

برآورد بسامدها و اشکال مودی سدهای خاکی مسجدسلیمان و مارون با استفاده از روش‌های کلاسیک و پیشرفته‌ی پردازش سیگنال

سعید خادمی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

محمد داودی (استادیار)

بزهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

در این نوشتار، نتایج مشخصات دینامیکی دو سد خاکی بزرگ کشور که با استفاده از پردازش رکوردهای ثبت شده در انفجارهای مختلف سایتی محاسبه شده‌اند ارائه می‌شود. بدین منظور، از تاریخچه‌ی زمانی سرعت ثبت شده در ۱۲ انفجار مختلف سایت سد مسجدسلیمان و ۷ انفجار مختلف سایت سد مارون استفاده شد و با توجه به عدم دسترسی به رکورد محرک ورودی، مقادیر بسامدها و اشکال مودی سدهای مذکور با استفاده از روش چهارطیفی برآورد شد. به دلیل مانا نبودن رکوردهای ثبت شده و همچنین افزایش دقت محاسبات، از روش پیشرفته‌ی پردازش سیگنال نیز در حوزه‌ی زمان - بسامد (TFD)^[۱] استفاده شد. در نوشتار حاضر، نتایج محاسبات مذکور و مقایسه‌ی کارایی هر کدام از دو روش فوق ارائه خواهد شد.

واژگان کلیدی: سد خاکی، پردازش سیگنال، روش چهارطیفی، توزیع زمان - بسامد (TFD)، بسامد مودی، اشکال مودی، آزمایش انفجار.

s.khademi59@yahoo.com
m-davood@iiees.ac.ir

۱. مقدمه

مشاوران طرح‌های سدسازی عمدتاً از روش‌های عددی برای مطالعه‌ی رفتار لرزه‌ی سدهای خاکی استفاده می‌کنند که بسته به دقت این روش‌ها و همچنین شرایط ساخت و اجرای سد، رفتار پیش‌بینی شده در مقابل زمین لرزه با رفتار واقعی می‌تواند متفاوت باشد. بدین منظور ضروری است با انجام آزمایش‌های ارتعاشی درجا بر روی چندین سد خاکی بزرگ در کشور، پارامترهای ارتعاشی بدنه‌ی سدهای مورد مطالعه به دست‌آید و درصد انطباق رفتار واقعی سد با مقادیر فرض شده در روند طراحی و تحلیل بررسی شود.^[۱] با مطالعه‌ی تاریخچه‌ی آزمایش‌های ارتعاشی درجا در سدهای خاکی،^[۲] انواع آزمایش‌های مذکور را می‌توان در چهارگروه کلی: ثبت ارتعاشات سد به زلزله، آزمایش ارتعاش اجباری، آزمایش ارتعاش محیطی و ثبت پاسخ سد به انفجارهای مختلف سایتی طبقه‌بندی کرد. بررسی رفتار لرزه‌ی سدهای خاکی با استفاده از زلزله‌های واقعی به دلیل نیاز به ابرارگذاری دقیق بر روی بدنه‌ی سد از یک طرف و وقوع زمین لرزه در منطقه‌ی احداث سد از طرف دیگر اغلب دشوار و گاهی دست نیافتنی است. در این راستا، دیگر آزمایش‌های ارتعاشی درجا را با توجه به پیشرفت‌های اخیر در روش‌های پردازش سیگنال می‌توان به‌منزله‌ی روشی مناسب برای تعیین مشخصات درجا‌ی دینامیکی مودی شامل بسامدها، اشکال و میرایی‌های مودی سدهای خاکی و نیز سایر انواع سازه‌های مهم به‌شمار آورد. در این میان آزمایش ارتعاش محیطی از چنان جایگاهی برخوردار است که معمولاً توصیه می‌شود در برخی بازدیدهای

دوره‌ی سد انجام گیرد. در مجموع با مقایسه‌ی مزایا و معایب هر کدام از آزمایش‌های ارتعاشی درجا در سدهای خاکی می‌توان گفت که استفاده از رکوردهای زمین لرزه‌های ثبت شده در بدنه‌ی سدهای خاکی با وجود اینکه اطلاعات با ارزشی از رفتار غیرخطی بدنه‌ی سد را در اختیار پژوهشگر قرار می‌دهد ولی به‌علت قابل کنترل نبودن منبع ایجاد موج زمین لرزه از نظر زمانی، مکانی، شدت ارتعاش و تکرارپذیری و همچنین نیاز به استقرار دائم شبکه‌ی شتاب‌نگاری در بدنه‌ی سد، با مشکلاتی مواجه است که برای راه‌حل، از دیگر آزمایش‌های ارتعاشی درجا (با محدودیت کوچک بودن دامنه‌ی ارتعاشات) در سدهای خاکی استفاده شده است.^[۳] در مورد انجام آزمایش‌های ارتعاشی درجا در سدهای خاکی به‌نظر می‌رسد با توجه به اینکه تحلیل دینامیکی سدهای مذکور در زمین لرزه‌های قوی عمدتاً با فرض رفتار واقعی غیرخطی خاک، فرض محیط دو فاز و در حوزه‌ی زمان انجام می‌گیرد، استفاده از نتایج آزمایش‌های ارتعاشی درجا عمدتاً با هدف تدقیق مشخصات دینامیکی (برای نمونه پارامترهای مصالح) در محدوده‌ی تغییرشکل‌های کوچک قابل توجیه است. در این صورت با مقایسه‌ی نتایج تحلیل مودال و آزمایش‌های ارتعاشی درجا، مدل عددی برای استفاده در تحلیل‌های دینامیکی کامل‌تر تدقیق می‌شود و ارزیابی دقیق‌تر رفتار لرزه‌ی سد در زمین لرزه‌های قوی‌تر ممکن می‌شود. در واقع توصیه شده است که از نتایج آزمایش‌های ارتعاش اجباری، محیطی و انفجار برای افزایش دقت مدل‌های پایه (در محدوده‌ی رفتار خطی) استفاده شود تا با برون‌یابی رفتار غیرخطی، پیش‌بینی رفتار واقعی سدها در زمین لرزه نیز ممکن

تاریخ: دریافت ۱۳۸۶/۱۱/۳۰، دوری ۱۳۸۷/۹/۱۱، پذیرش ۱۳۸۸/۳/۳.

نزدیک به هم و یا روی هم افتاده باشد، مشخص کردن بسامدهای تشدید و اشکال مودی با مشکلاتی مواجه می‌شود که برای گریز از این مشکلات، در تفسیر نتایج آزمایش‌های ارتعاش محیطی از توزیع زمان - بسامد استفاده می‌شود.^[۱] در ادامه‌ی نوشتار، ابتدا مختصری در مورد مبانی روش‌های چهارطیفی و TFD و نحوه‌ی برآورد بسامدها و اشکال مودی سدهای خاکی با استفاده از این دو روش توضیح داده خواهد شد و سپس به شرح نحوه‌ی انجام آزمایش و استخراج بسامدها و اشکال مودی سدهای مسجدها و ماریون پرداخته خواهد شد.

۲. مبانی روش چهارطیفی

۱.۲. تئوری محاسبات چهارطیفی

نقطه‌ی قوت روش چهارطیفی در برآورد بسامدها و اشکال مودی سدهای خاکی، استفاده‌ی هم‌زمان از خاصیت چهارطیف: PSD، CPS، CCPS و CS در حالت در دسترس نبودن محرک ورودی است. با استفاده از این روش و الگوریتم ارائه شده در قسمت بعدی، بسامدهای طبیعی سیستم به راحتی از سایر قله‌های موجود در طیف چگالی توان متمایز می‌شوند.

الف) محاسبه‌ی PSD از تابع خود همبستگی

با انجام تبدیل فوریه‌ی تابع خود همبستگی^{۱۱} R_{xx} یک نگاشت می‌توان به مقادیر چگالی طیف توان S_{xx} آن نگاشت دسترسی پیدا کرد:^[۱]

$$R_{xx}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t)x(t+\tau)dt \quad (۱)$$

$$S_{xx}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-J2\pi f\tau} d\tau \quad (۲)$$

در رابطه‌ی ۱، $J = \sqrt{-1}$ است.

ب) محاسبه‌ی PSD با استفاده‌ی مستقیم از تبدیل فوریه

دومین راه محاسبه‌ی تابع چگالی طیفی، استفاده‌ی مستقیم از تبدیل فوریه‌ی نگاشت‌های اولیه است. اگر مجموعه‌ی نگاشت‌های پیشای مانا (وارگودیک) $\{X(t)\}$ را در نظر بگیریم به طوری که تبدیل فوریه‌ی محدود K آمین نگاشت با طول T از مجموعه‌ی نگاشت‌های فوق با رابطه‌ی ۳ تعریف شود:^[۱۶]

$$X_k(f, T) = \int_0^T x_k(t) e^{-J2\pi f t} dt \quad (۳)$$

در این صورت:

$$S_{xx}(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left[|X_k(f, T)|^2 \right], \quad f > 0 \quad (۴)$$

در رابطه‌ی ۴، آپراتور E بر روی اندیس K میانگین‌گیری می‌کند. البته این تذکر لازم است که در تجزیه و تحلیل نگاشت‌های مربوط به فرآیندهای مانا (وارگودیک) یک عضو مجموعه برای انجام محاسبات کافی است ولی برای اطمینان در عرض مجموعه نیز معدل‌گیری می‌کنند.^[۱۲] در رابطه‌ی ۴، اگر u عبارت از واحد متناظر با دامنه‌ی سیگنال $X(t)$ باشد، واحد $|S_{xx}(f)|$ بر حسب u^2/Hz خواهد شد. براساس تحقیقات انجام شده ثابت شده است که طیف مذکور که از تبدیل فوریه‌ی مستقیم نگاشت‌ها به دست آمده است با طیف به دست آمده از روش توابع همبستگی یکی است و به این تساوی عموماً رابطه‌ی وینرکینچین^{۱۲} گفته می‌شود.^[۱۶] از آنجا

شود.^[۱] همچنین نتایج مطالعات گذشتگان نشان می‌دهد بسامدهای مودی سدهای خاکی در زمین لرزه‌های قوی (در محدوده‌ی رفتار غیرخطی خاک) نسبت به نتایج حاصل از دیگر آزمایش‌های ارتعاشی درجا (به دلیل رفتار کشسانی خاک) در حدود ۱۰٪ کاهش می‌یابد^[۱] که مطلب مذکور بایستی در تدقیق مدل عددی سد ملحوظ شود.

بررسی سابقه‌ی مطالعات رفتار لرزه‌ی سدهای خاکی دنیا نشان می‌دهد که استفاده از آزمایش مدل واقعی در سدهای مذکور با استفاده از یک یا چند دستگاه لرزاننده از دهه ۱۹۶۰ آغاز شده است و تا کنون در نقاط مختلف دنیا بر روی ۱۲ سد انجام شده است. همچنین آزمایش ارتعاش محیطی و ثبت ارتعاشات حاصل از انفجار در سدهای خاکی مختلف دنیا از سال ۱۹۷۶ آغاز و تا کنون بر روی ۱۸ سد خاکی با اهداف متفاوت انجام شده است.^[۱] برای اولین بار در سدهای خاکی ایران نیز در سال ۱۳۷۹، آزمایش‌های ارتعاش محیطی و انفجار بر روی سدهای خاکی ماریون و مسجد سلیمان (به منزه‌ی بزرگ‌ترین سدهای خاکی کشور) و در سال ۱۳۸۰، آزمایش ارتعاش اجباری بر روی سد خاکی مسجد سلیمان انجام شد و مشخصات دینامیکی سدهای مذکور با پردازش رکوردهای حاصله به دست آمد.^[۱] بررسی تاریخی مطالعات صورت‌گرفته در زمینه‌ی پردازش سیگنال نشان می‌دهد که ابتدایی‌ترین روش، برآورد بسامدهای طبیعی سدها با استفاده از تبدیل سریع فوریه FFT^۲ بوده است.^[۵] ولی به دلیل معایبی از جمله تناوبی نبودن نگاشت‌های مورد استفاده، میرانشدن نگاشت‌ها در زمان بی‌نهایت و همراه بودن آن‌ها با اغتشاشات، استفاده از روش FFT در محاسبات طیفی همواره با خطا همراه است. برای ارائه‌ی راه‌حل جایگزین، استفاده از تابع چگالی طیفی توان PSD^۳ (که در متون علمی مختلف، گاهی طیف خود توان^۴، تابع چگالی خود طیف^۵ و یا به طور خلاصه خود طیف^۶ نیز گفته می‌شود)^[۶] مطرح شده است که طیف صاف و همواری به دست می‌دهد. برای تشخیص بهتر بسامدهای غالب سد، پیشنهاد شده است نگاشت‌های هم‌زمان هر دو نقطه از بدنه‌ی سد مطالعه شود و بسامدهای غالب مشترک و نوع فاز بین دو نقطه با استفاده از دامنه‌ی طیف توان مقاطع CPS^۷ و طیف فاز همبستگی مقاطع CCPS^۸ به دست آید.^[۷] برای تعیین درصد اطمینان به صحت مراحل مختلف آزمایش و تحلیل، از طیف ارتباط CS^۹ بین دو نگاشت نیز استفاده شده است.^[۸] اخیراً با معرفی روش چهارطیفی در پردازش نگاشت‌های ارتعاشات مختلف ثبت شده در بدنه‌ی سدهای خاکی سعی شده است از توانایی چهار نوع طیف مختلف (PSD، CPS، CCPS و CS) برای شناسایی دقیق‌تر بسامدها و اشکال مودی سدهای خاکی و همچنین انواع دیگر سازه‌ها استفاده شود.^[۹-۱۱] این تذکر لازم است که مبانی کلیه‌ی روش‌های مذکور، استفاده از رکوردهای مانا (یعنی سیگنال‌هایی که مشخصات آماری آن‌ها در طول زمان تغییرات ناچیزی داشته باشند) همانند رکوردهای ارتعاش محیطی بوده است.

