

کاربرد مدل‌سازی خودبازگشتی - میانگین متحرک در زلزله‌خیزی حوالی سد سفید رود، شمال ایران

محمد کاظم حفیظی*

چکیده

انرژی‌های آزاد شده از زلزله‌های به شعاع چهل کیلومتر اطراف سد سفید رود از آوریل ۱۹۶۷ تا آخر فوریه ۱۹۶۹ محاسبه و به صورت یک سری زمانی به مدت بیست و سه ماه جهت مدل‌سازی بکار رفته است. زلزله‌های رخ داده در این مدت، از نظر بزرگی کمتر از چهار بوده و لذا مدت سری زمانی از لحاظ دوره بازگشت زلزله‌ها مناسب است. انرژی آزاد شده ماهانه از روی میانگین‌گیری انرژی کل آزاد شده در ماه بدست آمده و مدل مورد استفاده، مدل آماری خودبازگشتی - میانگین متحرک می‌باشد.

پارامترهای مدل از روی روابط ریاضی تعیین و بوسیله آزمون هم بستگی باقیمانده‌ها، آزمون پورت مانو و آزمون آکائیکه مرتبه آن تعیین شده است. بهترین مرتبه مدل از مرتبه یک تشخیص داده شده که با توجه به سادگی بسیار و تعداد پارامترهای کم و رسا بودن از لحاظ توان نمایش پدیده زلزله‌خیزی، مناسب می‌باشد. با استفاده از مدل آماری یاد شده، برای بیست و سه ماه آینده، انرژی آزاد شده و بزرگی زلزله‌ها در منطقه شبیه سازی شده است.

از آنجا که بزرگی چهار، بیشترین بزرگی زلزله واقع شده در این مدت است، شبیه‌سازی زلزله‌ها محدود به این زلزله می‌باشد. شبیه‌سازی زلزله‌ها نشان می‌دهد که در ماه‌های اوت و اکتبر ۱۹۶۹ و ژانویه ۱۹۷۱ زلزله با بزرگی ۳/۵ تا ۴ صورت می‌گیرد. بدیهی است این مدل، در صورت وجود اطلاعات برای مدت بیشتر و زلزله بزرگتر، قادر به شبیه‌سازی زلزله‌های با بزرگی بیشتر نیز خواهد بود. شبیه‌سازی یاد شده، می‌تواند عدم ثبت زلزله در ماه‌های آینده را، بدلیل نقص فنی دستگاه‌های ثبت، جبران نماید.

برای تعیین روند زلزله‌خیزی در آینده، مدل با استفاده از ۲۱ ماه داده اصلی، برای یکماه پیش‌بینی کرده که می‌توان مقدار آن را با داده واقعی ماه ۲۲ مقایسه نمود. چنانچه مقادیر ۲۲ ماه داده اصلی در نظر گرفته شود، پیش‌بینی برای ماه ۲۳ بدست آمده که با داده ماه ۲۳ قابل مقایسه است. در نهایت مدل به گونه‌ای عمل می‌نماید که با استفاده از ۲۳ ماه داده اصلی، برای ماه ۲۴ پیش‌بینی انجام می‌شود که در مجموع، سه ماه پیش‌بینی شده روند زلزله‌خیزی در منطقه را در ماه‌های آینده ارزیابی می‌نماید. در این مورد روند زلزله‌خیزی منطقه ثابت پیش‌بینی می‌شود.

کلیدواژه‌ها: مدل‌سازی خود بازگشتی، میانگین متحرک، زلزله‌خیزی، پیش‌بینی، شبیه‌سازی

۱ مقدمه

بوسیله مدل‌های سری زمانی مورد بررسی قرار گیرد، دامنه وسیع دارد. این موضوعها می‌تواند در زمینه اجتماعی، اقتصادی و غیره، جهت کسب بازدهی بیشتر وضع جامعه باشد و یا به زمینه فیزیکی مربوط شود که کاربرد مهندسی و

یک مجموعه داده که بترتیب زمانی ارائه شده و می‌تواند ورودی یا خروجی یک سیستم باشد، آنرا سری زمانی می‌نامند. مدل‌سازی سری‌های زمانی آماری برای مواردی چون پیش‌بینی و شبیه‌سازی بکار می‌روند. موضوعهایی که می‌تواند

* مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، صندوق پستی ۶۴۶۶-۱۴۱۵۵، تهران.

علمی دارد.

اگر چه تحلیل سریهای زمانی به موضوع آمار و احتمالات مربوط می‌شود، ولی روشی علمی در زمینه‌های مختلف بوده و از اهمیت بالایی برخوردار است. با استفاده از این مدلها می‌توان اطلاعاتی در مورد نظام مولد یک پدیده بدست آورد و یا پیش‌بینی‌های بهینه از پدیده‌ای در آینده نمود.

