



## برآورد مقادیر میراییهای مودی سد خاکی مارون با استفاده از روش TFD

محمد داودی<sup>۱</sup>، سعید خادمی<sup>۲</sup>

۱- استادیار پژوهشکده ژئوتکنیک پژوهشگاه بین المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

[m-davood@iiees.ac.ir](mailto:m-davood@iiees.ac.ir)

### چکیده

در محاسبات میرایی، برای برآورد مقادیر درصد میرایی معمولاً از روشهای نیم توان و یا کاهش لگاریتمی استفاده می شود. بدلیل محدودیتهای موجود در روشهای کلاسیک پردازش سیگنال (همانند تبدیل سریع فوریه FFT و چگالی طیف توان PSD) برای مودهای نزدیک هم و یا روی هم افتاده، محاسبه پهنای منحنی چگالی طیفی در اطراف هر یک از فرکانسهای مودی مشکل بوده و تخمین درصد میرایی از روش نیم توان با خطا همراه خواهد بود که در این تحقیق، نسبت میرایی مودهای مختلف ارتعاشی بدنه سد مارون با استفاده از سیگنالهای تک فرکانسی تجزیه شده در فرکانس تشدید، برآورد شده است. این روش تعریف خوبی از پیکهای PSD در هر فرکانس تشدید، بدون تداخل ناشی از مودهای نزدیک و یا پیکهای فرکانسی دیگر سیگنال ارائه می دهد. در مجموع، نتایج مطالعات نشان می دهد که در سد خاکی مارون نیز مقادیر نسبتهای میرایی مودهای مختلف در محدوده ۵-۲٪ قرار دارند ولی از آنجا که در اکثر سازه های فولادی و بتنی، مقادیر میرایی در مودهای بالا بیش از مودهای پایین برآورد می شود، در مورد سد خاکی مارون نیز چنین روندی پیش بینی می شد که برخلاف انتظار، مقادیر میرایی بدست آمده برای سد خاکی مارون در مودهای پایین بیش از مودهای بالا برآورد گردید. این نتایج نشان می دهد در مودهای پایین ارتعاشی، نسبت میرایی از مقادیر ۲/۲٪ شروع شده و در مودهای بالای شناسایی شده به مقدار ۱/۴٪ می رسد.

کلمات کلیدی: سد خاکی، نسبت میرایی، تداخل مودی، رکوردهای انفجار

### مقدمه

سدهای خاکی در مقایسه با انواع دیگر سدها بیشترین تعداد را در جهان داراست و در مناطق لرزه خیزی مانند ایران، تحلیل و طراحی سدهای خاکی بزرگ در مقابل زمین لرزه و تأمین پایداری آن در این شرایط بارگذاری از اهمیت ویژه و اولویت در امر مطالعات سدهای خاکی برخوردار است. در روشهای معمول طراحی از مدلهای ریاضی برای پیش بینی رفتار لرزه ای سدها استفاده می شود که در نتیجه دقت محاسبات تحلیلی به دقت این مدلها بستگی خواهد داشت. بدین منظور همواره توصیه می شود دقت مدلهای ریاضی و فرضیات مربوط به آنها با استفاده از اطلاعات تجربی موجود و یا با اندازه گیری مستقیم پاسخ دینامیکی و پارامترهای ارتعاشی سد کنترل گردد. در حالت اندازه گیری مستقیم استفاده از آزمایشهای با مقیاس کامل اهمیت خاص دارد و از نتایج این آزمایشها برای ارزیابی مدلهای ریاضی و بررسی صحت فرضیات مدل بخوبی استفاده می شود. بر اساس تحقیقات صورت گرفته قبلی [۱] در زمینه ارزیابی مشخصات دینامیکی سد خاکی مارون با استفاده از آزمایشهای ارتعاشی در جا، برآورد درصد میراییهای مودی سد بر اساس استفاده از روشهای کلاسیک پردازش سیگنال (مخصوصاً در مودهای نزدیک هم و یا روی هم افتاده) با محدودیتهایی همراه بوده است که بعنوان راه حل، در این مقاله از روشهای پیشرفته پردازش سیگنال برای تخمین مقادیر میراییهای مودی سد استفاده شده است.

### روشهای محاسبه میرایی در آزمایشهای ارتعاشی در جا

در آزمایشهای ارتعاش اجباری، محیطی و انفجار انجام شده در مدلهای واقعی سازه ها، میراییهای مودی سازه را می توان از دو روش «نیم توان» و «کاهش لگاریتمی» بدست آورد. در مطالب آتی، در مورد تئوری روشهای مذکور توضیح مختصری داده می شود و سپس روش استفاده شده در این تحقیق بیان می گردد.

