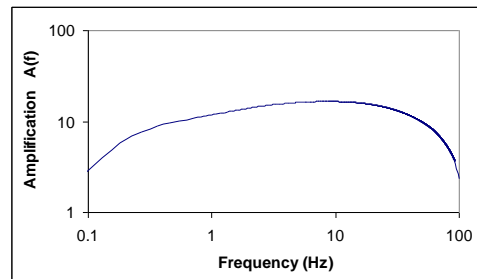
این زمین‌لرزه طبق آمارهای رسمی با ۲۲۳ کشته، نزدیک به ۱۵۰۰ مجروح و با بیش از ۵۰۰۰ بی‌خانمان همراه بوده است و تخریب نسبی ۵۰ روستا و آسیب‌های جدی به شهر آوج را به همراه داشته است. شدت زلزله در چنگوره و آبدره IX-VIII برآورد شده است و بیشینه شتاب زمین^۱ پس از فیلتر کردن، ۴۵۵ سانتیمتر بر مجذور ثانیه در ایستگاه آوج بدست آمده است. نگاشت‌های شتابنگاری در ۵۵ ایستگاه ثبت شده است.

در این مقاله تلاش شده که رکوردی با توجه به مشخصات گسل مسبب زلزله آوج شبیه‌سازی شده و مقایسه‌ای بین این رکورد شبیه‌سازی شده و رکورد واقعی صورت پذیرد. برای شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین روشهای مختلفی از جمله روشهای تابع تجربی گرین، تابع نیمه تجربی گرین^۲، روشهای کاتوره‌ای و شبکه عصبی توسط محققین ارائه شده است همچنین برخی از محققین، ترکیبی از روشهای یاد شده را بکار گرفته‌اند که از آنها به روشهای پیوندی^۳ یاد می‌شود. بعنوان نمونه Boore در سال ۱۹۸۲ به ارایه‌ی روشی کاتوره‌ای برای شبیه‌سازی جنبش زمین پرداخت. روش تابع تجربی گرین اولین بار در سال ۱۹۷۸ توسط Hartzell مورد استفاده قرار گرفت. روشهای تعینی^۴ مانند روش تابع تجربی گرین و روش تئوری تشعشعی توسط Irikura در سال ۱۹۸۶، Atkinson و Somerville در سال ۱۹۹۴، Irikura و Kamae در سال ۱۹۹۴ و Bolt در سال ۱۹۹۵ مورد استفاده قرار گرفته‌اند. و Beresnev و Atkinson نیز در سال ۱۹۹۷ از روش تصادفی گسل محدود استفاده کردند. Gibson در سال ۱۹۹۳ یک روش پیوندی که ترکیبی از روشهای تعینی و کاتوره‌ای می‌باشد، ارایه نمود.

یک سری اعداد تصادفی بین ۱ و ۱- است که با کمک یک برنامه کامپیوتری ایجاد می‌شود (شکل ۴).

ب) تابع فیلتر

همانگونه که گفته شد نوفه سفید دارای تمام فرکانسهای کم و زیاد می‌باشد در حالیکه، در فاصله چشمه تا نقطه مشاهده‌ای (ایستگاه ثبت رکورد) تغییراتی در محتوای فرکانسی موج، ایجاد می‌شود. این تغییرات در اثر عواملی چون میرایی هندسی، میرایی مسیر، بزرگنمایی پوسته، اثرات چشمه و غیره است. برای لحاظ نمودن این اثرات از تابع فیلتر استفاده می‌شود. در اثر اعمال این تابع بر نوفه سفیدی که به حوزه فرکانس برده شده (بوسیله تبدیل سریع فوریه)، برخی فرکانسهای این نوفه سفید، تقویت و برخی دیگر تضعیف می‌شوند (شکل ۱). سپس با برگرداندن این نوفه سفید به حوزه زمان (با استفاده از معکوس تبدیل فوریه)، سری زمانی تصادفی فیلتر شده بدست می‌آید.