در پنجاه سال گذشته که پیشرفتهای کامپیوتر امکان کاربرد سریهای زمانی ساده و پیچیده برای داده‌های وسیع را عملی ساخته است، مقاله‌های زیادی در زمینه‌های مختلف نوشته شده است. نگارندگانی مانند باکس و جنکینز (۱۹۷۸)، که ترجمه فارسی نیز شده است. جاتفیلد (۱۹۷۵)، جنکینز (۱۹۷۹)، پرستلی (۱۹۸۱) پیشرفتهای تحلیلی سریهای زمانی را بیان داشته‌اند. به علاوه، در خلاصه مقالات کنفرانسها از قبیل آندرسن (۱۹۸۰) و آندرسن و همکاران (۱۹۸۵)، منابع با ارزشی جهت پژوهش وجود دارد.

سری زمانی خودبازگشتی - میانگین متحرک بنام ARMA^۱ در مدلسازی شتاب نگاشت‌ها توسط کوزین (۱۹۷۷)، پلموس و ککمک (۱۹۸۱)، ککمک و همکاران (۱۹۸۵)، چنگ و همکاران (۱۹۸۲)، جورکویچ و اولریچ (۱۹۷۹)، گرج و کیتاگاو (۱۹۸۵)، ایس و همکاران (۱۹۹۱) و فیندل و همکاران (۱۹۹۳) بکار رفته و به حوزه عمل مهندسی زلزله راه یافته است.

سری زمانی خودبازگشتی AR توسط تومیزاوا و ماتسومورا (۱۹۹۴) در مدلسازی لرزه‌نگاشت‌ها بکار رفته و باین ترتیب در زمینه زلزله‌شناسی مورد استفاده قرار گرفته است. درگاهی نوبری (۱۹۹۲) علت برآزش مدل خودبازگشتی - میانگین متحرک را به نگاشت‌های زلزله شرح داده است.

برای تعیین ریسک زلزله، زلزله‌ها را مستقل از یکدیگر فرض کرده و وابستگی آنها به یکدیگر را به عنوان عامل منفی تلقی می‌کنند. در مطالعه حاضر زلزله‌ها بصورت سریهای زمانی وابسته به هم فرض شده که ماهیت این وابستگی مورد

توجه است.

در این مقاله، با ارائه مدل‌های مربوط به سریهای زمانی ناپیوسته در حوزه زمان، مدل‌هایی با بیشینه سادگی و کمینه تعداد پارامتر و رسایی از لحاظ توان نمایش پدیده زلزله خیزی بدست می‌آید. فرآیند مدلسازی که بعداً مورد بحث قرار می‌گیرد، ربط دادن یکی از مدلها به انرژی آزاد شده توسط زلزله‌ها می‌باشد. بنابراین ابتدا روشهای شناسایی بررسی می‌شوند.

این روشها نشان می‌دهند چه نوع مدل خاصی ارزش بررسی دارد. در این مورد، از توابع خود همبستگی^۲ و خود همبستگی جزئی^۳ استفاده می‌شود. سپس با برآزش مدل تعیین شده به سری زمانی انرژی‌های آزاد شده توسط زلزله و با استفاده از تابع درستنمایی^۴، می‌توان برآورد پارامترهای مناسبی با بیشینه درستنمایی^۵ را بدست آورد. مدل برآزش شده اولیه، الزاماً نمایشی از سری زمانی انرژیهای آزاد شده نخواهد بود. با به کار بردن روشهای بازرسی تشخیصی^۶ می‌توان نارساییهای مدل را یافت و تغییرات مناسب را پیشنهاد نمود. سپس در صورت لزوم، چرخه شناسایی شامل برآزش و بازرسی تشخیصی را تکرار کرد. همچنین حدودی را که مقدار پیش‌بینی سری با احتمال معین درون آن واقع خواهد شد، محاسبه می‌شود. در بخش پنجم خلاصه مدل ARMA و علت انتخاب این مدل بحث خواهد شد.

۲ زمین شناسی محدوده سد سفیدرود

از تقاطع دو رودخانه قزل اوزن و شاهرود، در حد فاصل شهرهای منجیل و رودبار، رودخانه سفیدرود به وجود آمده است و در محل تقاطع این دو رودخانه، سد سفید رود با دریاچه‌ای بسیار وسیع احداث گردیده است. عمده واحدهای سنگی شناخته شده در حوالی سد سفیدرود شامل رسوبات عهد حاضر و سنگهای پالئوژن می‌باشد. رسوبات عهد حاضر که به طور عمده تری در دریاچه سد یافت می‌گردد شامل دو

1. Auto Regressive Moving Average
2. auto correlation function
3. partial auto correlation function
4. likelihood function
5. maximum likelihood estimate
6. diagnostic -checking

نبودن دامنه و دوره در پایگاه سد سفیدرود، امکان نداشته است. لذا بزرگی زلزله‌های بیش از ۲/۵ که در پایگاه تهران ثبت شده است، با استفاده از فرمول پایگاه تهران و داشتن دامنه، دوره و فاصله زلزله محاسبه گردیده است. برای زلزله‌های کوچکتر از ۲/۵، در صورت آشکار بودن دامنه و مدت ثبت در پایگاه سد سفید رود، بزرگی آنها محاسبه شده است. سپس رابطه‌ای بین بزرگی زلزله و مدت زمان ثبت بدست آمده که برای کلیه زلزله‌ها بکار رفته است (حقیقی، ۱۳۵۵).

