



Dynamic Analysis of Earth Dams under De-Noised Earthquake Records

F. Nasiri, H. Javdanian*, A. Heidari

Department of Civil Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

ABSTRACT: In this study, the dynamic behavior of earth dams with clay core was analyzed using the finite element method. The seismic responses of earth dams under main and wavelet-based decomposed earthquake records were investigated. Earthquake records were decomposed up to five stages by using the wavelet de-noising method. The ratio of acceleration response spectrum to maximum acceleration, ratio of velocity response spectrum to maximum velocity, ratio of displacement response spectrum to maximum displacement, Fourier amplitude spectrum and time history of Arias intensity of earth dam crest under main and wavelet-based decomposed earthquake records were analyzed. The results demonstrated that the acceleration response spectrum ratio of dam crest under de-noised records up to 3rd level and the velocity and displacement spectrum ratios of dam crest up to 4th level has an acceptable accuracy in comparison to the responses under main earthquake records. Results of the dynamic analysis indicated that Fourier amplitude spectra and Arias intensity of earth dam crest under de-noising based records up to 4th level are compatible with main earthquake records. The results also showed that the wavelet-based decomposed earthquake records can be a reliable alternative for main earthquake records in the dynamic analysis of earth dams.

Review History:

Received: Jan. 11, 2020
Revised: Mar. 19, 2020
Accepted: May. 19, 2020
Available Online: May. 28, 2020

Keywords:

Earth dam
Dynamic analysis
Wavelet theory
De-noising method
Numerical modeling

1. INTRODUCTION

Evaluating the dynamic behavior of earth dams under earthquake loading has great importance. Some researchers have argued that there are various methods for the dynamic analysis of earth dams [1-3]. The effects of dam reservoir interactions and valley geometry on the seismic response of the La Villita embankment dam were investigated by Pelecanos *et al.* [4]. Some experiments, such as shaking Tables [5] and centrifuge [6] were used to examine the seismic behavior of earth dams. The results of the study on the dynamic behavior of concrete faced rockfill dam (CFRD) that provided by Xu *et al.* [7], revealed that acceleration response and seismic-induced deformations are influenced by rockfill characteristics. Seismic deformations and settlements of embankment dams have been extensively studied by some researchers [8-11]. Wavelet transform (WT) is one of the powerful methods for the analysis of signals. In this study, the seismic response analysis of the earth dam under two types of earthquake loading was investigated. The earthquake loading includes main and decomposed records. The decomposed records were obtained from the de-noising method based on the wavelet theory. The ratio of acceleration response spectrum to maximum acceleration, the ratio of velocity response spectrum to maximum velocity, the ratio of displacement response spectrum to maximum displacement,

Fourier amplitude spectrum, and time history of Arias intensity of earth dam crest were explored.

2. METHODOLOGY

One of the powerful mathematical tools used in signal processing is wavelet transform (WT). Wavelet theory has been widely used in civil engineering such as the process of earthquake records [12]. There are two types of wavelet transform such as discrete wavelet transform (DWT) and continuous wavelet transform (CWT). In the de-noising method (DNM), the main earthquake is divided into low and high frequencies without downsampling.

The seismic response analysis of the earth dam under the main and decomposed earthquake records was performed using the Plaxis program. For this purpose, the acceleration time history of 8 earthquake records with different magnitudes was selected as the main records. It is shown in Table 1.

To decomposition, first, the earthquake records were decomposed up to 5 stages by utilizing the de-noising method (DNM) based on the wavelet. Two types mentioned records (main and decomposed records) were applied as input ground motions to the earth dam model. In the numerical modeling, the elastoplastic constitutive Mohr-Coulomb was utilized for describing the soil behavior of core and shell and the linear elastic model was used for dam foundation.

*Corresponding author's email: javdanian@sku.ac.ir



Table 1. Earthquakes used in dynamic analysis

Number	Earthquake	Year	M_w
1	Abhar	2002	6.4
2	Imperial Valley	1979	6.5
3	Rudсар	2004	6.4
4	San Fernando	1971	6.6
5	Kobe	1995	6.9
6	Kocaeli	1999	7.6
7	Loma Prieta	1989	6.9
8	Hollister	1961	5.5

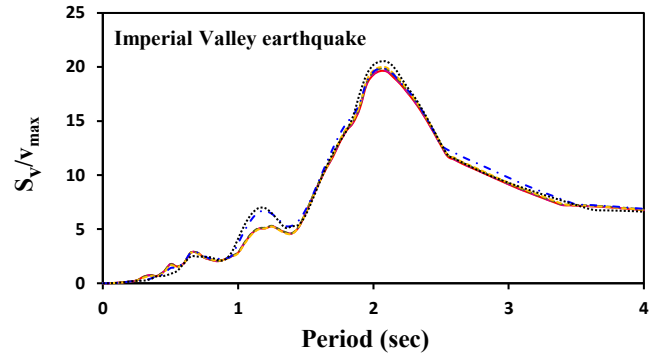


Fig. 2. The ratio of velocity response spectrum

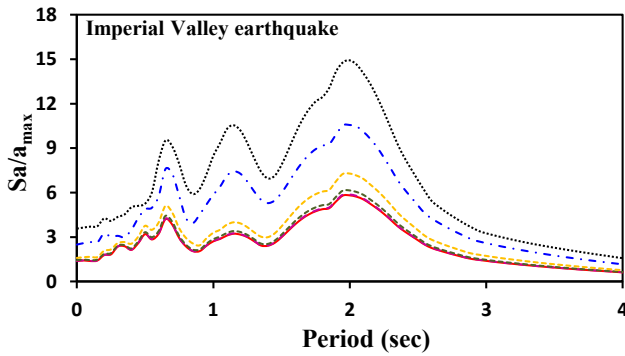


Fig. 1. The ratio of acceleration response spectrum

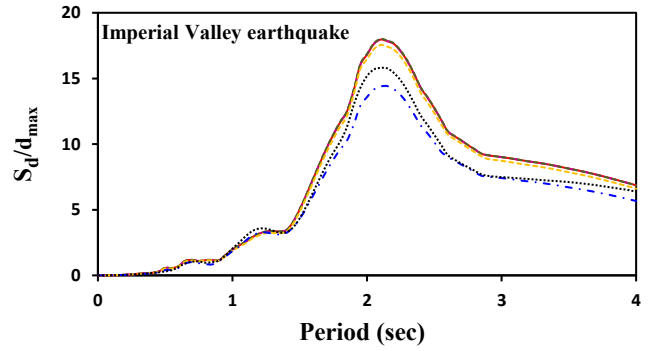


Fig. 3. The ratio of displacement response spectrum

3. RESULTS AND DISCUSSION

The ratio of acceleration response spectrum to maximum acceleration (S_a/a_{max}) is presented in Fig. 1. As seen in this Figure, the S_a/a_{max} based on the de-noising method up to the 3rd level is greatly compatible with the S_a/a_{max} under the main earthquake record.

Figs. 2 and 3 respectively show that the ratio of velocity response spectrum to maximum velocity (S_v/v_{max}) and the ratio of displacement response spectrum to maximum displacement (S_d/d_{max}) have an acceptable accuracy up to the 4th level decomposition.

4. CONCLUSION

In this paper, the earth dam with the height of 50 m under the main and denoising-based records was analyzed seismically. The ratio of acceleration response spectrum to maximum acceleration (S_a/a_{max}), the ratio of velocity response spectrum to maximum velocity (S_v/v_{max}), the ratio of displacement response spectrum to maximum displacement (S_d/d_{max}), Fourier amplitude spectrum, and time history of Arias intensity of earth dam crest was calculated. Comparisons indicated that the ratio of acceleration response spectrum to maximum acceleration (S_a/a_{max}) up to the 3rd levels of decomposed records is consistent with the results of the main records. Comparing the S_v/v_{max} , S_d/d_{max} , and time history of Arias intensity obtained from dynamic analysis under de-noising decomposed earthquake records had an acceptable

accuracy in comparison with those of the dam crest under the main earthquake records up to levels 4. Therefore, it can be concluded that the records based on the de-noising method can play the role of main earthquake records.

