

تعیین مشخصات دینامیکی سد پاکویما با استفاده از شتاب نگاشت‌های زلزله نورتریج

عبدالرحیم جلالی

استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

چکیده

بیشتر سدها، اگر نگوییم همه آنها، در نزدیکی و یا بر روی گسل‌ها ساخته شده‌اند و جنبش قوی زمین ناشی از زمین لرزه‌های نزدیک گسل، ممکن است آسیب‌های جدی بر این سدها وارد نماید. چنین آسیب‌هایی به طور معمول با تغییر در سختی سازه‌ای همراه می‌باشد. در نتیجه پیش بینی عملکرد واقعی سد با تحلیل غیرخطی امکان‌پذیر خواهد بود. علاوه بر این، روش‌های تحلیل متداول در مهندسی سازه از ورودی یکنواخت زمین لرزه برای تحلیل آنها استفاده می‌کند، در صورتی که تغییرات قابل توجهی هم در دامنه و هم در محتویات فرکانسی زمین لرزه‌ها، در محل تماس شالوده با زمین پل‌های با دهانه بلند و سدهای بزرگ، روی می‌دهد. هدف اصلی این مطالعه تعیین مشخصات ارتعاشی، بررسی اثرات اندرکنش بر روی این مشخصات، و سرانجام ردیابی کردن رفتار غیر خطی سیستم سد - پی - مخزن با بکارگیری روش‌های تعیین هویت بر روی داده‌های پاسخ لرزه‌ای سد پاکویما می‌باشد. مدل‌های ARX با استفاده از رهیافت ثابت در زمان و متغیر در زمان و یا رهیافت بازگشتی برای تعیین مشخصات دینامیکی سد-پی-مخزن بکار گرفته شد. میرایی‌های مودی، فرکانس‌های طبیعی و تابع پاسخ فرکانسی سیستم به دست آمد و فرکانس‌ها و میرایی‌های به دست آمده با فرکانس‌ها و میرایی‌های تعیین شده به وسیله ارتعاش اجباری و روش‌های تحلیلی مقایسه گردید. نتایج سازگاری مناسبی را با همدیگر نشان می‌دهند. همچنین در این بررسی نشان داده می‌شود که فرض ورودی یکنواخت، فرض واقع‌گرایانه‌ای نمی‌باشد و ممکن است به نتایج اشتباهی بیانجامد. سرانجام پارامترهای مودی تابع زمان نیز برآورد گردیده است، این روش برای به دست آوردن مشخصات دینامیکی سد-پی-مخزن مفید می‌باشد، زیرا این مشخصات در ارزیابی ایمنی لرزه‌ای سازه‌های موجود بسیار حیاتی هستند.

کلمات کلیدی: سد قوسی، پردازش داده‌های لرزه‌ای، تعیین هویت سیستم، فیلتر گذاری خطی، روش تعیین هویت بازگشتی، حرکت غیر یکنواخت زمین.