<sup>۱</sup>- استادیار پژوهشکده ژئوتکنیک پژوهشگاه بین المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله  
<sup>۲</sup> - دانشجوی کارشناسی ارشد پژوهشگاه بین المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

**الف) روش نیم توان**

سیستم ایده آل یک درجه آزاد تحت اثر بار هارمونیک  $P(t)$  با دامنه  $P_0$  و فرکانس زاویه ای  $\omega$  را که توسط دستگاه لرزاننده به سیستم اعمال می شود در نظر می گیریم. در این حالت، با حل معادله دیفرانسیل حرکت می توان پاسخ حالت دائم سیستم به بار هارمونیک را با معادله زیر بیان نمود [۲]:

$$u(t) = \rho \sin(\omega t - \theta) = \frac{P_0}{K} D \sin(\omega t - \theta) \quad (1)$$

که:

$$D = \frac{\rho}{P_0/K} = \left[ (1 - \beta^2)^2 + (2\beta\xi)^2 \right]^{-1/2} \quad (2)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2\xi\beta}{1 - \beta^2} \quad (3)$$

در روابط مذکور،  $\beta$  نمایانگر نسبت فرکانس اعمالی به فرکانس طبیعی سیستم،  $\rho$  عبارت از دامنه پاسخ،  $D$  ضریب تقویت دینامیکی (نسبت دامنه پاسخ حاصل از بارگذاری دینامیکی به جابجایی حاصل از اعمال استاتیکی نیروی  $P_0$ )،  $\xi$  نسبت میرایی و  $\theta$  زاویه تاخیر پاسخ نسبت به بار اعمالی می باشد. در صورتیکه با دستگاه اعمال بار هارمونیک، بارگذاری  $P_0 \sin(\omega t)$  در فرکانسهای متوالی نزدیک به یکدیگر که فرکانس تشدید سیستم را نیز در بر می گیرد اعمال گردد، می توان دامنه جابجایی پاسخ را بر حسب فرکانسهای اعمالی (منحنی پاسخ - فرکانس) ترسیم نمود. در شکل (۱) نمونه ای از منحنی پاسخ - فرکانس برای یک سازه با حد متوسط میرایی ارائه شده است.

همانگونه که از روابط مذکور مشاهده می شود، نسبت میرایی در سه متغیر ضریب تقویت دینامیکی  $D$ ، اختلاف فاز  $\theta$  و دامنه پاسخ  $\rho$  حضور پیدا کرده است. بر این اساس، در نتیجه نسبت میرایی را می توان با استفاده از سه روش برآورد کرد [۲]: روش اول محاسبه میرایی بر مبنای استفاده از ضریب تقویت دینامیکی  $D$  شکل گرفته است. در این روش، نسبت میرایی برابر

$$\frac{1}{2} \frac{\rho_0}{\rho_{\max}}$$

بدست می آید و به دلیل نیاز به ارزیابی جابجایی استاتیکی، کمتر استفاده می گردد زیرا اکثر سیستمهای اعمال بار نمی توانند در فرکانس نزدیک صفر نیروی قابل توجهی بر سیستم وارد نمایند. در روش دوم محاسبه میرایی نیز که از خصوصیات اختلاف فاز  $\theta$  استفاده می شود از این حقیقت استفاده می گردد که در حالت تشدید،  $\theta = 90^\circ$  درجه می گردد و نیروی اعمال شده بر سیستم برابر نیروی میرایی می شود. در استفاده از این روش که دیگر نیازی به ترسیم منحنی پاسخ - فرکانس وجود ندارد، مشکل اندازه گیری مقدار فاز بین نیروی تحریک و جابجایی بوجود آمده حضور پیدا می کند.

در روش سوم (با درک این مطلب که شکل موج کامل پاسخ - فرکانس توسط مقدار میرایی سیستم کنترل می گردد) نسبت میرایی با توجه به خواص منحنی پاسخ فرکانس بدست می آید. منحنی ارائه شده در شکل (۱) نیز نشان می دهد هرچه میرایی سیستم کمتر باشد، منحنی در محدوده فرکانس طبیعی سیستم باریکتر است (و برعکس). جهت استفاده از روش مذکور در محاسبه میرایی، از فرکانسهای  $\beta_1$  و  $\beta_2$  مربوط به پاسخی که دامنه آن  $\rho_{B=1} = \frac{1}{\sqrt{2}}$  باشد، یعنی در فرکانسهایی که انرژی ورودی نصف انرژی در وضعیت تشدید باشد (روش نیم توان)، استفاده می شود. در روش نیم توان، نسبت میرایی از رابطه زیر بدست می آید:

