

ارزیابی ویژگی های دینامیکی سد بتنی قوسی با استفاده از آزمایش ارتعاش اجباری

رضا تاری نژادⁱ؛ محمدتقی احمدیⁱⁱ؛ محمودرضا میوه چیⁱⁱⁱ؛ محمد کاظم احمدی^{iv}

چکیده

در این تحقیق، خصوصیات دینامیکی سد شهید رجایی، ساری به روش آزمایش ارتعاش اجباری و تحلیل مدل المان محدود مقایسه شده‌اند. آزمایش ارتعاش اجباری روی سد مذکور با دو واحد لرزاننده که در طرفین محور تاج سد قرار گرفتند، انجام شد لرزاننده‌ها یکبار با فاز موافق و بار دیگر با فاز مخالف بکار گرفته شدند. رکوردهای ثبت شده به کمک نرم‌افزار MATLAB5.3 وبا استفاده از طیف‌های خودقدرت، دیگر قدرت و همبستگی پردازش و خصوصیات دینامیکی، برای ۹ مود ارتعاش شناسایی و محاسبه شدند. مدل المان محدود سد با استفاده از مدول های بهینه الاستیسیته سد و سنگ به دست آمده از نتایج آزمایش ارتعاش محیطی، تحلیل شد. با استفاده از روش کار ویژه‌ای که در این تحقیق پیشنهاد شده انطباق بین نتایج مدل المان محدود سد و آزمایش برای ۸ مود میانی به دست آمده از آزمایش انجام شد.

کلمات کلیدی

آزمایش ارتعاش اجباری، سد بتنی قوسی، خصوصیات دینامیکی، مدل المان محدود

Evaluation of Dynamic Properties of Concrete Arch Dam Using Forced Vibration Test

R. Tarinejad; M.T. Ahmadi; M.R. Mivehchi; M.K. Ahmadi

ABSTRACT

Dynamic properties of Shahid Rajaei Concrete Arch Dam were identified by forced vibration tests and then compared with FE model results. Forced vibration tests on the dam were performed with two exciter units on the dam crest for alternative conditions of in-phase and out-of-phase cases. Test records were processed using PSD, CSD and Coherence Spectra through MATLAB software. Consistent conformity between experimental and computational 8 middle modes of the Dam-Reservoir-Foundation system was achieved by the particular algorithm proposed in this research.

KEYWORDS

Forced Vibration Test, Concrete Arch Dam, Dynamic Properties, Finite Element Model

ⁱ دانشجوی دکتری عمران؛ دانشکده فنی و مهندسی؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ tari_r@modares.ac.ir

ⁱⁱ استاد بخش عمران؛ دانشکده فنی و مهندسی؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ mahmadi@modares.ac.ir

ⁱⁱⁱ همکار ارشد شرکت مهندسین مشاور مهتاب قدس

^{iv} هیات علمی؛ دانشکده مهندسی پزشکی؛ واحد علوم و تحقیقات؛ دانشگاه آزاد اسلامی

ریاضی سدها با نتایج آزمایش‌ها، به سرپرستی کلاف منتشر شد [۱]. در این تحقیقات، رفتار ارتعاشی دو سد مذکور تحت ارتعاشات آزمایش‌ها اجباری و محیطی، اندازه‌گیری شده و خصوصیات دینامیکی حاصل از این آزمایش‌ها با خصوصیات دینامیکی حاصل از مدل ریاضی آنها مقایسه شده، و درباره فرض اعمال شده بر روی مدل ریاضی نیز اصلاحات و بررسی‌هایی به عمل آمد. در سال ۱۹۸۶ سد Monticello به ارتفاع ۹۳ متر و طول تاج ۳۱۹ متر تحت آزمایش‌ها دینامیکی اجباری قرار گرفت. طی این آزمایش‌ها فرکانس ۶ مود اول سد، همراه با میرایی‌های متناظر هر مود شناسایی و محاسبه گردید [۱]. در سال ۱۹۸۸، جان هال طی انتشار مقاله‌ای آزمایش‌های دینامیکی انجام شده تا همان سال را بر روی سدها را به طور کلی مرور کرد [۱۴]. از نمونه‌های دیگر انجام آزمایش‌ها دینامیکی بر روی سدهای بتنی، می‌توان به آزمایش‌ها انجام شده بر روی سدهای Santa Anita در سال ۱۹۷۱، Morrow Point در سال ۱۹۷۲، Pine Flat در سال ۱۹۷۱، Crystal Spring در سال ۱۹۷۹، Norsjo [۳] در سال ۱۹۹۸، Fei-Tsui [۴] واقع در تایوان در سال ۲۰۰۰، Contra واقع در سوئیس، Lindoso، Outared3 [۵] و چندین نمونه دیگر اشاره کرد [۶]- [۱۳]. در این تحقیق، اولین کار مشابه در ایران و با روش پردازش طیف‌های قدرت به نحو اقتصادی و با وسایل موجود با تغییرات مکانیکی ویژه؛ که در دستگاه‌های لرزاننده داده شد، صورت گرفته است که گشایشی برای کارهایی از این دست برای کنترل سلامت سازه‌های استراتژیک می‌باشد. کمبود امکانات، شامل لرزاننده‌های به اندازه کافی بزرگ در تعداد لازم، حسگرهای متعدد ثبت ارتعاشات به ابداع روش‌های جالبی برای اندازه‌گیری منجر شد.