Identification of Pacoima Dam from 1994 Northridge Earthquake Records

A. Jalali

Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz

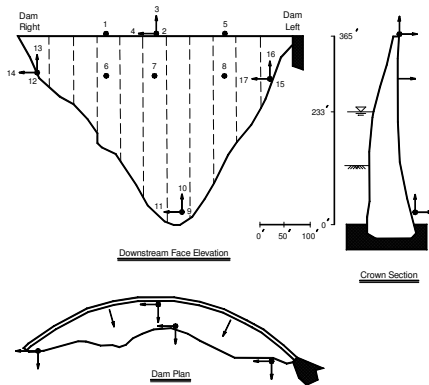
Abstract

Most if not all of the dams are located near or on the faults, and severe ground shaking from near-fault may cause significant damage to dams. Such damage usually is associated with changes in structural stiffness. Consequently, the actual performance of the dam can be predicted only by non-linear analysis. Moreover standard earthquake analyses of civil engineering structures use uniform ground motions even though considerable variations in both amplitude and phase can occur along the foundation interface for long-span bridges and large dams. The main purpose of this study is the identification of vibration properties, effect of interactions on these properties, and finally detection of nonlinearity in the dam-foundation rock-reservoir system by applying system identification methods on seismic response data from Pacoima Dam. For the identification of dam properties from seismic response data during 1994 Northridge earthquake, ARX models are applied using the time-invariant and time-variant or recursive approach to identify the dynamic characteristics of the dam-foundation rock-reservoir. The system modal damping, natural frequencies and frequency response functions are identified. The identified resonant frequencies and corresponding damping ratios have been compared with the results obtained from forced vibration measurements and analytical methods. All of the results are fairly in good agreement. It has also been shown that assumption of uniform input is not realistic and could lead to erroneous results. In addition time-varying modal parameters have been estimated. The method is useful for obtaining vibration properties of dam-foundation rock-reservoir system. These properties are essential in safety evaluation of existing dam structures.

Key words: Arch dam; Seismic data processing; System identification; Linear filtering theory;

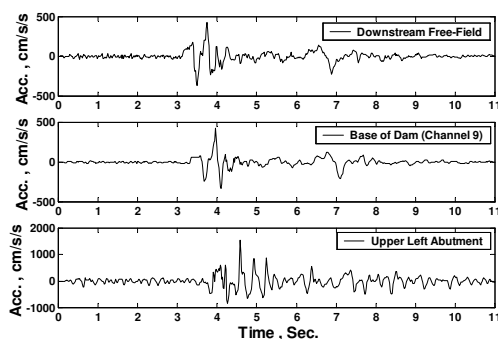
۱- مقدمه

در توده‌های بتنی سد بود. شتاب‌های سد و دره به وسیله شبکه‌ای از شتاب نگارهای‌های جنبش قوی CDMG ثبت گردید. محل قرارگیری شتاب نگارها در روی سد در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- سد پاکویما که محل قرارگیری شتاب نگارها در آن نشان داده شده است

داده‌های به دست آمده از کانال‌های ۸ تا ۱۱ شتاب‌های ثبت شده بر روی سد می‌باشند. بیشترین شتاب‌های ثبت شده در دره برابر با $g/0.43$ و $g/1.58$ به ترتیب برای ابزارهای جاگذاری شده در پایین دست و تکیه‌گاه سمت چپ (ULA) می‌باشند. اندازه این شتاب‌ها نشانگر تقویت حرکت زمین به وسیله شکل زمین دره می‌باشد. مؤلفه‌های در جهت جریان این شتاب‌ها همراه با شتاب شعاعی ثبت شده در پایه سد در شکل (۲) نشان داده شده است. کانال ۸ شتاب شعاعی با اندازه حداکثر $g/1.31$ در نقطه‌ای واقع در ربع سمت چپ و به ارتفاع ۸۰ درصد بلندی سد را ثبت نمود.



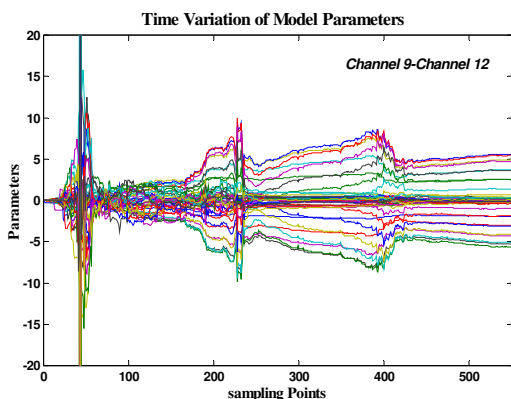
شکل ۲- شتاب نگاشت‌های ثبت شده در دره سد پاکویما