$$\xi = \frac{\beta_2 - \beta_1}{2} \quad (4)$$

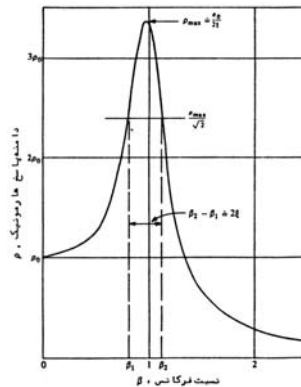
در آزمایش ارتعاش محیطی به منظور استفاده از روش نیم توان جهت محاسبه مقادیر میرایی، تابع انتقال فرکانسی را به صورت رابطه زیر نشان می دهیم [۳]:

$$|H(f)| = \frac{1/K}{\sqrt{[1 - (f/f_n)^2]^2 + [2\xi f/f_n]^2}} \quad (5)$$

رابطه مذکور نشان می دهد هرچه میرایی سیستم کمتر باشد منحنی  $|H(f)|$  در محدوده فرکانس طبیعی سیستم باریکتر می گردد (و برعکس). حال چون پاسخ سیستم را در برابر ارتعاشات محیطی که ماهیت کاملاً تصادفی دارند بررسی می کنیم و فرض کرده ایم که این ارتعاشات دارای چگالی طیفی ثابت هستند، در نتیجه چگالی طیفی خروجی، تابعی از  $|H(f)|$  خواهد شد.

به عبارت دیگر پهنای منحنی چگالی طیفی نیز در اطراف فرکانسهای طبیعی سیستم معیاری از میرایی موجود در سیستم خواهد بود و استفاده از روش نیم توان (معادله ۴) در طیفهای PSD و یا CSD جهت محاسبه نسبت میرایی لزج، به شرط ارضای شرایط ذیل کاربرد خواهد داشت [۳]:

۱. در محدوده فرکانسی  $f_i - 3B_i \leq f \leq f_i + 3B_i$  باید مقدار طیف تغییر مکان ورودی  $S_{xx}$  تقریباً ثابت باشد؛
۲. نسبت میرایی  $\xi_i$  کوچک باشد ( $\xi_i < 0.05$ )؛
۳. وضوح فرکانسی  $B_e$  در مقایسه با عرض نیم توان  $B_i$  کوچکتر باشد ( $B_e < 0.2B_i$ )
۴. شکل قله منحنی در فرکانس تشدید مورد نظر با قله‌های مجاور هم پوشانی نداشته باشد  
 $(f_i - f_{i-1} > 2(B_i + B_{i+1}))$



شکل (۱): منحنی پاسخ - فرکانس برای یک سیستم با حد متوسط میرایی [۲]

#### کاهش اثرات تداخل مودی در محاسبات میرایی با روش نیم‌توان

در آزمایشهای ارتعاشی درجا، طیف PSD رکوردهای ثبت شده دارای پیکهای مختلف فرکانسی می‌باشد که در برخی موارد به علت تداخل ناشی از مودهای نزدیک، استفاده از روش نیم توان را با مشکل مواجه می‌کند. لذا اخیراً در تحقیقات صورت گرفته بر روی برخی سازه‌ها از قبیل پل کوئینسبرگ (Queensborough) در سال ۱۹۹۶ [۴] و سد بتنی لانگ یانگ زیا (Longyangxia) در سال ۱۹۹۹ [۵] جهت کاهش اثرات تداخل مودی در محاسبات میرایی به روش نیم توان از سیگنالهای تک فرکانسی تجزیه شده در فرکانس تشدید استفاده شده است. این روش، تعریف خوبی از پیکهای PSD در هر فرکانس تشدید بدون تداخل ناشی از مودهای نزدیک و یا پیکهای فرکانسی دیگر سیگنال ارائه می‌دهد. [۵] در تحقیق حاضر نیز از این روش برای محاسبه میرایی استفاده شده است.

#### ب) روش کاهش لگاریتمی

در آزمایش روشن - خاموش ارتعاش اجباری هنگامی که دستگاه لرزاننده در حداکثر فرکانس ارتعاشی مورد نظر خاموش می‌شود و به هنگام عبور از فرکانسهای تشدید بدنه سد، تشدید مختصری در دامنه ارتعاشات ایجاد می‌نماید. در این آزمایش و همچنین در آزمایش خاموش نمودن دستگاه به هنگام کارکرد تحت فرکانس تشدید معین و سپس ثبت کاهش دامنه نوسان، می‌توان از روش کاهش لگاریتمی جهت محاسبه نسبت میرایی لزج مودی استفاده کرد.