۲- آزمایش ارتعاش اجباری بر سد شهید رجایی

آزمایش‌های ارتعاش اجباری موضوع این تحقیق برای اولین بار در ایران با همکاری پژوهشگاه بین‌المللی زلزله برای به دست آوردن خصوصیات دینامیکی سد بتنی قوسی مدرن شهید رجایی (واقع در جنوب شهر ساری) در آذر ماه سال ۱۳۷۹ انجام شد. مشخصات این سد در جدول (۱) آورده شده است:

خواص دینامیکی سازه‌ها شامل پریودهای طبیعی ارتعاش، شکل مودهای ارتعاش و درصد میرایی در ردیف مهم ترین عواملی هستند که نحوه پاسخ سازه و عکس‌العمل آن را در برابر زلزله مشخص می‌کنند. مدل‌های ریاضی و تئوری؛ که برای تعیین پارامترهای فوق استفاده می‌شود؛ غالباً فرضیات ساده‌کننده دارد و اثرات اجزای غیر سازه‌ای را در نظر نمی‌گیرند و علاوه بر آن، درصد میرایی در سازه‌ها نوع مصالح مصرفی و روش‌های ساخت وابسته است و فقط به وسیله آزمایش قابل اندازه‌گیری می‌باشد. بنابراین انجام آزمایش‌های لرزه‌ای بر روی سازه‌ها مطمئن‌ترین روش برای تعیین خواص دینامیکی آنهاست. آزمایش‌های ارتعاش اجباری معمولاً اطلاعات کامل‌تر و دقیق‌تری از خواص دینامیکی سازه‌ها می‌دهند که پیچیدگی و هزینه اینگونه آزمایش‌ها را توجیه می‌کند. عمومی‌ترین آزمایش ارتعاش اجباری شامل تحریک سینوسی پایا است. این آزمایش به وسیله اعمال یک نیروی سینوسی در یک جهت سازه انجام می‌گیرد. برای یک نیرو با فرکانس خاص، حرکات ناشی از اعمال نیرو در سازه اندازه‌گیری و سپس فرکانس تغییر داده شده و اندازه‌گیری تکرار می‌شود (جاروب فرکانس) و به این ترتیب، تمام منحنی‌های پاسخ-فرکانس به دست می‌آیند. با استفاده از این منحنی مقادیر دقیق فرکانس طبیعی سازه و میرایی آن را می‌توان به دست آورد.

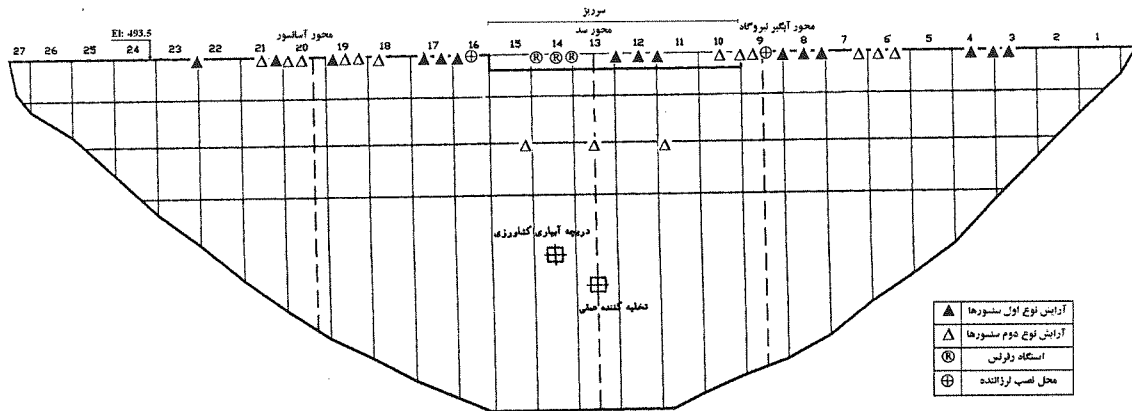
هاتانو و تاکاهاشی شاید اولین کسانی هستند که در سال ۱۹۵۷ برای محاسبه زمان تناوب سازه‌ها تکنیک خود همبستگی را در بسط داده‌های تجربی؛ که خاصیت نامنظم دارند و از عوامل طبیعی ناشی می‌شوند؛ برای سازه‌های با ابعاد واقعی به کاربرند. آنها از این روش و با استفاده از داده‌هایی که در تاج یک سد هنگام زلزله جمع‌آوری کرده بودند توانستند زمان تناوب اصلی و ضریب میرایی آن را به دست آورند [۱]. کار مشابهی در سال ۱۹۵۹ روی سد دیگری به وسیله تاکاهاشی و همکاران وی صورت گرفت. در سال ۱۹۸۲ دونگار و جری خواص دینامیکی سد قوسی اموسون در سوئیس را به روش آزمایش‌های ارتعاش محیطی و اجباری به دست آوردند. در این آزمایش‌ها، برای به دست آوردن شکل مودها از طیف دیگر قدرت و برای تعیین قابل اعتماد بودن نتایج تحلیل داده‌ها از طیف همبستگی استفاده شده بود [۱]. در سال ۱۹۸۴ گزارشی از طرف مرکز تحقیقات زلزله دانشگاه برکلی درباره آزمایش‌های دینامیکی انجام شده بر روی سدهای قوسی Quanshui و Xiang hong در چین و مقایسه نتایج تحلیل مدل