تحلیل اثر زمین‌لرزه بر روی پاسخ سد کار بسیار پیچیده و دشواری است. به همین دلیل روش‌های تعیین مشخصات دینامیکی، کمتر در مورد پاسخ لرزه‌ای واقعی سیستم سد - پی - مخزن مورد استفاده قرار گرفته است. از آن جایی که همه رکوردها به شکل گسسته در زمان می‌باشند، استفاده از رهیافت گسسته زمانی در تعیین مشخصات دینامیکی، طبیعی به نظر می‌رسد. تحلیل بسیار مفصلی از داده‌های آزمایشگاهی و پاسخ لرزه‌ای ثبت شده یک سازه ساختمانی (ساختمان ترنس امریکا) براساس رهیافت فیلترگذاری خطی گسسته زمانی و با تقریب کمترین مربعات مورد مطالعه قرار گرفته است [۳، ۱]. کاربرد روش ARX در مورد سدها در سال ۱۹۹۶ به وسیله چین شیانگ و تسو شیو [۴] گزارش گردید. آنها با استفاده از رکوردهای زمین لرزه‌های ثبت شده در روی سد قوسی فی جویی به ارتفاع ۱۲۲/۵ متر و طول ۵۱۰ متر در تایوان که در زمان وقوع پنج زلزله بین سال‌های ۱۹۹۲ و ۱۹۹۴ به دست آمده بود و همچنین با استفاده از رکوردهای به دست آمده از ارتعاشات محیطی که در ۱۴ نقطه به فاصله تقریبی ۲۰ متر انجام گرفت، اقدام به تعیین مشخصات دینامیکی سد نمودند. رفتار خطی و غیرخطی یک سازه بتن آرمه هفت طبقه با استفاده از مدل‌های خطی ARX و ARMAX و مدل غیرخطی روش بازگشتی AFMM در سال ۱۹۹۶ [۱۲] برای اولین بار انتشار یافت. در مورد سدها تنها مطالعه‌ای که رفتار غیرخطی سد را مورد بررسی قرار داده است، تحقیقی است که توسط داویدسون در نیوزلند انجام گردیده است.

۲- توصیف سد پاکویما

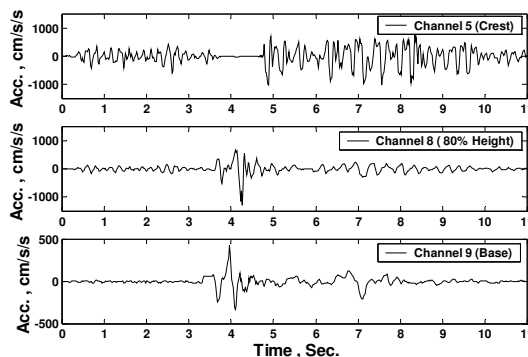
سد پاکویما هنگامی که در سال ۱۹۲۸ ساخته شد، با ارتفاع ۱۱۳ متر بلندترین سد قوسی ایالات متحده امریکا به حساب می‌آمد. این سد که یک دره بسیار تنگ ساخته شده است، دارای طول تاجی برابر با ۱۸۰ متر می‌باشد. پهنای قوس در وسط سد از ۳/۲ متر در تاج تا ۳۰ متر در پایه سد متغیر است. سد دو رویداد بزرگ زمین‌لرزه، زمین‌لرزه سن فرناندو در سال ۱۹۷۱ و زمین‌لرزه نورتریج در سال ۱۹۹۴ را تجربه کرده است. در زمین لرزه نورتریج فاصله رو مرکز از سد پاکویما برابر با ۱۹ کیلومتر بود. تنش‌های بسیار بالایی در سد به وجود آمد و نشانه اصلی برای این تنش‌های بزرگ، ایجاد ترک و جابجایی ماندگار