۵ مدل‌سازی سری زمانی انرژی‌های آزاد شده

در اینجا سه مدل به نام‌های $AR(p)$ خود بازگشتی از مرتبه p ، $MA(q)$ میانگین متحرک از مرتبه q و $ARMA(p,q)$ خود بازگشتی - میانگین متحرک از مرتبه p و q بررسی می‌شوند. روابط ریاضی هر یک براساس یوجویچ (۱۹۷۲) به صورت زیر است.

$$AR(p) \rightarrow Z_t = \sum_{j=1}^p \phi_j z_{t-j} + \varepsilon_t \quad (1)$$

$$MA(q) \rightarrow Z_t = \varepsilon_t - \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{t-j} \quad (2)$$

$$ARMA(p,q) \rightarrow Z_t = \sum_{j=1}^p \phi_j z_{t-j} + \varepsilon_t - \sum_{j=1}^q \theta_j \varepsilon_{t-j} \quad (3)$$

θ و ϕ پارامترهای مدل و ε نوفه سفید است. سری زمانی در مدل‌های بالا باید دارای شرط ایستایی باشد، یعنی میانگین و واریانس در طول سری ثابت باشند.

همانطور که اشاره شد، زلزله‌های محلی پایگاه سد سفیدرود تا شعاع ۴۰ کیلومتر مطالعه و انرژی آزاد شده آنها برحسب ارگ محاسبه گردیده است (حقیقی، ۱۳۵۵). میانگین انرژی آزاد شده در ماه برای هر ماه محاسبه و از ماه آوریل ۱۹۶۷ تا فوریه ۱۹۶۹ به مدت ۲۳ ماه یک سری زمانی نایستا به نام X_t تهیه شده است. برای بدست آوردن سری زمانی ایستا، با استفاده از تابع انتقال جذر، مقادیر X_t به Y_t تبدیل گردیده که مقدار ۲۳، ۲۲، ۲۱، ۲۰، ۱۹، ۱۸، ۱۷، ۱۶، ۱۵، ۱۴، ۱۳، ۱۲، ۱۱، ۱۰، ۹، ۸، ۷، ۶، ۵، ۴، ۳، ۲، ۱ می‌باشد. یعنی

گروه رسوبات جدیدتر و قدیمی‌تر آبرفتی و رسوبات دشت سیلابی و دلتایی می‌باشد. سنگهای قدیمی تشکیل دهنده حاشیه و زیر رسوبات آبرفتی مربوط به پالئوژن و شامل سازند کرج می‌باشد که خود از توفهای آندزیتی و توفهای گلسنگی در پایین ولاواهای بازیکی در بالا تشکیل گردیده‌اند و بطور عمده سنگهای مربوط به سازند کرج بعنوان سنگ کف در این منطقه شناخته می‌شود. نوروزی (۱۹۷۶) این منطقه را جزو استان لرزه‌خیز البرز قرار داده است.

۳ ابزار اندازه‌گیری

پایگاه زلزله شناسی سد سفید رود در دو کیلومتری شمالغرب منجیل به فاصله سیصد متر از غرب جاده تهران-رشت قرار دارد. لرزه‌نگارها در تونلی بطول ده متر با دمای ۱۸ تا ۲۰ درجه سانتیگراد و بر روی سنگهای آذرین از نوع آندزیت قرار دارند. لرزه‌نگارهای یاد شده دارای آونگی از نوع لابروست^۱ با دوره کوتاه و گالوانومترهای شلومبرژه-پیکارد^۲ از نوع AV17 می‌باشند. پایگاه دارای یک مؤلفه قائم و دو مؤلفه افقی در جهت سد و عمود بر آن بوده که بترتیب در راستای NE-SW و ES-WN یعنی امتداد N28E و E28S می‌باشد. دوره آزاد آونگها ۰/۶۲ ثانیه برای دو مؤلفه افقی و ۰/۹ ثانیه برای مؤلفه قائم با ثابت میرایی ۲/۶۵۳ برای مؤلفه‌های افقی و ۱/۵۴۶ برای مؤلفه قائم است. گالوانومترها دارای دوره ۰/۴۵ ثانیه برای همه مؤلفه‌ها و ثابت میرایی ۳/۲۵ برای مؤلفه افقی و ۳/۶۶ برای مؤلفه قائم می‌باشد.