شکل (۱): نمودار فیلتر A(f)

کامایی^۷ و ایریکورا^۸ ۱۹۹۲ تابع فیلتر A(f) را به صورت رابطه‌ی ۱ تعریف نمودند [۱۸]:

$$A(f) = \frac{S(f) \cdot P(f) \cdot e^{-\pi f R/Q\beta}}{R} \quad (1)$$

که در آن R فاصله کانونی، Q ضریب کیفیت، β سرعت موج برشی و $e^{-\pi R/Q\beta}$ نشان‌دهنده‌ی میرایی غیرارتجعی است. S(f): طیف شتاب براون^۹ است که از رابطه‌ی ۲ بدست می‌آید:

$$S(f) = \frac{(2\pi f)^2}{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2} \quad (2)$$

P(f): نشان‌دهنده‌ی میرایی نزدیک سایت در فرکانسهای بالا است و از رابطه‌ی ۳ بدست می‌آید:

$$P(f) = \frac{1}{1 + f/f_m} \quad (3)$$

$$f_m: \text{فاسیولی}^{۱۰} \text{ ۱۹۸۶ رابطه‌ی ۴ را برای } f_m \text{ ارائه داد [۱۲]:} \\ f_m = 7.31 \times 10^3 M_0^{-0.12} \quad (4)$$

که در آن M_0 ممان لرزه‌ای است.

$$M_0 = 10^{(1.5M_w + 16.05)} \quad (5)$$

با ضرب نمودن تابع فیلتر A(f) در سری زمانی تصادفی که

به حوزه فرکانس برده شده، طیف اصلاح شده‌ی A'(f) و پس از انتقال به حوزه زمان، سری زمانی تصادفی فیلتر شده‌ی a'(t) بدست می‌آید.

ج) تابع پوش زلزله

با فرض اینکه صفحه گسل مستطیلی است، این صفحه، به تعدادی المان تقسیم می‌شود (شکل ۲). تعداد تقسیمات از رابطه $n = 10^{0.5(M-M')}$ بدست می‌آید [۲۲] که در آن M بزرگی زلزله قوی و M' بزرگی زلزله‌ی ضعیف (مانند پس‌لرزه‌ها) است.

با توجه به رابطه‌ی ارائه شده توسط کامدا^{۱۱} و سوچی^{۱۲} ۱۹۷۸ [۱۹] و میدوریکاوا^{۱۳} ۱۹۹۳ [۲۲] می‌توان تابع پوش شکل موج شتاب را برای هر المان بدست آورد (رابطه‌ی ۶).

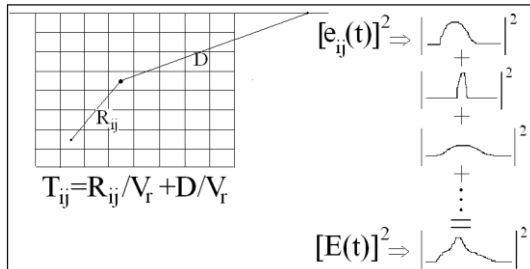
$$e(t) = [(a.t)/d]. \exp(1-t/d) \quad (6)$$

که در آن a شتاب نقطه‌ی اوج و d مدت زمان^{۱۴} شتابنگاشت می‌باشد. e(t) تابع پوش شکل موج شتاب است.

برای بدست آوردن تابع پوش شتابنگاشت برای زلزله‌ی قوی، از رابطه‌ی ۷ استفاده می‌شود [۱۷]:

$$E(t) = \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n e_{ij}^2(t-t_{ij}) \right]^{1/2} \quad (7)$$

که E(t) پوش شتابنگاشت مصنوعی است (شکل ۵). این تابع از نقاط ماکزیمم نسبی شتابنگاشت می‌گذرد.