REFERENCES

- [1] G. Gazetas, P. Dakoulas, Seismic analysis and design of rockfill dams: state-of-the-art, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 11(1) (1992) 27-61.
- [2] M. Rashidi, S.M. Haeri, Evaluation of behaviors of earth and rockfill dams during construction and initial impounding using instrumentation data and numerical modeling, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 9(4) (2017) 709-725.
- [3] F. Nasiri, H. Javdani, A. Heidari, Behavior of earth dams due to downsampling-based records. In: 8th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering (SEE8), 11 November, Tehran, Iran, 2019.
- [4] L. Pelecanos, S. Kontoe, L. Zdravković, Dam-reservoir interaction effects on the elastic dynamic response of concrete and earth dams, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 82 (2016) 138-141.
- [5] Y. Sawada, H. Nakazawa, T. Oda, S. Kobayashi, S. Shibuya, T. Kawabata, Seismic performance of small earth dams with sloping core zones and geosynthetic clay liners using full-scale shaking Table tests, Soils and foundations, 58(3) (2018) 533-519

- [6] D. S. Park, N. R. Kim, Safety evaluation of cored rockfill dams under high seismicity using dynamic centrifuge modeling, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 97 (2017) 345-363.
- [7] B. Xu, D. Zou, X. Kong, Z. Hu, Y. Zhou, Dynamic damage evaluation on the slabs of the concrete faced rockfill dam with the plastic-damage model, *Computers and Geotechnics*, 65 (2015) 258-265.
- [8] H. Javdanian, H. R. Zarif Sanayei, L. Shakarami, A regression-based approach to predict crest settlement of embankment dams under earthquake shaking, *Scientia Iranica*, 27 (2) (2020) 671-681.
- [9] H. Javdanian, L. Shakarami, H. R. Zarif Sanayei, modeling seismic settlement of earth dams due to earthquake loading, In: *International Conference on New Findings of Civil, Architectural and Iran Building Industry*, 11 December, Tehran, Iran, 2018.
- [10] H. Javdanian, B. Pradhan, Assessment of earthquake-induced slope deformation of earth dams using soft computing techniques, *Landslides*, 16(1) (2019) 91-103.
- [11] H. Javdanian, Predicting seismic slope displacements of embankment dams using fuzzy systems, *Journal of Dam and Hydroelectric Powerplant*, 5(19) (2019) 25-35.
- [12] A Heidari, E. Salajegheh, Wavelet analysis for processing of earthquake records, *Asian Journal of Civil Engineering*, 9(5) (2008) 513-524.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

F. Nasiri, H. Javdanian, A. Heidari, *Dynamic Analysis of Earth Dams under De-Noised Earthquake Records*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(7) (2021) 683-686.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17687.6648](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17687.6648)





تحلیل دینامیکی سدهای خاکی تحت زلزله های مبتنی بر روش کاهش نویز

فاطمه نصیری، حامد جاودانیان*، علی حیدری

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۲۱
بازنگری: ۱۳۹۸/۱۲/۲۹
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۳۰
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۳/۰۸

کلمات کلیدی:

سد خاکی
تحلیل دینامیکی
تئوری موجک
اهش نویز
مدل سازی عددی

خلاصه: در این مطالعه، با استفاده از روش عددی المان محدود به تحلیل دینامیکی سدهای خاکی با هسته رسی پرداخته شد. پاسخ لرزه ای سدهای خاکی تحت رکوردهای زلزله اصلی و رکوردهای تجزیه شده مبتنی بر تئوری موجک بررسی شد. رکوردهای زلزله با استفاده از روش کاهش نویز و تا پنج سطح تجزیه شدند. نسبت طیف پاسخ شتاب به شتاب بیشینه، نسبت طیف پاسخ سرعت به سرعت بیشینه، نسبت طیف پاسخ جابه جایی به جابه جایی بیشینه، طیف دامنه فوری و تاریخچه زمانی شدت آریاس تاج سدهای خاکی تحت رکوردهای زلزله اصلی و رکوردهای تجزیه شده مبتنی بر تئوری موجک محاسبه شد. نتایج نشان می دهد که نسبت طیف های پاسخ شتاب تاج سد خاکی تحت رکوردهای تجزیه شده مبتنی بر روش کاهش نویز تا سطح سوم و نسبت طیف های سرعت و جابه جایی تاج سد تا سطح چهارم، در مقایسه با رکوردهای اصلی زلزله از دقت قابل قبولی برخوردار هستند. اختلاف حداکثر مقدار نسبت طیف شتاب، نسبت طیف سرعت و نسبت طیف جابه جایی تحت رکورد حاصل از سطح سوم تجزیه و رکورد اصلی برای زلزله های مورد استفاده به ترتیب برابر با ۲۱/۵۱، ۴/۱۹ و ۸/۶۲ درصد می باشد. نتایج تحلیل های دینامیکی نشان می دهد که طیف دامنه فوری و شدت آریاس تاج سد خاکی تحت رکوردهای تجزیه شده مبتنی بر روش کاهش نویز تا سطح چهارم از سازگاری خوبی با رکوردهای اصلی برخوردار می باشند. نتایج حاکی از آن است که در تحلیل دینامیکی سدهای خاکی می توان رکوردهای تجزیه شده مبتنی بر تئوری موجک را جایگزین رکوردهای زلزله اصلی نمود.

۱ - مقدمه

پلکانوس و همکاران^۳ [۸ و ۹] اثر اندرکنش سد و مخزن و همچنین اثرات هندسه دره بر پاسخ لرزه های سد خاکی لاولیتا را بررسی کردند. رمپلو و همکاران^۴ [۱۰] با استفاده از روش المان محدود و همچنین تحلیل های مبتنی بر جابه جایی به بررسی رفتار لرزه های سد خاکی مارانا کاپاسیوتی^۵ پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که با افزایش عمق سنگ بستر، جابه جایی های لرزه ای و همچنین شتاب حداکثر تاج سد خاکی کاهش می یابد. دینگ و همکاران^۶ [۱۱] و آلیبرتی و

ارزیابی رفتار دینامیکی سدهای خاکی تحت بارگذاری زلزله از اهمیت بالایی برخوردار است. محققین با استفاده از روشهای مختلف به تحلیل دینامیکی سدهای خاکی پرداختند [۵-۱۱]. الگمل و همکاران^۱ [۶] با استفاده از روش بلوک لغزش به تحلیل دینامیکی سد خاکی لاولیتا پرداختند. تحلیل پاسخ لرزه ای این سد با استفاده از روش عددی المان محدود توسط پاپالو و بیلاک^۲ [۷] انجام شد.

3 Pelecanos et al
4 Rampello et al
5 Marana Capacciotti
6 Ding et al

1 Elgamal et al
2 Papolou and Bielak

* نویسنده عهده دار مکاتبات: javdanian@sku.ac.ir



حال این سؤال پیش می‌آید که آیا میتوان در مسائل عملی ژئوتکنیک لرزه‌های مانند تحلیل پاسخ لرزه‌های سدهای خاکی، رکوردهای مبتنی بر تئوری موجک را جایگزین رکوردهای اصلی نمود؟ این مطالعه بر تحلیل پاسخ لرزه‌های سد خاکی تحت ارتعاشات زلزله تمرکز دارد. سد خاکی با استفاده از برنامه‌ی المان محدود Plaxis مدل‌سازی و تحت رکوردهای زلزله تجزیه شده مبتنی بر تئوری موجک تحلیل دینامیکی شد. رکوردهای زلزله با استفاده از روش de-noising و تا پنج سطح تجزیه شدند. پاسخ لرزه‌های تاج سدهای خاکی تحت رکوردهای زلزله اصلی و رکوردهای تجزیه شده در سطوح مختلف بررسی شد. نسبت طیف شتاب به شتاب بیشینه رکورد زلزله (S_a) نسبت (a_{max}) ، نسبت طیف سرعت به سرعت بیشینه (S_v/v_{max}) ، نسبت طیف جابه‌جایی به جابه‌جایی بیشینه (S_d/d_{max}) ، طیف دامنه فوریه و تاریخچه زمانی شدت آریاس تاج سد خاکی تحت رکوردهای اصلی و تجزیه شده مقایسه شد.

۲- تئوری موجک

تبدیل موجک^{۱۱} به عنوان یک ابزار ریاضی پیشرفته در پردازش سیگنال استفاده میشود. تئوری موجک در مسائل مختلف مهندسی عمران استفاده شده است [۳۱]. برای فهم بهتر تبدیل موجک می‌توان آن را با تبدیل فوریه مقایسه کرد. تبدیل فوریه، بدون توجه به موقعیت اتفاق فرکانسها، یک سیگنال را بصورت توانهای مختلف از امواج سینوسی و فرکانس تفکیک میکند. بر خلاف تبدیل فوریه، تبدیل موجک متناسب با فرکانس عمل میکند [۳۲ و ۳۳]. با افزایش فرکانس در امتداد سری زمانی، مقیاس موجک کاهش مییابد و برعکس با کاهش فرکانس، مقیاس موجک افزایش مییابد [۳۴]. تبدیلات موجک به دو نوع پیوسته و گسسته تقسیم میشوند. در تبدیل موجک پیوسته، فریم مورد نظر منقبض یا منبسط شده، انتقال داده میشود و سپس از حاصل ضرب آن در سیگنال، انتگرال زمانی گرفته می‌شود. تبدیل موجک پیوسته^{۱۲} توسط رابطه‌ی زیر تعریف میشود:

$$CWT_r^p = \int r(t) \rho_{a,b}^*(t) dt \quad (1)$$

11 Wavelet transform
12 Continuous wavelet transform

همکاران^۱ [۱۲] به ترتیب پاسخ لرزه‌های سدهای خاکی شیزپینگ^۲ و سان پیتر^۳ را به روش عددی المان محدود مورد مطالعه قرار دادند. کاستلی و همکاران^۴ [۱۳] شتاب افقی حداکثر حاصل از تحلیل دینامیکی سد خاکی لنتینی تحت زلزله سانتالوسیا به روشهای عددی مختلف را بررسی و مقایسه کردند. مکانیسمهای گسیختگی و رفتار دینامیکی سد خاکی فوجینوما که تحت زلزله توهوکو گسیخته شد، توسط چاراتپانگون^۵ و همکاران [۱۴] بررسی شد.