آزمایش

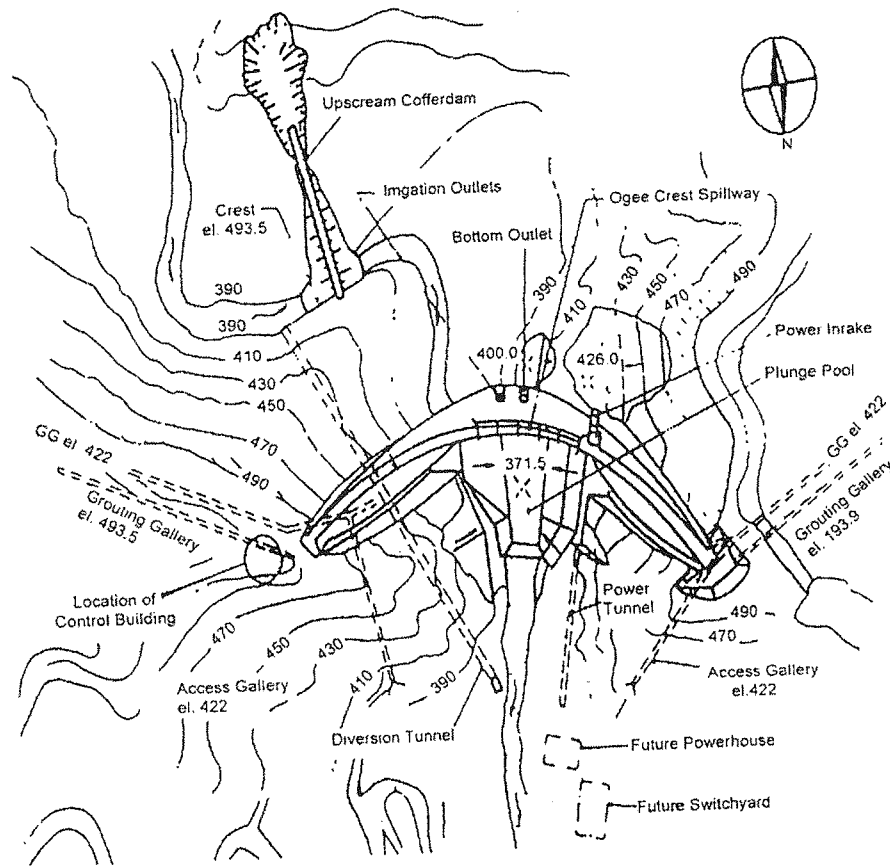
بتنی دو قوسی	نوع سد
۴۲۷ متر	طول تاج
۱۳۸ متر	ارتفاع از تراز پی
۲۷ متر	ضخامت در پی
۷ متر	ضخامت در تاج
۱۹۱/۵ میلیون مترمکعب	حجم مخزن
۴۷۲ متر	تراز مخزن از سطح دریا

وسایل و لوازم مورد نیاز و استفاده شده در انجام آزمایش در ادامه شرح داده می‌شود. دو واحد دستگاه لرزاننده، شامل دستگاه لرزاننده تک موتور با ماکزیم نیروی تحریک ۳ تن و نیز دستگاه لرزاننده دو موتور با ماکزیم نیروی تحریک ۲ تن؛ که تنها دستگاه‌های موجود در کشور بوده‌اند، بکارگرفته شدند. این دو سری دستگاه‌ها ناهم‌ساز و از دو سازنده مختلف بوده و عمدتاً برای تست سازه‌های کوچک نظیر ساختمان‌ها بکار می‌روند. تغییرات الکترونیکی و مکانیکی زیادی که امکان بهره‌گیری هم‌فاز و در فاز مخالف را فراهم کند و حداکثر نیروی آنها را که برای سازه سد قابل توجه باشد، تولید کند روی این دستگاه‌ها انجام شد. سایر وسایل، شامل واحد ضبط ارتعاشات با شتاب سنسورهای از نوع FBA-11 و سرعت سنسور از نوع SS-1 (استفاده از دو نوع مختلف به دلیل کمبود تعداد هم‌ساز بود) دستگاه ثبتات SSR-1 (ساخت کارخانه Kinematics) و کامپیوتر قابل حمل بوده است. نحوه آرایش حسگرها و نیز محل نصب لرزاننده‌ها در تاج سد با توجه به تحلیل‌های اولیه المان محدود سد و همراه با استفاده از شکل مودهای ارتعاشی حاصل از آن؛ که در پلان تاج سد رسم شده بود مشخص شد. لرزاننده‌ها در نقاطی از تاج سد استقرار یافتند تا بیشترین دامنه جابجایی مربوط به مودهای ارتعاشی مختلف حاصل از نتایج المان محدود، در آن نقاط واقع شوند. در ضمن باید محدودیت‌های دیگر در روی تاج، مثل پل‌های سرریز آزاد را نیز در نظر گرفت