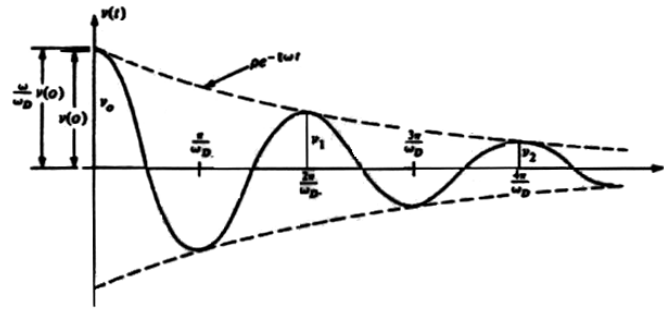
مطابق شکل (۲)، حالت ایده‌آل ارتعاش آزاد یک سیستم یک درجه آزاد با فرکانس طبیعی  $\omega$  را در نظر می‌گیریم [۲].

پاسخ ارتعاش آزاد  $u(t)$  شکل مذکور را می‌توان با رابطه زیر نشان داد:

$$u(t) = \rho e^{-\xi\omega t} \cos(\omega_D t - \theta) \quad (6)$$

برای سیستمهای با میرایی کم، دقت بیشتر در برآورد نسبت میرایی هنگامی حاصل می‌شود که حداکثر دامنه‌های با فاصله چندین سیکل دور (مثلاً  $m$  سیکل) را در رابطه زیر بکار برد [۲].

$$\xi = \frac{u_n - u_{n+m}}{2mu_{n+m}} \quad (7)$$



شکل (۲): پاسخ ارتعاش آزاد سیستم یک درجه آزاد و منحنی پوش ارتعاشات کاهش یافته [۲]

نکته‌ای که لازم است در این قسمت اشاره شود تاثیر انتخاب مقادیر مختلف  $m$  بر روی نسبت میرایی در حالتی از واقعیت است که منحنی پاسخ ارتعاش آزاد، حالت منظم ارائه شده در شکل فوق را نداشته باشد. در اینصورت انتخاب مقادیر مختلف  $m$  ممکن است نسبت میرایی‌های متفاوتی ارائه دهد. جهت رفع مشکل، از خصوصیات لگاریتمی معادله پوش شکل فوق استفاده می‌کنیم [۱]:

$$u(t) = \rho e^{-\xi \omega t} \quad (۸)$$

معادله مذکور را با رابطه زیر نیز می‌توان نشان داد:

$$\ln(u) - \ln(\rho) = -\xi \omega t = \alpha t \quad (۹)$$

رابطه مذکور بیان کننده معادله یک خط راست در محورهای مختصات نیمه لگاریتمی  $\ln(u) - t$  با شیب  $-\xi \omega = \alpha$  می‌باشد. از این مطلب می‌توان نتیجه گرفت در صورتیکه مقادیر حداکثر (و حداقل) دامنه ارتعاشات آزاد در طول سیکل‌های متوالی بدست آید و در محورهای مختصات نیمه لگاریتمی ترسیم شود و بهترین خط راست بر نقاط فوق برازش شود، نسبت میرایی در فرکانس تشدید مورد آزمایش به سادگی از تقسیم کردن مقدار شیب خط مذکور بر فرکانس دورانی تشدید بدست می‌آید:

$$\xi = \frac{|\alpha|}{2\pi f} \quad (۱۰)$$

در واقع می‌توان گفت میانگینی از کلیه دامنه‌های  $u_1$  تا  $u_n$  در میرایی محاسبه شده با روش فوق تاثیر گذاشته‌اند.