برخی از محققان با استفاده از آزمایشهای میز لرزه^۶ [۱۵] و آزمایشهای سنتریفیوژ^۷ [۱۶] به بررسی رفتار لرزه‌های سدهای خاکی پرداختند. نتایج مطالعه ایکسو و همکاران^۸ [۱۷] بر روی تحلیل دینامیکی سدهای سنگریزه‌های با رویه بتنی نشان داده که پاسخ شتاب و تغییرشکل‌های لرزه‌های این سدها تحت تأثیر خصوصیات سنگریز بوده و رویه بتنی اثر قابل توجهی بر رفتار لرزه‌های نخواهد داشت. نتایج مطالعه عددی آندریانوپولوس و همکاران^۹ [۱۸] بر رفتار لرزه‌های سدهای خاکی حاکی از آن است که شتاب بیشینه تاج سد تحت تأثیر ارتفاع سد، خصوصیات حرکت زلزله ورودی، و سختی خاک فونداسیون می‌باشد. محققین تغییرشکلها و نشستهای لرزه‌های سدهای خاکی را بررسی و مدلهایی را برای ارزیابی آنها ارائه کردند [۱۹-۲۳].

یکی از بهترین روشها برای جداسازی فرکانسهای زلزله، استفاده از تبدیل موجک^{۱۰} است [۲۴ و ۲۵]. تبدیل موجک ابزاری قدرتمند برای تحلیل سیگنالها است که میتواند اطلاعات رکورد زلزله را بطور همزمان در حوزهی زمان و فرکانس فراهم سازد [۲۶]. این روش در تحلیلهای مرتبط با زلزله به وفور مورد استفاده قرار گرفته است، از جمله تحلیل دینامیکی سازه‌ها [۲۷]، فیلتر کردن رکوردهای جنبش زمین [۲۸]. همچنین محققین این روش را در طراحی بهینه سازه‌ها تحت بارگذاری زلزله بکار بردند [۲۹ و ۳۰].

مرور تحقیقات گذشته حاکی از آن است که تبدیل موجک روشی مرسوم و پذیرفته شده برای اصلاح و تجزیه‌ی رکوردهای زلزله است.

- 1 Aliberti et al
- 2 Shiziping
- 3 San Pietro
- 4 Castelli et al
- 5 Charatpangoon et al
- 6 Shaking table
- 7 Centrifuge
- 8 Xu et al
- 9 Andrianopoulos et al
- 10 Wavelet Transform

می‌شوند؛ در حالی که در روش تبدیل موجک گسسته فقط تعداد محدودی از مقیاسها مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند [۳۳].

۲-۱- موجک با کاهش نويز

در روش کاهش نويز، بدون کاهش نمونه، موج اصلی زلزله به دو بخش فرکانسهای بالا و فرکانسهای پایین تقسیم میشود. فرکانسهای بالا از تابع ρ و فرکانسهای پایین از تابع r بدست می‌آیند. مؤلفه‌ی فرکانس پایین زلزله را تقریبات (A) و مؤلفه‌ی فرکانس بالای زلزله را جزئیات (D) مینامند. در تبدیل موجک گسسته فرکانسهای بالای رکورد زلزله حذف میشوند. مجدداً بر فرکانسهای پایین زلزله تبدیل موجک دیگری اعمال میشود و به دو بخش تقریبات و جزئیات تقسیم میشود و بخش جزئیات حذف میگردد. این روند تا زمانی که فرکانسهای بالای زلزله از بین بروند و موج زلزله‌ی حاصل در مقیاسه با موج اصلی زلزله خطای کمی داشته باشد، ادامه داده میشود [۳۷ و ۳۸]. فلوجارت تبدیل موجک همراه با کاهش نويز برای زلزله دره ایمپریال در شکل ۱ نشان داده شده است.

۳- رکوردهای زلزله

در این مطالعه از ۸ رکورد زلزله با بزرگیهای متفاوت استفاده شده است. نام، زمان وقوع، بزرگی (M_w) و شتاب حداکثر زمین (a_{max}) رکوردهای زلزله در جدول ۱ ارائه شده است. این زلزلهها در بازه‌ی سالهای ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۴ رخ داده است. بزرگی زلزلهها از ۵/۵ تا ۷/۶ (در مقیاس ریشتر) متغیر بوده است. مقدار حداقل و حداکثر a_{max} زلزلههای مورد استفاده در این پژوهش به ترتیب برابر ۰/۲۸ و ۳/۴۵ متر بر مجذور ثانیه بوده است (جدول ۱). رکوردهای زلزله با استفاده از روش کاهش نويز و تا ۵ سطح تجزیه شدند. بنابراین ۸ رکورد زلزله اصلی و ۴۰ رکورد حاصل از تجزیه (یعنی مجموعاً ۴۸ رکورد) به عنوان حرکت ورودی در تحلیل دینامیکی سدهای خاکی مورد استفاده قرار گرفت.

۴- مدل سازی عددی

جهت ارزیابی رفتار دینامیکی سدهای خاکی تحت بارگذاری زلزله از برنامه المان محدود Plaxis استفاده شد [۳۹]. روشهای عددی به وفور در ارزیابی رفتار دینامیکی سدهای خاکی و نهشته های خاکی

که در این رابطه، b نشان‌دهنده‌ی انتقال^۱، a بیانگر مقیاس (که متناظر با معکوس فرکانس است)، اندیس * نشان‌دهنده‌ی مزدوج مختلط^۲، $r(t)$ موج اصلی (که در این مطالعه تاریخچه زمانی شتاب زلزله است)، و ρ تابع موج اصلی برای تولید توابع دیگر است. کلیه توابع $\rho_{a,b}^*$ که از تابع اصلی مشتق می‌شوند، تابع موجکی (WF) نامیده میشوند و از رابطه‌ی زیر بدست می‌آیند:

$$\rho_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \rho\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

تبدیل گسسته موجک، یک سری موجک است که از تبدیل موجک پیوسته حاصل شده است [۳۵]. در این روش نوعی توصیف زمان-مقیاس از سیگنال گسسته با استفاده از فیلترهای دیجیتال ارائه می‌گردد. در تبدیل موجک گسسته، فیلترهایی با فرکانس قطعهای مختلف برای تحلیل سیگنال در مقیاسهای متفاوت بکار برده می‌شود. با عبور سیگنال از فیلترهای بالاگذر و پائین‌گذر، فرکانسهای مختلف آن آنالیز میشود. در این روش، رزولوشن سیگنال توسط عملکرد فیلترها کنترل می‌شود و مقیاس از طریق نمونه‌برداری رو به پایین^۳ یا نمونه‌برداری رو به بالا^۴ تغییر می‌کند [۳۶]. برای محاسبه ضرائب تبدیل گسسته موجک، مقادیر گسسته $a = a_0^j$ و $b = ka_0^j b_0$ در رابطه (۲) جایگزین میشود:

$$\rho_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^j}} \rho\left(\frac{t - ka_0^j b_0}{a_0^j}\right) \quad (3)$$

پس از ساده‌سازی رابطه فوق داریم:

$$\rho_{j,k}(t) = a_0^{-\frac{j}{2}} \rho(a_0^{-j} t - kb_0) \quad (4)$$

با جای‌گذاری رابطه (۴) در رابطه (۱)، تبدیل موجک گسسته بدست می‌آید:

$$DWT_r^\rho = \int_{-\infty}^{+\infty} r(t) \rho_{j,k}^*(t) dt \quad (5)$$

لازم به ذکر است که در روش تبدیل موجک پیوسته، همه-ی مقیاسها یا فرکانسهای ممکن از سری زمانی شناسایی و آنالیز

- 1 Translation
- 2 Complex conjugate
- 3 Down-sampling
- 4 Up-sampling

شده است. نسبت طیف شتاب (S_a/a_{max}) ، نسبت طیف سرعت (S_v/v_{max}) ، نسبت طیف جابه‌جایی (S_d/d_{max}) ، طیف دامنه فوریه و تاریخچه زمانی شدت آریاس در تاج سد خاکی با ارتفاع ۵۰ متر تحت رکوردهای زلزله اصلی (MER) و رکوردهای تجزیه شده (DER) مبتنی بر روش کاهش نویز مورد بحث قرار گرفته است.

۵-۱- نسبت طیف شتاب

بیشینه شتاب (a_{max}) به صورت حداکثر مقدار مشخصه ثبت شده در رکورد زلزله تعریف می‌شود. شکل ۳ نشانگر نسبت طیف پاسخ شتاب تاج سد خاکی با ارتفاع ۵۰ متر به حداکثر شتاب (S_a/a_{max}) تحت رکوردهای اصلی زلزله (جدول ۱) و رکوردهای تجزیه شده به روش **de-noising** می‌باشد. لازم به ذکر است که طیف پاسخهای شتاب در میرایی ۵٪ محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد که نسبت S_a/a_{max} تحت رکوردهای تجزیه شده مبتنی بر روش **de-noising** تا سطح تجزیه سوم از مطابقت بالایی با نسبت S_a/a_{max} تاج سد خاکی تحت رکوردهای اصلی زلزله برخوردار است.