که به دلیل عدم یکپارچگی کامل پلهای روی سرریز آزاد با بدنه سد در صورت نصب دستگاه‌ها بر روی پل با مشکل انتقال نیروی دستگاه به بدنه سد مواجه خواهیم بود و لذا نباید لرزاننده‌ها در چنین نقاطی نصب شوند. در مورد آرایش حسگرها به طور کلی هر چقدر تراکم حسگرهای ثبت بیشتر باشد به همان اندازه شکل مودهای حاصل از دقت بالایی برخوردار خواهند بود؛ ولی به همان نسبت هزینه انجام آزمایش و پردازش رکوردها افزایش خواهد یافت. برای این منظور نیز باید یک حالت آرایش بهینه را بکاربرد که بهترین شیوه آن استفاده از نتایج مدل المان محدود است. به این ترتیب، شکل مودهای حاصل از تحلیل‌های مدل المان محدود سد روی پلان تاج سد رسم شده و نقاط تغییرجهت‌های شکل مودها علامت گذاری می‌شوند و با توجه به این نکته که در حد امکان، در طرفین هر یک از نقاط عمده تغییرجهت‌های شکل مودها علامت حسگر نصب شود آرایش حسگرها تعیین می‌گردد. علاوه بر این، لازم است حسگرها تا حد ممکن دور از درزهای انقباض نصب شوند تا از حرکت ویژه احتمالی درزها مصون باشند. در این تحقیق به دلیل محدودیت در تعداد حسگرهای موجود، آزمایش برای دو آرایش مختلف حسگرها تکرار شد و یکی از ایستگاه‌ها به عنوان مبنا در هر دو آرایش استفاده شده و ثابت سر جای خود باقی ماند. در این آزمایش‌ها جمعاً ۱۸ حسگر شامل ۹ عدد حسگر شتاب سنسور و ۹ عدد حسگر سرعت سنسور بودند، بکار گرفته شدند. شکل (۱) موقعیت حسگرهای نصب شده در تاج و گالری و شکل (۲) نمایی کلی از سد را نشان می‌دهد. دو سری آزمایش برای هر کدام از آرایش حسگرها انجام گرفت، به این صورت که یکبار لرزاننده‌ها به صورت هم‌فاز و بار دیگر به صورت ضد‌فاز به کاربرده شدند. این کار برای ایجاد شرایط مناسب برای تحریک مودهای متقارن و نامتقارن سد است [۱].