۴ داده‌های بررسی شده

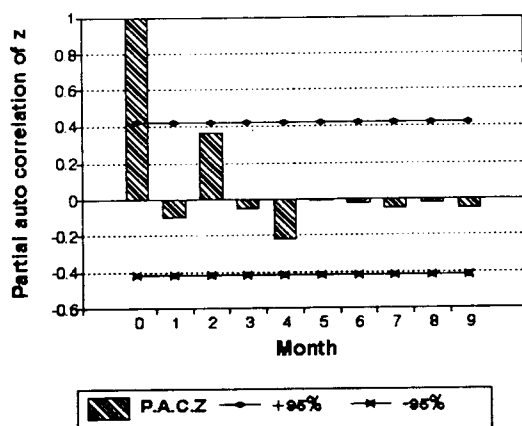
زلزله‌های محلی رخ داده در حوالی سد سفیدرود به شعاع ۴۰ کیلومتر، از روی رکوردهای پایگاه زلزله‌نگاری سد سفید رود به عرض جغرافیائی ۳۰" و ۴۵' و ۳۶° و طول جغرافیائی ۰۰" و ۲۳' و ۴۹°، از اول ماه آوریل ۱۹۶۷ تا آخر فوریه ۱۹۶۹ بمدت ۲۳ ماه قرائت گردیده است (حقیقی، ۱۳۵۵). بعد از ماه فوریه ۱۹۶۹ پایگاه سد به دلیل نقص فنی برای مدتی تعطیل بوده است. محاسبه بزرگی زلزله‌های بیش از ۲/۵ به دلیل واضح

در رابطه فوق، F_{α} حد بالا و پایین تابع خود همبستگی با ۹۵٪ سطح احتمال، N تعداد نمونه‌ها برابر ۲۳ و K فاصله بوده که در شکل‌های ۱ و ۲ دیده می‌شود.

(۳) توابع خود همبستگی و خود همبستگی جزئی شباهت زیادی به یکدیگر دارند و مقدار آنها حول محور صفر نوسان کرده و بتدریج تنزل می‌کنند که نشان دهنده حافظه سری است و چون طولانی‌تر از مدلهای $AR(p)$ و $MA(q)$ می‌باشد، در نتیجه مناسب‌تر است که مدل $ARMA(p, q)$ در نظر گرفته شود (باکس و جنکینز، ۱۹۷۶). شایان ذکر است که بعد از فاصله صفر هیچگونه همبستگی مهمی نبوده و در حدود ۹۵٪ اطمینان محدود می‌باشند. بیشترین فاصله مورد بررسی کمتر از $\frac{N}{4}$ و بیش از $\frac{N}{4}$ است. با توجه به اصل امساک^۱ (باکس و جنکینز، ۱۹۷۶)، کمترین مرتبه یعنی (۱) و (۱) $ARMA$ انتخاب می‌شود، یعنی داریم:

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} \quad (۴)$$

(۴) مقادیر θ و ϕ با روش بیشینه درستنمایی و همچنین مقادیر باقیمانده سری (اختلاف مقدار سری از مقدار داده‌های ورودی) و مجموع مربعات باقیمانده‌ها محاسبه می‌شود. بیشینه درستنمایی به سطح کمینه مجموع مربعات باقیمانده‌ها



شکل ۲. تابع خود همبستگی نسبی از جذر انرژی آزاد شده در ماه نشان می‌دهد که داخل در حدود ۹۵٪ سطح اطمینان بوده و مقادیر آن حول محور صفر نوسان کرده و به تدریج تنزل می‌نماید.

$Y_t = \sqrt{X_t}$ سری زمانی فوق، با رابطه زیر به سری زمانی با میانگین صفر و انحراف معیار یک، بنام Z_t تبدیل می‌شود.

$$Z_t = \frac{Y_t - \bar{Y}_t}{S_y} \quad (۴)$$

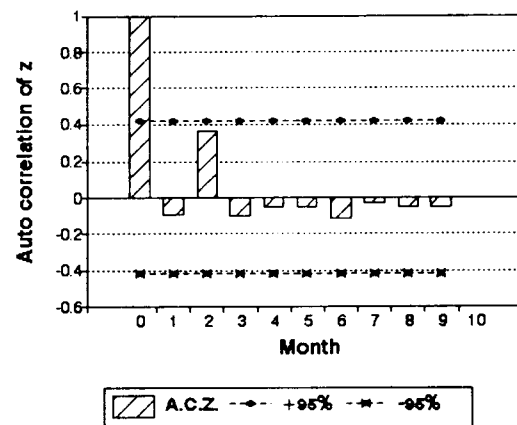
که در آن \bar{Y}_t میانگین مقادیر Y_t در ۲۳ ماه، S_y انحراف معیار سری Y_t و Z_t مقدار ایستا شده Y_t می‌باشد.

مراحل مختلف مدل‌سازی که از سالاس و همکاران (۱۹۸۵) گرفته شده، در زیر نشان داده می‌شود:

(۱) میانگین سری زمانی (\bar{Z}_t) صفر و انحراف معیار (S_z) یک می‌باشد.