۵-۲- نسبت طیف سرعت

یکی از پارامترهایی که به تشریح دامنه حرکات زمین می‌پردازد، سرعت بیشینه (v_{max}) می‌باشد. نسبت طیف سرعت تاج سد خاکی به سرعت بیشینه رکوردهای اصلی و تجزیه شده (S_v/v_{max}) در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که نسبت S_v/v_{max} تحت رکوردهای اصلی و تجزیه شده مبتنی بر روش کاهش نویز (DNM) تا سطح تجزیه چهارم با مقادیر نسبت طیف سرعت رکورد اصلی، سازگاری خوبی دارد.

۵-۳- نسبت طیف جابه‌جایی

نسبت طیف جابه‌جایی به جابه‌جایی بیشینه رکوردهای اصلی و تجزیه شده (S_d/d_{max}) در شکل ۵ ارائه شده است. با توجه به شکل ۵ مشاهده می‌شود که مقادیر S_d/d_{max} تحت رکوردهای اصلی و تجزیه شده به روش کاهش نویز (DNM) تا سطح چهارم از سازگاری خوبی با مقادیر رکورد اصلی برخوردار هستند.

بکار گرفته شدند [۱۰ و ۲۱]. در این مطالعه با استفاده از برنامه المان محدود Plaxis به تحلیل پاسخ لرزه‌های سد خاکی با ارتفاع $H=50m$ با شیب $1(V):2/2(H)$ پرداخته شد. شکل هندسی مدل سد خاکی با ارتفاع ۵۰ متر در شکل ۲ نشان داده شده است.

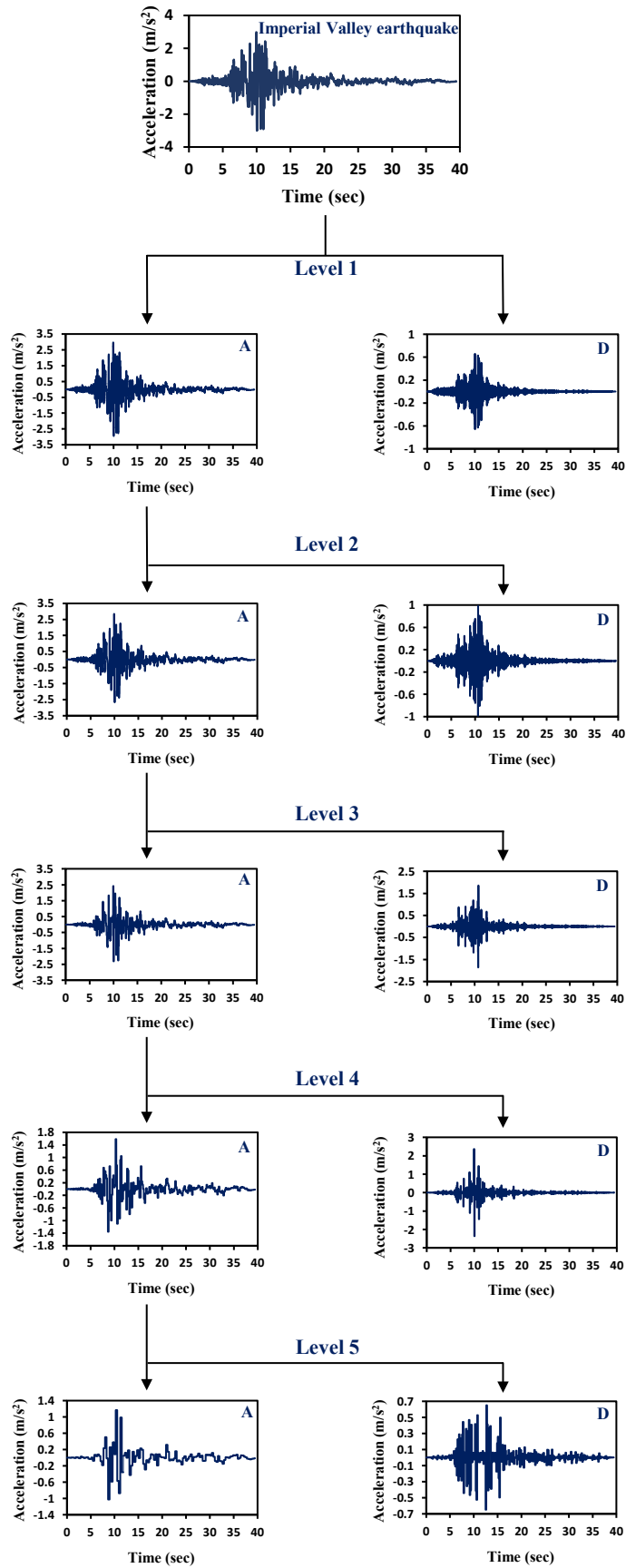
مشخصات هسته، پوسته و پی سدهای خاکی مدل‌سازی شده شامل وزن مخصوص (γ) ، چسبندگی (C) ، زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) ، مدول الاستیک (E) ، نفوذپذیری (k) و نسبت پواسون (ν) در جدول ۲ ارائه شده است. این مقادیر بر اساس تحقیقات گذشته و همچنین بازه‌های این پارامترها برای سدهای خاکی [۲، ۸ و ۹] انتخاب گردید.

در مدل‌سازیهای انجام شده در این مطالعه، جهت شبیه‌سازی رفتار بدنه سد خاکی از مدل رفتاری الاستوپلاستیک مبتنی بر معیار موهر-کولمب و برای رفتار پی سد از مدل رفتاری الاستیک استفاده شد. جهت انتشار صحیح امواج در محیط خاکی در طی تحلیل دینامیکی، اندازهی المانهای بکار گرفته شده در مدل‌سازی سد خاکی (AI) بر اساس پیشنهاد کوهلمیر و لیسمر^۱ [۴۰] بصورت $AI \leq 10$ تعیین شد. پارامتر AI طول موج مربوط به بالاترین فرکانس ورودی تحریک زلزله است. این پارامتر بر اساس حداقل سرعت موج برشی (V_s) و حداکثر فرکانس (f) تحریک ورودی محاسبه می‌شود.

در تحلیل‌های استاتیکی، مرزهای طرفین در جهت افقی و مرز پایین مدل در هر دو جهت محدود شد. در تحلیل‌های دینامیکی، جهت جلوگیری از انعکاس موج از مرزهای جاذب استفاده شد. در مدل‌سازیهای لرزه‌ای انجام شده در این مطالعه از میرایی رایلی استفاده شده است. ضرایب میرایی رایلی $\alpha=\beta=0.1$ در نظر گرفته شد. این ضرایب در روش عددی المان محدود مورد استفاده، بر اساس رابطه $[C]=\alpha[M]+\beta[K]$ محاسبه می‌شوند که C ، M و K به ترتیب بیانگر ماتریس میرایی، جرم و سختی می‌باشند [۳۹]. محرک ورودی به شکل تاریخچه زمانی شتاب به پی سد خاکی اعمال شد و رفتار لرزه‌های تاج سد تحت رکوردهای زلزله‌های مختلف بررسی شد.

۵- نتایج و بحث

در این بخش، نتایج تحلیل دینامیکی سد خاکی تحت رکوردهای زلزله اصلی و رکوردهای تجزیه شده به روش کاهش نویز ارائه



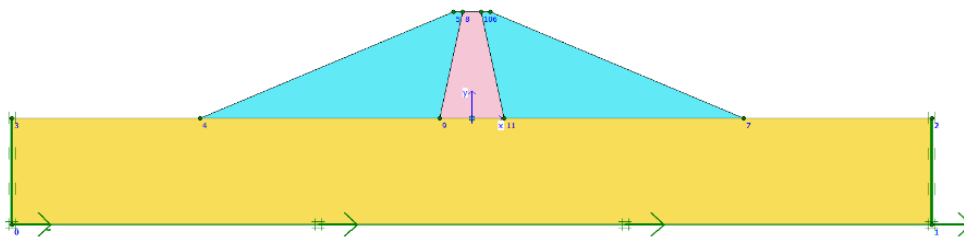
شکل ۱. فرآیند تجزیه رکورد زلزله دره ایمپریال تا پنج سطح با استفاده از روش کاهش نویز مبتنی بر موجک

Fig. 1. Decomposition process of Imperial Valley earthquake up to 5 level using wavelet-based de-noising method