شکل (۱): موقعیت حسگرهای نصب شده در تاج و گالری برای دو نوع آرایش استفاده شده



شکل (۲): نمایی کلی از سد شهید رجایی و ساختگاه آن

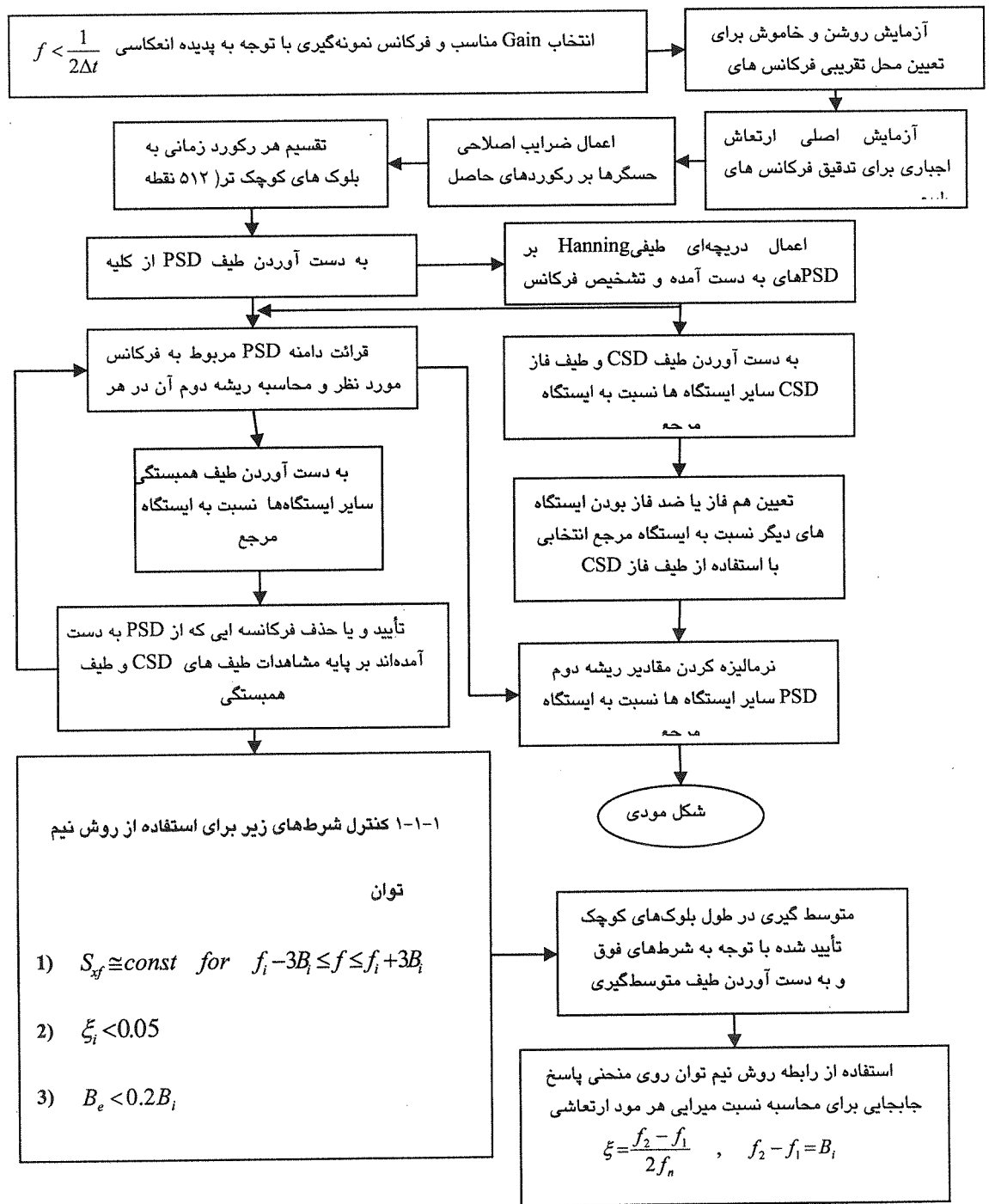
۳- مراحل محاسبه خصوصیات دینامیکی سد

بعد از تعیین محل مناسب ایستگاهها و تعیین ایستگاه مرجع، روش تعیین فرکانسهای طبیعی، شکل مودها و میراییهای متناظر هر مود با استفاده از نتایج آزمایش در شکل (۳) آورده شده است [۱]- [۲]. در این آزمایش به علت پدیده انعکاس فرکانسی و با توجه به این نکته که حداکثر فرکانس انجام آزمایش از ۲۰ هرتز کمتر می باشد نرخ نمونه گیری (SPS) ۸۳/۳۳ نمونه در هر ثانیه مناسب تشخیص داده شد. برای انتخاب Gain مناسب، آزمایشی با مقادیر مختلف انجام پذیرفت و در نهایت $Gain=10$ برای ثبت داده انتخاب شد. برای پیدا کردن محدوده های مناسب جاروب فرکانسی آزمایشهای روشن و خاموش با بالاترین فرکانس مودی موردنظر (۱۴ هرتز) برای دو حالت هم فاز و فاز مخالف به طور جداگانه انجام شدند. دادههای حاصل از انجام این آزمایشها پردازش شد. و محدوده تقریبی فرکانسهای تشدید به دست آمد. بعد از مشخص شدن پارامترهای ذکر شده، آزمایشهای اصلی ارتعاش اجباری به منظور تدقیق فرکانسهای طبیعی انجام شد. ذکر این نکته لازم است که تشخیص مودهای با فرکانس خیلی پایین از طریق آزمایش ارتعاش اجباری به دلیل کوچک بودن نیروی لرزندهها در این نوع فرکانسها بسیار مشکل است. از این رو برای این نوع فرکانسها بهتر است از آزمایش ارتعاش محیطی (که قبلاً انجام شده بود) استفاده شود. اعمال ضرایب اصلاحی بر دادههای ثبت شده با استفاده از نرم افزار PITSA [۱۵] و با توجه به مشخصات هر حسگر در شناسنامه آن انجام گرفت. پردازش دادهها به کمک جعبه ابزار پردازش سیگنال^۱ نرم افزار MATLAB و با استفاده از طیف های خودقدرت^۲ (PSD)، دیگر قدرت^۲ (CSD)، فاز^۳ و همبستگی^۴ انجام شد. مقادیر طیف دیگر قدرت مختلط هستند و با رسم دامنه در برابر فرکانس می توان فرکانسهای غالب و با رسم فاز در برابر فرکانس، هم فاز یا ضد فاز بودن دو فرایند تصادفی را بررسی کرد. طیف همبستگی وسیله ای مناسب برای تشخیص قابل اعتماد بودن نتایج تحلیل با طیفهای ذکر شده است. مقدار این طیف همیشه بین ۰ و ۱ و غیر مختلط است [۱۶]. در شکل (۴) یک نمونه از دادههای ثبت شده و طیفهای PSD، CSD، فاز و همبستگی به دست آمده نشان داده شده است.

۴- تحلیل المان محدود سد

تحلیل مدل المان محدود سد برای به دست آوردن مشخصات دینامیکی آن با استفاده از نرم افزار ANSYS انجام