(۲) مقادیر اتوکوریانس، خود همبستگی و خود همبستگی جزئی با برنامه‌نویسی کامپیوتری برای فاصله (Lag) صفر تا $\frac{N}{4} \approx 6$ محاسبه شده و منحنی مقادیر خود همبستگی و خود همبستگی جزئی بترتیب در شکل ۱ و ۲ نشان داده شده است. مقادیر حدی خود همبستگی، براساس رابطه آندرسن (۱۹۴۱) با ۹۵٪ سطح احتمال ($\alpha=0.05$)، به صورت زیر بدست می‌آید.

$$r_k(\%95) = \frac{-1 \mp 1.96 \sqrt{N-K-1}}{N-K} \quad (۵)$$



شکل ۱. تابع خود همبستگی از جذر انرژی آزاد شده در ماه نشان می‌دهد که داخل در حدود ۹۵٪ سطح اطمینان بوده و مقادیر آن حول محور صفر نوسان کرده و به تدریج تنزل می‌نماید.

باقیمانده‌ها مستقل هستند.

۶) درآزمون آکائیکه^۱ که برای تعیین بهترین مرتبه مدل بکار می‌رود، در صورت کمینه‌بودن آن، مرتبه مدل انتخاب می‌شود. با توجه به اصل امساک که انتخاب کمترین مرتبه را توصیه می‌نماید و مطالب ذکر شده در بالا، بهترین مدل (۱ و ۱) ARMA می‌باشد. با اینکه مقدار آکائیکه در دو ردیف اول و دوم زیر مقادیر مساوی می‌باشد، لازم است مدل اول انتخاب شود.

$$AIC(1,1)=1.1$$

$$AIC(2,1)=1.1$$

$$AIC(3,1)=1.3$$

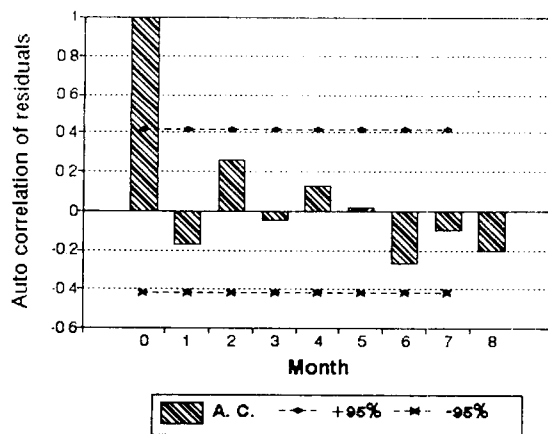
$$AIC(4,1)=1.2$$

۷) شبیه‌سازی سری Z_t با توجه به رابطه زیر انجام

می‌شود.

$$\hat{Z}_t = \hat{\phi}_1 \hat{Z}_{t-1} + \varepsilon_t - \hat{\theta}_1 \varepsilon_{t-1} \quad (۸)$$

که در آن علامت "۸" بعنوان مقدار برآورد شده پارامتر است و آخرین مقدار مشاهده شده سری، به عنوان اولین مقدار (\hat{Z}_{t-1}) در سری بکار برده می‌شود. مقدار اولیه باقیمانده ε_{t-1} به عنوان آخرین باقیمانده و باقیمانده‌های ε_t بوسیله یک تولید کننده اعداد اتفاقی که توزیع نرمال داشته و واریانس آنها $\sigma_\varepsilon^2 = 0.904644$ باشد، ایجاد می‌گردد. مقادیر پیش‌بینی شده



شکل ۴. تابع خود همبستگی باقیمانده‌ها که نشان می‌دهد در سطح ۹۵٪ اطمینان می‌باشد و همبستگی برجسته‌ای ندارد که نشان دهنده مناسب بودن مدل (۱ و ۱) ARMA می‌باشد.

مربوط می‌گردد. مقدار پارامترهای حاصل به صورت زیر است.

$$\phi_1 = -0.7176214$$

$$\theta_1 = -0.549821$$

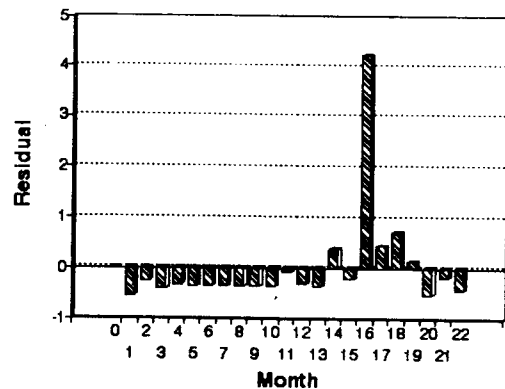
$$\sigma_\varepsilon^2 = 0.904644$$

۵) برای برآزش مدل، خودهمبستگی بین باقیمانده‌ها محاسبه شده است. این مقادیر لازم است برای حداقل فاصله $(L = \frac{N}{10} + P + q \approx 5)$ محاسبه گردد. منحنی تغییرات باقیمانده‌ها و خود همبستگی باقیمانده‌ها در شکل‌های ۳ و ۴ آمده است. همانطور که در شکل ۴ دیده می‌شود، باقیمانده‌ها همبستگی آشکار نداشته و در حد ۹۵٪ اطمینان محدود می‌باشند.