جدول ۱. مشخصات زلزله های مورد استفاده در تحلیل دینامیکی

Table 1. Earthquakes used in dynamic analysis

ردیف	نام زلزله	سال وقوع	بزرگی زلزله	a_{max} (m/s ²)
۱	ابهر	۲۰۰۲	۶/۴	۰/۲۸
۲	دره ایمپریال	۱۹۷۹	۶/۵	۳/۰۰
۳	رودسر	۲۰۰۴	۶/۴	۰/۴۰
۴	سن فرناندو	۱۹۷۱	۶/۶	۰/۹۲
۵	کوبه	۱۹۹۵	۶/۹	۳/۴۵
۶	کوکائلی	۱۹۹۹	۷/۶	۳/۲۳
۷	لوماپریتا	۱۹۸۹	۶/۹	۳/۴۴
۸	هالیستر	۱۹۶۱	۵/۵	۱/۹۹



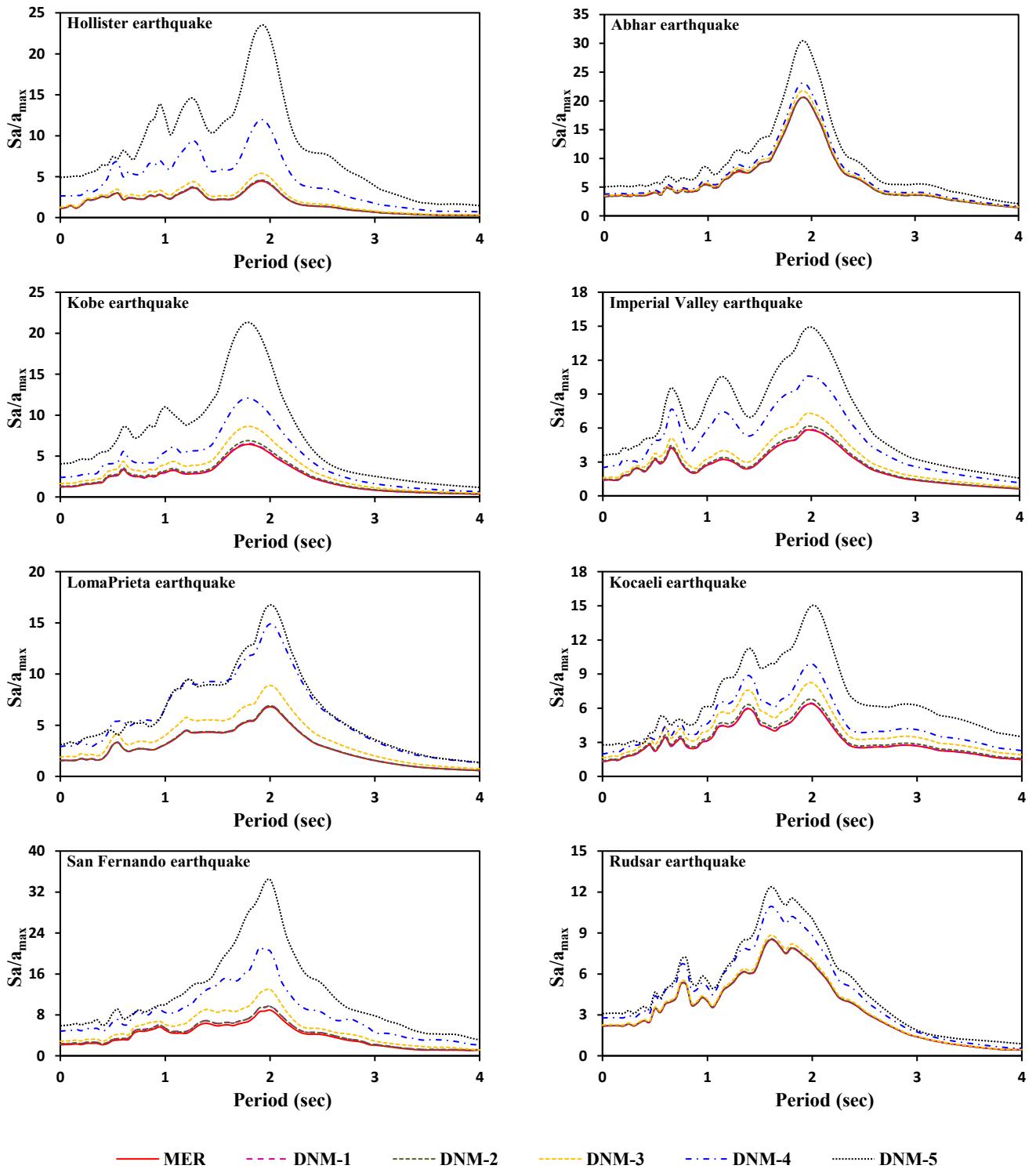
شکل ۲. هندسه سد خاکی در مدل سازی عددی

Fig. 2. Geometrical configuration of earth dam in numerical modeling

جدول ۲. مشخصات مصالح مورد استفاده در مدل سازی عددی

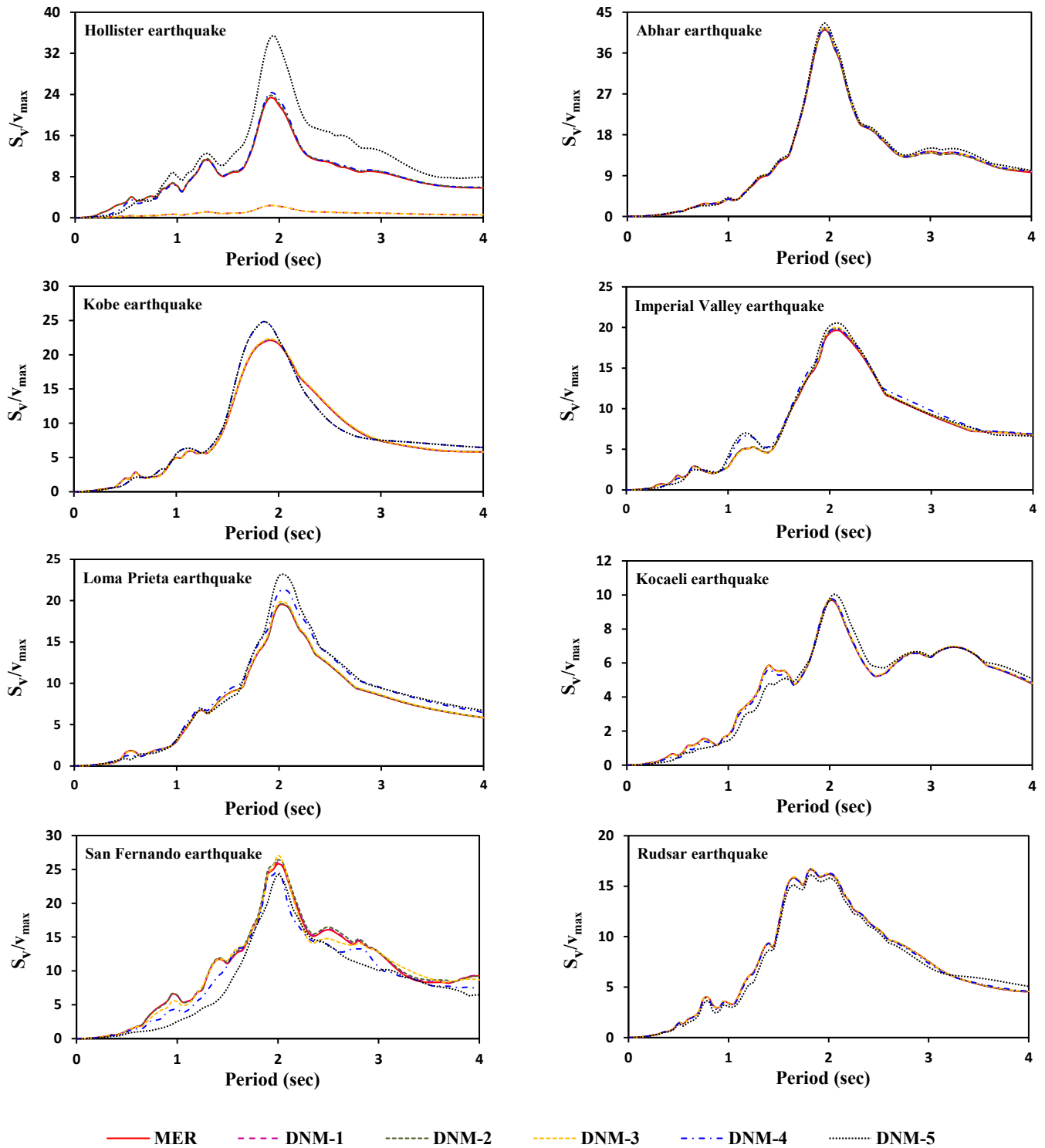
Table 2. Characteristics of materials used in numerical modeling

مصالح	γ (kN/m ³)	C (kPa)	ϕ (deg.)	E (MPa)	k (cm/s)	ν (-)
هسته	۱۷/۵	۳۰	۲۵	۲۷	$۱۰^{-۷}$	۰/۳۰
پوسته	۲۰	۲۰	۳۰	۳۱	۲×۱۰^{-۳}	۰/۲۵
فونداسیون	۲۰	-	-	۱۰۰۰	$۱۰^{-۶}$	۰/۲۵