شکل (۲): المانندی صفحه‌ی گسل و نحوه‌ی محاسبه‌ی تابع پوش

طبق آنچه شرح داده شد، در رابطه‌ی (۶) به دو پارامتر شتاب نقطه اوج (a) و مدت زمان شتابنگاشت (d) نیاز است. زارع ۱۹۹۹ مدل کاهندگی بیشینه شتاب را به صورت رابطه‌ی ۸ برای ایران ارائه داد [۲۸]:

$$\log(A) = a.M + b.X - \log(X) + C_i S_i + \sigma.P \quad (8)$$

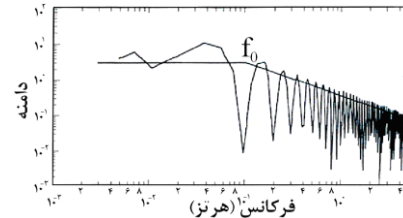
که در آن A بیشینه شتاب بر حسب متر بر مجذور ثانیه، M بزرگی گشتاوری و X فاصله کانونی بر حسب کیلومتر است. C_i ضریب ساختگاه S_i و σ انحراف معیار است که برای اعمال آن $P=1$ و برای محاسبه درصد میانگین $P=0$ لحاظ می‌شود. a و b ضرایبی هستند که در مرجع یاد شده ارائه شده است.

تورو^{۱۵} و مک گویر^{۱۶} ۱۹۸۷ مدت زمان شتابنگاشت را به

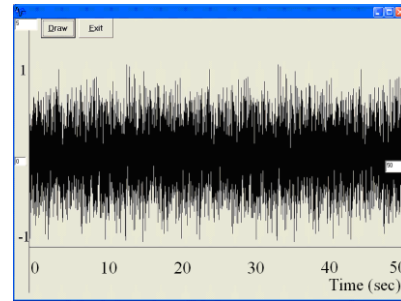
صورت رابطه‌ی ۹ نشان دادند [۲۶]:

$$d = \begin{cases} 1/f_0 & R < 100 \text{ km} \\ 1/f_0 + 0.1(R - 100) & 100 < R < 200 \\ 1/f_0 + 0.05R & R > 200 \text{ km} \end{cases} \quad (9)$$

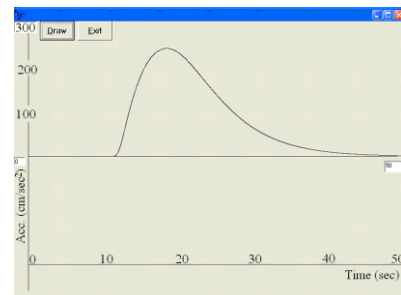
که در آن R فاصله کانونی بر حسب کیلومتر و f_0 فرکانس گوشه است که با توجه به طیف دامنه‌ی جابجایی شتابنگاشت مطابق شکل (۳) بدست می‌آید.



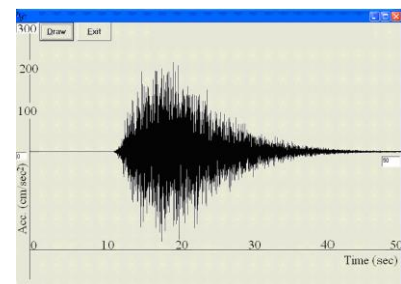
شکل (۳): طیف دامنه برای یافتن فرکانسهای گوشه [۸]



شکل (۴): نوفه سفید



شکل (۵): تابع پوش زلزله یا پنجره



شکل (۶): شتابنگاشت مصنوعی

محققین مختلف برای تعیین فرکانس گوشه، مدل‌های چشمه و روابط مختلفی ارائه داده‌اند که در میان آنها می‌توان به مدل‌های چشمه فرانکل، آتکینسون و سیلوا، براون و هادون اشاره نمود [۱۱]. با توجه به مدلسازیهای انجام شده با استفاده از مدل‌های چشمه مختلف و مقایسه‌ی آنها با رکوردهای واقعی، این نتیجه حاصل گردید که مدل چشمه فرانکل^{۱۷} به نتایج مناسب‌تری منجر می‌شود. این مدل، مقدار فرکانس گوشه را چنین محاسبه می‌کند:

$$f_0 = 10^{(2.623 - 0.5M)} \quad (10)$$

که در آن M بزرگی گشتاوری است.

اکنون با ضرب نمودن تابع پوش شتابنگاشت در تابع $a'(t)$ (سری زمانی تصادفی فیلتر شده) شتابنگاشت اصلی بدست می‌آید. (شکل ۶).