مقدار آماری Q با استفاده از مجموع مربعات تابع خود همبستگی باقیمانده‌ها $r_k(\varepsilon)$ برای ۹ فاصله $(L=9)$ و N نمونه از رابطه زیر بدست می‌آید.

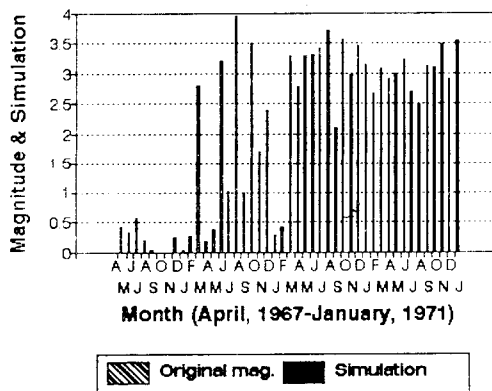
$$Q = N \sum_{k=1}^9 [r_k(\varepsilon)]^2 = 23(0.166292) = 3.824716 \quad (۷)$$

مربع کای (χ^2) به ازای $L=9$ ، $p=1$ و $q=1$ یعنی هفت درجه آزادی $(L-p-q=7)$ و $\alpha=0.05$ ، برابر ۱۴/۰۷ نتیجه می‌شود و چون $Q < \chi^2$ است، آزمون عدم برآزش پورت مانتو باموفقیت قبول شده است. بنابراین هم آزمون همبستگی باقیمانده‌ها و هم آزمون پورت مانتو نشان می‌دهد که

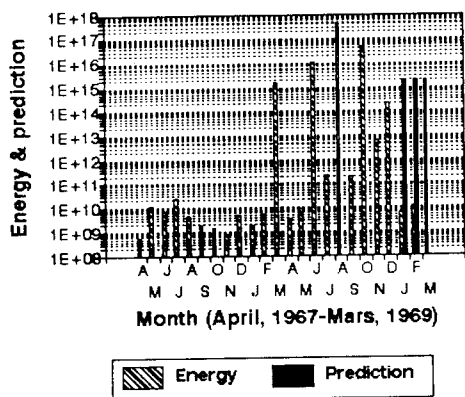


شکل ۳. مقادیر تفاوت جذر انرژی آزاد شده در ماه و مقادیر مدل (۱ و ۱) ARMA (باقیمانده‌ها) در ماه‌های مختلف که نشان می‌دهد جهت‌گیری خاصی در آنها وجود ندارد.

و ژانویه ۱۹۷۱ افزایش انرژی و در ماه اکتبر و دسامبر ۱۹۷۰، پس از یک کاهش انرژی مجدداً افزایش انرژی به چشم می‌خورد. برای تجسم بهتر مدل، انرژی را به بزرگی تبدیل کرده و در شکل ۷ نشان داده شده است. شبیه‌سازی بزرگی زلزله‌ها نشان می‌دهد که در ماه‌های اوت و اکتبر ۱۹۶۹ و ژانویه ۱۹۷۱ زلزله با بزرگی ۳/۵ تا ۴ به وقوع می‌پیوندد. (۹) در این مرحله، با استفاده از ۲۱ ماه داده اصلی می‌توان برای یک ماه پیش‌بینی کرد ($N+p+q>22$) که در شکل‌های ۸ و ۹ بصورت انرژی و بزرگی ارائه شده است. با در نظر گرفتن



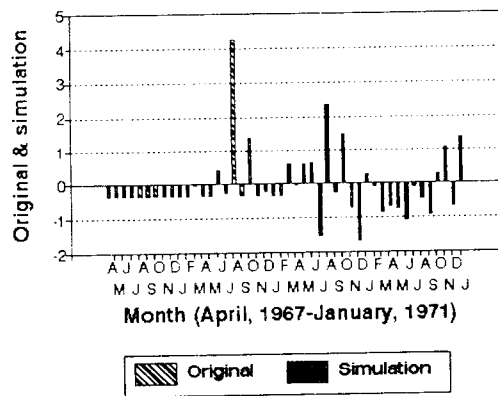
شکل ۷. بزرگی معادل زلزله مدل شده در ماه به مدت ۲۲ ماه بعد از داده‌های اصلی. مقادیر مدل شده به رنگ تیره و مقادیر اصلی به رنگ هاشور زده دیده می‌شود.