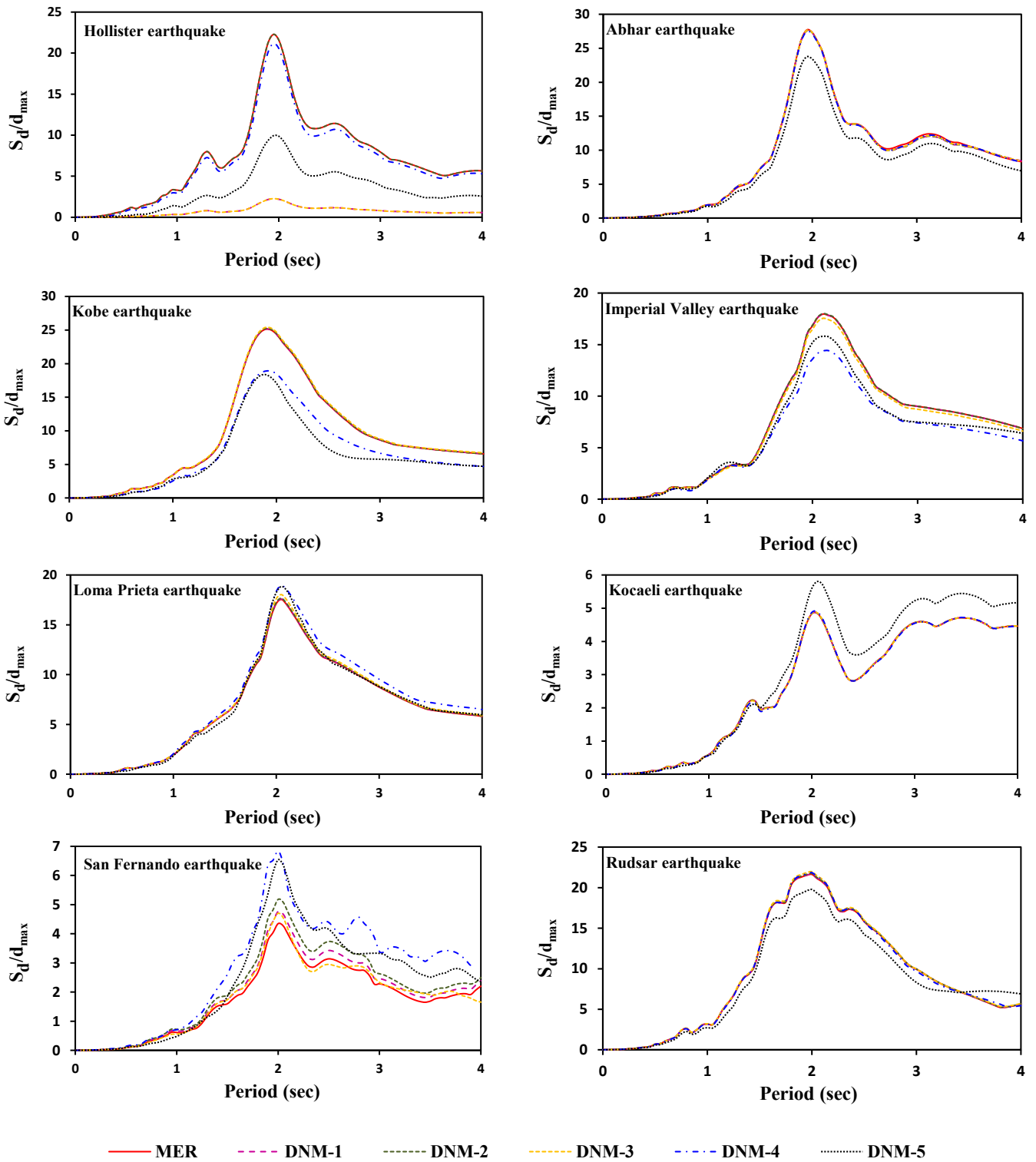
شکل ۳. نسبت طیف پاسخ شتاب تاج سد خاکی تحت رکوردهای زلزله اصلی و تجزیه شده

Fig. 3. Ratio of acceleration response spectrum of earth dam crest under the main and decomposed earthquake records



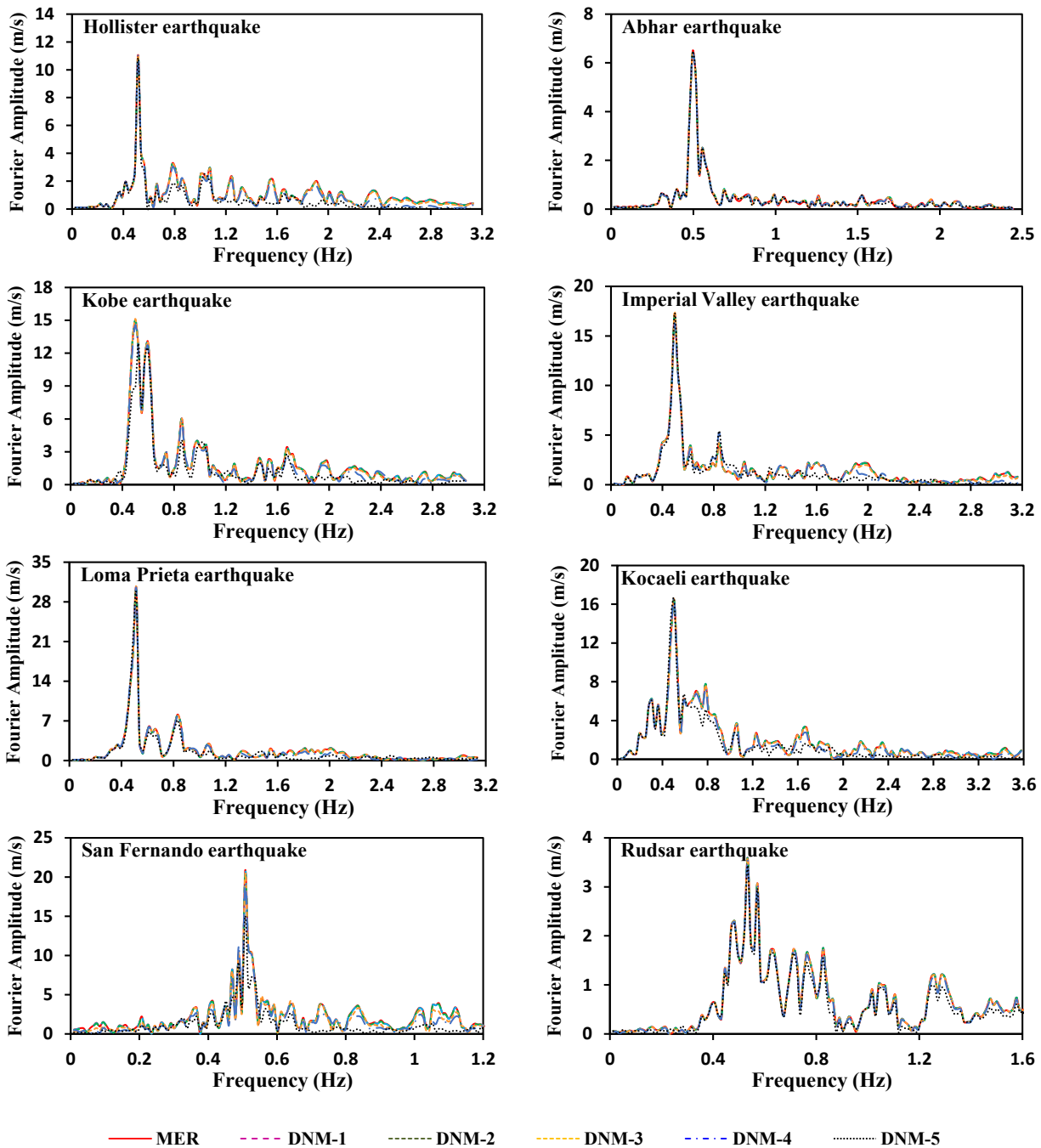
شکل ۴. نسبت طیف سرعت تاج سد خاکی تحت رکوردهای زلزله اصلی و تجزیه شده

Fig. 4. Ratio of velocity response spectrum of earth dam crest under the main and decomposed earthquake records



شکل ۵. نسبت طیف جابه‌جایی تاج سدخاکی تحت رکوردهای زلزله اصلی و تجزیه شده

Fig. 5. Ratio of displacement response spectrum of earth dam crest under the main and decomposed earthquake records