در مطالعات شناسایی سیستم با استفاده از رکوردهای ارتعاش محیطی، گاهی یک‌های موجود در طیف‌های چهارگانه‌ی مذکور واضح نیست و تعیین دقیق آن‌ها با مشکلاتی مواجه می‌شود به طوری که برخی از مودها مخفی مانده است و شناسایی نمی‌شوند. در چنین مواردی، از ارتعاشات ثبت شده در نقاط مختلف بدنه‌ی سد در اثر تحریکات گذرا (مانند انفجارهای مختلف سایتی و بازو بسته کردن دریچه‌های خروجی آب) برای غلبه بر این مشکلات استفاده شده است.^[۱۲، ۱۱] از آنجا که ارتعاشات ناشی از آزمایش تحریک گذرا بر خلاف ارتعاشات مانای محیطی ناماناست، استفاده از تحلیل‌های زمان - بسامد TFD و یا وولت^{۱۰} برای شناسایی سیستم‌های سازه‌ی مورد توجه قرار می‌گیرد.^[۱۰، ۷] همچنین در برخی از مطالعات پردازش سیگنال برای استخراج پارامترهای مودی سازه‌ها، هنگامی که تابع چگالی طیفی دارای قله‌های

در عمل به هنگام آزمایش ارتعاش درجای سدهای بزرگ اتفاق می افتد، تحریک سد با منابع تحریک مختلف با فواصل متفاوت از نقاط x و y و تأثیر نویزهای خارجی به همراه خطاهای محاسباتی است که باعث کاهش مقادیر طیف CS از مقدار واحد کاهش می شود ولی همواره بین صفر و یک تغییر می کند. نکته‌ی نهفته در محاسبات طیف CS این است که طیف مذکور در بسامدهای غالب سد دچار تشدید می شود و در منحنی تغییرات دامنه‌ی طیف برحسب بسامد، پیک ظاهر می شود. با توجه به دقت هر مسئله‌ی خاص می توان حد قابل قبول برای دامنه‌ی طیف CS را تعریف کرد ولی معمولاً مقادیر دامنه‌ی طیف کمتر از ۰٫۵، اطمینان لازم راجع به درستی نتایج محاسبات CPS ایجاد نمی کند.^[۱] در هر حال مقدار تابع ارتباط بیشتر معرف کیفیت نسبی داده‌هاست و همواره می توان ادعا کرد پیک‌هایی از طیف ارتباط که منطبق بر پیک‌های PSD و CPS شوند اطمینان بیشتری به بسامد تشدید بودن پیک‌ها ایجاد می کنند.^[۸] در هر حال مقدار طیف ارتباط γ_{xy} دو نگاهت $x(t)$ و $y(t)$ را می توان با استفاده از رابطه‌ی ۱۱ محاسبه کرد:^[۶]

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)} \quad (11)$$

۲.۲. برآورد بسامدهای طبیعی با روش چهارطیفی

قله‌هایی از طیف PSD به منزله‌ی کاندید بسامدهای مودی انتخاب می شود که در بسامدهای مذکور اولاً طیف دامنه‌ی CPS نیز دارای قله باشد، ثانیاً مقادیر دامنه‌ی طیف ارتباط مقادیر بیشتر از ۰٫۵ داشته باشد و ثانیاً طیف فاز متقاطع دارای مقادیر نزدیک صفر یا ۱۸۰ درجه باشد.

از بین بسامدهای به دست آمده برای کلیه‌ی نقاط اندازه‌گیری، بسامدهایی به منزله‌ی بهترین کاندید بسامدهای مودی انتخاب می شود که اولاً دارای تکرار پذیری بیشتری باشند، ثانیاً با توجه به فراوانی در بین نقاط، مقادیر طیف ارتباط به عدد ۱ نزدیک تر باشند.

برای کلیه‌ی بسامدهای منتخب، اشکال مودی بدنه‌ی سد ترسیم می شود (در بند ۳.۲ شرح داده خواهد شد) و در هر بسامدی که شکل حاصله، مود خاصی از بدنه‌ی سد را شناسایی کند، بسامد مورد نظر به منزله‌ی بسامد مودی بدنه‌ی سد تعیین می شود.

۳.۲. برآورد اشکال مودی با روش چهارطیفی

با پیگیری گام‌های ارائه شده در بند ۲.۲. چندین بسامد برای بررسی بیشتر در قسمت اشکال مودی در نظر گرفته شد. در این قسمت الگوریتم نحوه‌ی ترسیم اشکال مودی ارائه می شود تا با انجام مراحل زیر و از بین بسامدهای پیشنهادی، بسامدهای مودی شناسایی شود. در صورتی که شکل مود به دست آمده، یکی از اشکال مودی شناخته شده‌ی سد را شناسایی کند؛ بسامد مورد نظر به منزله‌ی بسامد مودی و شکل مربوطه به منزله‌ی شکل مودی بدنه‌ی سد تعیین می شود.

۱. دامنه‌ی طیف PSD نگاهت در بسامد پیشنهادی به دست آید و جذر مقدار حاصله محاسبه شود؛
۲. جذر دامنه‌ی طیف به دست آمده در کلیه‌ی نقاط نسبت به نقطه‌ی که بیشترین مقدار را دارد همگن شود. با این عمل، بیشینه‌ی دامنه‌ی شکل مود به مقدار واحد محدود می شود؛
۳. زاویه‌ی فاز طیف CPS در بسامد مذکور قرائت شود. اگر مقدار فاز در ربع اول و چهارم دایره‌ی مثلثاتی قرار گیرد، دو نقطه‌ی مورد نظر (نقطه‌ی محل ثبت

که PSD، تابعی در حوزه‌ی بسامد است، با استفاده از این تابع در حقیقت یک نوع اندازه‌گیری از نحوه‌ی توزیع بسامدی میانگین مربع داده‌های $E[x^2(t)]$ و به عبارت دیگر نرخ تغییرات میانگین مربع با بسامد به دست می آید.^[۶]

ج) محاسبه‌ی طیف توان متقاطع CPS

به کمک روش‌های اشاره شده در بندهای فوق، نحوه‌ی تغییرات محتوی بسامدی یک نگاهت به دست می آید. با توجه به اینکه قله‌های طیف محاسبه شده می تواند به بسامدهای مودی سد مورد مطالعه و یا به قله‌های موجود در طیف محرک ورودی ارتباط داشته باشند، بنابراین هر قله‌ی از طیف FFT و یا PSD را نمی توان فقط به بسامد مودی سیستم ارتباط داد. از طرف دیگر، اندازه‌گیری محرک ورودی در اغلب آزمایش‌های ارتعاشی درجا ممکن نیست. برای برطرف کردن ضعف مذکور و تشخیص بهتر بسامدهای غالب سد می توان نگاهت‌های هر دو نقطه از بدنه‌ی سد را مطالعه کرد و بسامدهای غالب مشترک و نوع فاز بین دو نقطه را با استفاده از طیف CPS به دست آورد.

طیف CPS را می توان همانند تابع چگالی طیف توان با استفاده از تابع همبستگی و یا استفاده‌ی مستقیم از تبدیل فوریه به دست آورد. در این صورت رابطه‌های ۲ و ۴ به رابطه‌های ۵ و ۶ تبدیل می شود:^[۶]

$$S_{xy}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (5)$$

$$S_{xy}(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E [X_k^*(f, T) Y_k(f, T)] \quad (6)$$

R_{xy} عبارت از تابع همبستگی متقاطع^{۱۳} دو نگاهت X و Y هستند:

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t)y(t+\tau) dt \quad (7)$$

مقادیر S_{xy} مقادیر مختلط هستند و اگر طبق رابطه‌ی ۸ مقدار حقیقی^{۱۴} با C_{xy} و موهومی^{۱۵} با Q_{xy} نشان داده شود، می توان دامنه‌ی طیف S_{xy} را با استفاده از رابطه‌ی ۹ محاسبه کرد و با رسم دامنه برحسب بسامد، بسامدهای غالب مشترک را در دو نگاهت $x(t)$ و $y(t)$ تشخیص داد.

$$S_{xy}(f) = C_{xy}(f) - jQ_{xy}(f) \quad (8)$$

$$|S_{xy}(f)| = \sqrt{C_{xy}^2(f) + Q_{xy}^2(f)} \quad (9)$$

برای تشخیص هم فاز یا در فاز مخالف بودن ارتعاشات دو نقطه‌ی x و y در بسامدهای مورد نظر، می توان طیف فاز همبستگی متقاطع θ_{xy} دو نگاهت x و y را با استفاده از رابطه‌ی ۱۰ محاسبه کرد:

$$\theta_{xy}(f) = \tan^{-1} \left[\frac{Q_{xy}(f)}{C_{xy}(f)} \right] \quad (10)$$

د) محاسبه‌ی طیف ارتباط CS

برای تعیین درصد اطمینان به صحت نتایج حاصل از طیف‌های PSD و CPS، از طیف ارتباط CS بین دو نگاهت استفاده می شود. در حقیقت اگر دو نگاهت $x(t)$ و $y(t)$ پاسخ دو نقطه از سد به یک محرک مشترک را ثبت کنند و به هنگام ثبت ارتعاشات، نوفه‌های خارجی وجود نداشته باشد و همچنین در محاسبات طیفی، خطاهای محاسباتی وارد نشود، در این صورت می توان انتظار داشت دو نگاهت کاملاً وابسته هستند و مقادیر طیف ارتباط برای کلیه‌ی بسامدها برابر واحد شود. آنچه که

را می‌توان از سیگنال اصلی کشف کرد، در حالی‌که فقط به کمک طیف نمی‌توان به این جزئیات دست یافت.

به‌طورکلی خصوصیات اساسی هر توزیع زمان - بسامد، متناظر با وابستگی آن به سیگنال $x(t)$ است که این وابستگی ممکن است خطی^{۱۶} و یا درجه‌ی دوم^{۱۷} (دوخطی^{۱۸}) باشد.^[۱۴] در توزیع‌های زمان - بسامد خطی، اگر سیگنال $x(t)$ یک ترکیب خطی از چند مؤلفه‌ی سیگنال باشد، آن‌گاه توزیع زمان - بسامد $x(t)$ نیز یک ترکیب خطی توزیع‌های زمان - بسامد هر یک از مؤلفه‌های سیگنال است. برای مثال اگر سیگنال دو مؤلفه‌ی $x(t)$ با مؤلفه‌های $x_1(t)$ و $x_2(t)$ را در نظر بگیریم، خواهیم داشت:

$$x(t) = c_1 x_1(t) + c_2 x_2(t) \Rightarrow$$

$$T_x(t, f) = c_1 T_{x_1}(t, f) + c_2 T_{x_2}(t, f) \quad (۱۲)$$

در رابطه‌ی ۱۲، c_1 و c_2 ضرایب ثابت است و توزیع زمان - بسامد با $T(t, f)$ نشان داده شده است. یکی از روش‌های توزیع زمان - بسامد خطی متداول، روش طیف فوریه‌ی کوتاه زمان است. جزئیات بیشتری از این روش، معایب و مزایای آن در منابع^[۱۵، ۱۲] شرح داده شده است.

اگرچه خطی بودن یک توزیع، خاصیت مطلوبی محسوب می‌شود ولی از آن‌جا

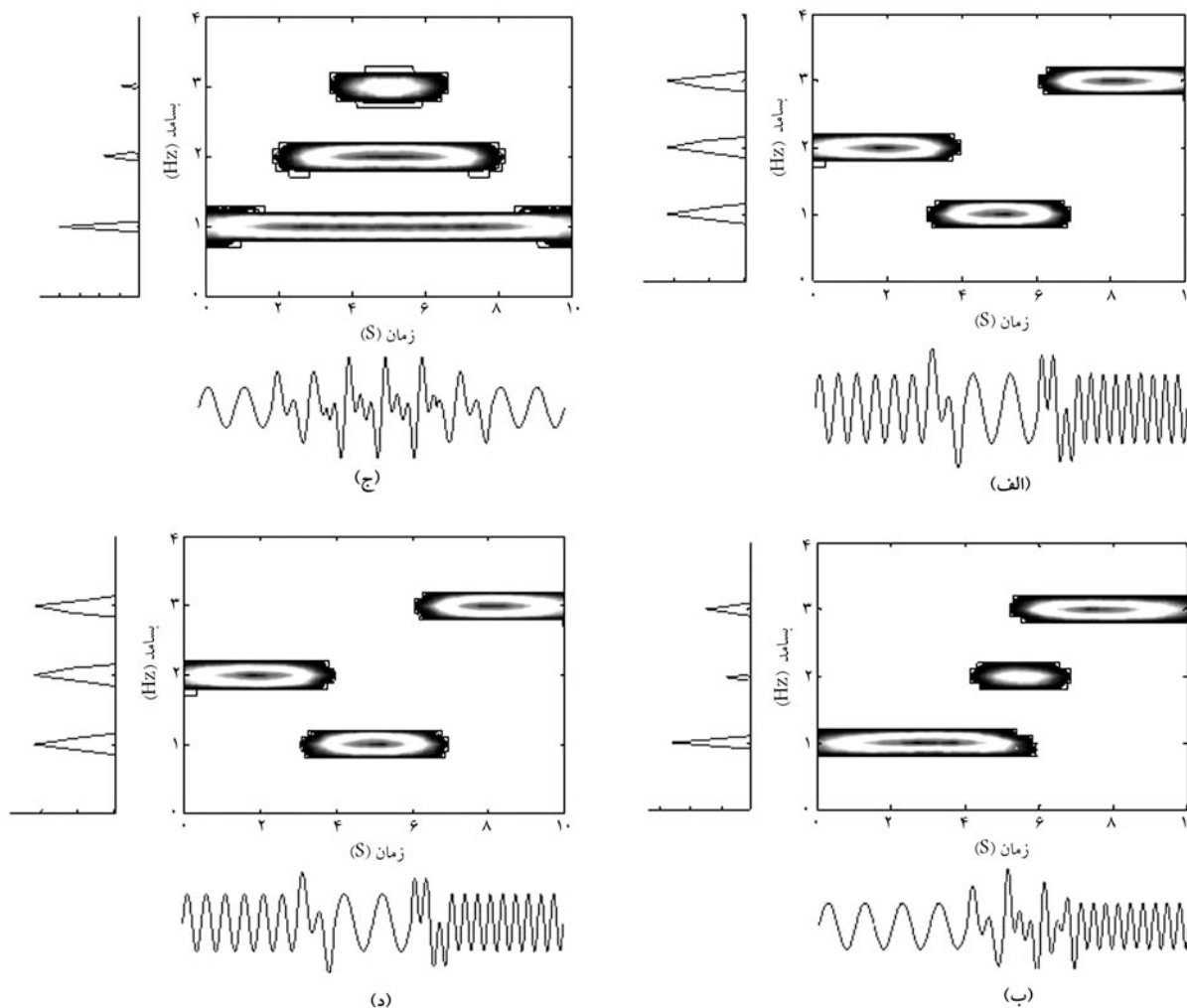
نگاشت نسبت به نقطه‌ی مرجع هم‌فازند؛ و در صورتی‌که مقدار فاز در ربع دوم و سوم دایره‌ی مثلثاتی قرارگیرد، دو نقطه در فاز مخالف قرار دارند؛

۴. با توجه به جذر دامنه و نوع فاز به دست آمده از گام‌های ۲ و ۳ شکل مود ارتعاشی سد ترسیم شود.

۳. مبانی روش TFD

۱.۳. تئوری محاسبات TFD

تفاوت نتایج حاصل از یک تحلیل طیفی (در حوزه‌ی بسامد) و تحلیل زمان - بسامد را می‌توان با رجوع به شکل ۱ بهتر درک کرد. در این شکل، سیگنال‌هایی نشان داده شده است که از حالات مختلف ترکیب امواج سینوسی با بسامدهای ۱، ۲ و ۳ هرترز تشکیل یافته‌اند به طوری‌که کلیه‌ی این چهار موج شکل طیفی مشابهی دارند. مثلاً در شکل ۱ الف، سیگنال اصلی طوری از سه نوع موج سینوسی ترکیب شده است که هر موج سینوسی پس از دیگری اتفاق می‌افتد. در شکل ۱ ب نیز لحظاتی را می‌توان یافت که فقط یک، دو و سه موج سینوسی حضور داشته باشند. این اشکال به وضوح نشان می‌دهند که با کمک توزیع زمان - بسامد، کلیه‌ی این جزئیات



شکل ۱. شماتیک توزیع زمان - بسامد امواجی با طول محدود در حالات مختلف ترکیب از امواج سینوسی در سه بسامد ۱، ۲ و ۳ هرترز.^[۱۶]

۲.۳. محاسبه‌ی دامنه و فاز سیگنال در حوزه‌ی زمان - بسامد [۱۷]

همان‌طورکه در بند ۳ شرح داده شد، دامنه‌ی سیگنال $S_i(t)$ را می‌توان با استفاده از توزیع عمومی TFD و از رابطه‌ی زیر در حوزه‌ی زمان - بسامد به دست آورد:

$$\rho_{S_i}(t, f) = \iiint e^{-J^2\pi\nu t - J^2\pi\tau f + J^2\pi\tau u} g(\nu, \tau) S_i^* \left[u + \frac{\nu}{\tau} \right] S_i \left[u - \frac{\nu}{\tau} \right] d\nu d\tau du \quad (۱۷)$$

در رابطه‌ی ۱۷، اگر u عبارت از واحد متناظر با دامنه‌ی سیگنال $S_i(t)$ باشد، واحد $\rho_{S_i}(t, f)$ برحسب u^2 خواهد شد.

توزیع زمان - بسامد متقاطع دو سیگنال $S_i(t)$ و $S_j(t)$ را نیز می‌توان مشابه رابطه‌ی ۱۷ و به صورت رابطه‌ی ۱۸ نشان داد:

$$\rho_{S_i S_j}(t, f) = \iiint e^{-J^2\pi\nu t - J^2\pi\tau f + J^2\pi\tau u} g(\nu, \tau) S_i^* \left[u + \frac{\nu}{\tau} \right] S_j \left[u - \frac{\nu}{\tau} \right] d\nu d\tau du \quad (۱۸)$$

مقادیر $\rho_{S_i S_j}(t, f)$ مقادیر مختلفی هستند و اختلاف فاز (PH) بین دو نگاشت $S_i(t)$ و $S_j(t)$ را می‌توان مشابه رابطه‌ی ۱۰ در حوزه‌ی زمان - بسامد محاسبه کرد:

$$PH_{i,j}(t, f) = \tan^{-1} \left[\frac{Im(\rho_{S_i S_j}(t, f))}{Re(\rho_{S_i S_j}(t, f))} \right] \quad (۱۹)$$

۳.۳. برآورد بسامدهای طبیعی با روش TFD

همان‌طورکه در بند ۳ اشاره شد، روش‌های متنوعی برای توزیع زمان - بسامد سیگنال معرفی شده است و استفاده از هر یک از این روش‌ها در وضوح نمایش زمان - بسامدی سیگنال مؤثر است. لذا برای دستیابی به بهترین وضوح نمایش سیگنال در حوزه‌ی زمان - بسامد ابتدا باید روش‌های مختلف بر روی یکی از رکوردها اعمال شود و پس از بررسی وضوح نمایش زمان - بسامدی سیگنال در هر یک از آن‌ها، بهترین روش برای پردازش بقیه‌ی رکوردها انتخاب شود. سپس با استفاده از روش انتخابی، کلیه‌ی نگاشت‌ها پردازش می‌شوند تا دامنه و فاز نقاط نسبت به نقطه‌ی مرجع در حوزه‌ی زمان - بسامد به دست آید.

قله‌هایی از دامنه‌ی نقاط در حوزه‌ی زمان - بسامد به منزله‌ی کاندید بسامدهای مودی انتخاب می‌شود به طوری که در بسامدهای مذکور تمام نقاط دارای قله باشند. در نهایت برای کلیه‌ی بسامدهای انتخاب شده، اشکال مودی بدنه‌ی سد ترسیم می‌شوند (در بند ۳.۳ شرح داده خواهد شد) و در هر بسامدی که شکل حاصله، مود خاصی از بدنه‌ی سد را شناسایی کند، بسامد موردنظر به منزله‌ی بسامد مودی بدنه‌ی سد تعیین می‌شود.

۴.۳. برآورد اشکال مودی با روش TFD

در این قسمت الگوریتم نحوه‌ی ترسیم اشکال مودی ارائه می‌شود تا با انجام مراحل زیر و از بین بسامدهای پیشنهادی، بسامدهای مودی شناسایی شود. در صورتی که شکل مود به دست آمده یکی از اشکال مودی شناخته شده‌ی سد را شناسایی کند، بسامد موردنظر به منزله‌ی بسامد مودی و شکل مربوط به منزله‌ی شکل مودی بدنه‌ی سد تعیین می‌شود.

۱. دامنه‌ی نگاشت در بسامد پیشنهادی به صورت تابعی از زمان به دست آید و جذر مقدار حاصله در هر لحظه‌ی زمانی محاسبه شود؛

که انرژی یک سیگنال تابع درجه‌ی دومی از دامنه‌ی سیگنال است، برای بررسی توزیع زمان - بسامد سیگنال موردنظر، تابع درجه‌ی دوم، تابعی مطلوب و مناسب خواهد بود. یک توزیع زمان - بسامد انرژی $T_x(t, f)$ ترکیبی از مفاهیم توان لحظه‌ی $p_x(t) = |x(t)|^2$ و چگالی انرژی طیفی $P_x(f) = |X(f)|^2$ است که در نتیجه رابطه‌های ۱۳ و ۱۴ استخراج می‌شود:

$$\int_f T_x(t, f) df = p_x(t) = |x(t)|^2 \quad (۱۳)$$

$$\int_t T_x(t, f) dt = P_x(f) = |X(f)|^2 \quad (۱۴)$$

در نتیجه انرژی سیگنال $E_x = \int |x(t)|^2 dt = \int |X(f)|^2 df$ با انتگرال‌گیری از $T_x(t, f)$ در کل حوزه‌ی (محدوده) زمان - بسامد به دست می‌آید. به طوری که هر توزیع زمان - بسامد درجه‌ی دوم T_x اصل زیر (رابطه‌ی ۱۵) را ارضاء می‌کند:

$$\begin{aligned} x(t) &= c_1 x_1(t) + c_2 x_2(t) \Rightarrow \\ T_x(t, f) &= |c_1|^2 T_{x_1}(t, f) + |c_2|^2 T_{x_2}(t, f) \\ &+ c_1 c_2^* T_{x_1, x_2}(t, f) + c_2 c_1^* T_{x_2, x_1}(t, f) \end{aligned} \quad (۱۵)$$

در رابطه‌ی ۱۵، $T_x(t, f)$ نمایش زمان - بسامد سیگنال اصلی $x(t)$ است و $T_{x_1, x_2}(t, f)$ نمایش زمان - بسامد متقاطع سیگنال‌های $x_1(t)$ ، $x_2(t)$ است. در مجموع طبق اصل بالا (رابطه‌ی ۱۵)، در یک سیگنال n مؤلفه‌ی $x(t) = \sum_{k=1}^n c_k x_k(t)$ برای هر مؤلفه‌ی سیگنال $c_k x_k(t)$ یک مؤلفه‌ی اصلی متناظر در نمایش زمان - بسامد به صورت $|c_k|^2 T_{x_k}(t, f)$ خواهیم داشت و برای هر جفت مؤلفه‌ی سیگنال $c_l x_l(t)$ ، $c_k x_k(t)$ یک مؤلفه‌ی متقاطع متناظر، در نمایش زمان - بسامد وجود دارد که به شکل $c_l c_k^* T_{x_l, x_k}(t, f) + c_k c_l^* T_{x_k, x_l}(t, f)$ در رابطه‌ی ۱۵ قابل مشاهده است. [۱۳]

این موضوع، در اکثر مواقع، تحلیل صحیح توزیع زمان - بسامد سیگنال‌های چند مؤلفه‌ی با مشکل مواجه می‌کند که برای حل این مشکل روش‌های مختلفی ارائه شده است. از متداول‌ترین روش‌های توزیع زمان - بسامد درجه‌ی دوم می‌توان روش کرنل [۱۹] (مرتبه‌ی کوهن [۲۰]) را نام برد که با رابطه‌ی ۱۶ تعریف می‌شود:

$$\rho(t, f) = \iiint e^{J^2\pi\nu(u-t)} g(\nu, \tau) S^* \left[u - \frac{\tau}{\nu} \right] S \left[u + \frac{\tau}{\nu} \right] e^{-J^2\pi f \tau} d\nu d\tau \quad (۱۶)$$

در رابطه‌ی ۱۶، $g(\nu, t)$ تابعی اختیاری به نام تابع کرنل است که با انتخاب آن، نوع توزیع دقیقاً مشخص خواهد شد. همچنین، در تحلیل یک سیگنال، هنگامی که کلیه‌ی توابع کرنل استفاده شوند، در حقیقت کلیه‌ی توزیع‌های ممکن در باره‌ی آن سیگنال به کار گرفته می‌شوند. توزیع اسپیکتروگرام، توزیع ویگنر، توزیع ویگنر ریچه‌بی، توزیع ویگنر هموار شده و توزیع چوی - ویلیامز از متداول‌ترین توزیع‌های زمان - بسامد به دست آمده از روش کرنل هستند. انواع مختلف توزیع‌های زمان - بسامد، معایب و مزایای هر کدام بررسی شده‌اند. [۱۵]

۲. زاویه‌ی فاز نقاط در بسامد مذکور در هر لحظه‌ی زمانی قرائت شود. اگر مقدار فاز در ربع اول و چهارم دایره‌ی مثلثاتی قرار گیرد، دو نقطه‌ی موردنظر (نقطه‌ی محل ثبت نگاشت نسبت به نقطه‌ی مرجع) در لحظه‌ی مذکور هم‌فازند و در صورتی‌که مقدار فاز در ربع دوم و سوم دایره‌ی مثلثاتی قرار گیرد دو نقطه در فاز مخالف قرار دارند؛

۳. با توجه به جذر دامنه و نوع فاز به دست آمده از گام‌های ۱ و ۲ شکل مود ارتعاشی سد در هر لحظه ترسیم شود که در این صورت انیمیشن ارتعاشی سد در هر بسامد به دست می‌آید؛

۴. علاوه بر انجام عملیات پیشنهادی در گام ۳، برای رسم اشکال مودی می‌توان منحنی میانگین دامنه‌ی نقاط در کل زمان ارتعاش را برای هر بسامد به دست آورد.

۴. مشخصات سدهای مورد مطالعه و انفجارهای ثبت شده

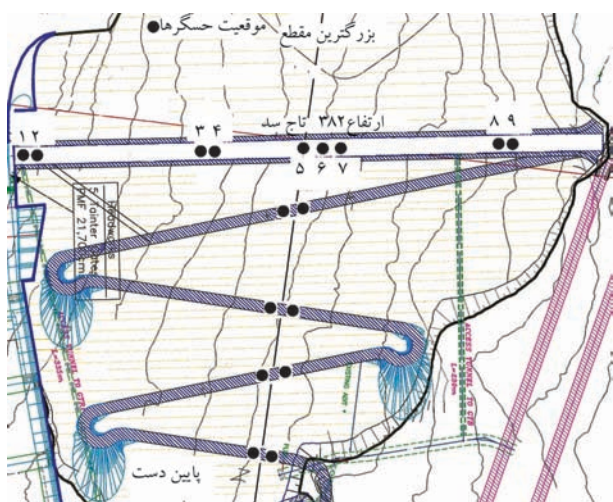
طرح سد سنگریزه‌ی مسجدسلیمان با ارتفاع ۱۷۷ متر از پی سنگی، طول تاج ۴۹۲ متر، هسته‌ی رسی قائم و پوسته‌ی سنگریزه‌ی، حجم بدنه‌ی سد در حدود ۱۳/۴ میلیون مترمکعب، حجم تقریبی مخزن ۲۳۰ میلیون متر مکعب و نیروگاه زیرزمینی ۲۰۰۰ مگاواتی، در فاصله ۲۵ کیلومتری شمال شرق شهر مسجد سلیمان و در ۲۶ کیلومتری پایین دست سد شهید عباسپور واقع شده است. نسبت طول به ارتفاع سد برابر ۲/۷۶ است که در مقایسه با سدهای خاکی دیگر عدد کوچکی است. احداث بدنه‌ی سد از سال ۱۳۷۴ آغاز و در سال ۱۳۸۰ به اتمام رسید و با پایان ساخت بدنه، آبگیری اصلی مخزن در ترازهای بالا آغاز شد.

سد مخزنی مارون، در جنوب غربی ایران و در ۱۹ کیلومتری شمال شرق بهبهان بر روی رودخانه مارون احداث شده است. این سد که از نوع سنگریزه‌ی با هسته‌ی رسی است با حجم مخزن ۱/۲ میلیارد مترمکعب با ارتفاع بیشینه‌ی ۱۶۵ متر از روی فونداسیون، طول تاج ۳۴۵ متر و عرض تاج ۱۵ متر است. نسبت طول به ارتفاع سد برابر ۲/۰۹ است که در مقایسه با دیگر سدهای خاکی کشورمان، کوچک‌ترین نسبت را داراست. طراحی این سد را شرکت مهندسان مشاور مهتاب قدس و با همکاری شرکت مهندسان مشاور رم‌کنسولت - بخارست از کشور رومانی انجام داده و احداث آن در سال ۱۳۷۷ پایان پذیرفته است.^[۱۸]

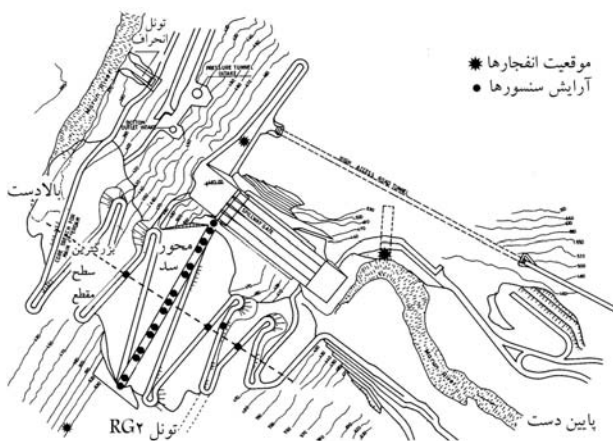
در کلیه‌ی آزمایش‌های ارتعاش بدنه‌ی سدهای مذکور به انفجارهای مختلف سایتی، از ۹ دستگاه لرزه‌نگار SS-۱ به همراه ۴ دستگاه ثبت SSR-۱ استفاده شده است. در این آزمایش‌ها، آرایش‌های مختلف حس‌گرها (نیمه‌ی چپ، نیمه‌ی راست، کل تاج و بیشینه‌ی مقطع) و جهات استقرار آن‌ها (بالادست - پایین دست، طولی و قائم) در ثبت ارتعاشات بدنه‌ی سد به انفجارهای مذکور به نحوی انتخاب می‌شد که علاوه بر عدم اختلال در روند احداث بدنه‌ی سد، آرایش‌های لازم برای مطالعه‌ی اشکال مودی سه‌بعدی سد نیز پوشش داده شود. در هر آرایش استقرار حس‌گرها، تاریخچه‌ی زمانی سرعت ۹ نقطه از بدنه‌ی سد با نرخ نمونه‌برداری ۲۰۰ نمونه در ثانیه به صورت هم‌زمان با دستگاه‌های لرزه‌نگار ثبت می‌شد. با توجه به طول کابل‌های حس‌گر به ثبت (۷/۵ و ۳۰ متری) و تعداد ۴ دستگاه ثبت استفاده‌شده، موقعیت نقاط استقرار حس‌گرها بر روی بدنه‌ی سد به نحوی تنظیم می‌شد که در محاسبه‌ی اشکال مودی مودهای پایین، عملاً از دامنه و فاز ۶ نقطه بتوان استفاده کرد. در این‌حالت از نتایج ۳ دستگاه حس‌گری که با فاصله‌ی ۱۵ متری حس‌گرهای دیگر مستقر شده بود فقط برای کنترل دامنه و فاز حس‌گرکناری استفاده می‌شد. موقعیت

نقاط استقرار حس‌گرها بر روی بدنه‌ی سدهای مورد مطالعه برای ثبت ارتعاشات انفجارهای بررسی‌شده، در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.

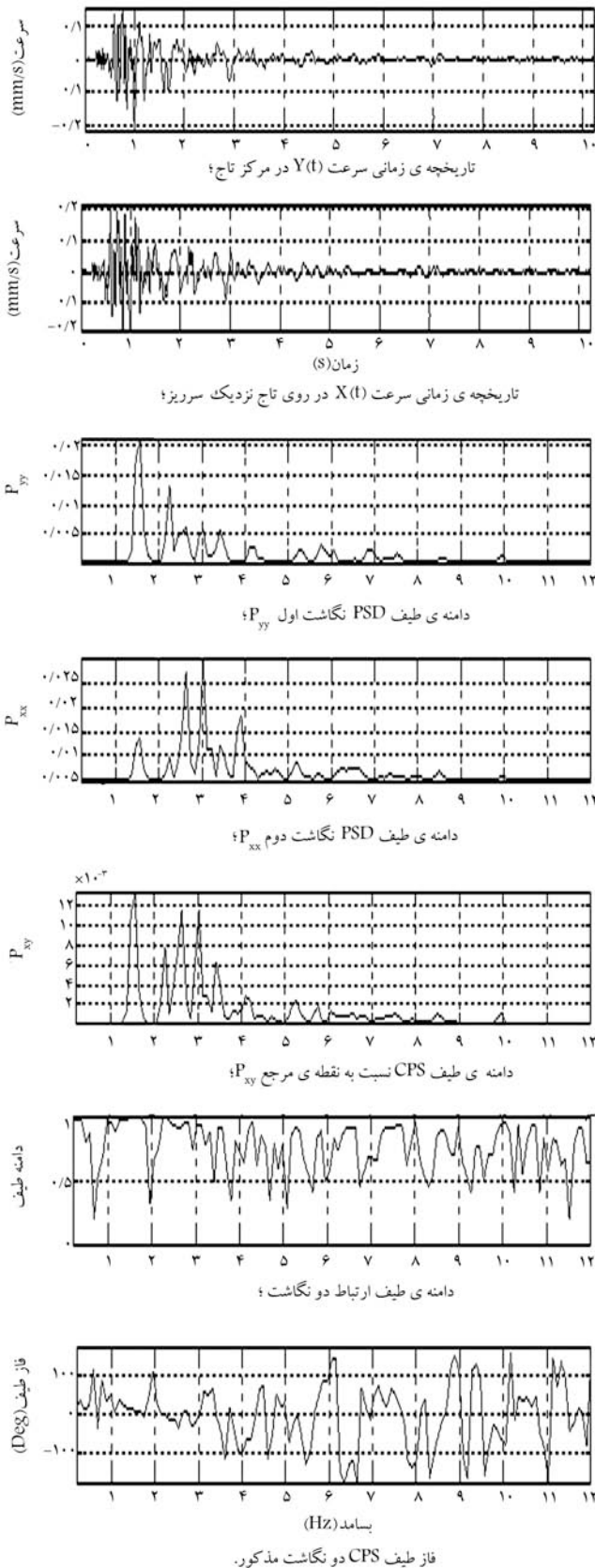
در سد مسجدسلیمان با انجام انفجارهای سنگین (تا بیشینه‌ی ۱۰ تن مواد ناریه) در قسمت منابع قرضه‌ی جدید^{۲۱} بدنه‌ی سد که در تکیه‌گاه سمت راست و با فاصله‌ی تقریبی ۱ الی ۲ کیلومتر از بدنه‌ی سد واقع شده بود و همچنین با انجام انفجارهای متوسط (بیشینه‌ی ۳۰۰ کیلوگرم مواد ناریه) در پیچ‌ساکو واقع در فاصله‌ی تقریبی ۲/۵ کیلومتری شمال غربی بدنه‌ی سد، مصالح مورد نیاز برای احداث پوسته‌ی سد تأمین می‌شد. به دلیل ادامه‌ی حفاری در حوضچه‌ی آرامش و برهم‌آوردن تکیه‌گاه‌های چپ و راست، انفجارهای سبک و متوسطی (از ۳ الی ۲۰۰ کیلوگرم مواد ناریه) در نقاط مذکور انجام می‌شد. در تونل‌های دسترسی، حفارهای ترانسفورمر و نیروگاه طرح توسعه نیز انفجارهای سبک تا متوسطی با فاصله‌ی نزدیک از بدنه‌ی سد در حال انجام بود. در تحقیق حاضر و از بین مجموعه‌ی ۳۰ انفجار مختلف که با دستگاه‌های ثبت به ثبت رسید، فقط رکوردهای ثبت‌شده در ۱۲ انفجار به گونه‌ی انتخاب شده‌اند که با پردازش آن‌ها بتوان بسامدها و اشکال مودی سد را تشخیص داد. در سد مارون نیز نیروگاه ۱۲۵ مگاواتی در حال احداث واقع در تکیه‌گاه سمت



شکل ۲. پلان سد مسجدسلیمان، نحوه‌ی استقرار حس‌گرها در تاج و شیب‌های بالادست - پایین دست سد.^[۱]



شکل ۳. پلان سد مارون، موقعیت انفجارهای سایتی و نحوه‌ی استقرار حس‌گرها در تاج و شیب‌های سد.^[۱]



شکل ۴. نمونه‌بی از رکوردهای انفجار (انفجار ۱۷۵ کیلوگرم مواد ناریه در حوضچه آرامش) ثبت شده در تاج سد مسجدسلیمان در جهت بالادست -پایین دست به همراه نتایج پردازش با روش چهارطیفی.

چپ و پایین دست سد، در زمان انجام آزمایش در مراحل پایانی حفاری (با انفجار مواد ناریه) قرار داشت. قبل از انجام انفجارهای اصلی در سایت، دو انفجار کوچک با وزن مواد ناریه ۷/۵ و ۱۵ کیلوگرم در دامنه‌ی راست بدنه‌ی سد برای کالیبره کردن دستگاه‌های لرزه‌نگار انجام شد. پس از انجام انفجار کالیبراسیون و ایده‌گرفتن از حداکثر دامنه‌ی سرعت و شتاب در بدنه‌ی سد، آمادگی برای ثبت ارتعاشات بدنه‌ی سد به انفجارهای سنگین نیروگاه در حال احداث سد ایجاد شد و ارتعاشات بدنه‌ی سد به ۳ انفجار در کف نیروگاه با وزن‌های مواد ناریه ۱۰۰، ۵۰۰ و ۸۰۰ کیلوگرم ثبت شد.

این تذکر لازم است که وزن مواد ناریه در انفجارهای مختلف سایتی در سدهای مذکور همواره به گونه‌ی کنترل شده است که با عدم ورود به محدوده‌ی غیرخطی خاک، هیچ‌گونه تغییر شکل ماندگار در بدنه‌ی سد ایجاد نشود و برای تأمین این حالت، از ضریب اطمینان بزرگی نیز استفاده شده است. بنابراین با اطمینان می‌توان گفت که در کلیه‌ی انفجارهای مذکور، بدنه‌ی سدها در محدوده‌ی خطی قرار داشته است.

۵. نتایج پردازش رکوردهای انفجار در سد مسجدسلیمان

۱.۵. نتایج روش چهارطیفی

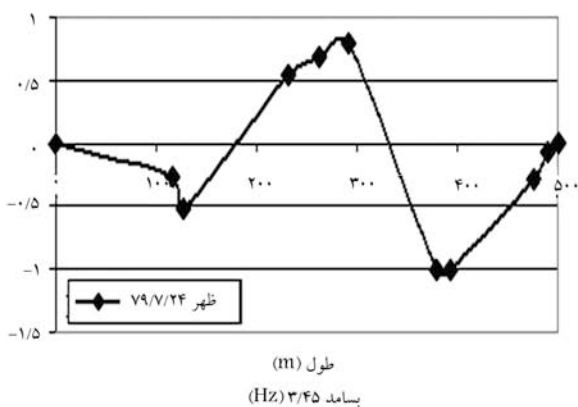
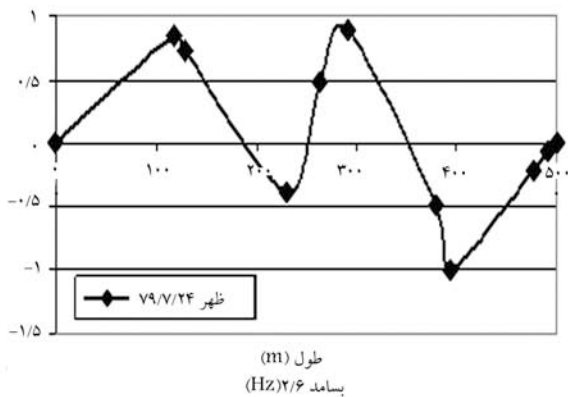
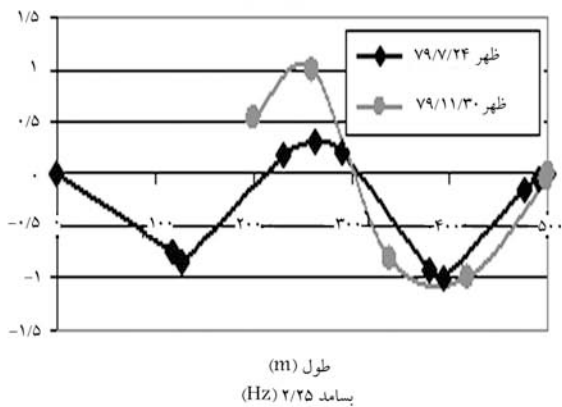
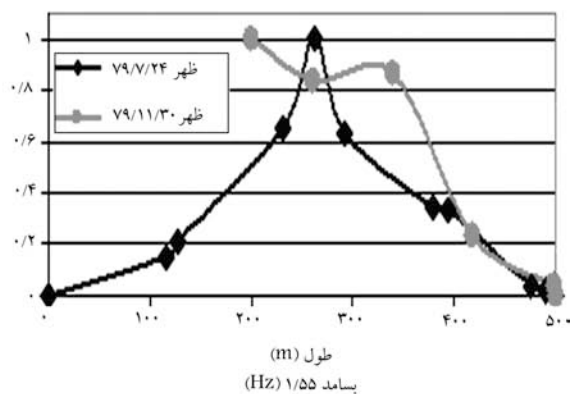
رکوردهای انفجار ثبت شده در بدنه‌ی سد مسجدسلیمان با روش چهارطیفی (طبق بند ۲) پردازش شد و طیف‌های مربوط برای تمام رکوردهای ثبت شده در نقاط مختلف بدنه‌ی سد و در جهت‌های بالادست -پایین دست، طولی و قائم به دست آمد. در شکل ۴ نمونه‌بی از نتایج پردازش نگاشت‌های ثبت شده در جهت بالادست -پایین دست سد برای انفجار ۱۷۵ کیلوگرم مواد ناریه در حوضچه آرامش شامل تاریخچه‌ی زمانی نگاشت دو نقطه از بدنه‌ی سد، دامنه‌ی طیف‌های PSD، CPS، CS و CCPS ارائه شده است. بر اساس الگوریتم شرح داده شده در بند ۲.۲، بسامدهای استخراج شده از این مرحله در جهت‌های بالادست -پایین دست، طولی و قائم طبق جدول ۱ جمع‌آوری شد. در این مرحله و با پیگیری الگوریتم ارائه شده در

جدول ۱. بسامدهای مودی پیشنهادی بدنه‌ی سد مسجدسلیمان در آزمایش ارتعاش انفجار برای بررسی بیشتر با ترسیم اشکال مودی بدنه‌ی سد.

شماره	جهت بالادست - پایین دست (بسامد مودی (هرتز))	جهت طولی (بسامد مودی (هرتز))	جهت قائم (بسامد مودی (هرتز))
۱	۱,۵۵	۱,۵۵	۲,۲۵
۲	۲,۲۵	۱,۸	۲,۶
۳	۲,۶	۲,۲	۴,۴
۴	۳,۴	۲,۵۵	۵,۶۵
۵	۵,۵	۳,۳	۸,۸۵
۶	۶,۹	۳,۸	۱۰,۲۵
۷	۸,۶۵	۴,۲۵	۱۰,۵
۸	-	۵,۴	۱۲,۶
۹	-	۵,۹۵	۱۵,۸
۱۰	-	۶,۸	-
۱۱	-	۱۰,۲۵	-

جدول ۲. بسامدهای مودی بدنه‌ی سد مسجدسلیمان در آزمایش ارتعاش انفجار و اشکال مودی شناسایی شده با روش چهارطیفی.

شماره	بسامد مودی (هرتز)	شکل مودی	
		جهت	نوع مود
۱	۱/۵۵	بالادست-پایین دست	اول متقارن
۲	۲/۲۰	طولی	اول نامتقارن
	۲/۲۵	بالادست-پایین دست	دوم متقارن
	۲/۲۵	قائم	-
۳	۲/۵۵	طولی	دوم متقارن
	۲/۶۰	بالادست-پایین دست	دوم نامتقارن
	۲/۶۰	قائم	اول نامتقارن
۴	۳/۳۰	طولی	دوم متقارن
	۳/۴۰	بالادست-پایین دست	دوم متقارن
۵	۳/۸۰	طولی	دوم نامتقارن
۶	۴/۲۵	طولی	-
۷	۴/۴۰	قائم	دوم نامتقارن
۸	۵/۴۰	طولی	-
۹	۵/۶۵	قائم	دوم متقارن
۱۰	۶/۸۰	طولی	-
	۶/۹۰	بالادست-پایین دست	-
۱۱	۸/۶۵	بالادست-پایین دست	-
۱۲	۸/۸۵	قائم	-
۱۳	۱۰/۵۰	قائم	-
۱۴	۱۲/۶۰	قائم	-



شکل ۵. اشکال مودی بدنه‌ی سد مسجدسلیمان در جهت بالادست-پایین دست حاصل از آزمایش ارتعاش انفجار با استفاده از روش چهارطیفی.

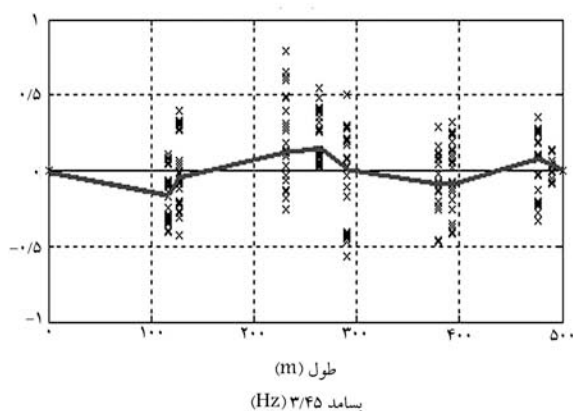
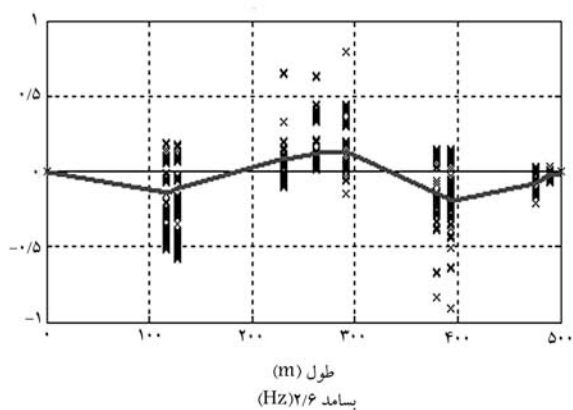
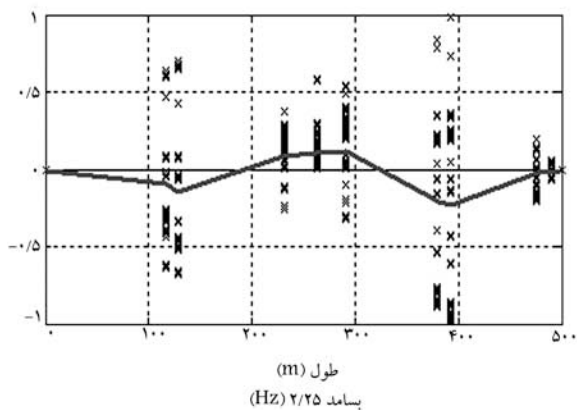
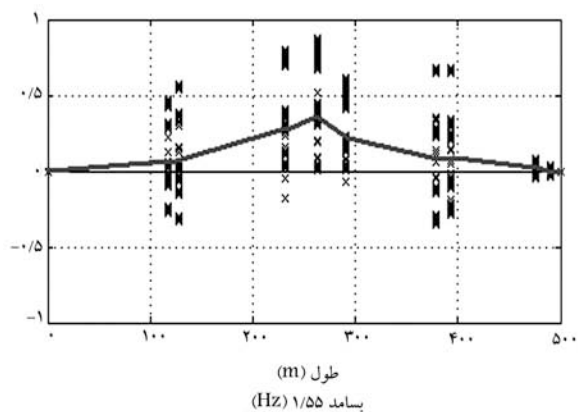
بند ۳.۲، اشکال مودی در کلیه‌ی بسامدهای مودی پیشنهادشده از مرحله‌ی قبل (۲.۲) ترسیم شد و در بسامدهایی که شکل مود به دست آمده است، یکی از اشکال مودی شناخته شده‌ی سد را شناسایی می‌کرد، بسامد مذکور به منزله‌ی بسامد مودی و شکل مربوط نیز به منزله‌ی شکل مودی بدنه‌ی سد تعیین شد.

در جدول ۲ بسامدها و اشکال مودی شناسایی شده‌ی بدنه‌ی سد جمع‌آوری شده‌اند. باتوجه به فاصله‌ی زیاد بین حس‌گرهای نصب شده بر روی بدنه‌ی سد (به دلیل محدودیت تعداد حس‌گرها) امکان شناسایی مودهای بالاتر از مود دوم در هر سه جهت بالادست-پایین دست، طولی و قائم حاصل نشد. با این وجود، در جدول ۲، بسامدهای مودی (بدون اشاره به نوع مود) تا بسامد ۱۲/۶ هرتز معرفی شده‌اند و این، به دلیل اطمینان زیاد به بسامدهای مذکور در مرحله‌ی پردازش است.

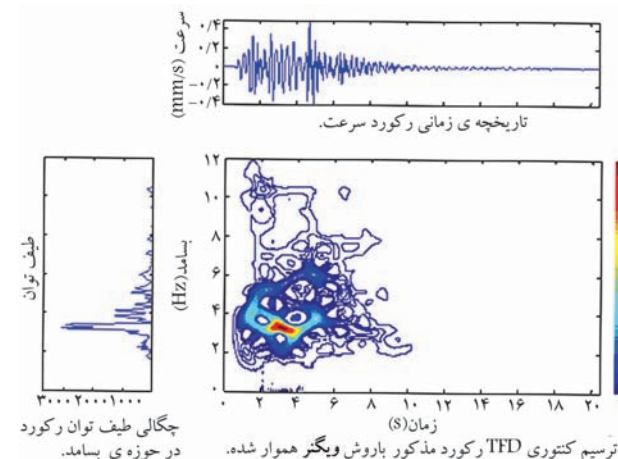
در شکل ۵، نمونه‌ی از اشکال مودی رسم شده در جهت بالادست-پایین دست سد با روش چهارطیفی ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، اشکال مودی تاج سد در بسامدهای ۱/۵۵ و ۲/۲۵ هرتز، برای دو آرایش دستگاه‌های لرزه‌نگار در نیمه‌ی راست و کل تاج سد در دو انفجار مختلف رسم شده است.

۲.۵. نتایج روش TFD

همان‌طورکه در بند ۳ شرح داده شد، روش‌های متنوعی برای توزیع زمان - بسامدی سیگنال معرفی شده است. برای انتخاب مناسب‌ترین روش در پردازش نگاشت‌های موردنظر، رکورد سرعت ثبت شده در وسط تاج سد به انفجار در قسمت منابع قرصه (که قوی‌ترین انفجار سایتهی بوده است) با ۱۵ روش مختلف TFD پردازش شد و



شکل ۷. اشکال مودی بدنه‌ی سد مسجد سلیمان در جهت بالادست-پایین دست حاصل از آزمایش ارتعاش انفجار با استفاده از TFD.



شکل ۶. نمونه‌ی از رکوردهای انفجار (انفجار در منابع قرصه) ثبت شده در تاج سد مسجد سلیمان در جهت بالادست-پایین دست به همراه نتایج پردازش با روش TFD.

در نهایت با توجه به وضوح بالای توزیع ویگنر هموار شده (SPWV) 2^2 در پردازش رکورد مذکور، از این روش برای تحلیل مابقی رکوردهای انفجار استفاده شد. در شکل ۶، نمونه‌ی از ترسیم کنوری نحوه‌ی تغییرات دامنه‌ی طیف رکورد انفجار در منابع قرصه‌ی مصالح در حوزه‌ی زمان-بسامد با استفاده از روش SPWV قابل مشاهده است.

در این تحقیق، فقط بسامدهای مودی شناسایی شده در روش چهارطیفی، با استفاده از روش SPWV بررسی مجدد شد. بنابراین در این بسامدها، انیمیشن تاج سد با روش TFD رسم شد تا متعلق بودن بسامدهای مذکور به اشکال مودی شناخته شده‌ی سد با دقت بیشتری بررسی شود. در شکل ۷ نمونه‌ی از اشکال مودی رسم شده در جهت بالادست-پایین دست سد با روش TFD ارائه شده است. در این شکل مقادیر دامنه هر یک از نقاط تاج سد در زمان‌های مختلف نگاشت انفجار با علامت (x) مشخص شده و در نهایت، منحنی میانگین دامنه نقاط در طول زمان به عنوان معیاری از شکل مود ارتعاشی تاج سد رسم شده است.

۳.۵. مقایسه‌ی نتایج روش‌های چهارطیفی و TFD

برای بررسی نقاط قوت و ضعف روش‌های چهارطیفی و TFD در استخراج بسامدها و اشکال مودی سدهای خاکی، نتایج حاصل از پردازش رکوردهای انفجار ثبت شده در بدنه‌ی سد مسجد سلیمان به روش چهارطیفی با نتایج حاصل از پردازش رکوردهای انفجار مذکور با استفاده از توزیع TFD مطابق جدول ۳ مقایسه شدند.

نکته‌ی قابل توجه در این جدول این است که در جهت قائم، شکل مود در بسامد $2/25$ هرتز به روش چهارطیفی تعیین نشده است. عدم ارائه‌ی آن در جدول ۳ به این دلیل است که در پردازش رکوردهای ثبت شده در بدنه‌ی سد برای انفجارهای مختلف، اشکال مودی مختلفی در این بسامد شناسایی شده است. لذا با توجه به نتایج مطالعات قبلی انجام شده در پژوهشگاه بین المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله که شامل پردازش رکوردهای ثبت شده در بدنه‌ی سد مسجد سلیمان ناشی از ارتعاش اجباری و محیطی و همچنین تحلیل‌های عددی بر روی مدل‌های مختلف سد است و در جدول ۴ ارائه شده است،^[۱] مشاهده می‌شود که بسامد $2/2$ هرتز در جهت قائم، مربوط به مود اول متقارن سد در این جهت است. همان‌طور که در جدول ۳ نیز مشاهده می‌شود با استفاده از توزیع زمان-بسامدی رکوردها به روش

جدول ۳. بسامدهای مودی بدنه‌ی سد مسجدسلیمان حاصل از نتایج آزمایش ارتعاشات ناشی از انفجارهای مختلف سایتی در سد مسجد سلیمان با دو روش چهارطیفی و TFD.

شماره	جهت	روش چهارطیفی		روش TFD	
		شکل مود	بسامد مودی (Hz)	شکل مود	بسامد مودی (Hz)
۱	بالادست-پایین دست	اول متقارن	۱٫۵۵	اول متقارن	۱٫۵۵
۲	طولی	اول نامتقارن	۲٫۲	اول نامتقارن	۲٫۲
۳	بالادست-پایین دست	دوم متقارن	۲٫۲۵	دوم متقارن	۲٫۲۵
۴	قائم	-	-	اول متقارن	۲٫۲۵
۵	طولی	دوم متقارن	۲٫۲۵	دوم متقارن	۲٫۶
۶	بالادست-پایین دست	دوم نامتقارن	۲٫۶	دوم متقارن	۲٫۶
۷	قائم	اول نامتقارن	۲٫۶	دوم متقارن	۲٫۵۵
۸	طولی	دوم متقارن	۳٫۳	دوم متقارن	۳٫۲۵
۹	بالادست-پایین دست	دوم متقارن	۳٫۴	دوم نامتقارن	۳٫۴۵
۱۰	طولی	دوم نامتقارن	۳٫۸	دوم نامتقارن	۳٫۷
۱۱	قائم	دوم نامتقارن	۴٫۴	دوم نامتقارن	۴٫۴
۱۲	قائم	دوم متقارن	۵٫۶۵	دوم متقارن	۵٫۷

جدول ۴. مقایسه‌ی بسامدهای مودی بدنه‌ی سد مسجدسلیمان حاصل از نتایج مطالعات قبلی و مطالعه‌ی حاضر.

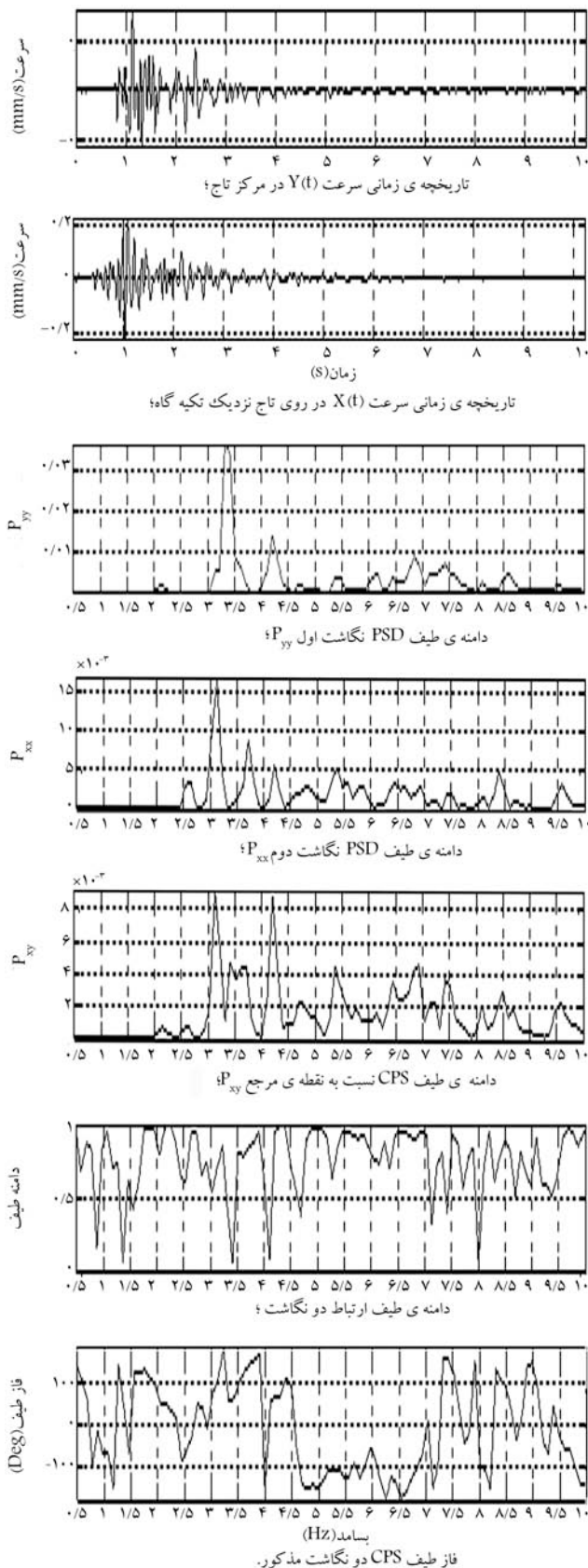
شماره	جهت	شکل مود		بسامد مودی (برحسب هرتز)	
		نوع	مطالعات قبلی [۱]	مطالعه حاضر	مطالعه حاضر
۱	بالادست-پایین دست	اول متقارن	۱٫۵	۱٫۵۵	۱٫۵۵
۲	طولی	اول متقارن	۱٫۷	-	-
۳	بالادست-پایین دست	اول نامتقارن	۱٫۸	-	-
۴	قائم	اول متقارن	۲٫۱	۲٫۲۵	۲٫۲۵
۵	طولی	اول نامتقارن	۲٫۲	۲٫۲	۲٫۲
۶	بالادست-پایین دست	دوم متقارن	۲٫۹	۲٫۲۵ و ۲٫۶	۲٫۲۵ و ۲٫۶
۷	قائم	دوم متقارن	۳	-	-
۸	طولی	دوم متقارن	۳٫۳	۲٫۵۵ و ۳٫۳	۲٫۵۵ و ۳٫۳
۹	بالادست-پایین دست	دوم نامتقارن	۳٫۵	۳٫۴۵	۳٫۴۵
۱۰	طولی	دوم نامتقارن	-	۳٫۸	۳٫۸
۱۱	قائم	دوم نامتقارن	-	۴٫۴	۴٫۴

توجه: نتایج مطالعات قبلی پژوهشگاه با استفاده از مدل‌های عددی و آزمایش‌های ارتعاشی (اجباری، محیطی و انفجار) با روش چهارطیفی به دست آمده و نتایج مطالعه‌ی حاضر با استفاده از آزمایش ارتعاش انفجار و با دو روش چهارطیفی و TFD استخراج شده است.

سد در بسامدهای مذکور است. در روش دوم، با انجام مطالعات تکمیلی می‌توان از دستگاه‌های لرزه‌نگار که به تعداد کافی و در ارتفاع بدنه‌ی سد نصب شده باشند استفاده کرد و ارتعاشات بدنه‌ی سد را در ارتفاع ثبت کرده و پس از پردازش این رکوردها شکل مود در ارتفاع بدنه‌ی سد را در بسامدهای مربوط تعیین کرد. از آنجا که در زمان ثبت ارتعاشات بدنه‌ی سد مسجدسلیمان به انفجارهای مختلف سایتی، ارتعاشات نقاطی از پوسته‌ی پایین دست و بالادست که بر روی مقطع بیشینه‌ی سد قرار داشتند ثبت شده است امکان استفاده از روش دوم در تحقیق حاضر فراهم

و دیگر هموار شده، مود اول متقارن جهت قائم در بسامد ۲٫۲۵ هرتز شناسایی شده است که انطباق خوبی با نتایج قبلی دارد.

با توجه به جدول ۳ مشاهده می‌شود که برخی از مودهای ارتعاشی سد در جهات بالادست-پایین دست، طولی و قائم، در چند بسامد مختلف شناسایی شده است. تحریک یک مود مشخص در دو بسامد مختلف می‌تواند به تفاوت شکل مود در ارتفاع بدنه‌ی سد مربوط شود که با دو روش زیر قابل شناسایی خواهد بود: روش اول، استفاده از مدل‌های عددی سه‌بعدی سد و تعیین شکل مود در ارتفاع بدنه‌ی



شکل ۸. نمونه‌یی از رکوردهای انفجار (انفجار ۱۰۰ کیلوگرم مواد ناریه در نیروگاه در حال احداث) ثبت شده در تاج سد مارون در جهت بالادست -پایین دست به همراه نتایج پردازش با روش چهارطیفی.

شد. بنابراین در ادامه ی بحث، ابهامات موجود در هر کدام از سه جهت اصلی سد با انجام مطالعات تکمیلی برطرف می‌شود.

در جهت بالا دست -پایین دست، در روش چهارطیفی بسامد $3/4$ هرتز مود دوم متقارن را شناسایی می‌کند، در حالی که با استفاده از روش TFD مشخص می‌شود که بسامد $3/45$ هرتز به مود دوم نامتقارن تعلق دارد. لذا با بررسی نتایج مطالعات قبلی صورت گرفته بر روی سد مسجد سلیمان (که در جدول ۴ منعکس شده است)^[۱] مشاهده شد که در نتایج مربوط به پردازش رکوردهای ثبت شده ی بدنه ی سد در ارتعاش اجباری در جهت بالادست -پایین دست، بسامد $3/5$ هرتز مود دوم نامتقارن را تحریک می‌کند. با توجه به تعداد بیشتر حس‌گرهای مورد استفاده در آزمایش ارتعاش اجباری و دقت بالاتر آن نسبت به انفجار، به نظر می‌رسد که مود دوم نامتقارن در TFD برای بسامد $3/45$ هرتز در این جهت، انطباق بیشتری با واقعیت داشته باشد. همچنین برای بسامد $2/6$ هرتز با استفاده از روش چهار طیفی مود دوم نامتقارن و با استفاده از توزیع TFD مود دوم متقارن شناسایی شده است، این در حالی است که در مطالعات صورت گرفته ی قبلی، بسامد مزبور مشاهده نمی‌شود. مطالعات تکمیلی با پردازش نگاشت‌های ثبت شده در پوسته ی پایین دست در جهت مذکور نشان داد که در بسامد $2/25$ هرتز، مود اول تیرطره و در بسامد $2/6$ هرتز، مود دوم تیرطره در ارتفاع سد تحریک می‌شود که با توجه به این موضوع به نظر می‌رسد بسامد $2/6$ هرتز نیز مربوط به مود دوم متقارن باشد که شکل مود آن در ارتفاع سد تغییر کرده است.

در جهت طولی سد، شکل مود دوم متقارن در هر دو روش چهارطیفی و TFD در دو بسامد مختلف (به ترتیب بسامدهای $2/6$ و $3/25$ هرتز و $2/55$ و $3/3$ هرتز) شناسایی شد. نتایج مطالعات تکمیلی در ارتفاع سد نشان داد که در بسامد $2/6$ هرتز، مود اول تیرطره و در بسامد $3/3$ هرتز، مود دوم تیرطره در ارتفاع سد تحریک می‌شود. بنابراین به نظر می‌رسد هر دو بسامد مذکور مربوط به مود دوم متقارن باشند که شکل مود آن‌ها در ارتفاع سد تغییر کرده است.

در جهت قائم نیز با استفاده از روش چهارطیفی برای بسامد $2/6$ هرتز مود اول نامتقارن و در توزیع TFD برای بسامد $2/55$ هرتز مود دوم متقارن شناسایی می‌شود که در نتایج مطالعات قبلی، بسامد مزبور مشاهده نمی‌شود. لذا از آنجا که ارتعاش پوسته ی پایین دست سد در جهت قائم در زمان انفجار ثبت نشده است، تعیین شکل مود در ارتفاع سد برای این بسامد مقدور نبوده است و اظهار نظر در مورد این بسامد به تحقیقات بیشتری نیاز دارد.

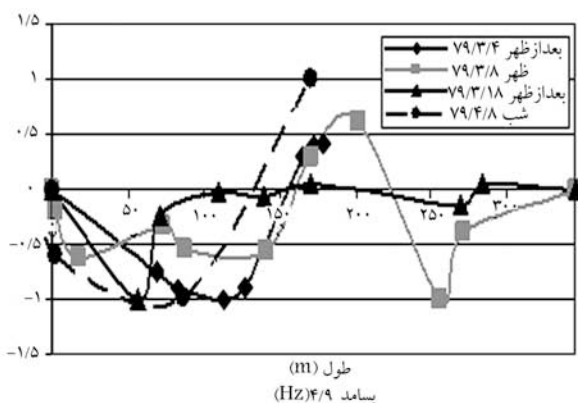
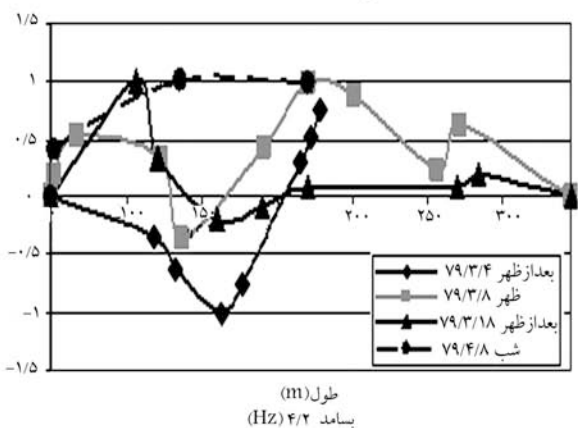
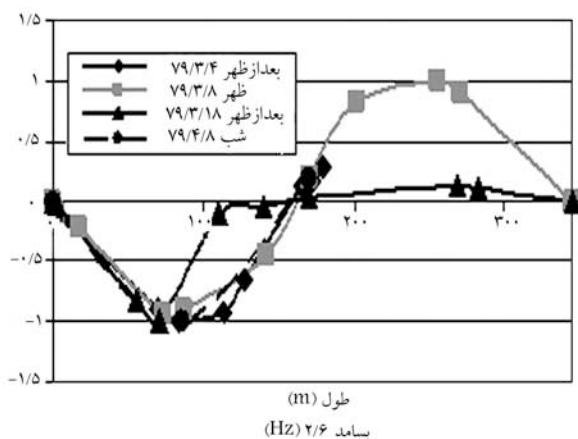
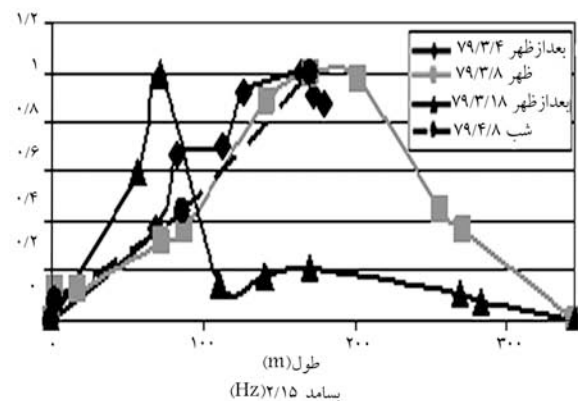
۶. نتایج پردازش رکوردهای انفجار در سد مارون

نگاشت‌های انفجار ثبت شده در بدنه ی سد مارون نیز طبق بند ۲ و با روش چهارطیفی پردازش شد و بسامدها و اشکال مودی سد به دست آمد. شکل ۸ نمونه‌یی از نتایج پردازش نگاشت‌های انفجار ۱۰۰ کیلوگرم مواد ناریه در نیروگاه در حال احداث را نشان می‌دهد.

در جدول ۵، براساس نتایج پردازش شده ی کلیه ی نگاشت‌های انفجار، بسامدهای مودی شناسایی شده ی بدنه ی سد در جهت بالادست -پایین دست جمع‌آوری شده‌اند. این تذکر لازم است که در دو جهت طولی و قائم سد مارون ارتعاشات نیمه ی چپ بدنه ی سد در برابر انفجار، ثبت شده بود که با توجه به تعداد کم حس‌گرها (تعداد سه حس‌گر در نیمه ی چپ بدنه ی سد) و ثبت نشدن ارتعاشات بدنه ی سد در کل طول تاج، امکان شناسایی مود در این دو جهت میسر نشده است. با این وجود، در جدول

جدول ۵. بسامدها و اشکال مودی بدنه‌ی سد مارون در جهت بالادست-پایین دست و بسامدهای مودی پیشنهادی بدنه‌ی سد در دو جهت طولی و قائم در آزمایش ارتعاش انفجار در نیروگاه درحال احداث با روش چهارطیفی.

شماره	جهت بالادست-پایین دست		نوع مود	جهت قائم
	بسامد مودی (هرتز)	جهت طولی (هرتز)		
۱	۲٫۱۵	۱٫۷۵	اول متقارن	بسامد مودی (هرتز)
۲	۲٫۶	۲٫۲۵	اول نامتقارن	
۳	۴٫۲	۲٫۶	دوم متقارن	
۴	۴٫۹	۳	دوم نامتقارن	
۵	۵٫۴۵	۳٫۷	-	
۶	۵٫۸	۴٫۵	-	
۷	۶٫۴۵	۴٫۵	-	
۸	۶٫۸	۶٫۳۵	-	
۹	۷٫۵	۶٫۷۵	-	
۱۰	۸٫۱	-	-	
۱۱	۸٫۶	۷٫۶	-	



شکل ۹. اشکال مودی بدنه‌ی سد مارون در جهت بالادست-پایین دست حاصل از آزمایش ارتعاش انفجار با استفاده از روش چهارطیفی.

۵، بسامدهای مودی پیشنهادی بدنه‌ی سد مارون (بدون اشاره به نوع مود) تا بسامد ۷٫۶ هرتز در دو جهت طولی و قائم معرفی شده‌اند.

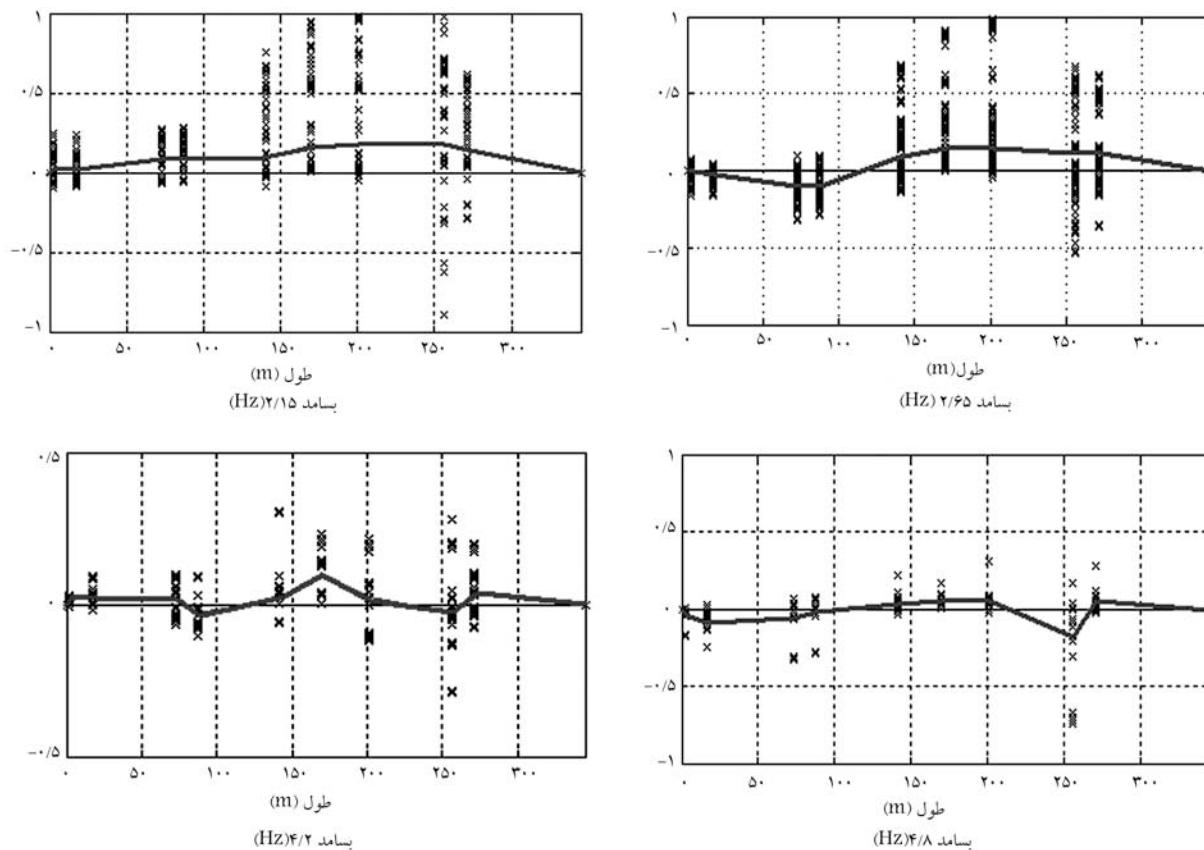
همان‌گونه که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، مودهای اول متقارن و اول نامتقارن سد مارون در جهت بالادست-پایین دست به ترتیب در بسامدهای ۲٫۱۵ و ۲٫۶ هرتز تحریک می‌شوند. مودهای دوم متقارن و دوم نامتقارن این جهت نیز به ترتیب در بسامدهای ۴٫۲ و ۴٫۹ هرتز اتفاق می‌افتند.

با دقت در جدول ۵ ملاحظه می‌شود در جهت بالادست-پایین دست سد مارون به دلیل فاصله‌ی زیاد بین حسن‌گرهای نصب‌شده بر روی بدنه‌ی سد (به دلیل محدودیت تعداد حسن‌گرها)، امکان شناسایی مودهای بالاتر میسر نشده است و برای بسامدهای مودی بالاتر از ۴٫۹ هرتز در این جهت، مود مشخصی تعلق نگرفته است. با این وجود، در جدول ۵ بسامدهای مودی (بدون اشاره به نوع مود) تا بسامد ۸٫۶ هرتز معرفی شده‌اند و این به دلیل اطمینان زیاد به بسامدهای مذکور در مرحله‌ی پردازش رکوردهای ثبت شده‌ی بدنه‌ی سد در جهت بالادست-پایین دست است. اشکال مودی رسم شده در جهت بالادست-پایین دست سد با روش چهارطیفی در شکل ۹ ارائه شده‌اند.

در شکل ۹ برای هر یک از بسامدهای مودی شناسایی شده، اشکال مودی تاج سد برای آرایش کل تاج در ۲ انفجار مختلف و نیمه‌ی چپ برای ۲ انفجار مختلف رسم شده است.

در سد مارون نیز نتایج حاصل از پردازش رکوردهای انفجار ثبت شده در بدنه‌ی سد در جهت بالادست-پایین دست به روش چهارطیفی با نتایج حاصل از پردازش رکوردهای انفجار مذکور با استفاده از توزیع TFD مطابق جدول ۶ مقایسه شدند. اشکال مودی رسم شده در جهت بالادست-پایین دست سد با روش TFD (مشابه منطقی ارائه شده در شکل ۷) در شکل ۱۰ ارائه شده است.

نکته‌ی قابل توجه در این جدول این است که برای بسامد ۴٫۲ هرتز، در روش چهارطیفی مود دوم متقارن و در روش TFD مود سوم متقارن شناسایی شده است.



شکل ۱۰. اشکال مودی بدنهی سد مارون در جهت بالادست - پایین دست حاصل از آزمایش ارتعاش انفجار با استفاده از TFD.

جدول ۷. مقایسه‌ی بسامدهای مودی بدنهی سد مارون حاصل از نتایج مطالعات قبلی و مطالعه‌ی حاضر (جهت بالادست - پایین دست).

شماره	نوع مود	بسامد مودی (هرتز)	
		مطالعات قبلی [۱]	مطالعه‌ی حاضر
۱	اول متقارن	۲/۱	۲/۱۵
۲	اول نامتقارن	۲/۶	۲/۶
۳	دوم متقارن	۳/۳	-
۴	دوم نامتقارن	-	۴/۸

توجه: نتایج مطالعات قبلی پژوهشگاه با استفاده از آزمایش ارتعاش محیطی با روش چهارطیفی به دست آمده و نتایج مطالعه‌ی حاضر با استفاده از آزمایش ارتعاش انفجار و با دو روش چهارطیفی و TFD استخراج شده است.

جدول ۶. بسامدهای مودی بدنهی سد مارون حاصل از نتایج آزمایش ارتعاش ناشی از انفجارهای مختلف سایتی در سد مارون با دو روش چهارطیفی و TFD (جهت بالادست - پایین دست).

شماره	روش چهارطیفی		روش TFD	
	نوع مود	بسامد مودی (هرتز)	نوع مود	بسامد مودی (هرتز)
۱	اول متقارن	۲/۱۵	اول متقارن	۲/۱۵
۲	اول نامتقارن	۲/۶	اول نامتقارن	۲/۶۵
۳	دوم متقارن	۴/۲	سوم متقارن	۴/۲
۴	دوم نامتقارن	۴/۹	دوم نامتقارن	۴/۸

از طرفی بر اساس نتایج آزمایش ارتعاش محیطی انجام شده در مطالعات قبلی بر روی بدنهی سد مارون که در جدول ۷ منعکس شده است، بسامد ۴/۲ هرتز شناسایی نشده است که اظهار نظر در مورد این بسامد را با مشکل مواجه می‌کند. از این رو می‌توان با انجام آزمایش ارتعاش اجباری و با استفاده از دستگاه‌های لرزه‌نگار که به تعداد کافی و در بدنهی سد نصب شده باشند، ارتعاشات بدنهی سد را در این بسامد ثبت کرد و پس از پردازش این رکوردها شکل مود مربوط را تعیین کرد. به عنوان راه حل دیگر، می‌توان از مدل‌های عددی سه‌بعدی سد استفاده کرد و شکل مودی بدنهی سد را در بسامد مذکور تعیین کرد.

۷. نتیجه‌گیری

پردازش نگاشت‌های حاصل از ثبت ارتعاشات ۱۹ انفجار سایتی (از ۷/۵ الی ۱۲۵۰ کیلوگرم مواد ناربه در هر انفجار) و آرایش‌های مختلف حس‌گرها (نیمه‌ی چپ، نیمه‌ی راست، کل تاج و حداکثر مقطع) در جهت‌های بالادست - پایین دست، طولی و قائم در سدهای مارون و مسجد سلیمان با استفاده از دو روش چهارطیفی و TFD انجام شد. در سد مسجد سلیمان، با پردازش نگاشت‌های ثبت شده بر روی سد مذکور، ۲۰ بسامد مودی اول بدنهی سد در محدوده‌ی بسامدهای ۱۲/۶-۱/۵۵ هرتز به دست

در سد مذکور به دلیل فاصله‌ی زیاد بین حس‌گرهای نصب‌شده بر روی بدنه‌ی سد (به دلیل محدودیت تعداد حس‌گرها)، امکان شناسایی شکل مود برای بسامدهای مودی بالاتر از ۴/۸ هرتز میسر نشد. با توجه به مطالعات مذکور، بسامد مودی مربوط به اولین مود متقارن و نامتقارن سد در جهت بالادست - پایین دست به ترتیب برابر ۲/۱۵ و ۲/۶ هرتز به دست آمد.

در مجموع، مطالعات مذکور که بر روی نگاشت‌های انفجار ثبت شده در دو سد خاکی بزرگ کشور با کوچک‌ترین نسبت طول به ارتفاع انجام گرفت، نشان می‌دهد استفاده از روش TFD در پردازش سیگنال‌های نامانا، به دلیل قابلیت نمایش مشخصات سیگنال در حوزه‌ی زمان - بسامد و دقت بالای استخراج بسامدها و اشکال مودی سد، نتایج بهتری در مقایسه با روش چهارطیفی ارائه می‌دهد. این درحالی است که بر اساس مطالعات صورت‌گرفته‌ی قبلی، روش چهارطیفی توانایی بالایی در برآورد مشخصات دینامیکی سازه‌ها؛ از جمله سدهای خاکی؛ در حالت استفاده از نگاشت‌های مانا دارد.

تقدیر و تشکر

در انتها از مساعدت مسئولین محترم سازمان آب و برق خوزستان، شرکت مهندسین مشاور مهتاب قدس و همکاری صمیمانه، مشاور و پیمانکار سدهای مارون و مسجد سلیمان و همچنین از همکاری بخش تجهیزات لرزه‌نگاری پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله در مراحل مختلف انجام آزمایش‌های صورت‌گرفته بر روی سدهای مذکور تشکر و قدردانی می‌شود.

آمد که برای ۱۰ مود اول، اشکال مودی نیز شناسایی شد ولی به دلیل فاصله‌ی زیاد بین حس‌گرهای نصب‌شده بر روی بدنه‌ی سد (به دلیل محدودیت تعداد حس‌گرها)، امکان شناسایی شکل مود برای بسامدهای مودی بالاتر از ۴/۴ هرتز میسر نشد. در این راستا، بسامد مودی مربوط به اولین مود متقارن سد در جهت بالادست - پایین دست برابر ۱/۵۵ هرتز و در جهت قائم برابر ۲/۲۵ هرتز برآورد شد. در جهت طولی نیز بسامد مودی مربوط به اولین مود نامتقارن برابر ۲/۲ هرتز به دست آمد. همچنین نتایج مطالعات نشان داد در برخی از بسامدها، نوع مود شناسایی شده با دو روش چهارطیفی و TFD متفاوت است که با توجه به تحقیق حاضر، نتایج حاصل از روش TFD مورد قبول واقع شد. این موضوع دقت بالای روش TFD در تفسیر نتایج رکوردهای نامانای انفجار ثبت شده در سد خاکی مسجد سلیمان را نشان می‌دهد. مطالعات تکمیلی (با پردازش نگاشت‌های ثبت شده در ارتفاع) در مواردی که برای دو بسامد مودی مختلف، شکل مود یکسانی در تاج سد شناسایی شده بود، صورت گرفت و اشکال مودی متفاوتی در ارتفاع سد برای بسامدهای مذکور شناسایی شد. در سد مارون به دلیل تعداد کمتر انفجارهای انجام شده در سایت و با توجه به تعداد کم حس‌گرها (تعداد سه حس‌گر در نیمه‌ی چپ بدنه‌ی سد) و ثبت نشدن ارتعاشات بدنه‌ی سد در کل طول تاج برای دو جهت طولی و قائم، امکان شناسایی مود در این دو جهت میسر نشد. لیکن با پردازش نگاشت‌های ثبت شده بر روی سد مذکور در جهت بالادست - پایین دست، ۱۱ بسامد مودی اول بدنه‌ی سد در محدوده‌ی بسامدهای ۲/۱۵-۸/۶ هرتز به دست آمد که برای ۳ مود اول، اشکال مودی نیز شناسایی شد.

پانویس

1. time-frequency distribution
2. fast fourier transform
3. power spectral density function
4. auto power spectra
5. auto spectral density function
6. auto spectrum
7. cross power spectra
8. cross correlation phase spectrum
9. coherence spectra
10. wavelet
11. auto correlation function
12. Wiener-Khinchin relationship
13. cross correlation function
14. real
15. imaginary
16. linear
17. quadratic
18. bilinear
19. Kernel method
20. Cohen class

21. new quarry
22. smoothed pseudo wigner ville

منابع

1. Davoodi, M. "Evaluating dynamic characteristics of embankment dams using ambient and forced vibration tests", Ph.D. Thesis (in Persian), *International Institute of Earthquake Engineering and Seismology*, Tehran, I.R. Iran (2003).
2. Jafari, M.K. and Davoodi, M. "Forced and ambient vibration tests of embankment dams", Report (in Persian), *International Institute of Earthquake Engineering and Seismology*, Tehran, I.R. Iran (2002).
3. Severn, R.T. "Field and laboratory studies for earthquake engineering", *Experimental and Numerical Methods in Earthquake Engineering*, ECSC, EEC, EAEC, *J. Donea and P.M. Jones (eds)*, Printed in Netherlands, pp. 23-45 (1991).

4. Ellis, B.R. and Jeary, A.P. "On the forced vibration testing of dams", *Proceedings of 8Th World Conference Earthquake Engineering*, Sanfrancisco, California; **5**, pp. 119-126 (1984).
5. Cimilli, I.T. "Seismic response analysis of alibey earth-fill dam", *M.S. Thesis*, Bogazici University, Turkey (1998).
6. Bendat, J.S. and Piersol, A.G. "Engineering applications of correlation and spectral analysis", Second Edition, *John Willey & Sons Inc.* (1993).
7. Ghanaat, Y.; Chen, H.Q.; Redpath, B.B.; Hall, R.L. and Marjanishvili, S.M. "Measurement and prediction of dam-water-foundation interaction at longyangxia dam", *Report to the US National Science Foundation on Research Conducted under the Us-China Protocol for Scientific and Technical Cooperation in Earthq. Studies*, QUEST Structures, California (1999).
8. Daniell, W.E. and Taylor, C.A., "Effective ambient vibration testing for validating numerical models of concrete dams", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **28**, pp. 1327-1344 (1999).
9. Hessian, M. "Evaluating the different system identification methods in structures using ambient vibration", Ms. Thesis (in Persian), *International Institute of Earthquake Engineering and Seismology*, Tehran, I.R. Iran (2008).
10. Davoodi, M. and Amel Sakhi, M. "Using advanced signal processing techniques on ambient vibration records of a structure", *International Symposium on Advances in Earthquake & Structural Engineering*, Süleyman Demirel University, Isparta-Antalya, Turkey, , pp. 24-26 (October 2007).
11. Jafari, M.K. and Davoodi, M. "Dynamic characteristics evaluation of Masjed Soleyman dam using in-situ dynamic Tests", *Canadian Geotechnical Journal*, **43**(10), pp. 997-1014 (2006).
12. Mivehchi, M.R. "A comparison between the numerical model and prototype dynamic behavior of arch dams; Suggesting some methods for increasing the numerical accuracy", Ph.D. Thesis (in Persian), *Civil Department of Science and Research Branch Islamic Azad University*, Tehran, I.R. Iran (2001).
13. Newland, D.E. "An introduction to random vibration and spectral analysis", *Longman Scientific and Technical* (1984).
14. Hlawatsch, F. and Boudreaux-Bartels, G.F. "Linear and quadratic time-frequency signal representations", *Institute of Electrical and Electronics Engineers(IEEE) Signal Processing Magazine.*, pp. 21-67 (1992).
15. Khademi, S. "Processing the non-stationary signals of Masjed Soleiman and Marun embankment dams Using advanced methods in time-frequency domain", Ms. Thesis (in Persian), *International Institute of Earthquake Engineering and Seismology*, Tehran, I.R. Iran (2008).
16. Boashash, B. "Time-frequency signal analysis", *Longman Cheshire* (1992).
17. Bonato, P.; Ceravolo, R.; De Stefano, A. and Molinari, F. "Use of cross-time -frequency estimators for structural identification in non-stationary conditions and under unknown excitation", *Journal of Sound and Vibration*, **237**(5), pp. 775-791 (2000).
18. Farhangi, B. "Contemporary dam construction in Iran", (in Persian), *Iranian National Committee on Large Dams(IRCOLD)*, Tehran (1998).