۳- شبیه‌سازی زمین لرزه‌ی آوج

با توجه به شرحی که بر روش انتخابی یعنی روش تابع نیمه تجربی گرین داده شد، پارامترهای مورد نیاز این روش برای شبیه‌سازی رکورد مصنوعی با توجه به مشخصات گسل آوج و زلزله رخ داده در این ناحیه در سال ۱۳۸۱ بدست آورده شده و به شبیه‌سازی این زلزله برای چند ایستگاه پرداخته شده است. مشخصات لازم برای شبیه‌سازی در جدول (۱) خلاصه گردیده است.

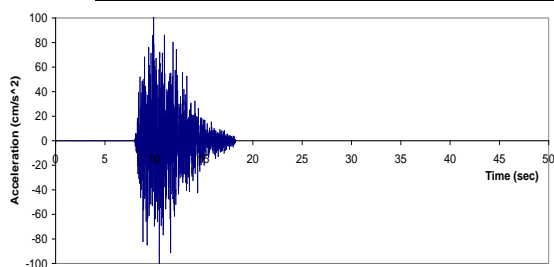
جدول (۱): مشخصات لازم برای شبیه‌سازی

۶/۵	بزرگی گشتاوری
۱۷	طول گسیختگی (km)
۱۲	عرض گسیختگی (km)
۱۱۷	راستای گسل
۵۲	شیب گسل
۳/۲	سرعت موج برشی (km/s)
$Q = 14M^{0.97}$	فاکتور کیفیت [۲]
۱۷×۱۲	تعداد تقسیمات
۴۸/۹۳	طول جغرافیایی کانون
۳۵/۶۷	عرض جغرافیایی کانون
۱۰۰	افت تنش [۴] (bar)

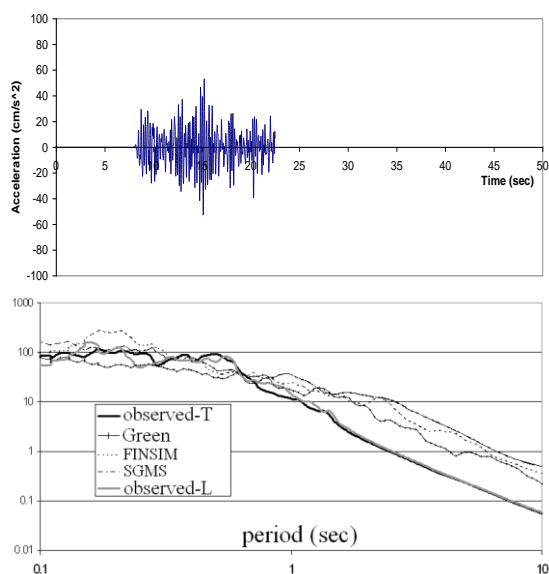
شبیه‌سازی برای ایستگاههای آوج، کبودرآهنگ، شیرین‌سو، بهار و باکندی انجام شده که مشخصات این ایستگاهها در جدول (۲) و محل ایستگاهها در شکل (۷) آمده است.

جدول (۲): مشخصات ایستگاههای ثبت کنندهی زلزله آوج [۴]

نام ایستگاه	فاصله رومرکزی (km)	مولفه طولی (cm/s ²)	مولفه عرضی (cm/s ²)	مولفه قائم (cm/s ²)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	f _{max}	نوع خاک
آوج	۲۶/۵	۴۵۵	۴۲۹	۲۹۱	۴۹/۲۲	۳۵/۵۸	۲۰	I
کبودرآهنگ	۵۸	۵۸	۸۵	۱۶۱	۴۸/۷۲	۳۵/۲	۱۲	I
شیرین سو	۵۱/۲	۵۱	۱۷۶	۱۲۵	۴۸/۴۶	۳۵/۵	۱۸	III
بهار	۹۹	۳۴	۳۹	۱۶	۴۸/۴۳	۳۴/۹	۶	I
باکندی	۹۸/۴	۴۱	۲۴	۱۳	۴۹/۵۹	۳۶/۴	۸	II



شکل (۸): از بالا به پایین به ترتیب رکورد واقعی در ایستگاه بهار، رکورد شبیه سازی شده به روش تابع نیمه تجربی گرین و با استفاده از برنامه SGMS است.