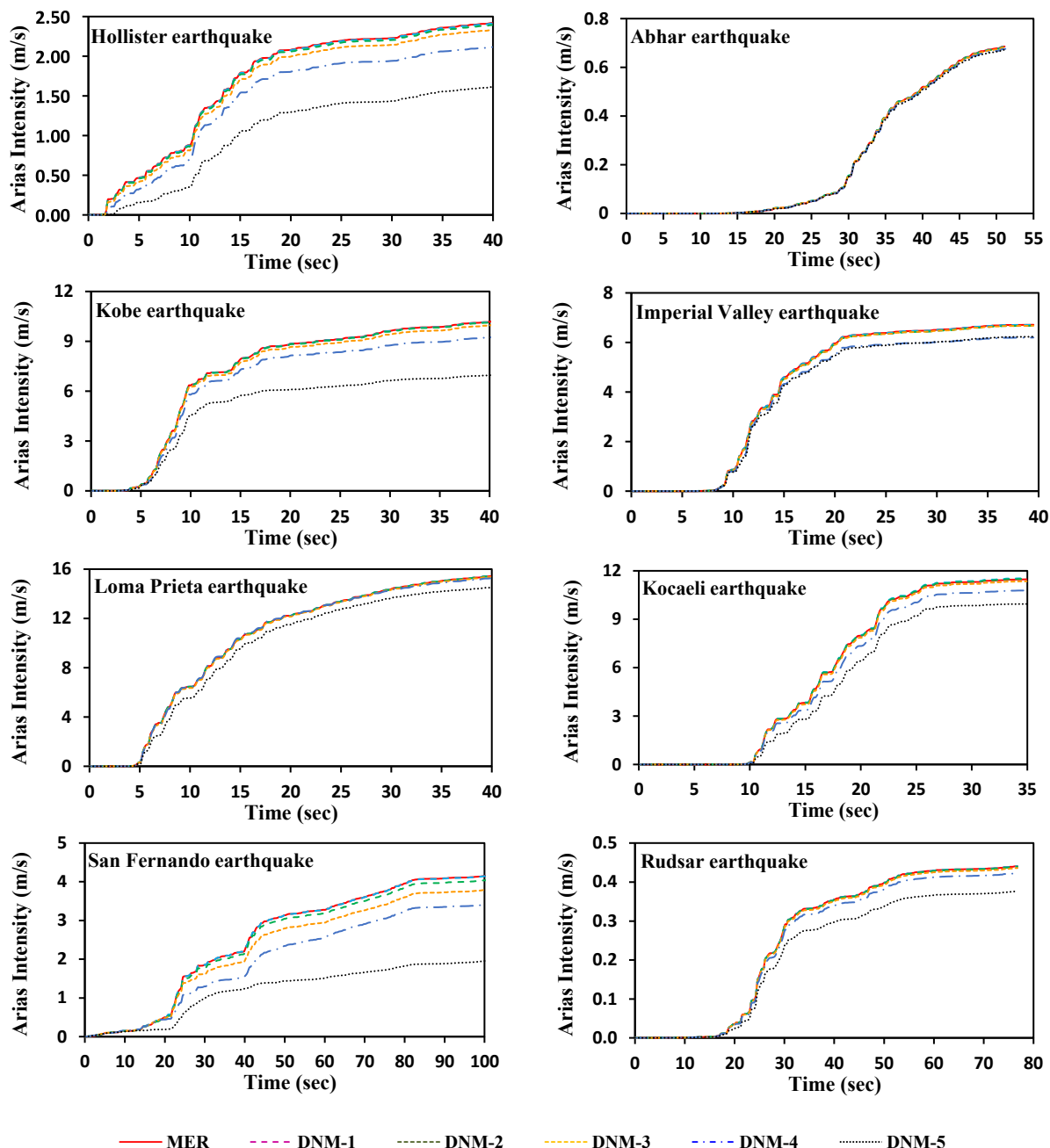
شکل ۶. طیف دامنه فوریه تاج سد خاکی تحت رکوردهای زلزله اصلی و تجزیه شده

Fig. 6. Fourier amplitude spectrum of earth dam crest under the main and decomposed earthquake records

طیف فوریه می تواند بخوبی محتوای فرکانسی رکورد زلزله را معرفی نماید. همان طور که در شکل ۶ مشاهده می شود، طیف دامنه فوریه شتاب تاج سد خاکی تحت رکوردهای تجزیه شده مبتنی بر DNM از سازگاری بالایی با طیف دامنه فوریه تحت رکورد اصلی زلزله برخوردار است.

۴-۵- طیف دامنه فوریه

طیف دامنه فوریه شتاب تاج سد خاکی با ارتفاع ۵۰ متر تحت رکوردهای زلزله اصلی (MER) و رکوردهای تجزیه شده مبتنی بر روش کاهش نویز (DNM)، در شکل ۶ نشان داده شده است. طیف دامنه فوریه نشانگر نحوه ی توزیع دامنه با فرکانس می باشد. این طیف اهمیت فرکانسهای موجود در یک سیگنال را نشان می دهد.



شکل ۷. شدت آریاس تاج سد خاکی تحت رکوردهای زلزله اصلی و تجزیه شده

Fig. 7. Arias intensity of earth dam crest under the main and decomposed earthquake records

می‌نماید. شدت آریاس از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_g} [a(t)]^2 dt \quad (6)$$

که g شتاب گرانش، $a(t)$ تاریخچه زمانی شتاب زلزله و t_g زمان زلزله است. شکل ۷ تاریخچه زمانی شدت آریاس تاج سد خاکی با ارتفاع ۵۰ متر تحت رکوردهای زلزله اصلی و رکوردهای تجزیه شده

۵-۵- شدت آریاس

شدت آریاس (I_a) عبارت است از مجموع کل انرژی در واحد وزن جذب شده در پایان یک زلزله توسط مجموعه ای نامحدود از نوسانگرهای یک درجه آزادی بدون میرایی [۴۱]. شدت آریاس یکی از پارامترهای ارزشمند لرزه‌ای است که متناسب با کل انرژی منتقل شده توسط امواج لرزه‌ای به خاک است. این پارامتر، هر سه مشخصه ی فرکانس، دامنه و مدت جنبش نیرومند زمین را منعکس

و شدت آریاس تاج سدهای خاکی تحت رکوردهای اصلی و تجزیه شده نیز مؤید این موضوع است. از این رو، رکوردهای مبتنی بر روش کاهش نویز می توانند نقش رکوردهای اصلی زلزله را در تحلیلهای دینامیکی سدهای خاکی ایفا نمایند.

مبتنی بر روش کاهش نویز را نشان میدهد. همان طور که در شکل ۷ مشاهده میشود، شدت آریاس تاج سد خاکی تحت رکوردهای تجزیه شده مبتنی بر روش کاهش نویز تا سطح چهارم در مقایسه با شدت آریاس تحت رکوردهای اصلی زلزله (جدول ۱) از دقت بالایی برخوردار است.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

CWT	تبدیل موجک پیوسته
$r(t)$	موج اصلی
S_a	طیف شتاب، m/s^2
a_{max}	شتاب بیشینه رکورد زلزله، m/s^2
S_v	طیف سرعت، m/s
v_{max}	سرعت بیشینه رکورد زلزله، m/s
S_d	طیف جابه‌جایی، m
d_{max}	بیشینه جابه‌جایی رکورد زلزله، m
I_a	شدت آریاس، m/s
$a(t)$	تاریخچه زمانی شتاب زلزله، m/s^2
tg	زمان زلزله، s
DNM	روش کاهش نویز
MER	رکورد زلزله اصلی
DER	رکورد زلزله تجزیه شده

علائم یونانی

ρ	تابع موج اصلی
--------	---------------

زیرنویس

a	مقیاس، $1/Hz$
b	انتقال

مراجع

- [1] G. Gazetas, P. Dakoulas, Seismic analysis and design of rockfill dams: state-of-the-art, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1(11) (1992) 61-27.
- [2] M. Rashidi, S.M. Haeri, Evaluation of behaviors of earth and rockfill dams during construction and initial impounding using instrumentation data and numerical modeling, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 4(9) (2017) 725-709.
- [3] D. Russo, S. Sica, S. Del Gaudio, R. De Matteis, A. Zollo,

۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه به تحلیل پاسخ لرزهای سدهای خاکی با هسته رسی تحت رکوردهای زلزله تجزیه شده مبتنی بر تئوری موجک پرداخته شد. رکوردهای زلزله با استفاده از روش کاهش نویز و تا ۵ سطح تجزیه شدند. در روش کاهش نویز فرکانسهای بالا و پایین موج اصلی زلزله از یکدیگر جدا شده و به دو موج جزئیات و تقریبات تجزیه می شود. در ادامه موج تقریبات مجدداً تجزیه می شود تا موج تقریبات جدیدی حاصل شود. سد خاکی با ارتفاع ۵۰ متر با استفاده از برنامه المان محدود Plaxis تحت رکوردهای زلزله اصلی (یعنی ۸ رکورد) و تجزیه ی آنها (یعنی ۴۰ رکورد) تحلیل دینامیکی شد. نسبت طیف پاسخ شتاب (S_d/a_{max}) ، نسبت طیف پاسخ سرعت (S_v/v_{max}) ، نسبت طیف پاسخ جابه‌جایی (S_d/d_{max}) ، طیف دامنه فوریه و تاریخچه زمانی شدت آریاس تاج سدهای خاکی تحت رکوردهای زلزله اصلی و رکوردهای تجزیه شده مبتنی بر تئوری موجک محاسبه شد.