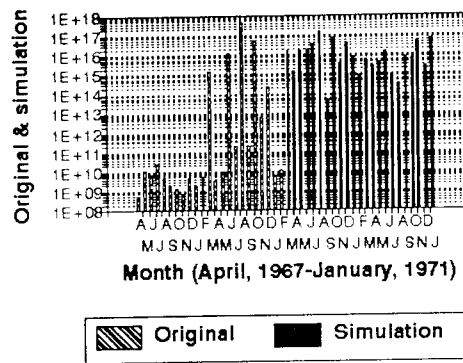
شکل ۸. پیش‌بینی انرژی آزاد شده در یک ماه بعد از ۲۳ ماه داده اصلی که به صورت هاشور زده نشان داده شده است و انرژی پیش‌بینی شده در ماه به صورت رنگ تیره نشان داده شده است.

که از تابع Z_1 بدست می‌آید، همراه با مقادیر اولیه در شکل ۵ نشان داده شده است. در این شکل، مقدار Z_1 دارای نوسانهایی در جهت مثبت و منفی می‌باشد.

(۸) برای مشاهده بهتر تغییرات، بوسیله تابع وارون انتقال، انرژی آزاد شده در آینده محاسبه و در شکل ۶ ارائه شده است. همانطوریکه در شکل دیده می‌شود، مقادیر نمونه سازی شده دارای نوسان است. در ماه‌های آوریل و سپتامبر ۱۹۶۹ و فوریه، جولای، اوت و دسامبر ۱۹۷۰ کاهش انرژی محسوس است. این در حالی است که در ماه اوت ۱۹۶۹، نوامبر ۱۹۷۰



شکل ۵. مقادیر مدل سازی شده استاندارد جذر انرژی ماهانه به مدت ۲۲ ماه بعد از داده‌های ورودی که نشان می‌دهد بدون جهت‌گیری خاصی می‌باشد. مقادیر مدل شده به رنگ تیره و مقادیر داده‌های اصلی به رنگ هاشور زده دیده می‌شود.



شکل ۶. مقادیر مدل سازی شده انرژی آزاد شده در ماه به مدت ۲۲ ماه بعد از داده‌های اصلی که به صورت تیره نشان داده شده است. داده‌های اصلی به صورت هاشور زده دیده می‌شود.

شده به بزرگی، نتیجه می‌شود که فقط در ماه‌های اوت و اکتبر ۱۹۶۹ و ژانویه ۱۹۷۱ زلزله با بزرگی ۳/۵ تا ۴ صورت می‌گیرد. با توجه به توانایی خاص مدل، با داشتن اطلاعات مربوط به بیست و سه ماه، می‌توان برای یک ماه پیش‌بینی نمود که بزرگی زلزله در آن ماه ۲/۸ می‌باشد. همچنین با ثابت بودن پیش‌بینی‌ها، روند زلزله‌خیزی در ماه‌های آینده ثابت برآورد می‌گردد.

تشکر و قدردانی

قسمتی از هزینه‌های این پژوهش از محل طرح شماره ۶۵۱/۱/۲۱۲ مصوب دانشگاه تهران تحت عنوان "مدلسازی حرکات نیرومند زمین با استفاده از روش ARMA" تأمین شده است که صمیمانه از همکاران دانشگاهی در معاونت پژوهشی تشکر می‌نماید. بدینوسیله از همکاران دانشگاهی در مرکز کامپیوتر دانشگاه تهران مخصوصاً آقای مهندس موسوی و همچنین رئیس مرکز کامپیوتر دانشگاه صنعتی شریف آقای دکتر علی حیدری که از هرگونه همکاری برای انجام محاسبات دریغ نفرموده‌اند و آقای مهندس علی‌اکبر اسلامی جهت پیشنهادهای ویرایشی تشکر و قدردانی بعمل می‌آید.

منابع

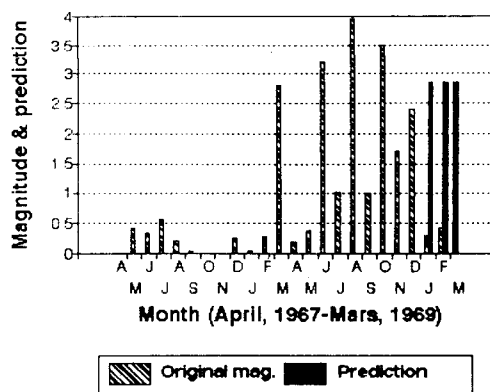
- Anderson, R.L., 1941, Distribution of the serial correlation coefficients: *Annals of Math. Statistics*, 8, 1-13.
- Anderson, O.D. (Editor), 1980, *Time series: Proceedings of the Conference held at Nottingham University, March 1979*, North-Holland, Amsterdam.
- Anderson, O.D., Ord, J.K., and Robinson, E.A., 1985, *Time series analysis: Theory and practice 6: Proceedings of the International Conference held at Toronto, Canada, August 10-14, 1983*.
- Box, G.E.P., and Jenkins, G.M., 1976, *Time series analysis: Forecasting and control*: Holden-Day, San Francisco, California.