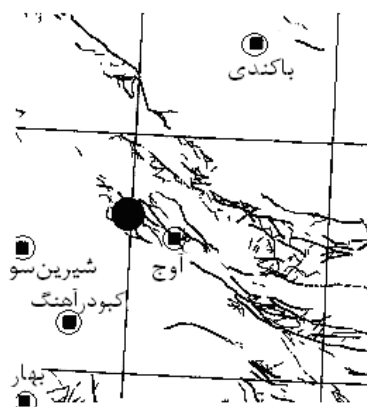


ادامه شکل (۸): به ترتیب رکورد شبیه سازی شده با استفاده از برنامه FINSIM و طیفهای پاسخ شتاب برای ایستگاه بهار است.

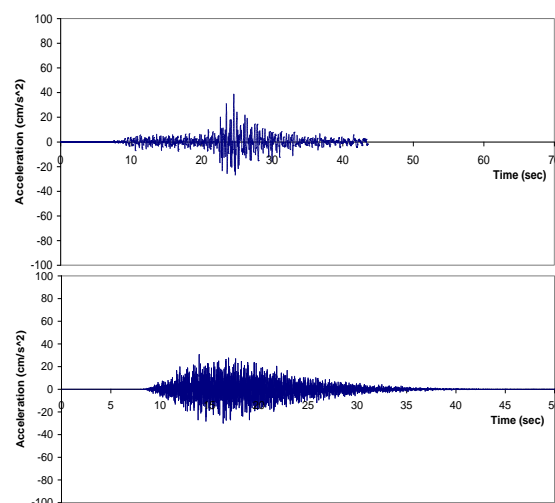
۴- بحث و نتیجه گیری

با توجه به اینکه در روشهای کاتوره‌ای، رکوردهایی برای هر یک از زیر گسلها (المانها)، ایجاد شده و از تجمع آن رکوردها در ایستگاه، شتابنگاشت اصلی بدست می‌آید، شکل شتابنگاشت واقعی‌تر خواهد بود در حالیکه در روش تابع نیمه تجربی گرین با استفاده از تابع پوش زلزله، به یکباره شتابنگاشت ایجاد می‌شود. از طرفی با عنایت به این نکته که در روشهای کاتوره‌ای، گسیختگی و جابجایی‌هایی به هر یک از

شبیه‌سازی به دو روش کاتوره‌ای (بکمک برنامه‌های *FINSIM* و *SGMS* [۲۳]) و تابع نیمه تجربی گرین انجام شده است و سپس پارامترهای بیشینه شتاب، مدت زمان مؤثر و طیف پاسخ شتاب آنها با هم مقایسه شده و بعد مقدار خطای (جذر متوسط مجذور خطا^{۱۸}) رکورد شبیه‌سازی شده با رکورد واقعی، محاسبه شده که نتایج آن در بخش [۴- بحث و نتیجه‌گیری] می‌آید. شکل ۸ نیز شتابنگاشتها و طیفهای پاسخ شتاب برای رکورد واقعی و رکوردهای شبیه‌سازی شده در ایستگاه بهار را به عنوان نمونه نشان می‌دهد (شکل شتابنگاشت‌های حاصل از شبیه‌سازی برای سایر ایستگاهها در مرجع [۵] آمده است).



شکل ۷- محل ایستگاههای ثبت رکورد برای زلزلهی آوج



زیر گسلها تخصیص داده می‌شود، بیشتر می‌تواند بیانگر رفتاری باشد که در واقعیت اتفاق می‌افتد.