نسبت طیفهای پاسخ شتاب تاج سدهای خاکی تحت رکوردهای زلزله اصلی و تجزیه شده به شتاب بیشینه (S_d/a_{max}) بررسی و مقایسه شد. این مقایسه نشان می دهد که رکوردهای زلزله تجزیه شده مبتنی بر روش کاهش نویز تا سطح تجزیه سوم با نتایج حاصل از رکوردهای اصلی سازگار می باشند. بررسی نسبت طیف سرعت به بیشینه (S_v/v_{max}) و نسبت S_d/d_{max} تحت رکوردهای اصلی و تجزیه شده حاکی از آن است که رکوردهای تجزیه شده مبتنی بر روش کاهش نویز تا سطح تجزیه چهارم با نتایج حاصل از رکوردهای اصلی از مطابقت بالایی برخوردار می باشند. در تحلیلهای دینامیکی انجام شده تحت زلزلههای مختلف، اختلاف حداکثر مقدار نسبت طیف شتاب، نسبت طیف سرعت و نسبت طیف جابه جایی تحت رکورد سطح سوم تجزیه و رکورد اصلی به ترتیب برابر با ۲۱/۵۱، ۴/۱۹ و ۸/۶۲ درصد می باشد. همچنین مقایسه‌ی طیف دامنه فوریه

- Procedia Engineering, 158 (2016) 361-356.
- [14] Charatpangoon, J. Kiyono, A. Furukawa, C. Hansapinyo, Dynamic analysis of earth dam damaged by the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 64 (2014) 62-50.
- [15] Y. Sawada, H. Nakazawa, T. Oda, S. Kobayashi, S. Shibuya, T. Kawabata, Seismic performance of small earth dams with sloping core zones and geosynthetic clay liners using full-scale shaking table tests, *Soils and foundations*, 3(58) (2018) 519-533.
- [16] S. Park, N. R. Kim, Safety evaluation of cored rockfill dams under high seismicity using dynamic centrifuge modeling, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 97 (2017) 363-345.
- [17] Xu, D. Zou, X. Kong, Z. Hu, Y. Zhou, Dynamic damage evaluation on the slabs of the concrete faced rockfill dam with the plastic-damage model, *Computers and Geotechnics*, 65 (2015) 265-258.
- [18] K. I. Andrianopoulos, A. G. Papadimitriou, G. D. Bouckovalas, D. K. Karamitros, Insight into the seismic response of earth dams with an emphasis on seismic coefficient estimation *Computers and Geotechnics* 55 (2014) 210-195.
- [19] H. Javdanian, H. R. Zarif Sanayei, L. Shakarami, A regression-based approach to predict crest settlement of embankment dams under earthquake shaking, *Scientia Iranica*, 27 (2) (2020) 681-671.
- [20] H. Javdanian, L. Shakarami, H. R. Zarif Sanayei, Modeling seismic settlement of earth dams due to earthquake loading, In: *International Conference on New Findings of Civil, Architectural and Iran Building Industry*, 11 December, Tehran, Iran, 2018.
- [21] H. Javdanian, B. Pradhan, Assessment of earthquake-induced slope deformation of earth dams using soft computing techniques, *Landslides*, 1(16) (2019) 103-91.
- [22] L. Shakarami, H. Javdanian, H.R. Zarif Sanayei, G. Shams, Numerical investigation of seismically induced crest settlement of earth dams, *Modeling Earth Systems and Environment*, 4(5) (2019) 1238-1231.
- [23] H. Javdanian, Predicting seismic slope displacements of Near-source effects on the ground motion occurred at the Conza Dam site (Italy) during the 1980 Irpinia earthquake, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10(15) (2017) -4009 4037.
- [4] F. Nasiri, H. Javdanian, A. Heidari, Behavior of earth dams due to downsampling-based records. In: *8th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering (SEE8)*, 11 November, Tehran, Iran, 2019.
- [5] S. Chakraborty, J. T. Das, A. J. Puppala, A. Banerjee, Natural frequency of earthen dams at different induced strain levels, *Engineering geology*, 248 (2019) 345-330.
- [6] A. W. M. Elgamal, R. F. Scott, M. F. Succarieh, L. Yan, La Villita dam response during five earthquakes including permanent deformation, *Journal of Geotechnical Engineering*, 10(116) (1990) 1462-1443
- [7] Papalou, J. Bielak, Nonlinear seismic response of earth dams with canyon interaction, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1(130) (2004) -103 110.
- [8] L. Pelecanos, S. Kontoe, L. Zdravkovic, Dam-reservoir interaction effects on the elastic dynamic response of concrete and earth dams, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 82 (2016) 141-138.
- [9] L. Pelecanos, S. Kontoe, L. Zdravkovic, The effects of dam-reservoir interaction on the nonlinear seismic response of earth dams, *Journal of Earthquake Engineering*, (2018) 23-1.
- [10] S. Rampello, E. Cascone, N. Grosso, Evaluation of the seismic response of a homogeneous earth dam, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 5(29) (2009) -782 798.
- [11] X. M. Ding, H. L. Liu, T. Yu, G. Q. Kong, Nonlinear finite element analysis of effect of seismic waves on dynamic response of Shiziping dam, *Journal of Central South University*, 8(20) (2013) 2332-2323.
- [12] D. Aliberti, E. Cascone, G. Biondi, Seismic performance of the San Pietro dam, *Procedia Engineering*, 158 (2016) 367-362.
- [13] F. Castelli, V. Lentini, C. A. Trifaro, 1D seismic analysis of earth dams: the example of the Lentini site,

- (2016) 1183-1169.
- [32] O. Rioul, M. Vetterli, Wavelets and signal processing, IEEE signal processing magazine, 8 (1991) 38-14.
- [33] I. Daubechies, The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis, IEEE Trans Inf. Theory, 5)36) (1990) 1005-961.
- [34] A. Heidari, S. Pahlavan sadegh, J. Raeisi, Investigating the effect of soil type on non-linear response spectrum using wavelet theory, International Journal of Civil Engineering, (2019). <https://doi.org/10.1007/s6-00394-019-40999>.
- [35] R. E. Crochiere, Digital Signal Processor: Sub-Band Coding, Bell System Technical Journal, 7)60) (1981) -1633 1653.
- [36] E. Salajegheh, A. Heidari, Optimum design of structures for earthquake induced loading by wavelet neural network, In Intelligent Computational Paradigms in Earthquake Engineering, IGI Global, (2007) 100-80.
- [37] L. Donoho, Nonlinear wavelet methods for recovery of signals, densities, and spectra from indirect and noisy data, In Proceedings of Symposia in Applied Mathematics. 47 (1993) <http://dx.doi.org/10.1090/psapm/047>.
- [38] A. Ansari, A. Noorzad, H. Zafarani, H. Vahidifard, Correction of highly noisy strong motion records using a modified wavelet de-noising method, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 30(11) (2010) 1168-1181.
- [39] R. B. J. Brinkgreve, (Ed.). Plaxis 2D: finite element code for soil and rock analyses, Version 8, Balkema Publisher, The Netherlands, (2002).
- [40] R. L. Kuhlemeyer, J. Lysmer, Finite element method accuracy for wave propagation problems, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 99 (1973) 427-421.
- [41] A. Arias, Measure of earthquake intensity, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, University of Chile, Santiago de Chile, (1970).
- embankment dams using fuzzy systems, Journal of Dam and Hydroelectric Powerplant, 19)5) (2019) 35-25.
- [24] A Heidari, E. Salajegheh, Wavelet analysis for processing of earthquake records, Asian Journal of Civil Engineering, 5)9) (2008) 524-513.
- [25] T. P. Banjade, S. Yu, J. Ma, Earthquake accelerogram denoising by wavelet-based variational mode decomposition, Journal of Seismology, 4)23) (2019) -649 663.
- [26] A. Kaveh, V. R. Mahdavi, A new method for modification of ground motions using wavelet transform and enhanced colliding bodies optimization. Applied Soft Computing, 47 (2016) 369-357.
- [27] S. Soroushian, E. M. Maragakis, A. Ansari, Estimation of vertical floor displacement using a wavelet de-noising method, Journal of Earthquake Engineering, 2)20) (2016) 297-279.
- [28] G. Ghodrati Amiri, A. A. Rad, N. K. Hazaveh, Wavelet-based method for generating nonstationary artificial pulse-like near-fault ground motions, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 10)29) (2014) -758 770.
- [29] Salajegheh, A. Heidari, Optimum design of structures against earthquake by adaptive genetic algorithm using wavelet networks, Structural and Multidisciplinary Optimization, 4)28) (2004) 285-277.
- [30] Salajegheh, A. Heidari, Optimum design of structures against earthquake by wavelet neural network and filter banks, Earthquake engineering & structural dynamics, 1)34) (2005) 82-67.
- [31] Smyrou, I. E. Bal, P. Tasiopoulou, G. Gazetas, Wavelet analysis for relating soil amplification and liquefaction effects with seismic performance of precast structures, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 7)45)

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Nasiri, H. Javdanian, A. Heidari, Dynamic Analysis of Earth Dams under De-Noised Earthquake Records, Amirkabir J. Civil Eng., 53(7) (2021) 3101-3114.

DOI: [10.22060/ceej.2020.17687.6648](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.17687.6648)