سد غیرخطی است)، از روش تعیین مشخصات بازگشتی برای همه حالت‌ها استفاده گردید تا آن که تغییرات زمانی پارامترها به گونه‌ای مناسب ردیابی گردد. ما برای تعیین مشخصات دینامیکی سد پاکویما، تنها از پنج رکورد یعنی رکوردهای دریافت شده از کانال‌های ۲، ۱۵، ۱۲، ۹ و از رکورد درجهت جریان به دست آمده در پایین دست و میدان آزاد سد استفاده کرده‌ایم. از آنجایی که ما مدل‌های ورودی تنها و خروجی تنها را در نظر گرفته‌ایم، برای همه حالت‌ها رکورد کانال ۹ و رکورد پایین دست به عنوان ورودی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، درحالی که از رکوردهای مربوط به کانال‌های ۲، ۱۲ و ۱۵ به عنوان خروجی استفاده شده است. با مقایسه نمودن نتایج برای حالت‌هایی که در آنها رکورد مربوط به کانال ۹ و یا رکورد پایین دست ورودی در نظر گرفته شود، اثرات اندرکنش سد - پی سنگی بر روی فرکانس‌های تشدید سد مورد بررسی قرار گرفته است. سرانجام ما برای تعیین مشخصات دینامیکی سد در مجموع از ده مدل ورودی - خروجی تغییرات زمانی پارامترهای مربوط به مدل محاسبه شده‌اند و در شکل‌های (۵) و (۶) به ترتیب برای مدل‌های رکورد کانال ۹ - رکورد کانال ۱۲ و رکورد پایین دست - رکورد کانال ۱۲ نشان داده شده‌اند. تغییرات زمانی در پارامترهای مدل‌های نشان داده شده در شکل‌های (۵) و (۶)، سه ناحیه مشخصی را به طور آشکار نشان می‌دهند. ناحیه اول مربوط به زمان به زمان صفر و ۳/۵ ثانیه می‌باشد، که نشانگر رفتار خطی سازه اولیه می‌باشد. ناحیه دوم به زمان ۳/۵ تا ۵ ثانیه مربوط می‌شود و این زمانی را شامل می‌شود که سد دچار آسیب سازه‌ای می‌شود.

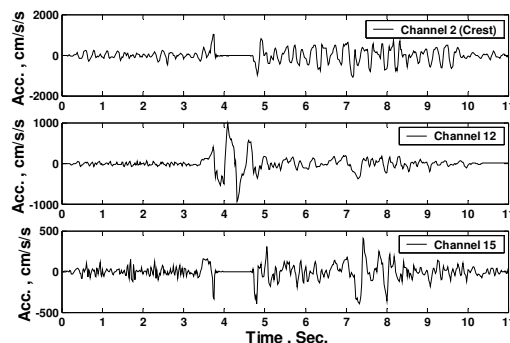


شکل ۵- تغییرات زمانی پارامترهای مدل برای کانال ۹- کانال ۱۲

شکل (۳) شتاب شعاعی سد در سه تراز متفاوت، پایه، ۸۰ درصد بلندی سد و تاج سد را نشان می‌دهد. رکوردهای شتابی که بخشی از آنها پردازش شده است و اصلاح نیز نگردیده‌اند، در جهت جریان برای کانال‌های ۱۲، ۱۵ و ۲ که در تعیین مشخصات دینامیکی سد مورد استفاده قرار گرفته‌اند، در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۳- شتاب نگاشت‌های ثبت شده در کانال ۹، ۸ و ۵

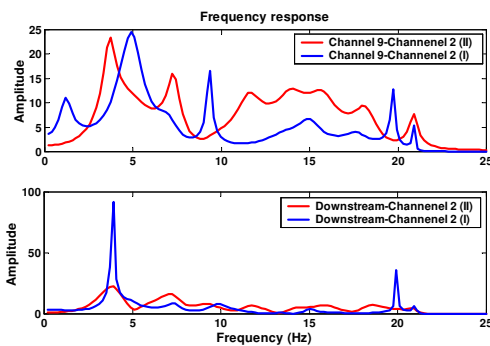


شکل ۴- شتاب نگاشت‌های اصلاح نشده برای کانال‌های ۱۲، ۱۵ و ۲

۳- تعیین مشخصات سد پاکویما به روش بازگشتی

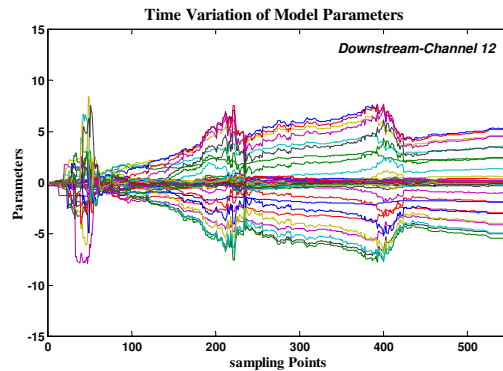
در حالت‌هایی که در زمان اثر تحریک قوی زمین لرزه، سازه ممکن است به صورت سیستم غیرخطی رفتار کند لازم است برای تعیین تغییرات زمانی پارامترهای مودی، از روش‌های تعیین مشخصات بازگشتی استفاده شود. این روش در نرم‌افزار MATLAB به کار بسته شده است و ما از این روش‌ها برای تعیین مشخصات بازگشتی استفاده کرده‌ایم. از آنجایی که معلوم بود سد در زمان زمین‌لرزه آسیب دیده است (یعنی پاسخ

شکل (۸) تابع پاسخ فرکانسی برای قسمت اول و قسمت دوم رکورد کانال ۹ - رکورد کانال ۲، و رکورد پایین دست - رکورد کانال ۲ را نشان می‌دهد. ما تابع‌های پاسخ فرکانسی را برای قسمت‌های اول و دوم رکوردها با همدیگر مقایسه کرده‌ایم. به دلیل ترک خوردگی و آسیبی که سد متحمل شده است، فرکانس تشدید برای سد از 0.2 ثانیه ($4/9$ هرتز) به 0.25 ثانیه ($3/9$ هرتز) تغییر کرده است.



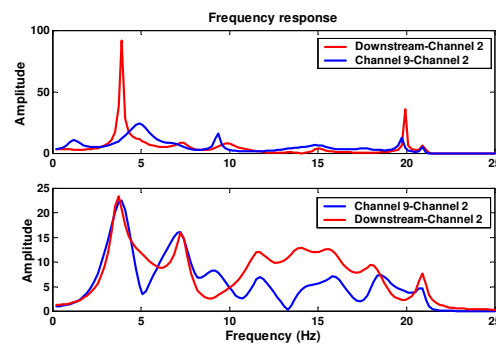
شکل ۸- تابع پاسخ فرکانسی نشان دهنده رفتار غیرخطی سد برای کانال ۹ - کانال ۲ (بالا)، پایین دست - کانال ۲ (پایین)

شکل‌های (۹) تا (۱۸) تابع‌های پاسخ فرکانسی برای همه مدل‌های مورد استفاده قرار گرفته در تعیین مشخصات دینامیکی را نشان می‌دهد. این شکل‌ها تغییر در فرکانس‌های تشدید برای همه مدل‌ها را در زمان‌های گوناگون، یعنی زمانی که سد به صورت خطی رفتار می‌کند و زمانی که سد رفتار غیرخطی از خود نشان می‌دهد، بیان می‌کنند. اگر چه تعیین پارامترهای مودی سد پاکویما با استفاده از رکوردهای زمین‌لرزه نورتریج کار دشواری است، زیرا که حرکت ورودی پیچیده است و عدم قطعیت در آنها را داریم و علاوه بر همه این‌ها، رکوردهای ثبت شده در ساختگاه کامل نمی‌باشند، زیرا همان گونه که پیشتر اشاره شد شتاب نگارها نتوانستند شتاب‌های بزرگ را ثبت کنند، با این حال ما تلاش نموده‌ایم تا پنج فرکانس تشدید اولیه سد را به دست آوریم و با نتایج به دست آمده از مطالعات پیشین به ویژه نتایج حاصل از ارتعاشات اجباری مقایسه نماییم. به عنوان مثال نتایج به دست آمده برای فرکانس‌های تشدید از مدل رکورد کانال ۹ - رکورد کانال ۱۲، برای مدل رفتار خطی به ترتیب برابر 0.22 ثانیه ($4/5$ هرتز)، 0.152 ثانیه ($6/56$ هرتز)، 0.137 ثانیه ($7/31$ هرتز)، 0.10 ثانیه ($9/85$ هرتز)، 0.086

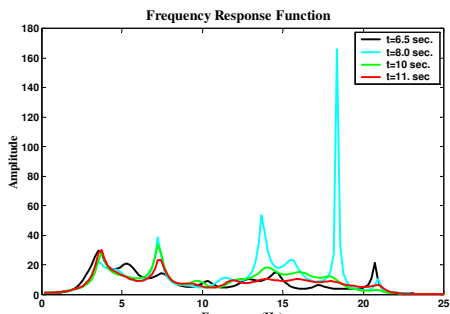


شکل ۶- تغییرات زمانی پارامترهای مدل برای کانال پایین دست - کانال ۱۲

این ناحیه به طور کامل در منحنی حرکت ورودی با پالس‌های بزرگی از بقیه قسمت‌ها مشخص می‌باشد. ناحیه پایانی به زمان ۵ ثانیه و بعد از آن مربوط می‌گردد، که نشانگر ارتعاش سازه آسیب دیده است. شکل (۷) تابع پاسخ فرکانسی برآورد شده برای قسمت ۱ رکورد کانال ۹ - رکورد کانال ۲ و رکورد پایین دست - رکورد کانال ۲، قسمت ۲ رکورد کانال ۹ - رکورد کانال ۲ و رکورد پایین دست - رکورد کانال ۲ را نشان می‌دهد. همچنان که از قسمت بالای شکل (۷) برای قسمت اول رکوردها به طور آشکار می‌توان دید، هنگامی که سازه به صورت یک سیستم خطی رفتار می‌کند، ($4/9$ هرتز) به 0.25 ثانیه ($3/9$ هرتز) تغییر کرده است.

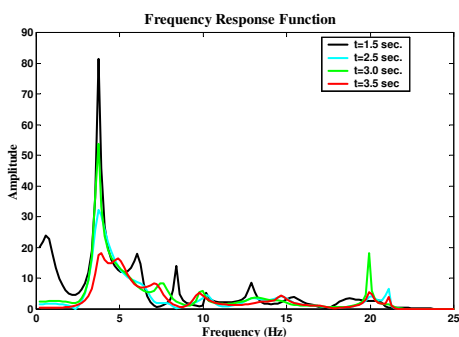


شکل ۷- تابع پاسخ فرکانسی نشان دهنده اثرات اندرکنش سد - پی برای قسمت یک کانال ۹ - کانال ۲ و پایین دست - کانال ۲ (بالا)، قسمت دوم کانال ۹ - کانال ۲ و پایین دست - کانال ۲ (پایین)



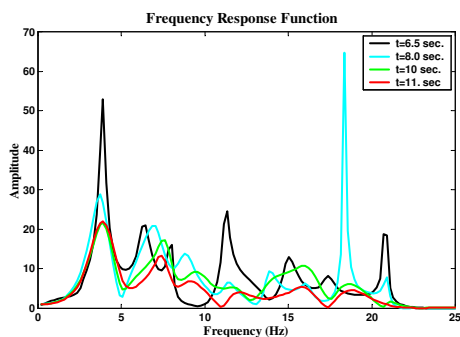
شکل ۱۲- تابع پاسخ فرکانسی در زمان ۱۱ و ۱۰، ۸، ۶/۵ و ۱۱ ثانیه

برای کانال ۹ - کانال ۲



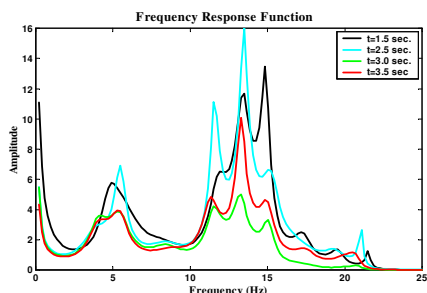
شکل ۱۳- تابع پاسخ فرکانسی در زمان ۳/۵ و ۳، ۲/۵ و ۱/۵ ثانیه

ثانیه برای کانال پایین دست - کانال ۲



شکل ۱۴- تابع پاسخ فرکانسی در زمان ۱۱ و ۸، ۱۰، ۶/۵ و ۱۱ ثانیه

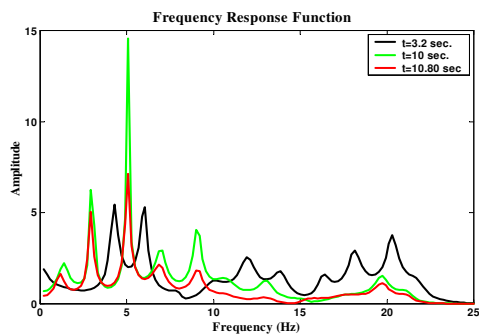
برای کانال پایین دست - کانال ۲



شکل ۱۵- تابع پاسخ فرکانسی در زمان ۳/۵ و ۳، ۲/۵ و ۱/۵ ثانیه

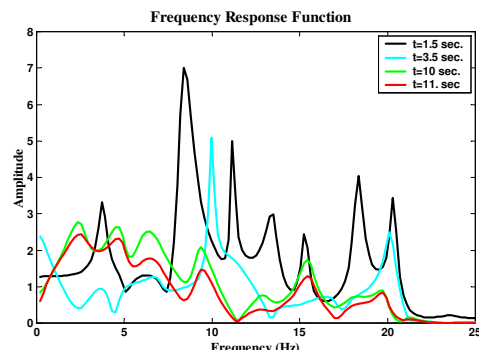
ثانیه برای کانال ۹ - کانال ۱۵

ثانیه (۱۱/۶۱ هرتز) می‌باشد. در حالی که نتایج برای مرحله رفتار غیر خطی به ترتیب برابر ۰/۳۳۸ ثانیه (۲/۹۶ هرتز)، ۰/۱۹۱ ثانیه (۵/۲۳ هرتز)، ۰/۱۳۶ ثانیه (۷/۳۷ هرتز)، ۰/۱۰۶ ثانیه (۹/۴۴ هرتز)، ۰/۰۹ ثانیه (۱۰/۹۸ هرتز) به دست آمد.



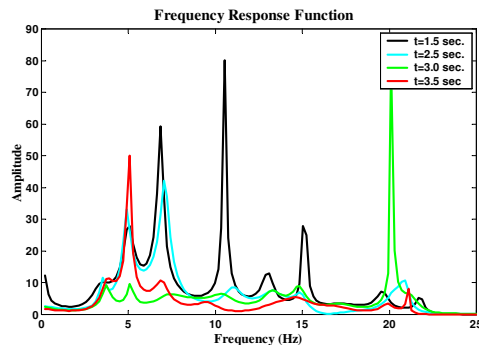
شکل ۹- تابع پاسخ فرکانسی در زمان ۱۱ و ۳، ۱۰/۵، ۱/۵ و ۱۱ ثانیه

برای کانال پایین دست - کانال ۱۲



شکل ۱۰- تابع پاسخ فرکانسی در زمان ۱۱ و ۳، ۱۰/۵، ۱/۵ و ۱۱ ثانیه

برای کانال پایین دست - کانال ۱۲



شکل ۱۱- تابع پاسخ فرکانسی در زمان ۳/۵ و ۳، ۲، ۱/۵ و ۱۱ ثانیه

برای کانال ۹ - کانال ۲

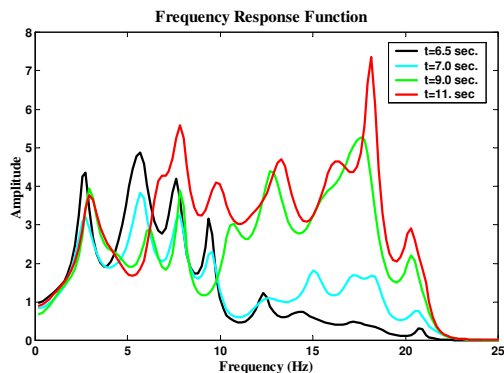
۴- نتیجه‌گیری

در این بررسی نشان داده شد که برای تعیین مشخصات دینامیکی سدهای قوسی، به دلیل وجود حرکت غیر یکنواخت در تکیه‌گاه‌های کناری سد، نباید از ورودی یکنواخت استفاده نمود.

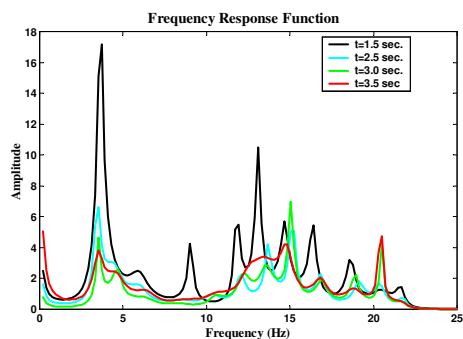
کاربرد روش تعیین مشخصات دینامیکی بازگشتی برای پیدا نمودن پارامترهای مودی تابع زمان بسیار مفید می‌باشند. اثر اندرکنش سد- پی سنگی بر روی فرکانس‌های تشدید سیستم به شکل آشکاری مشخص گردیده است. تغییرات زمانی فرکانس‌های تشدید سد در اثر ترک خوردگی و آسیب‌هایی سد متحمل گردیده است در زمان‌های گوناگون ردیابی شده است.

مراجع

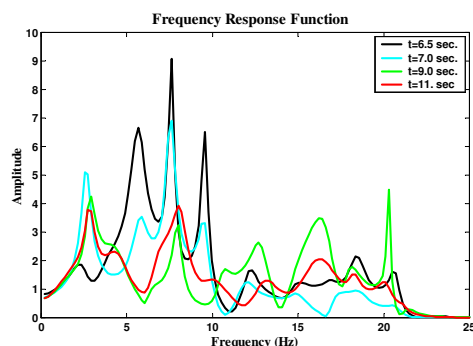
- [1] E. Safak. 'Adaptive modelling, identification, and control of dynamic system, I: theory', J. eng. mec. ASCE 115, 2386-2405 1989).
- [2] E. Safak. 'Adaptive modelling, identification, and control of dynamic system, II: application', J. eng. mec. ASCE 115, 2406-2426 1989).
- [3] E. Safak and M. Celebi, 'Seismic response of Transamerica building, II: 'system identification', J. struct. eng. ASCE 117, 2405-2425 (1991).
- [4] Chin-Hsiung, L., Tsu-Shiu W. 1996. Identification of Fei-Tsui arch dam from both ambient and seismic response data. Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 15, PP.465 – 483.



شکل ۱۶- تابع پاسخ فرکانسی در زمان ۶/۵، ۷، ۹ و ۱۱ ثانیه برای کانال ۹ - کانال ۱۵



شکل ۱۷- تابع پاسخ فرکانسی در زمان ۱/۵، ۲/۵، ۳ و ۳/۵ ثانیه برای کانال پایین دست - کانال ۱۵



شکل ۱۸- تابع پاسخ فرکانسی در زمان ۶/۵، ۷، ۹ و ۱۱ ثانیه برای کانال پایین دست - کانال ۱۵

Recursive identification method; Non-uniform ground motion.