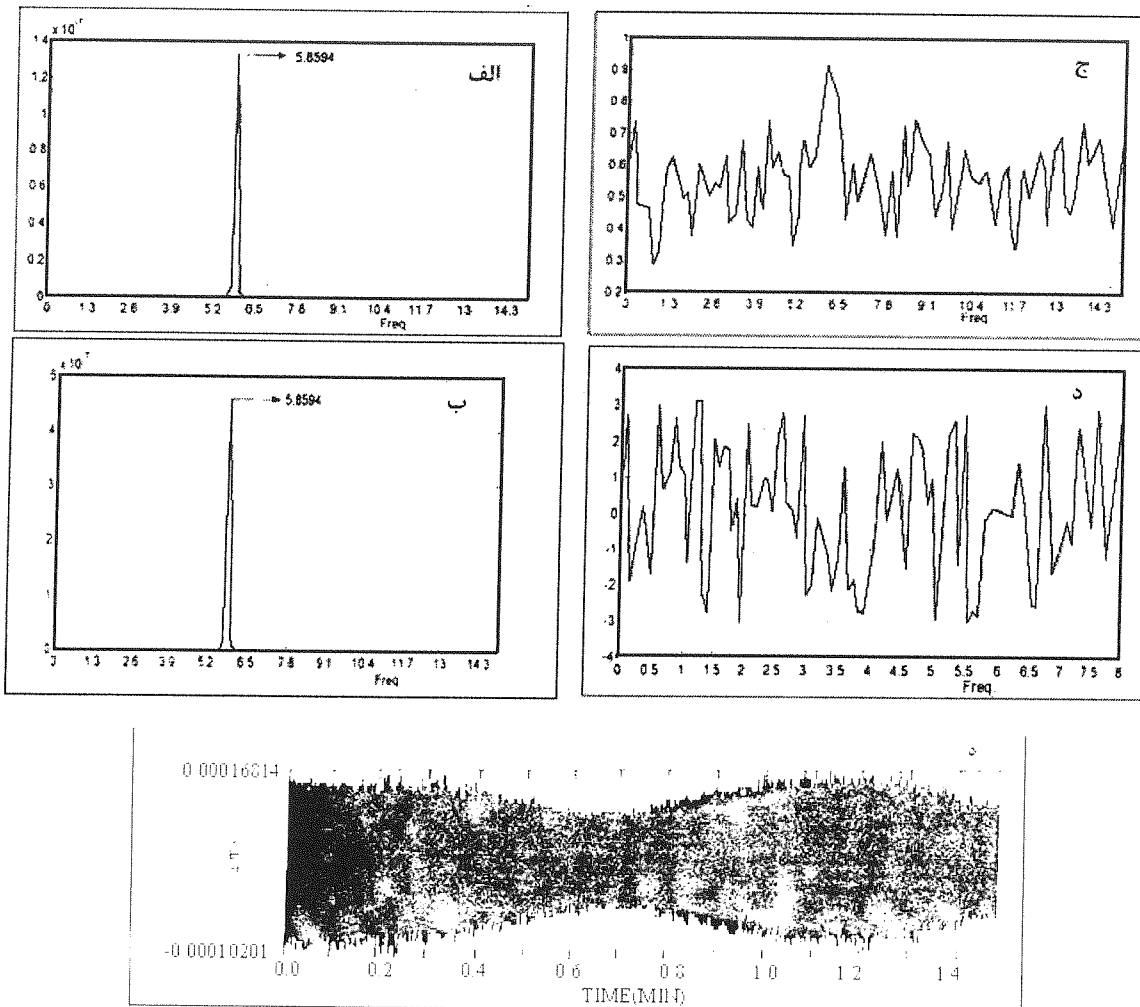
گرفت. المانی که در این نرم افزار برای مدل کردن محیط سد و پی استفاده شد، المان ۸ گرهی جامد (Solid45) بود. محدوده مدل شده در پی با شعاع امتداد در حدود ۲ برابر ارتفاع سد منظور شد. در مش بندی این سد از ۵۶۰۹ گره اصلی و ۹۸۳ حجم و برای محیط مخزن از المان آب تراکم پذیر (Fluid30) استفاده شده است. این المان ۸ گره دازد و درجه آزادی انتخابی برای همه گرهها، فشار است. برای مش بندی محیط مخزن از این نوع المان به طول حداکثر ۳۵ متر (برای ایجاد امکان انتقال موج) استفاده شده و طول مخزن نیز برابر ۳۰۰ متر فرض شده است که تقریباً ۲/۵ برابر ارتفاع سد است. برای تحلیل سد از پارامترهای بهینه شده سد، که نتایج تحلیل های المان محدود و آزمایش ارتعاش محیطی سد بودند و قبلاً به دست آمده بودند، استفاده شد [۱۷]. این پارامترها عبارتند از $E_c=28GPa$ و $E_f=11GPa$ که E_c مدول الاستیسیته بتن و E_f مدول الاستیسیته سنگ است. استفاده از مقادیر طراحی پارامترهای فوق با توجه به عدم قطعیت های ناشی از ساخت و محیط پی توصیه نمی شود. اگرچه اطلاعات آزمایش ارتعاش محیطی موجود نباشد، با این حال، امکان انجام فرایند بهینه سازی مشخصات ماده در مدل ریاضی براساس تطبیق مشخصات دینامیکی مدل ریاضی با مدل تجربی وجود دارد. وزن مخصوص بتن، سنگ پی و آب به ترتیب برابر ۲۴، ۲۴ و ۱۰ کیلونیوتن بر مترمکعب و سرعت صوت در آب برابر ۱۴۴۰ متر بر ثانیه فرض شده است. نتایج تحلیل مدل المان محدود سد با پارامترهای بهینه شده فوق با نتایج آزمایش ارتعاش اجباری سد مقایسه شد که در ادامه به آن خواهیم پرداخت.



PSD: S_{xf} ارتعاشات تغییر مکان اجباری B_i : تفاضل فرکانسهای چپ و راست f_2, f_1 مربوط به تراز نیم توان در فرکانس طبیعی f_i

ξ_i : نسبت میرایی برای فرکانس طبیعی مورد نظر B_e : رزولوشن فرکانسی که برابر است با $\frac{1}{T} = \frac{1}{N\Delta t}$ که N تعداد نقاط نمونه برداری شده و Δt فاصله زمانی بین این نقاط در هر بلوک

شکل (۳): نمودار جریانی تعیین فرکانس‌ها، شکل مودهای ارتعاشی و میرایی‌های متناظر بر اساس آزمایش ارتعاش اجباری



شکل (۴): نمونه‌هایی از (الف). طیف PSD. (ب) طیف CSD. (ج) طیف همبستگی. (د) طیف فاز CSD. (د) رکورد ثبت شده

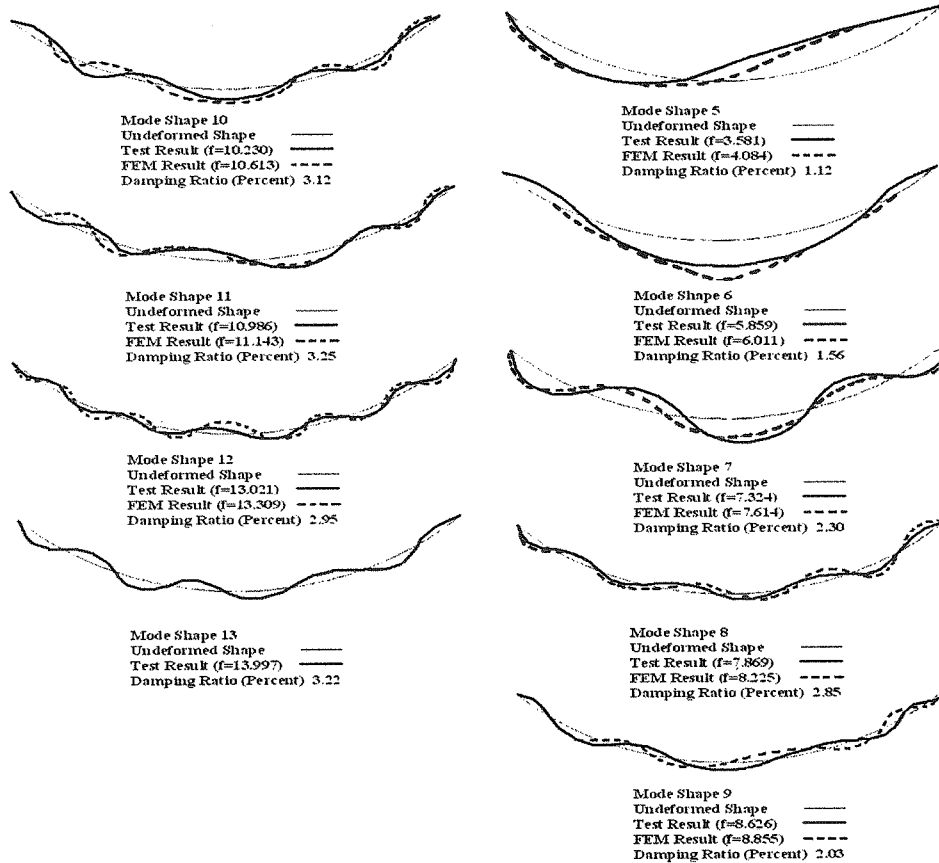
۵- مقایسه خصوصیات دینامیکی

مدل ریاضی استفاده شده با توجه به اینکه فرکانس Cut-off آن تقریباً ۱۰ هرتز است، در به دست آوردن مدهای بالاتر از این مقدار محدودیت دارد. دلیل دیگر را می‌توان به وجود نسبت Noise/Signal بالا با توجه به توان ضعیف دستگاه‌های لرزاننده و عدم تناسب اسقرار لرزاننده‌ها با بعضی از اشکال مودی عنوان کرد. در شکل (۵) نتایج اشکال مودی حاصل از آزمایش با نتایج حاصل از مدل المان محدود سد باهم رسم شده‌اند که خط پر به نتایج آزمایش و خط نقطه‌چین به نتایج مدل المان محدود مربوط است. به طور کلی، اختلاف موجود در شکل مدها و فرکانس‌های محاسباتی و اندازه‌گیری شده را می‌توان به عدم قطعیت‌هایی چون جرم پی، سختی هندسی سازه و پی، خواص ارتجاعی پی و بتن نسبت داد.

در این بخش خصوصیات دینامیکی بدست آمده از آزمایش ارتعاش اجباری و تحلیل مدل المان محدود سد با هم مقایسه می‌شوند از آنجا که چهار مود اول سیستم به علت محدودیت شدید موتورهای لرزاننده از نظر توان اعمال نیروی دینامیکی در فرکانس‌های پایین با آزمایش ارتعاش اجباری قابل شناسایی نبود، برای شناخت این مدها از آزمایش ارتعاش محیطی استفاده شد [۱۷]. در جدول (۲) فرکانس‌های به دست آمده از آزمایش ارتعاش اجباری و تحلیل مدل المان محدود سد ارائه شده و با هم مقایسه شده‌اند. برای ۸ فرکانس مربوط به مدهای ۵ تا ۱۲ به دست آمده از آزمایش ارتعاش اجباری انطباق خوبی بین شکل مدهای متناظر به دست آمده؛ ولی برای فرکانس ۱۳/۹۹۷۳ موفق به انطباق شکل مودی متناظر نشدیم.

جدول (۲): مقایسه فرکانسهای به دست آمده از آزمایش و تحلیل المان محدود سد

شماره مود	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
فرکانس حاصل از آزمایش	۳/۵۸۱	۵/۸۵۹	۷/۳۲۴	۷/۸۶۹	۸/۶۲۶	۱۰/۲۳۰	۱۰/۹۸۶	۱۳/۰۲۱	۱۳/۹۹۷
فرکانس حاصل از مدل المان محدود	۴/۰۸۴	۶/۰۱۱	۷/۶۱۴	۸/۲۲۵	۸/۸۵۵	۱۰/۶۱۳	۱۱/۱۴۳	۱۳/۳۰۹	
درصد میرایی	۱/۱۲	۱/۵۶	۲/۲	۲/۸۵	۲/۰۲	۳/۱۲	۳/۲۵	۲/۹۵	۳/۳۲
خطای فرکانس (%)	۱۲/۳	۲/۵	۸/۳	۴/۳۸	۲/۶	۳/۶	۱/۴	۲/۱۶	



شکل (۵): مقایسه شکل مودهای ارتعاشی به دست آمده از آزمایش ارتعاش اجباری و تحلیل المان محدود سد

۶- جمع بندی و نتیجه گیری

۴- در این تحقیق، الگوریتم مناسب و موثری برای پردازش نتایج آزمایش ارتعاش اجباری پیشنهاد شده است.
۵- اختلاف موجود در شکل مودها و فرکانسهای محاسباتی و اندازه گیری شده را می-توان به عدم قطعیت‌هایی چون جرم پی، سختی هندسی سازه و پی، خواص ارتجاعی پی و بتن نسبت داد.
۶- اختلاف زیاد در فرکانس مربوط به اولین مود به دست آمده از آزمایش (مود پنجم واقعی سیستم) و مود متناظر به دست آمده از مدل المان محدود سد را می-توان به کم بودن نیروی وارد از لرزاننده به سازه ربط داد و این یکی از ضعف

۱- در این تحقیق، آزمایش ارتعاش اجباری برای اولین بار در ایران بر روی سدبنتی قوسی مدرن انجام شد.
۲- با استفاده از روش ارائه شده در این مقاله می-توان این آزمایش را با وجود تجهیزات ضعیف و ناکافی ارتعاش اجباری برای سازه‌های غول آسا انجام داد.
۳- نتایج به دست آمده از انجام آزمایش با نتایج مدل تحلیلی با استفاده از مقادیر بهینه یابی شده خواص مواد انطباق خوبی نشان می-دهد.

Vibration Testing for Validating Numerical Models of Concrete Dams", J. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.28 PP.1327-1344, 1999
 Serveren, R.T., Taylor, C. A., Brownjohn, J. M. W., "Full-Scale Dynamic Testing and Mathematical Model Validation of Dams", J. Dam Engineering, Vol.1, Issue 2, PP.101-122,
 Duron, Z.H., Ostorm, D.K., Aagaard, B., "Measured Steady State, and Transient Response of a Small Arch Dam", J.Dam Engineering, Vol.V, Issue 1, PP.43-62, 1994

Cantieni, R., Deger, Y., Pietrzko, S., "Modal Analysis of a Concrete Gravity Dam: Experiment, Finite Element Analysis and Link", Paper presented at the XIth International Modal Analysis Conference, Honolulu, Hawaii, U.S.A., January 31 to February 3, 1994

Hall J.F., "The Dynamic and Earthquake Behavior of Concrete Dams: review of experimental behavior and observation evidence", Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.7, no.2. PP.58-121, 1988

Scherbaum, F., Johnson, J., "Programmable Interactive Toolbox for Seismological Analysis", Version 4, 1993

10) Bendat, J.S., Piersol, A.J., "Engineering Application of Correlation and Spectral Analysis", John Wiley.pub., 1993 Second Edition

Mivehchi, M.R., Ahmadi, M.T. and Hajmomeni, A., "An Ambient Vibration Test of an Modern Arch Dam; Some Proposals for Method for Data Processing", Proc. of Annual Meeting of USCOLD, Seattle, U.S.A, 2000.

۹- زیر نویس ها

- Signal Processing¹
- Auto-Power Spectrum Density Function²
- Cross-Power Spectrum Density Function³
- Phase Spectrum Function⁴
- Coherence Spectrum Function⁵

های مربوط به آزمایش ارتعاش اجباری است که مودهای نظیر فرکانس‌های خیلی پایین را با دقت کمتر پیش‌بینی می‌کند (سطر آخر از جدول ۲) برای این مودها بهتر است از آزمایش‌های ارتعاش محیطی استفاده کرد.

۷- تقدیر و تشکر

از پژوهشگاه بین المللی مهندسی زلزله، که امکانات انجام این تحقیق را فراهم کردند؛ شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران، که همکاری‌های لازم را انجام دادند و شرکت مهندسین مشاور مه‌اب قدس به خاطر حمایت‌های بی دریغ آنها در انجام این پروژه تقدیر و تشکر می‌شود.

۸- مراجع

- [۱] رضا تارلی نژاد، "ارزیابی خصوصیات دینامیکی سدهای بتنی قوسی با استفاده از آزمایش ارتعاش اجباری"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، شهریور ماه ۱۳۸۰
- [۲] عقیل حاج‌مومنی، "بررسی روش‌های مختلف پردازش داده‌های تصادفی حاصل از آزمایش‌های ارتعاش محیطی به منظور به دست آوردن خصوصیات دینامیکی سدهای بتنی"، سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، اسفند ماه ۱۳۷۸
- [۳] Cantieni, R., Wiberg, U., Pietrzko, S., and Deger, Y., "Modal Investigation of a Dam", Paper Submitted to the 16th International Modal Analysis Conference, Santa Barbara, 1998
- [۴] Chin-Hsung Loh., Tsu-Chiu Wu., "System Identification of Fei-Tsui Arch Dam From Forced Vibration and Seismic Response Data", J. of Earthquake Engineering, Vol.4, no.4, PP.511-537, 2000
- [۵] Proulx, J., Paultre, P., "Analytical and Experimental Evaluation of the Dynamic Behavior of Outared 3 Gravity Dam", Proc. of 10th Conference on Earthquake Engineering, Duma, 1995, Balkema, Rotterdam
- [۶] Camara, R.C., and Oliviera, S. B., "Dynamic Behavior of an Arch Dam-Foundation-Reservoir System Numerical and Calibration With a Forced Vibration Test", Paper no. 1711, 11th CEE, 1996
- [۷] Proulx, J., Carbonneau, C., Paultre, P., "Forced-Vibration Tests of a Large Gravity Dam in Winter and Summer Conditions", Paper no.1714, 11th World Conference on Earthquake Engineering, 1996
- [۸] Pietrzko, S., Cantieni, R., "Modal Testing of a Gravity Dam-Influence of the Exciter Placement on the Quality of the Identified Modal Parameters", A Paper Submitted for Presentation at the 12th IMAC, Honolulu, Hawaii, 1994
- [۹] Riezingler, J., Zigeler, F., Lei, Y., "Identification Problems for Large Arch-Dams", Proc. of 10th Conf. on Earthquake Engineering, Duma, 1995, Balkema, Rotterdam
- [۱۰] Daniell, W. E., Taylor, C.A., "Effective Ambient