۲۲ ماه داده اصلی، پیش‌بینی برای ماه ۲۳ و انتخاب ۲۳ ماه داده اصلی، پیش‌بینی برای ماه ۲۴ قابل اجرا می‌باشد. مقدار بزرگی پیش‌بینی شده در ماه مارس ۱۹۶۹ برابر ۲/۸ درجه ریشتر است. این پیش‌بینی نشان می‌دهد که زلزله‌خیزی منطقه، چه روندی در آینده خواهد داشت (صعودی، نزولی یا ثابت). در این مطالعه روند ثابت است، زیرا هر سه ماه پیش‌بینی مقادیر یکسان نشان می‌دهند.

۶ نتیجه‌گیری

زلزله‌های به وقوع پیوسته در شعاع ۴۰ کیلومتری سد سفید رود، در مدت بیست و سه ماه بررسی شده و با توجه به همبستگی موجود بین آنها، مدل خودبازگشتی - میانگین متحرک برازش شده است. این برازش نشان می‌دهد که نه تنها زلزله‌ها از یکدیگر مستقل نیستند، بلکه وابستگی بین آنها نشان دهنده نوع خاص یک مدلی است که بهترین ارتباط بین آنها را برقرار می‌نماید. با آزمون هم‌بستگی و آزمون پورت مانو ثابت می‌شود که اختلاف مقادیر مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده که باقیمانده مدل می‌باشد، مستقل از یکدیگر بوده و مدل مناسبی انتخاب شده است.

این مدل بیست و سه ماه را شبیه‌سازی کرده و می‌تواند عدم ثبت زلزله در این ماه‌ها را که در اثر اشکالات فنی دستگاهها بوده است، جبران نماید. پس از تبدیل انرژی آزاد



شکل ۹. بزرگی معادل زلزله پیش‌بینی شده که به رنگ تیره نشان داده شده است همراه با بزرگی معادل زلزله‌های اصلی که به رنگ هاشور زده مشخص شده است.

- Jurkevics, A., and Ulrych, T. J., 1979, Autoregressive parameters for A Suite of strong motion accelerograms, Bulletin of the Seismological Society of America, 69, 2025-2036.
- Kozin, F., 1977, Estimation and modelling of non-stationary time series: Proceedings of the Symposium on Computer Methods in Engineering, University of Southern California.
- Nowroozi, A., 1976, Seismotectonic Provinces of Iran: B.S.S.A., 66, 1249-1276.
- Polphemus, N. W., and Cakmak, A.S., 1981, Simulation of earthquake ground motions using Autoregressive Moving Average (ARMA) Models: Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 9, 343-354.
- Priestly, M. B., 1981, Spectral analysis and time series, Volume 1- Univariate series, Volume 2-Multivariate series, prediction and control: Academic Press, London, England.
- Salas, J. D., Delleur, J.W., Yevjevich, V., and Lane, W. L., 1985, Applied modeling of hydrologic time series: Water Resources Publications, Littleton, Colorado, U.S.A.
- Tomizawa, M. and Matsumura, T., 1994, Properties of the innovations sequence provided by fitting a three-dimensional time-varying AR-model to a strong motion seismogram: Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 12, 479-495.
- Yevjevich, V., 1972, Stochastic processes in hydrology: Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, U.S.A.
- پاکس، جی.ای.بی و جنکینز، جی.ام. ۱۳۷۱، تحلیل سریهای زمانی: پیش‌بینی و کنترل جلد اول و دوم، ترجمه مشکاتی، م.ر.
- Cakmak, A.S., Sherif, R.I. and Ellis, G.W., 1985, Modelling earthquake ground motions in California using parametric time series methods: Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 4, 124-131.
- Chang, M. K., Kwiatkowski, J.W., Nau, R.F., Oliver, R.M., and Pister, K.S., 1982, ARMA models for earthquake ground motions: Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 10, 651-662.
- Chatfield, C., 1975, The analysis of time series: Theory and Practice: Chapman and Hall, Inc.
- Dargahi - Noubary, G.R., 1992, Models for seismic records, why uniformly modulated ARMA: Soil Dynamics and Earthquake Engineering 11, 381-385.
- Ellis, G.W., Deveaux, R.D., and Cakmak, A.S., 1991, Multivariate time series modelling of strong motion accelerograms recorded in Mexico and Taiwan: Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 9, 218-235.
- Findell, K.L., Köylüoğlu, H.U., and Cakmak, A. S., 1993, Modeling and simulating earthquake accelerograms using strong-motion data from the Istanbul, Turkey, region : Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 12, 51-59.
- Gersch, W., and Kitagawa, G., 1985, A time varying AR coefficient model for modelling and simulating earthquake ground motion: Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 13, 243-254.
- Jenkins, G.M., 1979, Practical experiences with modelling and forecasting time series: Gwilym Jenkins and Partners Ltd., Parkfield, Greaves road, Lancaster, England.

انتشارات دانشگاه شهید بهشتی.

حفیظی، م.ک.، ۱۳۵۵، اثر آب در زلزله خیزی حوالی سد سفید

رود: پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران.