

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

سد بتنی دو قوسی دز یکی از قدیمی ترین سدهای بزرگ در حال بهره‌برداری ایران است که در سال ۱۳۴۱ ساخت آن پایان یافت. ارتفاع این سد ۲۰۳ متر از روی پی می‌باشد که آن را به یکی از بلندترین سدهای ایران تبدیل می‌کند. در سال ۱۳۹۶ و پیرو طرح افزایش ارتفاع سد به میزان تقریبی ۸ متر و لزوم تدقیق مدل عددی سد موجود، آزمایش ارتعاش محیطی بدنه سد جهت تعیین مشخصات دینامیکی آن در زمانی که مخزن سد در بالاترین تراز ممکن قرار داشت انجام شد. در این راستا تعداد ۱۹ حس گر لرزه‌نگار و شتاب‌نگار در چهار آرایه مختلف بر روی بدنه سد قرار گرفتند. در این مقاله سعی شد تا با تحلیل نگاشت‌های آزمایش ارتعاش محیطی با سه روش مختلف پردازش سیگنال چهار طیفی، تجزیه دامنه فرکانس و تجزیه دامنه فرکانس افزایش یافته، مشخصات دینامیکی سد شامل فرکانس‌های مودی، اشکال مودی و میرایی‌های مودی استخراج شوند. در نهایت شش مود اول سد شناسایی و برای پنج مود اشکال مودی ترسیم گردید و نتایج آن با نتایج سایر تحقیقات انجام شده مقایسه شد. همچنین مزایا و معایب هر کدام از روش‌های پردازش سیگنال مورد مطالعه نیز در مبحث شناسایی سیستم سدهای بتنی مورد مقایسه قرار گرفت. از نتایج این تحقیق می‌توان برای کالیبره کردن مدل‌های عددی سد دز جهت بررسی رفتار دینامیکی آن استفاده نمود.

واژگان کلیدی: سد دز، ارتعاش محیطی، چهار طیفی، تجزیه دامنه فرکانس، تجزیه دامنه فرکانس افزایش یافته، مشخصات دینامیکی.

تعیین مشخصات دینامیکی سد بتنی دو قوسی دز با استفاده از آزمایش ارتعاش محیطی به وسیله سه روش مختلف پردازش سیگنال

محمد داودی (نویسنده مسئول)

دانشیار، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران، davood@iies.ac.ir

داریوش اقبالی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

۱- مقدمه

مهم‌ترین این عدم قطعیت‌ها عبارتند از: مشخصات مصالح همچون مصالح بدنه سد، رسوبات و سنگ بستر؛ هندسه سیستم سد-مخزن-پی، توپوگرافی دره، توزیع جرم، سطوح تماس مشترک و نهایتاً شکل مخزن؛ شرایط بارگذاری اولیه همانند فشار آب حفره‌ای، دما و شرایط مرزی و تعیین بارگذاری اصلی [۱]. برای پیدا کردن این مشخصات دینامیکی و به حداقل رساندن تأثیر این عدم قطعیت‌ها در نتایج رفتار لرزه‌ای سدها از آزمایش‌های دینامیکی همانند آزمایش ارتعاش محیطی^۱ استفاده می‌شود.

در آزمایش ارتعاش محیطی پاسخ سازه تحت تحریکات طبیعی (باد، فعالیت‌های مکانیکی و راه‌سازی، حرکات تکتونیکی ضعیف، حرکت آب از مجاری تخلیه و سرریز و ... [۲]) ثبت

با توجه به هزینه‌های جانی و مالی ناشی از تخریب سدها به علت زلزله، بررسی رفتار لرزه‌ای این سازه‌ها و کنترل پایداری آنها در مقابل زلزله طرح از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای انجام این مهم، مهندسين مشاور به‌طور معمول از مدل‌های عددی استفاده می‌کنند. جهت بررسی رفتار دینامیکی سدها در مدل‌های عددی، نیاز است که با داشتن مشخصات دینامیکی آنها همانند فرکانس‌ها، شکل‌ها و میرایی‌های مودی مدل‌های عددی دقیقی با رفتار نزدیک به سازه اصلی ایجاد شود. به علت پیچیدگی بیش‌ازحد هندسه سدها، معمولاً در این مدل‌ها، ساده‌سازی‌ها و فرضیاتی در نظر گرفته می‌شود. این ساده‌سازی‌ها ممکن است منجر به نتایج غلط به علت عدم قطعیت‌های موجود در این مدل‌ها شوند.

بازه فرکانسی ۳/۹۱-۶/۲۵ هرترز، شناسایی شد. دومین تجربه استفاده از آزمایش‌های درجا بر روی سدهای بتنی در ایران بر روی سد شهید رجایی بود. در این آزمایش با هدف کالیبره کردن مدل المان محدود، دو آزمایش ارتعاش اجباری و محیطی بر روی این سد انجام شد. با استفاده از آزمایش ارتعاش محیطی چهار مود اول سد در محدوده ۱/۴-۳/۵۸ هرترز و با آزمایش ارتعاش اجباری هشت مود بعدی در محدوده ۳/۵۸-۱۴ هرترز شناسایی شد. در این تحقیقات با توجه به کم بودن تجهیزات با استفاده از مدل عددی اولیه بهترین نحوه تحریک سد و ابزار گذاری برای آن طراحی شد. با توجه به گذشت مدت زمان طولانی از پایان ساخت سد دز، طراحی بدنه سد بر مبنای دانش فنی ۵۰ سال قبل به روش شبه استاتیکی با ضریب زلزله $g/0.1$ ، نزدیکی سد به گسل‌های مهم منطقه، احتمال وجود گسل فعال در ساختگاه سد و نیروگاه و نهایتاً مطرح شدن طرح افزایش ارتفاع سد به عنوان گزینه‌ای برای افزایش قابل توجه حجم مخزن، لزوم انجام مطالعات تکمیلی تحلیل پایداری بدنه سد در سال‌های اخیر مطرح شده است. با توجه به اینکه برای انجام دقیق تحلیل دینامیکی سد، اطلاع از مشخصات دینامیکی در جای سد نقش بسیار مهمی در صحت‌سنجی و اصلاح مدل عددی بدنه سد و تکیه‌گاه‌ها ایفا می‌کند، این تحقیق به بررسی مشخصات دینامیکی سد دز با استفاده از آزمایش ارتعاش محیطی در تراز حداکثر مخزن می‌پردازد. سد با استفاده از تعداد زیادی لرزه‌نگار ابزار گذاری شده و با استفاده از سه روش پردازش سیگنال چهار طیفی، تجزیه دامنه فرکانس^۵ و تجزیه دامنه فرکانس افزایش یافته^۶ نگاشت‌های برداشت شده بررسی شده‌اند تا مشخصات دینامیکی سد استخراج گردد. در سال‌های گذشته در ارتباط با این سد، میرزابزرگ [۸] مدل عددی سد دز را با استفاده از نرم‌افزار ANSYS مدل‌سازی کرده و مدل عددی خود را با استفاده از اطلاعات استاتیکی کالیبره نموده است. همچنین حریری اردبیلی و کیانوش [۹] در تحقیقات خود به تحلیل بر روی رفتار لرزه‌ای غیرخطی سد دز پرداخته‌اند.

می‌شود. انجام آزمون ارتعاش محیطی ارزان و سریع بوده و فقط نیاز به استقرار حسگرهای مناسب در سازه دارد. با اندازه‌گیری و تحلیل داده‌های ناشی از ارتعاش محیطی می‌توان رفتار دینامیکی سازه را در محدوده‌ی خطی (به علت دامنه بسیار کوچک امواج) بررسی و تحلیل نمود. از آزمایش ارتعاش محیطی می‌توان در انواع سازه‌های سخت و نرم استفاده کرد ولی برای سازه‌های نرم با توجه به افزایش نسبی دامنه تحریکات مناسب‌تر است [۳]. کلاف و همکاران [۴] برای اولین بار در سال ۱۹۸۴ بر روی سد ژآننگ هوآننگ دیان از آزمایش ارتعاش محیطی همراه با آزمایش ارتعاش اجباری جهت تشخیص پارامترهای مودی سد استفاده نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که آزمایش ارتعاش محیطی روشی کارآمد جهت تعیین مشخصات دینامیکی سدهای بتنی است. در نهایت با استفاده از هر دو آزمایش یازده مود ارتعاشی سد ژآننگ هوآننگ دیان در محدوده فرکانسی ۴-۱۴/۱ هرترز به دست آمد [۴]؛ اما اولین تحقیقاتی که در آن از آزمایش ارتعاش محیطی به‌عنوان تنها آزمایش دینامیکی استفاده شد مربوط به سد کونترا در سوئیس است [۵]. با استفاده از روش جستار قله^۲ بر روی چگالی طیف توان^۳، سه مود ارتعاشی این سد در محدوده ۱/۸-۴/۲ هرترز به دست آمد. اولین تجربه انجام آزمایش ارتعاش محیطی در ایران با هدف کالیبره کردن مدل عددی در سد ساوه انجام شد [۶-۷]. این آزمایش در دو مرحله صورت گرفت. در مرحله اول فقط ارتعاشات محیطی معمول در دو آرایش حس‌گرها ثبت شدند. در آرایش اول تمام حس‌گرها بر روی تاج سد مستقر شدند تا از بردارش نگاشت‌های آنها بتوان شکل مودی تاج سد را به دست آورد. در آرایش دوم حس‌گرها، برخی از آنها را به گالری سد منتقل کردند تا بتوانند شکل مودی طره مرکزی سد را به دست آورند. در مرحله دوم با استفاده از آرایش اول حس‌گرها، ارتعاشات نقاط مختلف تاج سد در حالی ثبت شد که بدنه سد به‌وسیله خروج آب از دریچه‌های سد تحریک می‌شد. در نهایت تمام نگاشت‌های برداشت‌شده از سد ساوه، با استفاده از چگالی طیف توان و طیف ارتباط^۴ مورد بررسی قرار گرفتند و مشخصات دینامیکی مربوط به چهار مود ارتعاشی اول سد در

۲- تئوری روش‌های پردازش سیگنال

روش‌های متنوعی جهت پردازش سیگنال در حوزه‌های زمان، فرکانس و زمان-فرکانس وجود دارد. به‌عنوان مثال حسان [۱۰] جهت مقایسه روش‌های چهار طیفی، جستار قله، مک وری و شناسایی زیر فضای تصادفی^۷ در تعیین مشخصات دینامیکی سازه‌ها بر اساس آزمایش ارتعاش محیطی سه سازه برج بلند سپهر، ساختمان پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و مدل ۱/۲ را مورد بررسی قرار داد و نهایتاً مزایا و معایب هر کدام از این روش‌ها را مشخص نمود. همچنین در مورد مقایسه روش‌های زمان-فرکانس، خادمی [۱۱] و اقبالی [۱۲] تحقیقات گسترده‌ای انجام دادند. در این مقاله از میان تمام روش‌های پردازش سیگنال از سه روش چهار طیفی، تجزیه دامنه فرکانس و تجزیه دامنه فرکانس افزایش یافته جهت تحلیل نگاشت‌های آزمایش ارتعاش محیطی سد دز استفاده می‌شود تا نقاط قوت و ضعف هر کدام از این روش‌ها در تعیین مشخصات دینامیکی سدهای بتنی بر اساس آزمایش ارتعاش محیطی مشخص گردد.

۱-۲- روش چهار طیفی

این روش اولین بار توسط جعفری و داودی [۱۳] و داودی [۱۴] جهت تعیین مشخصات دینامیکی سدهای خاکی مارون و مسجد سلیمان از روی نگاشت آزمایش‌های ارتعاش اجباری و ارتعاش محیطی معرفی شد. نقطه قوت این روش استفاده هم‌زمان از چهار طیف در حوزه فرکانس است تا با استفاده از خاصیت هم‌زمانی چهار مشکلات پردازش سیگنال فقط با یک طیف را به حداقل برساند. این طیف‌ها عبارتند از: چگالی طیفی توان، طیف توان متقاطع^۸، طیف ارتباط و فاز متقاطع مبانی هر کدام از این طیف‌ها به‌طور مفصل در مراجع [۳، ۱۴] آمده است. در زیر به‌طور خلاصه به هر کدام اشاره می‌شود.

۱-۱-۲- چگالی طیف توان

محاسبه PSD به دو صورت امکان دارد که در اینجا فقط به یکی از آنها اشاره می‌شود. راه اول محاسبه طیف از انجام تبدیل

فوریه بر روی تابع خودهمبستگی یا نگاشت می‌باشد در رابطه (۱) فرم کلی این محاسبات آورده شده است.

$$S_{xx}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (1)$$

$$R_{xx}(\tau) = E[x(t)x(t+\tau)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)x(t+\tau) dt \quad (2)$$

که در این روابط $J = \sqrt{-1}$ ، τ متغیر زمانی، R_{xx} تابع خودهمبستگی، E اپراتور بر روی سیگنال $x(t)$ و S_{xx} چگالی طیف توان سیگنال می‌باشد.

۲-۱-۲- طیف توان متقاطع

به طریق مشابه PSD می‌توان طیف توان متقاطع دو سیگنال را محاسبه کرد. برای این کار باید از طیف همبستگی دو سیگنال بهره برد. در زیر روابط طیف توان متقاطع آورده شده است.

$$S_{xy}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (3)$$

$$R_{xy}(\tau) = E[x(t)y(t+\tau)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)y(t+\tau) dt \quad (4)$$

۳-۱-۲- طیف ارتباط

جهت تعیین درصد اطمینان به صحت نتایج طیف‌های CPS از طیف ارتباط استفاده می‌شود. در زیر فرمول محاسبه طیف ارتباط بین دو سیگنال x و y آورده شده است.

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)} \quad (5)$$

۴-۱-۲- فاز متقاطع

با استفاده از طیف توان متقاطع می‌توان فاز بین دو سیگنال را با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$\theta_{xy}(f) = \tan^{-1} \left[\frac{Q_{xy}(f)}{C_{xy}(f)} \right] \quad (6)$$

که در این رابطه Q_{xy} ، قسمت موهمی S_{xy} ، C_{xy} قسمت حقیقی S_{xy} و θ_{xy} بین دو سیگنال X و Y است.

لازم به ذکر است در این روش زمانی که فرکانس هم‌زمان چهار شرط را داشته باشد به‌عنوان فرکانس مودی انتخاب

است که حاوی بردارهای تکین u_{ij} و S_i یک ماتریس قطری است که حاوی مقادیر تکین اسکالر S_{ij} است. اگر ماتریس چگالی طیفی یک سیستم دینامیکی به مقادیر و بردارهای تکین متناظر با فرکانس مورد نظر تجزیه شود؛ پیک‌های اولین مقادیر تکین معادل با فرکانس‌های طبیعی سیستم و نیز بردارهای تکین متناظر با پیک‌های اولین مقادیر تکین، بردارهای شکل مودی سیستم را تقریب می‌زنند [۱۵]. در این روش برای به دست آوردن ضرایب میرایی، هر یک از تکنیک‌های نیم توان یا کاهش لگاریتمی بسته به شرایط موجود، می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند [۱۶].

در روش FDD، برای انتخاب صحیح و دقیق قله‌ها از معیار طیف ارتباط و تضمین مودال (MAC) استفاده می‌شود. همان‌طور که قبلاً نیز بدان اشاره شد، اولین مقدار تکین به دست آمده از روش FDD متناظر با چگالی طیف توان سیستم است. از این رو، هر قله زنگوله‌ای شکلی در نمودار اولین مقدار تکین، می‌تواند معادل با طیف توان یک سیستم تک‌درجه آزادی مجازی باشد. این PSDهای جزئی مجازی، با جداسازی قله‌های زنگوله‌ای شکل و مقایسه بردار شکل مودی پیک آن قله با بردارهای شکل مودی نقاط اطراف آن پیک شناسایی می‌شود. در نهایت مبتنی بر یک معیار مناسب برای تضمین مودال، می‌توان میزان تشابه بردار شکل مودی پیک مربوطه را با بردارهای متناظر نقاط اطراف آن پیک ارزیابی کرده و برای آن یک حد مناسبی تعریف نمود [۱۶-۱۷]. برای مقایسه تشابه بردارهای شکل مودی از رابطه (۹) استفاده می‌شود [۱۸-۱۹]:

$$MAC = \frac{|\psi^T \phi|^2}{(\psi^T \psi)(\phi^T \phi)} \quad (9)$$

که در آن، ψ و ϕ دو بردار شکل مودی هستند. یکی از این بردارها متعلق به نقطه پیک و دیگری متناظر با بردارهای مودی نقاط اطراف پیک هستند. برای $MAC=1$ ، بردارهای شکل مودی کاملاً مشابهند. برای $MAC=0$ ، هیچ تشابه‌ی بین بردارهای شکل مودی وجود ندارد؛ بنابراین هرچه مقدار معیار MAC، به عدد ۱ یا ۱۰۰ درصد نزدیک‌تر باشد، پیک مورد نظر از درجه اطمینان بالاتری برخوردار خواهد بود.

می‌شود. این شرط‌ها عبارتند از:

۱. یک فرکانس در اکثر چگالی طیف توان سیگنال‌ها دارای قله باشد.
۲. در طیف توان مقاطع بین نقاط مختلف و نقطه مرجع (که اکثراً تکیه‌گاه یا حس‌گر میانی است) قله‌ای واضح داشته باشد.
۳. طیف ارتباط در آن فرکانس در نقاط مختلف و نقطه مرجع مقداری بین ۰/۶ تا ۱ داشته باشد.
۴. فاز مقاطع بین نقاط مختلف و نقطه مرجع در آن فرکانس، مقداری نزدیک به صفر یا ۱۸۰ درجه باشد.

۲-۲- روش تجزیه دامنه فرکانس

یکی از مهم‌ترین و پیشرفته‌ترین روش‌های شناسایی سیستم در حوزه فرکانس، روش تجزیه دامنه فرکانس (FDD) است. در این روش که توسط برینکر ارائه شده است، ابتدا ماتریس چگالی طیف توان محاسبه و سپس تکنیک تجزیه مقادیر تکین بر روی آن اعمال می‌شود و به وسیله آن مقادیر فرکانس‌های طبیعی، اشکال مودی و ضرایب میرایی به دست می‌آیند. رابطه بین ورودی‌های ناشناخته $x(t)$ و خروجی‌های اندازه‌گیری شده $y(t)$ ، به صورت رابطه (۷) بیان می‌شود [۱۵]:

$$G_{yy}(j\omega) = \bar{H}(j\omega) G_{xx}(j\omega) H(j\omega)^T \quad (7)$$

که در آن G_{xx} ماتریس چگالی طیف توان ورودی از مرتبه r (تعداد ورودی‌ها)، G_{yy} ماتریس چگالی طیف توان خروجی از مرتبه m (تعداد خروجی‌ها) و $H(j\omega)$ ، ماتریس تابع پاسخ فرکانسی از مرتبه $(m \times r)$ است که در آن بالانویس T علامت «-» به ترتیب نشان‌دهنده‌ی ترانزپوز و مزدوج مختلط ماتریس تابع پاسخ فرکانسی هستند. در روش شناسایی FDD اولین گام تخمین ماتریس طیف توان خروجی $G_{yy}(j\omega)$ است. سپس ماتریس PSD خروجی به دست آمده، به وسیله ابزار قدرتمند تجزیه مقادیر تکین، در فرکانس‌های گسسته $\omega = \omega_i$ با استفاده از رابطه (۸) تجزیه می‌گردد:

$$\hat{G}_{yy}(j\omega_i) = U_i S_i U_i^H \quad (8)$$

که در آن $U_i = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im}]$ یک ماتریس متعامد یکه‌ای

۲-۳- روش تجزیه دامنه فرکانس افزایش یافته

در روش تجزیه دامنه فرکانس افزایش یافته (EFDD) بخشی از تابع $S(\omega)$ در محدوده یک مود که در آن معیار تضمین مود بین اولین بردار منفرد در فرکانس‌های مختلف با بردار منفرد متناظر با فرکانس قله مود مورد بررسی بالاتر از حد مشخصی باشد جدا شده و پس از صفر کردن بقیه مقادیر، تابع طیف چگالی توان یک درجه آزادی مود k ام به $S_k(\omega)$ دست می‌آید. $S_k(\omega)$ از طریق تبدیل عکس فوریه مجزا به حوزه زمان برده می‌شود و τ_k ، تابع همبستگی یک‌درجه آزادی آن مود محاسبه می‌شود. سپس فرکانس طبیعی و نسبت میرایی از طریق گذر از صفر و کاهش لگاریتمی تابع زمانی حاصل استخراج می‌شود. شکل مود نیز به صورت جمع وزن‌دار بردارهای منفرد حاصل از فرکانس‌های مختلف محدوده انتخابی در نظر گرفته می‌شود:

$$\phi_w = \sum_1 V(\omega_i) S(\omega_i) \quad (10)$$

در روش EFDD قله‌هایی که ناشی از تحریک هارمونیک تشخیص داده شده باشند، قبل از انجام تبدیل عکس فوریه مجزا از طریق میان‌یابی خطی از تابع $S(\omega)$ حذف می‌شوند و بردارهای منفرد متناظر با آن فرکانس‌ها در جمع معادله (۱۰) وارد نمی‌شوند [۱۶].

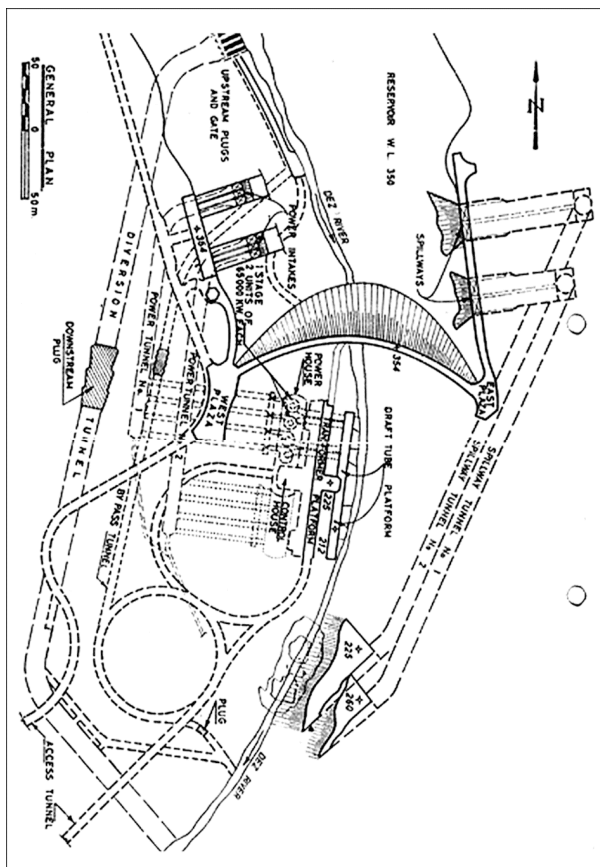
۳- مشخصات سد بتنی دو قوسی دز

سد دز یکی از قدیمی‌ترین و بزرگ‌ترین سد‌های بتنی دو قوسی کشور است که در فاصله ۱۹ کیلومتری شمال شرقی شهرستان اندیمشک واقع در استان خوزستان بر روی رودخانه دز قرار گرفته است. این سد از ۱۷ بلوک بتنی که در کنار هم قرار گرفته‌اند و دو بالشتک در کناره‌های آن که سد و تکیه‌گاه آن را از هم جدا می‌کند، تشکیل شده است. روند ساخت این سد از سال ۱۳۳۸ آغاز گردید و در اسفندماه ۱۳۴۱ به بهره‌برداری رسید. همچنین این سد دارای یک نیروگاه برق آبی می‌باشد که در پایین دست آن ساخته شده است. در جدول (۱) و شکل (۱) مشخصات کلی سد آورده شده است. سد دز و

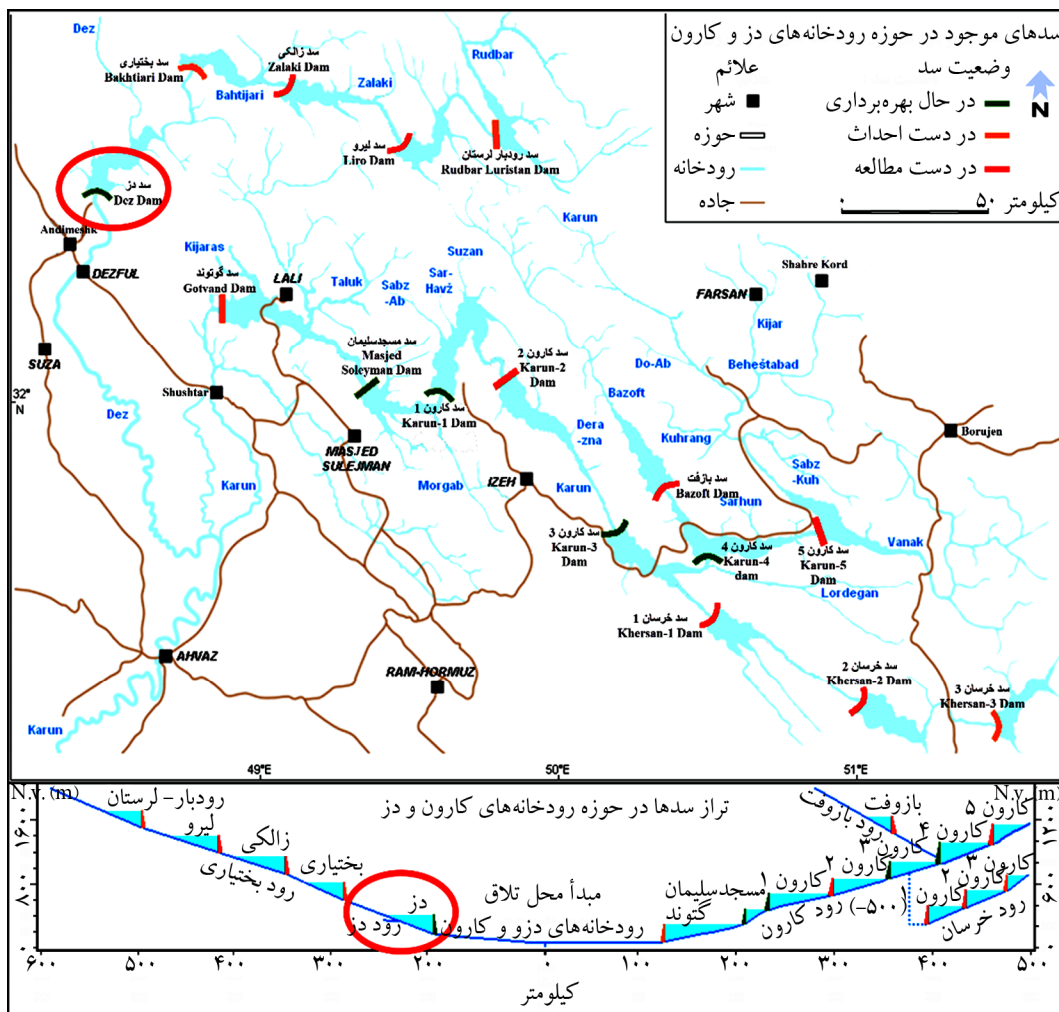
نیروگاه آن واقع در مختصات $48/28E$ و $32/36N$ در منطقه‌ای احداث شده که چندین گسل فعال در اطراف خود دارد (همچون گسل اصلی زاگرس و دزفول) که این گسل‌ها در طول سالیان گذشته بارها زلزله‌های نسبتاً کوچک و بزرگی ایجاد کرده‌اند. موقعیت سد دز نسبت به سایر سد‌های منطقه در شکل (۲) نشان داده شده است.

جدول (۱): مشخصات کلی سد دز.

۲۰۳/۵	ارتفاع سد
۲۱۲	طول تاج سد
۱/۰۴	نسبت طول به ارتفاع سد
۴/۵ متر	عرض سد در تاج
۲۷/۵ متر	عرض سد در پی
۳۵۴ متر	ارتفاع تاج سد از سطح دریا
۳۵۲ متر	حداکثر ارتفاع آب قابل مهار
۲۹۰ متر	حداقل ارتفاع آب قابل مهار
۳۴۶۵ میلیون مترمکعب	حجم مخزن در حالت نرمال



شکل (۱): محل و نمای کلی سد دز در پلان [۲۰].



شکل (۲): موقعیت سد مخزنی دز در حوزه رودخانه‌های دز و کارون نسبت به سایر سدهای منطقه [۲۱].

جدول (۲): مشخصات فنی تجهیزات لرزه‌نگاری و شتاب‌نگاری استفاده شده در آزمایش ارتعاش محیطی سد دز.

نرخ نمونه بردار (sps)	حساسیت	محدوده کارکرد دمایی	محدوده دینامیکی	مشخصات	نام دستگاه
---	1000v/m/s	از ۱۵- تا ۶۰+ درجه سلسیوس	۱۳۶ dB	حس گر سرعت سنج سه مؤلفه‌ای	Lennartz 3D/20s
۱ تا ۱۰۰۰	2000v/m/s	از ۱۰- تا ۷۵+ درجه سلسیوس	۱۴۰ dB	حس گر سرعت سنج سه مؤلفه‌ای و دیجیتالیزر	CMG-6TD
۱ تا ۱۰۰۰	از ۱g تا ۴g	از ۲۰- تا ۶۵+ درجه سلسیوس	۱۵۰ dB	حس گر شتاب سنج سه مؤلفه‌ای و دیجیتالیزر	CMG-5TD
۲۰ تا ۵۰	۱۱۹nV/count	از ۲۰- تا ۷۰+ درجه سلسیوس	۱۳۰ dB	دیجیتالیزر سه مؤلفه‌ای	PDER

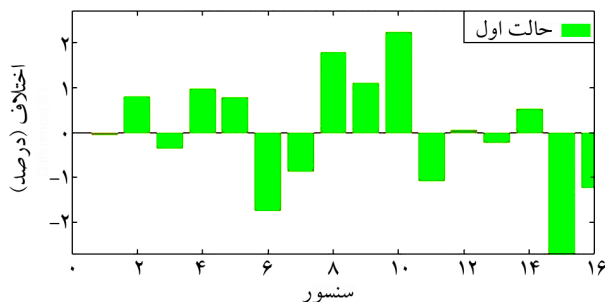
است. حس گرهای لنارتز مورد استفاده در این آزمایش فاقد دیجیتالیزر داخلی هستند به همین علت از دیجیتالیزرهای پارسیان برای ثبت رکوردهای ارتعاش محیطی استفاده شد، این در حالی است که حس گرهای گورالپ در داخل خود دیجیتالیزر نیز دارند. همچنین از منبع تغذیه قابل حمل برای تأمین برق مورد نیاز همه دستگاه‌ها بهره برده شد (جدول ۲).

۴- تجهیزات استفاده شده در آزمایش ارتعاش محیطی

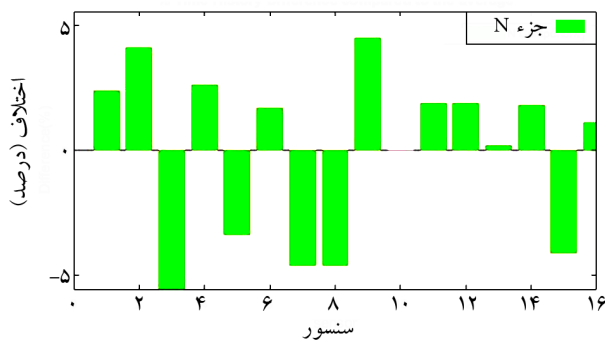
به منظور ثبت رکوردهای مورد نظر در آزمایش ارتعاش محیطی، از ۱۶ دستگاه لرزه‌نگار سه مؤلفه‌ای لنارتز (ساخت کشور آلمان)، دو دستگاه شتاب‌نگار سه مؤلفه‌ای CMG-5TD گورالپ و یک دستگاه لرزه‌نگار سه مؤلفه‌ای CMG-6TD گورالپ (ساخت کشور انگلیس) در آرایه‌های مختلف حس گرها استفاده شده

۵- آزمایش کالیبراسیون

با توجه به اینکه دامنه ارتعاشات در مرکز تاج سد بیشترین مقدار را داراست و می‌تواند معیار خوبی برای مقایسه دستگاه‌ها با یکدیگر باشد، در آزمایش‌های دوم و سوم، کلیه ۱۹ دستگاه لرزه‌نگار و شتاب‌نگار در کنار یکدیگر در مرکز تاج سد مستقر شدند و به صورت هم‌زمان، ارتعاشات محیطی را به مدت یک ساعت ثبت کردند. در هنگام چپش دستگاه‌ها روی تاج سد، سعی شد تا جای ممکن حس‌گرها نزدیک به یکدیگر باشند و یک تحریک ورودی یکسان را ثبت نمایند. به دلیل اینکه گاهی به علت نویزهای ورودی (همانند نویز ناشی از کابل‌های برق) تاریخچه زمانی ارتعاشات ورودی کمی با هم اختلاف را نشان می‌دهند و معیار خوبی برای به دست آوردن ضرایب کالیبراسیون نیستند. همچنین کاربرد اصلی این ضرایب در رسم شکل مودی است و این شکل‌ها با استفاده از طیف‌های فرکانسی رسم می‌گردند، به همین علت ضرایب کالیبراسیون به دست آمده از چگالی طیف توان در فرکانس مود اول سد معیار اختلاف دستگاه‌ها با یکدیگر قرار گرفت. نمونه‌ای از میزان اختلاف دستگاه‌ها از میانگین در هر دو حوزه زمان و فرکانس در شکل (۵) نشان داده شده است.



(الف) میزان اختلاف پیک فرکانسی هر دستگاه از میانگین در فرکانس مود اول سد



(ب) میزان اختلاف دامنه سرعت ارتعاش محیطی هر دستگاه با میانگین در راستای N
 شکل (۵): نمونه‌ای از ضرایب کالیبراسیون به دست آمده از آزمایش دوم کالیبراسیون.

به منظور اطمینان از صحت عملکرد دستگاه‌ها و به دست آوردن ضرایب کالیبراسیون نسبی برای ترسیم شکل‌های مودی سد با حداکثر دقت، سه آزمایش کالیبراسیون بر روی دستگاه‌های مورد نظر برنامه‌ریزی و انجام شد. آزمایش اول در محل آزمایشگاه پیشرفته مهندسی زلزله پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (واقع در سوهانک تهران) بر روی فونداسیون دستگاه میز لرزه قبل از اعزام به محل سد انجام شد تا اگر دستگاهی دارای ایرادی است این ایراد برطرف شده و با بیشترین دقت آزمایش اصلی بر روی سد انجام شود (شکل ۳).
 آزمایش دوم بر روی تاج سد قبل از چیدمان اولین آرایه و آزمایش نهایی نیز بر روی تاج سد بعد از چیدمان آخرین آرایه انجام گردید (شکل ۴).



شکل (۳): بر روی فونداسیون دستگاه میز لرزه آزمایشگاه پیشرفته مهندسی زلزله.



شکل (۴): چیدمان حس‌گرها در آزمایش کالیبراسیون دوم روی تاج سد.

نمود. بدین منظور، ۱۶ دستگاه لرزه‌نگار لنارتز در موقعیت‌هایی که با مترکشی دقیق تاج سد مشخص شده بود، با فاصله تقریبی ۱۵ متر از هم چیده شدند. با توجه به قرارگیری برخی دستگاه‌های لرزه‌نگار در کنار دستگاه‌های شتاب‌نگار موجود سد (Sara)، دو دستگاه شتاب‌نگار CMG-5TD نیز به منظور کنترل صحت ارتعاشات ثبت شده، در کنار دستگاه‌های لرزه‌نگار قرار گرفتند. پیش از تغییر موقعیت دستگاه‌ها به سمت آرایش دوم و به منظور تحریک بدنه سد در برخی مودهای مخفی، قایقی در محل حاضر شد تا با ایجاد موج در مخزن نزدیک تاج بتواند در بدنه سد تحریکی متفاوت از ارتعاشات محیطی اعمال نماید. بدین منظور چهار نوع مانور برای قایق در نقاط مختلف مخزن اجرا شد (شکل ۶).



شکل (۶): مانور قایق در مخزن سد برای ایجاد ارتعاشات مصنوعی در بدنه سد، آرایه اول حس گرها.

جهت کنترل شکل‌های مودی استخراج شده از آرایه اول حس گرها و افزایش دقت آنها دو آرایه دوم و سوم طراحی شدند. بدین صورت که در آرایه دوم کلیه تجهیزات به نیمه شرقی تاج سد و در آرایه سوم به نیمه غربی سد انتقال داده شدند. برای افزایش دقت شکل‌های مودی سه بعدی سد، باید آرایشی برای حس گرها در نظر گرفته می‌شد تا یک پوشش سرتاسری از بدنه سد به دست آید. متأسفانه سد دز فاقد گالری‌های سراسری در ترازهای میانی است، به همین دلیل با توجه به شرایط دسترسی به نقاط مختلف بدنه سد، آرایه چهارم طوری طراحی گردید که دو حس گر لرزه‌نگار در ارتفاع ۲۲۸ و ۲۴۰، دو حس گر لرزه‌نگار در گالری شرقی، دو حس گر لرزه‌نگار در گالری غربی، سه حس گر لرزه‌نگار در شفت

همان‌گونه که در شکل (۵) مشخص است، میزان اختلاف دستگاه‌ها با یکدیگر حداکثر در حدود ۵ درصد بوده و به همین علت اعمال این ضرایب برای رسم شکل مودی خیلی ضرورتی نداشت.

۶- آزمایش ارتعاش محیطی سد دز

هدف از انجام آزمایش ارتعاش محیطی بر روی سد، به دست آوردن مشخصات دینامیکی می‌باشد که شامل فرکانس‌های طبیعی سازه، ضریب میرایی و شکل مودی است. بدین منظور برای اینکه بتوان با دقت بالا و کمترین خطا، موارد خواسته شده را به دست آورد باید از آرایه‌های گوناگونی برای چیدمان حس گرها استفاده شود تا بتوان کل بدنه سد را پوشش داد. آزمایش ارتعاش محیطی سد دز در تراز حداکثر آب مخزن (تراز ۳۵۲) از تاریخ ۱۳۹۶/۳/۱۶ لغایت ۱۳۹۶/۳/۲۲ انجام شد. برای این آزمایش و با توجه به موقعیت قرارگیری گره‌ها و شکم‌های مهم‌ترین اشکال مودی به دست آمده از تحلیل‌های عددی [۸-۹] چهار چیدمان مختلف برای آرایش دستگاه‌های لرزه‌نگار و شتاب‌نگار بر روی بدنه سد و تکیه‌گاه‌ها تنظیم گردید. در این چیدمان‌ها، همچنین به موقعیت دستگاه‌های موجود در شبکه شتاب‌نگاری دائم سد نیز توجه شد. به منظور تشخیص دقیق‌تر اشکال مودی، دستگاه شتاب‌نگار و لرزه‌نگار مستقر در مرکز تاج در کلیه چیدمان‌های مذکور ثابت ماندند تا یک نقطه همواره با سایر آرایش‌ها همپوشانی داشته باشد.

در مدت‌زمان یک‌هفته‌ای آزمایش، شرایط محیطی و کارگاهی با دقت تحت نظر قرار گرفت و کلیه عوامل مولد ارتعاش (شامل جهت و شدت وزش باد، تردهای ناخواسته) به همراه تغییرات دمای محیط یادداشت شد. همچنین بر اساس امکانات کارگاهی، سعی شد شرایط تحریکات وارده بر بدنه سد به صورت کنترل شده تغییر نماید تا از رکوردهای ثبت شده در بدنه سد در این شرایط، بتوان برای آشکارسازی مودهای مخفی استفاده نمود.

در آرایه اول کلیه حس گرها بر روی تاج سد قرار گرفتند به طوری که بتوان با تعداد حس گرهای موجود، تاج سد را به شکل مناسب پوشش داده و اشکال مودی سد را با دقت مناسب مشخص

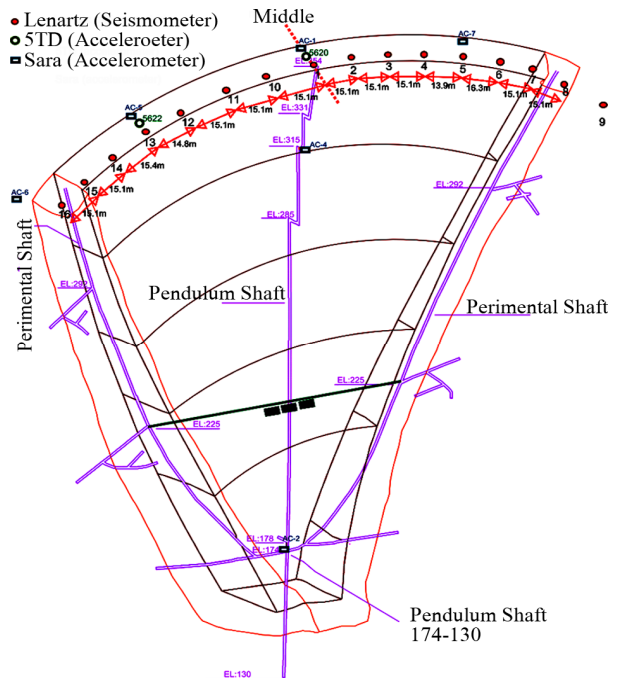
شد و با لحاظ کردن فیلترهای مناسب، نویزهای غیرواقعی افزوده شده به سیگنال اصلی در اثر عوامل بیرونی و یا دستگاهی و همچنین در اثر دمای بالای محیط حذف شدند.

برای استفاده از روش چهار طیفی یک برنامه با استفاده از زبان برنامه‌نویسی Matlab [۲۲] نوشته شد. همچنین برای تحلیل نگاشت‌ها با روش‌های FDD و EFDD از نرم‌افزار ARTeMIS Modal [۲۳] استفاده شد. روند انجام شناسایی سیستم با هر کدام از روش‌های پردازش به طور خلاصه بدین صورت بود که طیف‌ها در هر یک از روش‌ها به دست آمدند و بنا به مفاهیم آن روش برخی از فرکانس‌ها به عنوان فرکانس‌های طبیعی احتمالی انتخاب شدند. سپس در مرحله بعد برای فرکانس‌های احتمالی شکل‌های مودی بدنه سد رسم شد. در صورتی که اشکال مودی رسم شده با منطق اشکال مودی سدهای بتنی دو قوسی (که از بررسی ادبیات فنی در این زمینه مشخص شدند) و مدل‌های عددی سد دز هماهنگی داشت، آن فرکانس‌های احتمالی به عنوان فرکانس‌های طبیعی سد در نظر گرفته شدند. در نهایت پس از مشخص شدن فرکانس‌های مودی، برای آنها مقادیر میرایی‌های مودی از روش نیم‌توان^۹ محاسبه شد. مبانی استخراج میرایی‌های مودی با استفاده از روش نیم‌توان در مرجع [۱۲] به طور مفصل آمده است. در ادامه به صورت مختصر به تحلیل‌های انجام شده با استفاده از هر کدام از روش‌های چهار طیفی، تجزیه دامنه فرکانس و روش تجزیه دامنه فرکانس افزایش یافته اشاره می‌شود.

۱-۲- روش چهار طیفی

این روش از چهار طیف چگالی طیف توان، طیف توان متقاطع، طیف ارتباط و طیف فاز به صورت هم‌زمان استفاده می‌کند تا بتواند فرکانس‌های مودی را شناسایی کند. این استفاده هم‌زمان از چهار طیف حوزه فرکانس به این روش این قدرت را می‌دهد تا برخی از ضعف‌ها که هر کدام از این طیف‌ها به طور مستقل در شناسایی سیستم در حوزه فرکانس داشتند را رفع کند. در این روش همواره می‌بایست یک نقطه به عنوان مرجع در نظر گرفته می‌شد تا بتوان سایر نقاط را با آن بررسی نمود. در این پژوهش به طور معمول از سه مرجع استفاده شده است (حس گر

مرکزی و بقیه ۹ حس گر لرزه‌نگار و شتاب‌نگار بر روی تاج سد قرار گیرند. به عنوان نمونه در شکل (۷) آرایه اول حس گر‌ها در آزمایش ارتعاش محیطی سد دز نشان داده شده است.

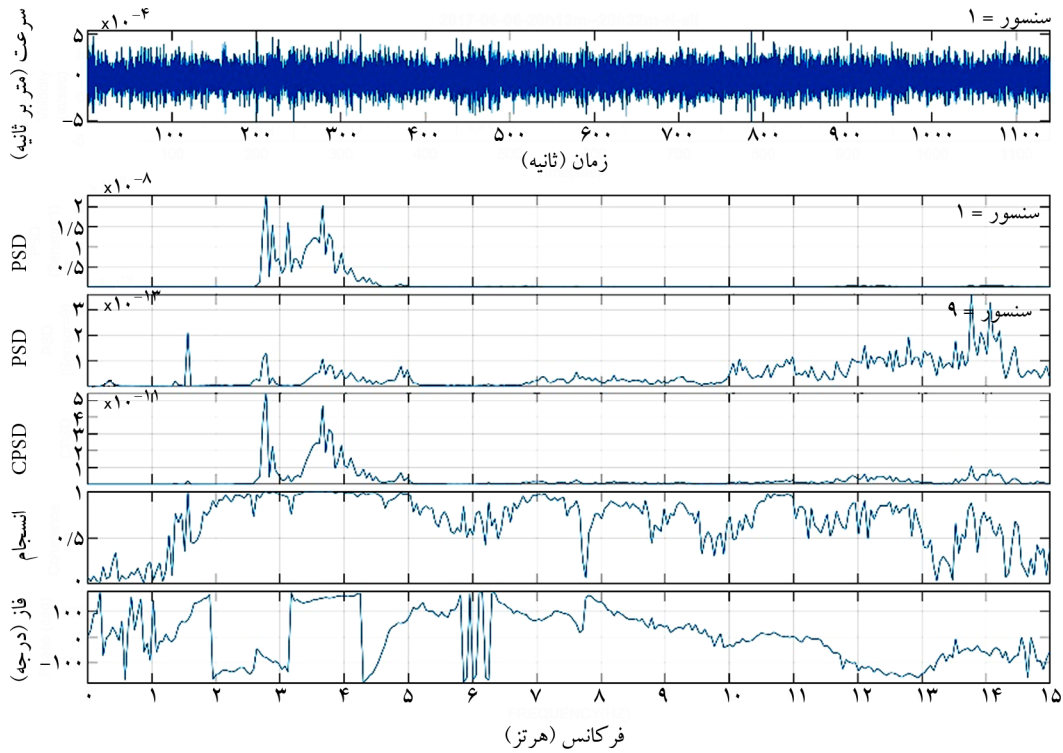


شکل (۷): شماتیک آرایه اول حس گر‌ها در آزمایش ارتعاش محیطی سد دز.

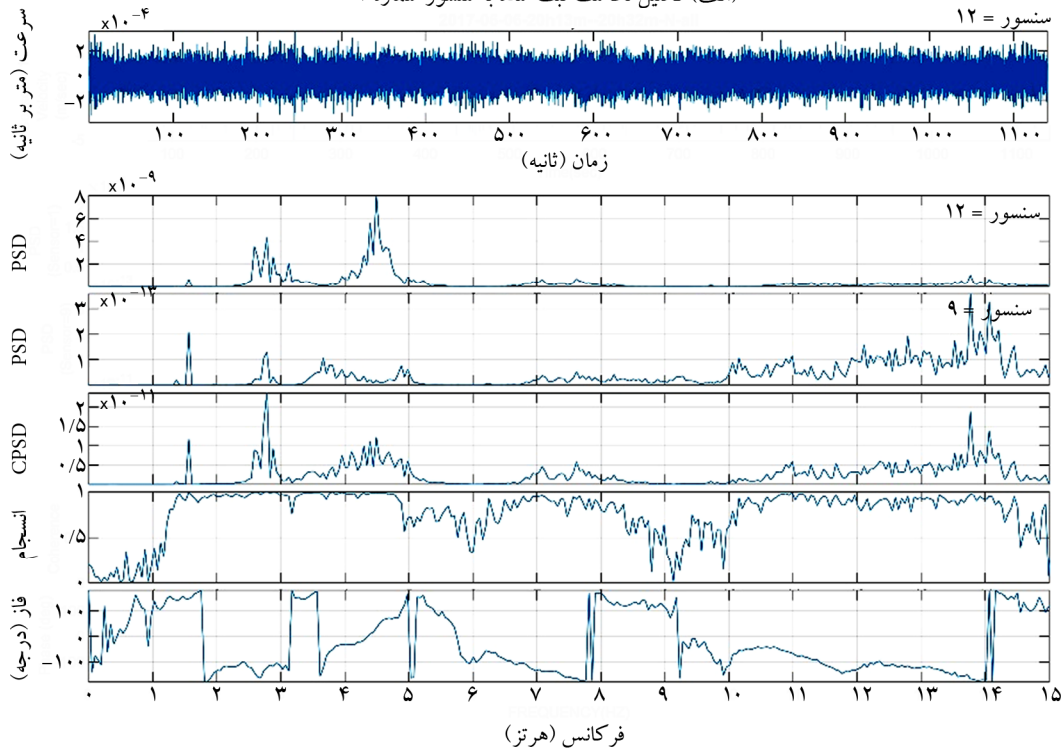
۷- پردازش نگاشت‌های آزمایش ارتعاش محیطی

برای پردازش نگاشت‌ها ابتدا لازم است تاریخچه زمانی رکوردهای ثبت شده توسط دستگاه‌های مختلف لرزه‌نگار و شتاب‌نگار مورد پردازش اولیه قرار گیرند تا رکوردهای واقعی سرعت و شتاب ارتعاشات، جهت انجام تحلیل‌های اصلی پردازش سیگنال استخراج شود. با توجه به حجم قابل توجه رکوردهای ثبت شده در چهار آرایه مختلف آزمایش، پردازش‌های اصلی سیگنال‌ها در چهار بازه زمانی سکوت کارگاهی انجام شد و سعی شد تا حد ممکن از رکوردهای مانا استفاده شود تا خطای نامانا بودن نگاشت‌ها بر روی نتایج به حداقل برسد و مشخصات دینامیکی سد با حداکثر دقت ممکن به دست آید. لیکن به دلیل تغییر مسیر وزش باد از بالادست به پایین دست و برعکس در ساعاتی از شبانه‌روز، پردازش‌های تکمیلی نیز با لحاظ کردن این موضوع ادامه یافت تا برخی مودهای مخفی نیز آشکار شوند. در مرحله بعد از انتخاب نگاشت‌های مناسب، ضرایب اصلاح دستگاهی به رکوردها اعمال

۱ در مرکز، حس گر ۹ در تکیه گاه و حس گری که در پاسخها کاهش یابد. در شکل (۸) نمونه‌ای از تحلیل‌ها به روش یک چهارم سمت راست سد قرار داشت) تا تأثیر نقطه مرجع در چهار طیفی نشان داده شده است.



(الف) تحلیل نگاشت ثبت شده با سنسور شماره ۱



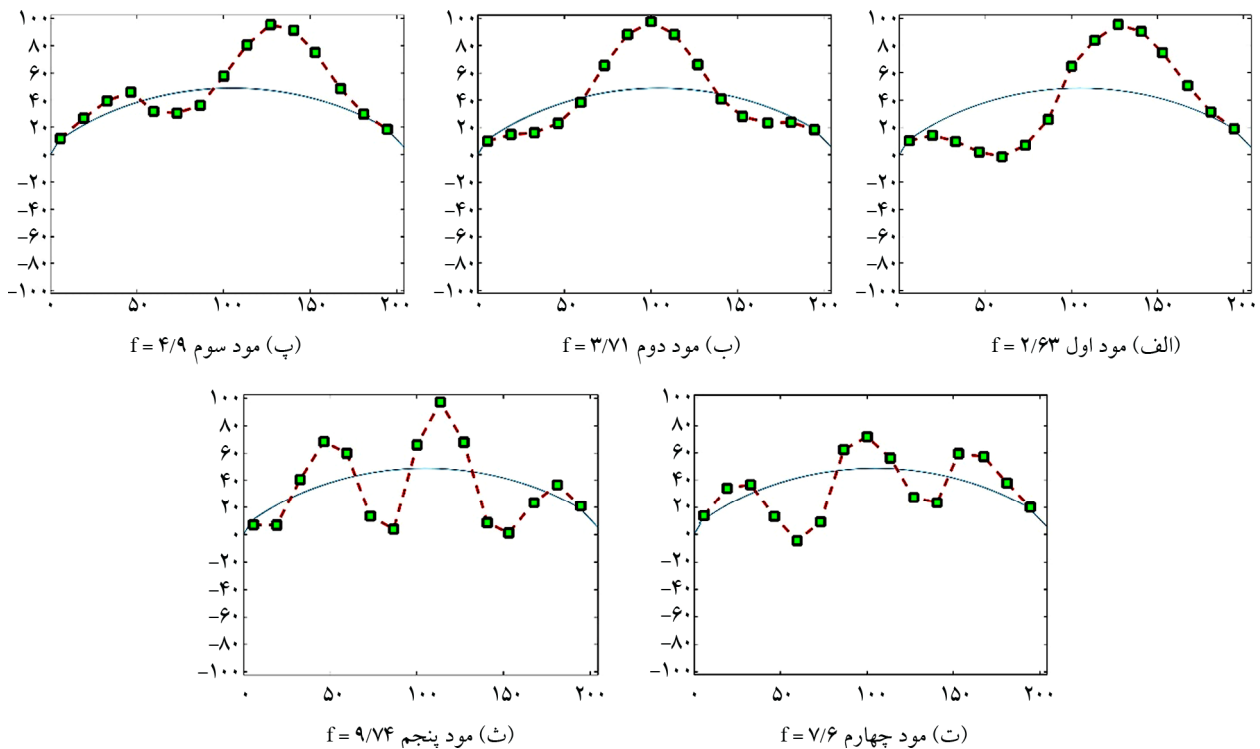
(ب) تحلیل نگاشت ثبت شده با سنسور شماره ۱۲

در تاریخ ۲۰۱۷/۰۶/۰۶ از ساعت ۱۳:۰۰ تا ۲۰:۳۲ به روش چهار طیفی (سنسور مرجع، شماره ۹ انتخاب شده است)

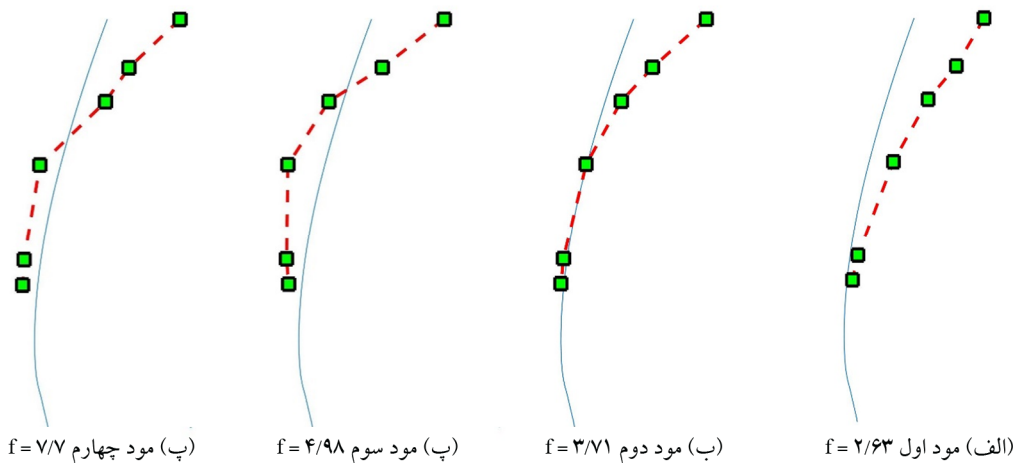
شکل (۸): نمونه‌ای از تحلیل نگاشت‌های آزمایش ارتعاش محیطی سد دز با استفاده از روش چهار طیفی.

ندارند، برای بررسی شکل مودی سد در ارتفاع، فقط از حس‌گرهایی که در شفت مرکزی نصب شده‌اند استفاده شده است. با توجه به اینکه در بعضی از مودهای شناسایی شده سد، در محل شفت مرکزی سد گره وجود دارد، از طیف‌های این حس‌گرها نمی‌توان جهت تشخیص مودها استفاده کرد و فقط می‌توان برای فرکانس‌های مودی شناسایی شده از سایر آرایه‌ها شکل مودی در ارتفاع را رسم نمود. شکل (۱۰) اشکال مودی سد در ارتفاع را نشان می‌دهد.

در نهایت پس از پردازش تمامی ۱۶ نگاهت حس‌گرها در هر زمان، بررسی آنها و رسم اشکال مودی پنج فرکانس مودی سد از این روش به دست آمد. در شکل (۹) شکل‌های مودی سد دز که در این روش شناسایی شده‌اند رسم شده است. جهت شناسایی شکل‌های مودی سد در ارتفاع با توجه به اینکه حس‌گرهایی که در شفت‌های کناری در آرایش پنجم نصب شده بودند تأثیر زیادی در شناسایی مشخصات دینامیکی و رسم شکل مودی



شکل (۹): شکل‌های مودی سد دز در تراز تاج با استفاده از روش چهار طیفی.



شکل (۱۰): اشکال مودی سد دز با استفاده از روش چهار طیفی در آرایش ارتفاعی حس‌گرها.

۲-۲- روش تجزیه دامنه فرکانس

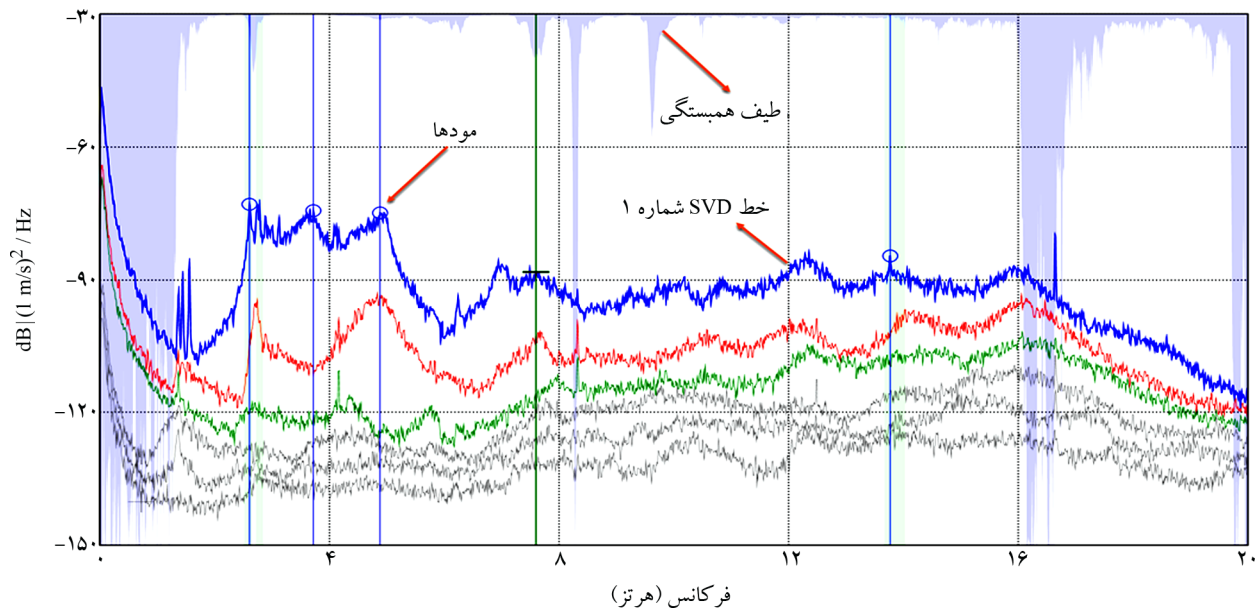
در این روش که توسط برینکر ارائه شده است، ابتدا ماتریس چگالی طیف توان محاسبه و سپس تکنیک تجزیه مقادیر تکین بر روی آن اعمال می‌شود و به وسیله آن مقادیر فرکانس‌های طبیعی، اشکال مودی و ضرایب میرایی به دست می‌آیند. در شکل (۱۱) نمونه‌ای از تحلیل‌ها به این روش که بر روی نگاشت‌های سد دز انجام شده، نشان داده شده است.

در این روش از دو معیار برای تعیین فرکانس‌های اصلی سازه استفاده می‌شود. یکی معیار همبستگی می‌باشد که در شکل (۱۱) مشخص شده و دیگری معیار تضمین مودال (MAC) است. معیار همبستگی همان تعریف طیف همبستگی در روش چهار طیفی را دارد، بدین صورت که هر چقدر به عدد یک نزدیک‌تر گردد تضمین مناسب‌تری برای فرکانس اصلی سازه می‌باشد. در ارتباط با معیار تضمین مودال در بخش ۲-۲ به صورت مفصل

بحث شد. در شکل (۱۲) نمونه‌ای از کاربرد معیار MAC در شناسایی فرکانس‌های مودی نشان داده شده است. با استفاده از روش FDD چهار مود اول سد دز شناسایی شد (شکل ۱۳).

۳-۲- روش تجزیه دامنه فرکانس افزایش یافته

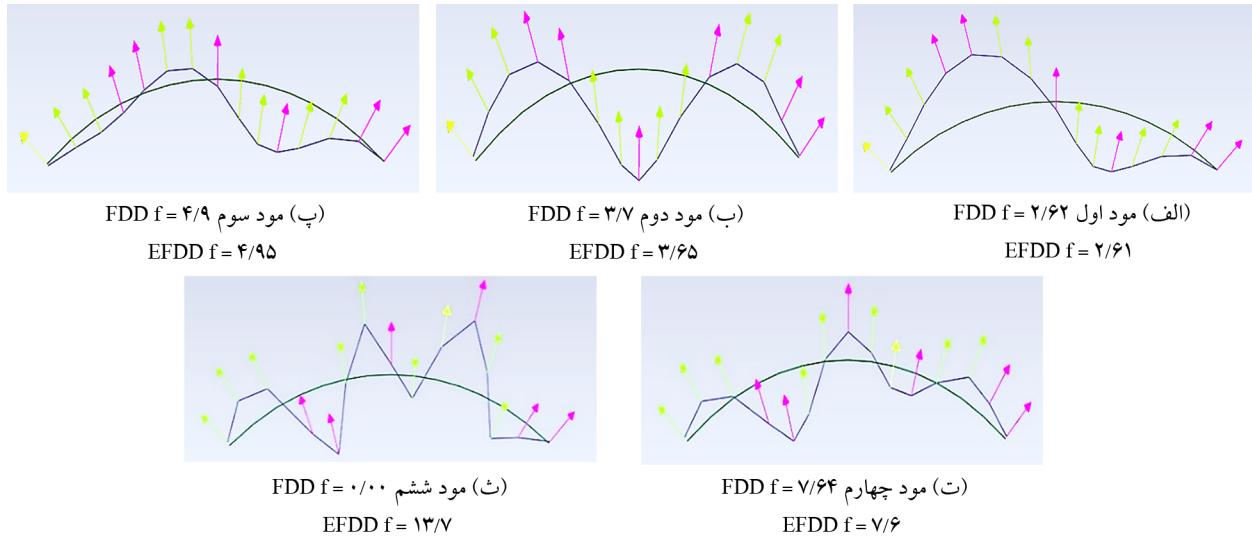
طیف‌های استخراج‌شده از این روش همان طیف‌های روش FDD هستند با این تفاوت که در این روش انتخاب فرکانس‌های مودی با استفاده از الگوریتم ارائه‌شده در بخش ۲-۳ انجام می‌شود و فقط در انتخاب قله‌های طیف تغییر به وجود آمده است. در نهایت پس از بررسی تمام نگاشت‌های سد در آرایش اول حس گرها، پنج فرکانس مودی برای سد دز با استفاده از روش EFDD شناسایی شد. در شکل (۱۴) اشکال مودی شناسایی شده با استفاده از این روش برای آرایش اول نشان داده شده است. مود پنجم سد در این روش شناسایی نشد.



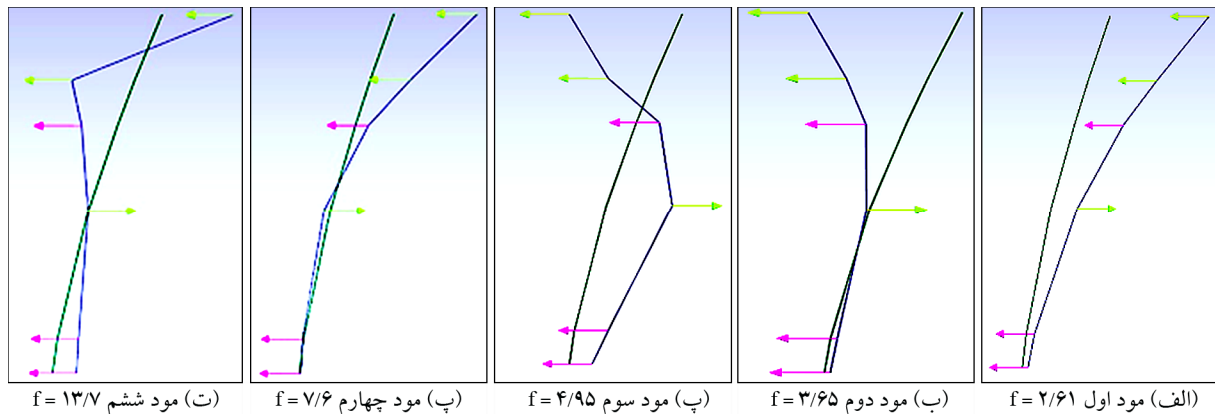
شکل (۱۱): تحلیل نگاشت ۰۶/۰۶ از ۲۰:۱۳:۰۰ تا ۲۰:۳۲:۰۰ به روش FDD.

	۲/۶۲۲ هرتز	۳/۷۰۱ هرتز	۴/۸۹۷ هرتز	۷/۶۴۲ هرتز	۱۳/۹۶۵ هرتز	۱۶/۰۵ هرتز
۲/۶۲۲ هرتز	۱	۰/۰۲۵	۰/۲۶۶	۰/۴۲	۰/۱۶۵	۰/۰۴۶
۳/۷۰۱ هرتز	۰/۰۲۵	۱	۰/۰۱۲	۰/۰۴۳	۰/۰۶۶	۰/۱۳۷
۴/۸۹۷ هرتز	۰/۲۶۶	۰/۰۱۲	۱	۰/۰۹۳	۰/۰۷۱	۰/۱۴۹
۷/۶۴۲ هرتز	۰/۴۲	۰/۰۴۲	۰/۰۹۳	۱	۰/۱۶۳	۰/۰۲۸
۱۳/۹۶۵ هرتز	۰/۱۶۵	۰/۰۶۶	۰/۰۷۱	۰/۱۶۳	۱	۰/۰۰۷
۱۶/۰۵ هرتز	۰/۰۴۶	۰/۱۳۷	۰/۰۴۹	۰/۰۲۸	۰/۰۰۷	۱

شکل (۱۲): معیار MAC در هر فرکانس با فرکانس‌های دیگر (نگاشت ۰۶/۰۶ از ۲۰:۱۳:۰۰ تا ۲۰:۳۲:۰۰ به روش FDD).



شکل (۱۳): اشکال مودی سد دز در تراز تاج با استفاده از روش‌های FDD و EFDD.



شکل (۱۴): اشکال مودی سد دز با استفاده از روش‌های FDD و EFDD در آرایش ارتفاعی حس‌گرها.

نیم‌توان که از چگالی طیفی توان بهره می‌برد از رکوردهای طولانی‌تری استفاده شده است. پس از انتخاب رکوردهای مناسب با استفاده از الگوریتم محاسبه میرایی به روش نیم‌توان، مقدار میرایی برای هر فرکانس مودی در هر دستگاه محاسبه می‌گردد. برای محاسبه میرایی از روش نیم‌توان نیاز است که وضوح فرکانسی در اطراف قله فرکانسی مورد نظر به حدی باشد که بتوان محل دقیق عرض نوار نیم‌توان را مشخص کرد، برای رسیدن به این خواسته با استفاده از یک تابع درونیابی در محل قله فرکانسی با نرخ نمونه‌برداری بالا می‌توان این مسئله را حل نمود. سپس با توجه به شکل مودی در میان آن دستگاه‌هایی که در محل گره‌ها قرار نگرفته‌اند و می‌توان به نحوه تجزیه سیگنال آنها اطمینان کرد، میانگین‌گیری انجام می‌شود و در نهایت مقدار

با توجه به شباهت در مبنای تنوریک دو روش FDD و EFDD، در آرایش ارتفاعی تفاوت چندانی بین آنها دیده نشد.

۲-۴- محاسبه میرایی‌های مودی

برای هر مود سد یک نسبت میرایی معادل به‌وسیله یک منحنی یک درجه آزاد هم‌اندازه با پیک آن مود به دست می‌آید. میرایی مودی برای سد دز در این تحقیق با استفاده از روش نیم‌توان محاسبه شده است. مقدار میرایی در این روش با استفاده از نگاشت تجزیه شده در فرکانس تشدید و محاسبه PSD آن به دست آمد. از آنجایی که استفاده از رکورد با طول زمانی کوتاه میزان دو خطای پیشا و انحراف [۱۴] را افزایش می‌دهد، به همین دلیل در این بخش جهت استفاده از روش

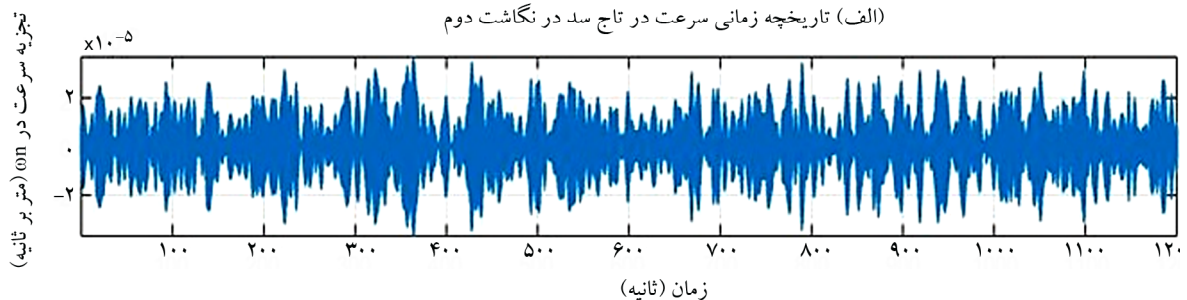
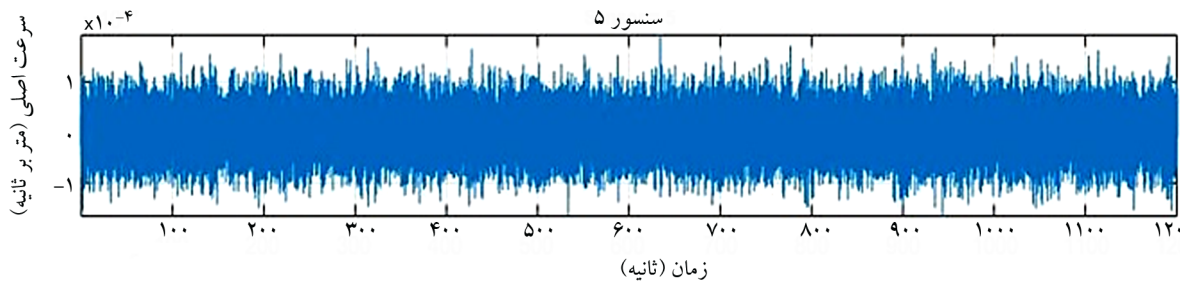
روش نیم توان نمی توان مقدار میرایی را برای سد دز به درستی محاسبه کرد. مشکلی مشابه در هنگام محاسبه میرایی در سایر سدهای بتنی در جهان با این روش وجود دارد [۲۴-۲۵].

جدول (۳): مقادیر میرایی محاسبه شده با استفاده از روش نیم توان در آزمایش ارتعاش محیطی.

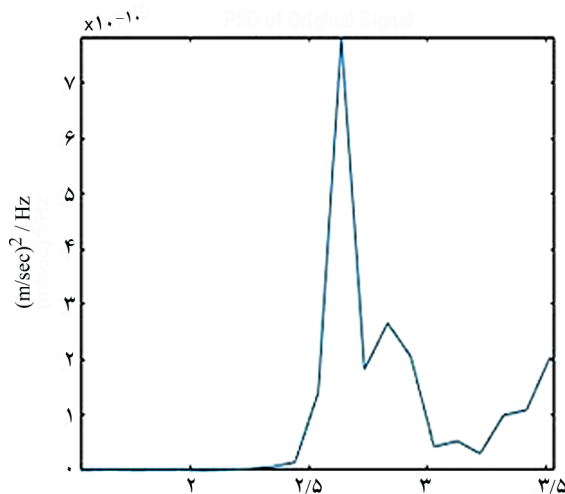
شماره تکاشت	(درصد)	مود اول	مود دوم	مود سوم	مود چهارم	مود پنجم
۱	۵	۱/۵۱	۱/۲۱	۱/۷۶	۰/۶۴	۰/۴۶
۲	۵	۱/۶	۱/۵۲	۱/۱	۰/۶۶	۰/۴۲

میرایی در هر مود محاسبه می گردد. در شکل (۱۵) نمونه ای از طیف های میرایی محاسبه شده در مود اول (۲/۶۳ هرتز) قرار گرفته است.

در نهایت مقادیر میرایی محاسبه شده در هر فرکانس به دست می آید. در جدول (۳) مقادیر میرایی محاسبه شده در هر مود برای دو نگاشت آزمایش ارتعاش محیطی، قرار داده شده است. با در نظر گرفتن این موضوع که در اکثر سازه ها مقدار میرایی در حالت خطی، مقداری بین ۳-۵ درصد می باشد، با بررسی نتایج به دست آمده از این جدول، مشخص می گردد که با استفاده از

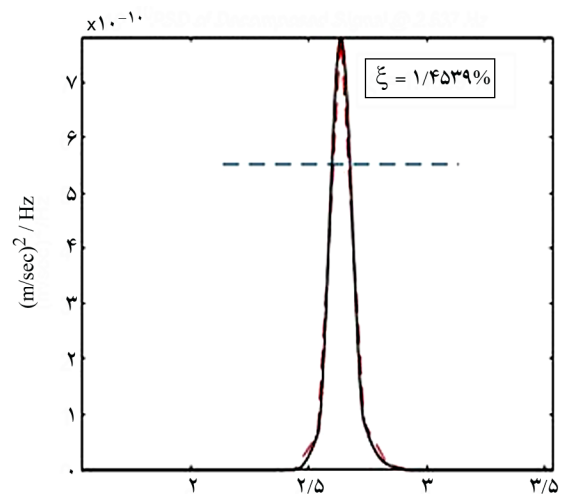


(ب) تاریخچه زمانی رکورد سرعت تجزیه شده در فرکانس تشدید ۲/۶۳ هرتز



فرکانس (هرتز)

(ت) طیف PSD رکورد اصلی



فرکانس (هرتز)

(پ) طیف PSD رکورد تجزیه شده در فرکانس تشدید ۲/۶۳ هرتز

شکل (۱۵): محاسبه نسبت میرایی مود اول حاصل از آزمایش ارتعاش محیطی در سد دز.

جدول (۴): مشخصات دینامیکی سد دز و مقایسه با سد بیر که.

شماره مود	نوع مود	فرکانس مودی سد بیر که [۲۴] f_i (هرتز)	فرکانس مودی سد دز (هرتز) f_i	محدوده فرکانسی سد دز (هرتز) Δf_i	میرایی سد بیر که [۲۴] ξ (%)	میرایی نیم توان سد دز ξ (%)
۱	مود اول نامتقارن	۲/۷۵	۲/۶۲	۲/۷-۲/۵	۱/۱۳	۱/۳
۲	مود اول متقارن	۳/۴۱	۳/۷۱	۳/۷۷-۳/۶	۰/۳۷	۱/۴۱
۳	مود دوم نامتقارن	۴/۷۸	۴/۹۱	۴/۹۸-۴/۸۵	۰/۷۸	۱/۸۵
۴	مود دوم متقارن	۷/۷۹	۷/۶۳	۷/۷۱-۷/۶	۰/۴۵	۰/۶۶
۵	مود سوم نامتقارن	۹/۶۶	۹/۸۳	۹/۹-۹/۷	۰/۴۴	۰/۷۷
۶	مود چهارم نامتقارن	---	۱۳/۹۲	۱۳/۹۸-۱۳/۸	---	۰/۶

۷-۵- مقایسه توانمندی روش‌های مختلف پردازش سیگنال

هر کدام از روش‌های استفاده شده در این تحقیق دارای معایب و مزایایی نسبت به یکدیگر می‌باشند. در میان این روش‌ها، روش چهارطیفی به دلیل کنترل هم‌زمان چهار طیف اصلی با یکدیگر یک روش مطمئن برای به دست آوردن فرکانس‌های اصلی سازه می‌باشد اما به دلیل اینکه باید تمامی حس‌گرها با مراجع مختلف به صورت عینی کنترل شوند امکان ایجاد خطا در این روش موجود است. در روش FDD چگالی طیف توان و همبستگی حس‌گرها به صورت خود کار کنترل شده و از یک ابزار قدرتمند ریاضی به نام SVD نیز برای تجزیه ماتریسی داده‌ها استفاده می‌شود. همچنین برای کنترل بیشتر طیف همبستگی نیز به کار برده می‌شود که می‌تواند یک اطمینان مضاعف را به نتایج حاصله بدهد. در هر دو روش برای به دست آوردن میرایی از روش نیم توان استفاده می‌شود که با توجه به دلایل گفته شده روش مناسبی برای تشخیص میرایی نیست. روش EFDD از همان طیف‌های روش FDD استفاده می‌کند با این تفاوت که از الگوریتم خاصی جهت انتخاب قله در طیف بهره می‌برد. این موضوع باعث می‌شود که دقت این روش نسبت به روش FDD کمی بهبود یابد.

مشخصات دینامیکی سد دز در راستای بالا دست- پایین دست در جدول (۴) خلاصه شده است. در ارتباط با جدول (۴) منظور از محدوده فرکانس (Δf_i) بازه فرکانسی است که در هنگام پردازش نگاشت‌های مختلف، مود ارتعاشی مربوطه در این بازه فرکانسی شناسایی می‌شد لیکن f_i معرفی شده بیشترین تکرار را در مطالعات فوق داشته است.

روند شناسایی مشخصات دینامیکی سدها با استفاده از آزمایش‌های درجا یک پروسه تجربی است که میزان دقت نتایج حاصل آن بستگی زیادی به تجربه محقق دارد. جهت افزایش دقت تحقیقات حاضر مطالعات گسترده‌ای در ادبیات فنی در این زمینه صورت گرفت تا الگوی کلی اشکال مودی سدهای بتنی قوسی مشخص گردد [۱۲]. در میان سدهایی که در ادبیات فنی مورد بررسی قرار گرفتند، سد بتنی دو قوسی بیر که [۲۴] بیشترین شباهت را از نظر هندسه (نسبت طول به ارتفاع سد بیر که ۱/۳۴ و نسبت طول به ارتفاع سد دز ۱/۰۴) و شکل دره (هر دو سد در دره‌ای به شکل حرف V قرار دارند) به سد دز دارد. از این سو برای صحت‌سنجی نتایج به دست آمده از آزمایش‌های ارتعاش محیطی سد دز، از نتایج موجود آزمایش ارتعاش محیطی سد بیر که استفاده شد.

۸- نتیجه گیری

پژوهش حاضر به منظور تعیین مشخصات دینامیکی سد بتنی دو قوسی دز با استفاده از آزمایش ارتعاش محیطی انجام شد. در این راستا سد با استفاده از تعداد بسیار زیادی حس‌گر لرزه‌نگار سه مؤلفه‌ای در چهار آرایه مختلف ابزار گذاری و جهت پردازش

۷-۶- معرفی مشخصات دینامیکی سد دز

پس از بررسی تمامی رکورد‌های آزمایش ارتعاش محیطی با استفاده از سه روش مختلف پردازش سیگنال و رسم شکل مودی برای آنها در هر چهار آرایه حس‌گرها بر روی بدنه سد،

2. Jafari, M.K. and Davoodi, M. (2002) Ambient vibration and forced vibration tests in embankment dams. *International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Technical Report*, Tehran, I.R. Iran (in Persian).
3. Kaveh, M. (2018) *Accuracy of Classical Signal Processing Methods in Evaluating Dynamic Characteristics of Dez Dam and Comparing with Numerical Results*. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, M.Sc. Thesis, Tehran, I.R. Iran (in Persian).
4. Clough, R.W., Chang, K., Chen, H., Stephen, R.M., and Ghanaat, Y. (1984) *Dynamic Response of Xiang Hong Dian Dam*. University of California, Technical report, ucjjeerc-84j02.
5. Bukenya, P., Moyo, P., Beushausen, H., and Oosthuizen, C. (2014) Health monitoring of concrete dams: a literature review. *J. Civ. Struct. Heal. Monit.*, 4(4), 235-244.
6. Mivehchi, M.R., Ahmadi, M.T., and Hajmomeni, A. (2003) Effective techniques for arch dam ambient vibration test: application on two Iranian dams. *J. Seismol. Earthq. Eng.*, 5(2), p. 23.
7. Hajmomeni, A. (2001) *Dynamic Propertice Evaluation of a Concrete Arch Dam by Comparing Mathematical Model and Ambient Vibration Tests Results*. Tarbiat Modares University, M.Sc. Thesis, I.R. Iran (in Persian).
8. Mirzabozorg, H. (2014) *Safety Evaluation of Dez Concrete Arch Dam*. Technical Report, Khuzestan Water and Power Authority.
9. Hariri-Ardebili, M.A. and Kianoush, M.R. (2014) Integrative seismic safety evaluation of a high concrete arch dam. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 67, 85-101.
10. Hesan, M. (2007) *Evaluating The Different System Identification Methods In Structures Using Ambient Vibration*. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, M.Sc. Thesis, Tehran, Iran (in Persian).
11. Khadami, S. (2006) *Processing the Non-Stationary signals of Masjed Soleiman and Marun*

نگاشت‌های آزمایش ارتعاش محیطی از روش‌های پردازش سیگنال چهار طیفی، تجزیه دامنه فرکانس و تجزیه دامنه فرکانس افزایش یافته استفاده شد تا علاوه بر افزایش دقت تحلیل‌ها جهت تشخیص مشخصات دینامیکی، مقایسه‌ای نیز بین این روش‌ها انجام شود.

اولین یافته‌ای که از پژوهش حاضر به دست آمد، این بود که روش‌های FDD و EFDD نسبت به روش چهار طیفی به علت اینکه به‌طور هم‌زمان تمام طیف‌های سیگنال‌ها را بررسی می‌کنند و برای تأیید اشکال مودی از معیار MAC بهره می‌برند، از دقت بهتری جهت تعیین فرکانس‌های مودی برخوردار هستند. همچنین میزان اختلاف دو روش FDD و EFDD بسیار کم است و بهتر است از روش EFDD به‌طور کل استفاده شود.

در نهایت با بررسی تمام نگاشت‌ها، شش مود ارتعاشی سد دز در بازه فرکانسی ۲/۶۳ تا ۱۳/۹۲ هرترز شناسایی شدند. سپس برای فرکانس‌های مودی شکل مودی رسم شد. جهت تعیین میرایی‌های مودی از روش نیم‌توان استفاده و نسبت میرایی سد در محدوده ۱/۸ تا ۰/۶ درصد تعیین شد و مشخص گردید که با استفاده از روش نیم‌توان نمی‌تواند مقدار میرایی منطقی را برای سدهای بتنی محاسبه کرد و در این زمینه باید تحقیقات بیشتری صورت گیرد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از آقای مهندس محسن کاوه به دلیل همکاری‌های ایشان در انجام آزمایش و تحلیل نگاشت‌ها کمال تشکر را دارند. همچنین از تمامی مهندسين در سازمان آب و برق خوزستان، کنترل پایداری سد دز مخصوصاً مهندس موسوی، مهندس عرب و مهندس رئوفی نسب مدیر سد دز. نهایتاً از تمامی کارشناسان آزمایشگاه مهندسی زلزله پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله علی‌الخصوص مهندس بندری و مهندس محمودی سپاسگزاریم.

مراجع

1. Tarinejad, R., Ahmadi, M.T., and Harichandran, R.S. (2014) Full-scale experimental modal analysis of an arch dam: The first experience in Iran. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 61, 188-196.

20. Abbasi, S. and Rashidi, N. (2015) *Dez Dam Safety and Sustainability Report*. Technical Report, Khuzestan Water and Power Authority, Deputy of Sustainability Control.
21. Karun and Dez Catchments (2020) Iran Water and Power Resources Development Company, Available: <http://www.iwpc.com/st/12>.
22. Matlab [Computer Software] (2018) Available: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
23. ARTeMIS Modal software for Operational Modal Analysis [Computer Software] (2019) Available: <http://www.svibs.com/Products>.
24. Sevim, B.B., Altunişik, A.C., Bayraktar, A. Altunis, A.C., and Bayraktar, A. (2012) Earthquake behavior of berke arch dam using ambient vibration test results. *J. Perform. Constr. Facil.*, **26**(6), 780-792.
25. LOH, C.-H.H. and WU, T.-C.C. (2000) System identification of Fei-Tsui arch dam from forced vibration and seismic response data. *J. Earthq. Eng.*, **4**(4), 511-537.
12. Eghbali, D. (2018) *Performance Evaluation of Advanced Time-Frequency Signal Processing Methods to Determine Dynamic Characteristics of Dez Dam*. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, M.Sc. Thesis, Tehran, Iran (in Persian).
13. Jafari, M.K. and Davoodi, M. (2006) Dynamic characteristics evaluation of Masjed Soleiman Dam using in situ dynamic tests. *Can. Geotech. J.*, **43**(10), 997-1014.
14. Davoodi, M. (2003) *Dynamic Characteristic Evaluation of Embankment Dams by Forced and Ambient Vibration Tests*. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Ph.D. Thesis, Tehran, Iran (in Persian).
15. Brincker, R., Zhang, L., and Andersen, P. (2001) Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition. *Smart Mater. Struct.*, **10**(3), p. 441.
16. Brincker, R., Ventura, C., and Andersen, P. (2001) Damping estimation by frequency domain decomposition. in *19th International Modal Analysis Conference*, 698-703.
17. Zhang, L. and Brincker, R. (2005) An overview of operational modal analysis: major development and issues. *1st International Operational Modal Analysis Conference*, 179-190.
18. Gade, S., Moller, N.B., Herlufsen, H., and Konstantin-Hansen, H. (2005) Frequency domain techniques for operational modal analysis. *1st IOMAC Conference*.
19. Michel, C., Guéguen, P., El Arem, S., Mazars, J., and Kotronis, P. (2010) Full-scale dynamic response of an RC building under weak seismic motions using earthquake recordings, ambient vibrations and modelling. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **39**(4), 419-441.

واژه‌نامه

Ambient Vibration Test	۱- آزمایش ارتعاش محیطی
Peak Peaking	۲- جستار قله
Power Spectral Densities	۳- چگالی طیف توان
Coherence Spectrum	۴- طیف ارتباط
Frequency Domain Decomposition	۵- تجزیه دامنه فرکانس
Enhanced Frequency Domain Decomposition	۶- تجزیه دامنه فرکانس افزایش یافته
Stochastic Subspace Identification	۷- شناسایی زیر فضای تصادفی
Cross Power Spectra	۸- طیف توان متقاطع
Half Power Method	۹- روش نیم توان
Modal Assurance Criterion (MAC)	۱۰- معیار تضمین مودال

Determination of Dynamic Characteristics of Double Curvature Concrete Dez Dam by Using Ambient Vibration Test with Three Different Signal Processing Methods

Mohammad Davoodi^{1*} and Dariush Eghbali²

1. Assistant Professor, Geotechnical Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran, *Corresponding Author, email: m-davood@iiees.ac.ir
2. M.Sc. Student, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran

Considering the human and financial costs resulting from the destruction of dams, studying the seismic behavior of these structures and controlling their stability against events like earthquakes is crucially important. Numerical models are utilized to carry out this vital process. However, these models possess many assumptions that differ between mathematic models and reality. As a result, experts use system identification methods to ease such problems. Generally, system identification consists of two parts; experimental tests and signal processing. The first part refers to field experiments like ambient vibration tests, and the latter section means analyzing records gathered from the field tests. From the estimated dynamic properties, the mathematical models can be calibrated to evaluate the possible responses of the building under study to future earthquakes.

The ambient vibration test, used in this paper, is one of the dynamic structural tests which records natural vibrations such as wind and human activities on the structures. These oscillations stimulate the structure's dynamic properties on a marginal scale which can be seen and analyzed in seismic records. Recently, an ambient vibration experiment was conducted on the double curvature concrete Dez dam, which is one of the highest dams in the country. The dam is currently 203 meters high, and a project is being undertaken to add around 8 meters to its current height. For this reason, evaluating the dynamic characteristics of its body and calibrating the existing dam's numerical models is vital. In this regard, the ambient vibration test with 19 seismometers and accelerometers was conducted when the height of the dam reservoir was at its maximum water level (MWL). Sensors were placed on the dam in four different layouts to obtain dynamic mode shapes from the plan and the dam's height.

In this paper, some stationary records have been selected from data recorded within several days, and the data are analyzed with three different methods. These methods are 4-Spectrum, Frequency Domain Decomposition (FDD), and Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD). Each of the techniques used in this research has advantages and disadvantages. The 4-spectrum method is a reliable method for obtaining the modal frequencies owing to the simultaneous control of the four spectral with each other. However, since all sensors' spectrums must be separately controlled by different source points, some possible errors lie in this approach. In the FDD, the power spectrum density and correlation spectrum are automatically controlled by the computer, and a powerful mathematical tool called SVD is used to analyze the data matrix. The EFDD has a similar structure to the FDD method, while it uses a special algorithm to select the peaks in the spectrums. This makes it slightly more accurate than FDD. Furthermore, to calculate modal damping, the Half Power method was used in all these methods.

After analyzing all the records with different system identification methods, natural frequencies in six modes were found in the frequency range of 2.63 Hz to 13.92 Hz and mode shapes in five modes were drawn. Likewise, the damping ratio was estimated at 1.8% to 0.6%, which shows the half-power method is not an accurate way to calculate the damping ratio in concrete dams. Finally, the process of system identification, using field experiments, is an experimental process, for obtaining more accuracy, the results extracted from the Dez dam were compared with the outcome of Birkeh Dam's essay, which has the same features as the Dez dam. The comparison of the system identification results shows that the extracted outcomes are relatively precise, which is suitable for calibrating the existing computer models.

Keywords: Dez Dam, Ambient Vibration Test, 4-Spectrum Method, Frequency Domain Decomposition (FDD), Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD), Dynamic Properties.