نتایج نشان می‌دهند که برای ثبت رکورد در محلی نزدیک گسل، استفاده از دو برنامه‌ی FINSIM و SGMS به نتایج خوبی منجر می‌شود. ولی برای ثبت رکورد در نقاط دور از گسل، برنامه‌ی نوشته شده به روش تابع نیمه تجربی گرین، جوابهای بهتری می‌دهد. دلیل این امر اینست که مدل‌های استفاده شده در برنامه‌های FINSIM و SGMS مثل مدل سه خطی مدت زمان و مدل‌های میرایی، برای آمریکا درست است ولی در مناطق نزدیک به گسل بعثت تأثیر اندک این عوامل، برنامه، جوابهای خوبی می‌دهد (با این وجود، استفاده از این روشها برای ایران نیازمند مطالعات گسترده‌تر است).

با وجود این گفته‌ها، طبق نتایج بدست آمده که در جدول (۳) خلاصه گردیده‌اند، روش تابع نیمه تجربی گرین به نتایج مناسبی می‌رسد زیرا در روش تابع نیمه تجربی گرین با استفاده از رابطه کاهندگی ایران، اصلاحاتی صورت پذیرفته که باعث شده تا نتایج مطلوبتری حاصل گردد.

روابط تجربی استفاده شده برای ایجاد رکورد مصنوعی، تطابق خوبی با واقعیت دارند برای نمونه در زلزله‌ی آوج، مرکز CMT مقدار M_0 را برابر $7/13 \times 10^{25}$ برآورد نمود که با استفاده از رابطه‌ی ۵ مقدار بزرگی برابر $6/52$ بدست می‌آید که بزرگی رخ داده شده نیز $6/5$ بوده است.

با توجه به جدول (۳) برای ایستگاه آوج برنامه‌ی FINSIM منجر به بیشینه شتاب و مدت دوام نزدیک‌تر به زلزله‌ی واقعی می‌گردد. بیشینه شتاب بدست آمده برای ایستگاههای کبودرآهنگ و شیرین‌سو با استفاده از روش تابع نیمه تجربی گرین دارای مقداری مابین مقادیر این پارامتر در زلزله‌ی واقعی در جهات طولی و عرضی است. در ایستگاههای بهار و بکندی نیز بهترین نتایج از روش تابع نیمه تجربی گرین بدست آمده است که علت این نتایج همان فاصله‌ی ایستگاهها تا گسل است که هر چه این فاصله بیشتر می‌شود، نتایج روش تابع نیمه تجربی گرین به واقعیت نزدیک‌تر می‌شود.

جدول (۳): خلاصه‌ی نتایج حاصل از شبیه‌سازی

نام ایستگاه	روش بدست آوردن رکورد	بیشینه شتاب (cm/sec ²)	مدت دوام موثر ^{۱۹} (sec)	فاصله تا رومرکز زلزله (km)	
آوج	واقع	۴۵۵	۶	۲۶/۵	L
		۴۷۹	۵/۴		T
	۵۰۵	۱۱/۴۶	گرین		
	۴۹۰	۵/۴	FINSIM		
	۵۴۵	۵/۶	SGMS		
کبودرآهنگ	واقع	۸۵	۱۷/۹	۵۸	L
		۱۶۱	۱۶/۲		T
	۱۳۶	۱۳/۶	گرین		
	۲۰۴	۹	FINSIM		
	۱۸۹	۶/۹	SGMS		
شیرین‌سو	واقع	۱۷۶	۷/۸	۵۱/۲	L
		۱۲۵	۱۰/۶		T
	۱۴۵	۱۵	گرین		
	۲۴۵	۷/۷	FINSIM		
	۳۰۰	۶/۵	SGMS		
بهار	واقع	۲۴	۱۷/۸	۹۹	L
		۳۹	۱۶/۴		T
	۳۰	۱۳/۴	گرین		
	۵۲	۱۱/۵	FINSIM		
	۱۱۵	۸/۹	SGMS		
بکندی	واقع	۴۰	۱۴/۹	۹۸/۴	L
		۲۳/۶	۱۳		T
	۵۲	۱۳/۵	گرین		
	۸۳	۷/۷	FINSIM		
	۱۱۹	۹/۱	SGMS		

نتایج برجسته پژوهش حاضر بطور خلاصه عبارتند از:

الف- با توجه به دلایل گفته شده و با مدارک و نتایج بدست آمده، روش تابع نیمه تجربی گرین اصلاح شده نسبت به روشهای کاتوره‌ای منجر به نتایج بهتری می‌شود.

ب- از بین طیفهای چشمه‌ی ارائه شده توسط محققین مختلف، طیف چشمه‌ی فرانکل نتایج مطلوبتری می‌دهد.

ج- با توجه به دقت بدست آمده از این شبیه‌سازی، می‌توان از این روش برای شبیه‌سازی شتابنگاشت مصنوعی برای مناطقی همچون تهران که زلزله‌ی دستگامی برای آن وجود ندارد و همچنین گسل آن دارای سازوکاری شبیه سازوکار گسل آوج است، استفاده نمود. البته قابل توجه است که استفاده از این روش نیازمند انجام مطالعات گسترده و شناخت کامل مشخصات گسل و خاک منطقه می‌باشد.

د- در مناطقی که جنبش نیرومند ثبت شده‌ای وجود ندارد، استفاده از روشهای نیازمند به رویداد کوچک مانند روش تابع



Faccioli, E., "A Study of Strong Motions from Italy and Yugoslavia in terms of Gross Source Properties", In Earthquake Source Mechanics (S. Das, J. Boatwright, and C. Scholz, eds.), Amer. Geophys. Union Geophysical Monograph 37, P.P.297-309, 1986.

Gibson, G., "Artificial ground motions," Proceedings of a Seminar Held by the Australian Earthquake Engineering Society of The Institute for Engineers Australia, Melbourne, Australia, P.P.83-86, 1993.

Hartzell, S.H. Earthquake "Aftershocks as Green's Functions", Geophys. Res. Lett. Vol.5, No.1, P.P.1-4, 1978.

Irikura, K. "Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function," Proceedings of the 7th Japan Earthquake Engineering Symposium, P.P.151-156, 1986.

Irikura, K., Kamae, K. "Simulation of strong ground motion based on fractal composite faulting model and empirical Green's function," proceedings of the 9th Japan Earthquake Engineering Symposium, Tokyo, 1994.

Joshi, A.; Kumar, B.; Sinvhal, A.; Sinvhal, H.; "Generation of synthetic accelerograms by modeling of rupture plane", ISET Journal of Earthquake Technology, Vol. 36, No. 1, P.P. 43-60, 1999.

Kamae, K.; Irikura, K., "Prediction of site-specific strong ground motion using semi empirical methods", in Proc. of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, Spain, P.P.801-806, 1992.

Kameda, H.; Sugito, M., "Prediction of strong earthquake motion by evolutionary process model", Proc. 6th Japan earthquake engineering symp., P.P.41-48, 1978.

Lam, N.; Wilson, J.; Hutchinson, G.; "Generation of synthetic earthquake accelerograms using seismological modeling: a review", Journal of Earthquake Engineering, Vol. 4, No. 3, P.P. 321-354, 2000.

Lay, T.; Wallace, T.; "Modern global seismology. Academic press", 1995.

Midorikawa, S.; "Semi-empirical estimation of peak ground acceleration from large earthquakes", Tectonophysics, vol. 218, P.P. 287-295, 1993.

Papageorgiou, A.; Halldorsson, B.; Dong, G.; "Strong Ground Motion Simulation Code for Eastern North America: User's Manual, Version 1.0", University at Buffalo.

Rofoei, F.; Aghababaii Mobarake, R.; Ahmadi, G.; "Generation of artificial earthquake records with a nonstationary Kanai-Tajimi model", Engineering Structures, Vol. 23, P.P. 827-837, 2001.

Shakib, H.; Datta, T.K.; Kazimi, S.M.A.; "Response of torsionally coupled system to random ground motion", European Earthquake Engineering, Vol. 3, P.P. 16-27, 1991.

Toro, G. R.; McGuire, R. K., "An Investigation into Earthquake Ground Motion Characteristics in Eastern North America", Bull. Seismol. Soc. Am. 77, P.P.468-489, 1987.

[۱۲] تجربی گرین باعث وارد شدن خطای زیاد در شبیه‌سازی می‌گردد.

ه- از آنجا که در این روش از فاکتورهایی مانند فاکتور

[۱۳] چشمه، بزرگنمایی پوسته، میرایی مسیر غیر الاستیک و میرایی پوسته استفاده می‌شود که باید خاص منطقه مورد مطالعه باشد، توجه به تحقیقات در این زمینه برای کشور نیاز است.

۵- مراجع

[۱] حمزه‌لو، حسین؛ کمالیان، نصرالله؛ تخمین بیشینه شتاب با استفاده از شبیه‌سازی جنبش نیرومند زمین، پژوهشنامه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، سال چهارم، شماره اول، ۱۳۸۰.

[۲] فرهد، امیر منصور؛ اله یارخانی، میترا؛ غفوری آشتیانی، محسن؛ "تغییرات مکانی پوسته‌ای ضریب کیفیت Q دنباله امواج S در منطقه تهران"، پژوهشنامه بین‌المللی زلزله-شناسی و مهندسی زلزله، سال هفتم، شماره دوم، ۱۳۷۷.

[۳] فقهی، خلیل‌الله؛ سلیمانی آزاد، شهریار؛ "هندسه گسیختگی‌های گسلی پدید آمده در زمین‌لرزه اول تیر ماه ۱۳۸۱ منطقه آوج (چنگوره)"، پژوهشنامه بین‌المللی زلزله-شناسی و مهندسی زلزله، سال پنجم، شماره چهارم، ۱۳۸۱.

[۴] زارع، مهدی؛ بررسی جنبش شدید زمین و پردازش داده‌های شتابنگاری زمین‌لرزه اول تیر ماه ۱۳۸۱ چنگوره (آوج) $M_w=6/3$ ، پژوهشنامه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، سال پنجم، شماره چهارم، ۱۳۸۱.

[۵] مقدسی موسوی، سید علی؛ اثر زلزله‌های مصنوعی ناشی از گسل شمال تهران بر روی رفتار غیر ارتجاعی ساختمانهای ناحیه، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۳.

[۶] Atkinson, G. M.; Boore, D. M., "On the MN, M Relation for Eastern North American Earthquakes", Seism. Res. Lett. 58, P.P.119-124, 1987.

[۷] Atkinson, G.M.; Somerville, P.G., "Calibration of time history simulation methods", Bull. Seism. Soc. Am. 84, P.P.400-414, 1994.

[۸] Beresnev, I. A.; Atkinson, G. M. "Modelling finite-fault radiation from the ω_n spectrum", Bull. Seism. Soc. Am. 87(1), P.P.67-84, 1997.

[۹] Bolt, B.A., "Interplate seismicity and zonation", Proceedings of the fifth pacific conference on earthquake engineering, Melbourne, Australia, Vol. 1, P.P.1-11, 1995.

[۱۰] Boore, D. M. "Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological model of the radiated spectra", Bull. Seism. Soc. Am. 73(6), P.P.1865-1894, 1983.

[۱۱] Boore, D.M.; "Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method", Pure appl. Geophys. Vol. 160, P.P. 635-676, 2003.



- Walker, R.T.; Bergman, E.; Jackson, J.; Ghorashi, M.; Talebian, M., "The 2002 June 22 Changureh (Avaj) earthquake in Qazvin province, northwest Iran: epicentral relocation, source parameters, surface deformation and geomorphology", Geophys. J. Int., P.P. 707-720, 2005. [۲۷]
- Zare, M.; Ghafory, M.; Bard, P.; "Attenuation law for the strong motions in Iran", Third international conference on seismology and earthquake engineering, Vol. 1, P.P. 345-354, 1999. [۲۸]
- "the study on seismic Micro zoning of the Greater Tehran Area in the Islamic Republic of Iran", JICA, 2000 [۲۹]

۶- زیر نویس ها

1. Peak Ground Acceleration
2. Semi Empirical Green's Function
3. Hybrid
4. Deterministic
5. White Noise
6. Envelope Function
7. Kamae
8. Irikura
9. Brune
10. Faccioli
11. Kameda
12. Sugito
13. Midorikawa
14. Duration
15. Toro
16. McGuire
17. Frankel
18. Root Mean Square Error
19. Effective Duration