#### نتایج مطالعات صورت گرفته در انواع سدهای بتنی

در طول سالیان اخیر و جهت شناسایی مشخصات دینامیکی سدهای بتنی، انواع آزمایش‌های ارتعاشی درجا در مدل واقعی چندین سد بتنی انجام گرفته است. به عنوان نمونه می‌توان به آزمایش‌های ارتعاش اجباری صورت گرفته بر روی تعدادی از سدهای بتنی ایالات متحده آمریکا، چین و ژاپن اشاره کرد [۶] که سد بتنی مانتیسلو (Monticello) در ایالات متحده آمریکایی از این سدها می‌باشد که در سالهای ۱۹۶۷ و ۱۹۸۲ و ۱۹۸۶ و در سطوح مختلف تراز آب مخزن تحت انجام آزمایش ارتعاش اجباری قرار گرفته است [۶]. همچنین می‌توان به سد بتنی لانگ یانگ زیا (Longyangxia) در کشور چین اشاره کرد که در سال ۱۹۹۹ آزمایش‌های ارتعاش محیطی و انفجار بر روی آن صورت گرفته است [۵]. بر این اساس و پس از بررسی نتایج آزمایش‌های ارتعاشی درجا در کشورهای مختلف مشخص می‌شود که استفاده از نتایج برخی از آزمایش‌های ارتعاش اجباری و محیطی بر روی پروتوتیپ سدهای بتنی احتیاط بیشتری می‌طلبند. به عنوان نمونه مقادیر میرایی مودی در گزارش‌های منتشر شده از آزمایش ارتعاش اجباری، از ۱ تا ۱۲ درصد تغییر می‌کند که مقادیر میرایی بزرگ، احتمالاً به دلیل تداخل مودی در پاسخ سد و یا کنترل نامناسب فرکانس بارگذاری در دستگاه‌های لرزاننده (در آزمایش‌های اولیه) حاصل شده است. اگر نقص‌های فوق برطرف گردد مقادیر نسبت میرایی سدهای بتنی در اندازه‌های کوچک ۱ تا ۴ درصد بدست می‌آید. اشاره به این نکته جالب خواهد بود که حتی با وجود پتانسیل بالای انرژی تشعشعی سدهای بتنی از طریق فونداسیون سنگی؛ که پارامترهای مصالح آن اختلاف زیادی با بتن ندارد؛ و از طریق لایه آبی که سطح بالادست سد را پوشانده است، نسبت میرایی هنوز مقادیر کوچکی را نشان می‌دهد. شواهد دیگری که بر مقادیر میرایی کوچک سدهای بتنی دلالت می‌کند از مقادیر اندازه گیری شده تابع بزرگنمایی تاج در ارتعاشات خفیف بدست می‌آیند ولی هنوز یک روند مشخصی بین میرایی و شماره مودهای تحریک وجود ندارد. آنچه که در آزمایش چندین سد مشاهده شده است حکایت از مقادیر بزرگ میرایی در



مودهای متقارن دارد ولی نتیجه مطمئن تر در این مورد منوط به آزمایشهای بیشتری است. البته مقادیر بزرگ میرایی به تراکم پذیری آب نیز ارتباط دارد [۶].

#### نتایج مطالعات صورت گرفته در سدهای خاکی

آزمایش مدل واقعی سدهای خاکی با استفاده از یک یا چند دستگاه لرزاننده از دهه ۱۹۵۰ آغاز شده است و تاکنون 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 شده و تا حال بر روی ۱۸ سد خاکی با اهداف متفاوت صورت گرفته است [۱]. برای اولین بار در سدهای خاکی ایران نیز در سال ۱۳۷۹ آزمایشهای ارتعاش محیطی و انفجار بر روی سدهای خاکی مارون و مسجد سلیمان و در سال ۱۳۸۰ آزمایش ارتعاش اجباری بر روی سد خاکی مسجد سلیمان انجام شد و مشخصات دینامیکی سدهای مذکور با پردازش رکوردهای حاصله بدست آمد [۱].

همانگونه که در بخش قبل اشاره شد، مقادیر میرایی‌های مودی سدهای خاکی را مطابق مطالب ذکر شده، می‌توان با انجام آزمایش ارتعاش اجباری و با دو روش بدست آورد. در روش اول، پس از انجام آزمایش در کلیه پله‌های فرکانسی مورد نظر، منحنی پاسخ فرکانسی بدست می‌آید و با استفاده از روش نیم‌توان، مقادیر میرایی‌هایی مودی محاسبه می‌گردد. گاهی استفاده از این روش در محاسبه مقادیر میرایی با مشکلاتی مواجه می‌شود. هنگامی که قله‌های موجود در منحنی پاسخ فرکانس به یکدیگر نزدیک باشند و به علت تداخل و یا تاثیر مودها برهم، عرض قله از شفافیت لازم جهت استفاده از روش نیم‌توان برخوردار نباشد (مقادیر دامنه طیف در مختصات  $0/707$  برابر قله طیف مشخص نباشد) استفاده از روش دوم توصیه می‌گردد. در این روش، پس از تعیین دقیق فرکانسهای مودی، پاسخ ارتعاش آزاد بدنه سد در نقاط استقرار حسگرها با خاموش کردن دستگاههای لرزاننده در هر فرکانس مودی بدست می‌آید و مقادیر میرایی مودی در مود مورد نظر با استفاده از روش کاهش لگاریتمی محاسبه می‌شود.

در مجموع، محاسبه مقادیر میرایی بدنه سد مسجدسلیمان با استفاده از دو روش نیم‌توان و کاهش لگاریتمی و براساس آلگوریتم معرفی شده نشان می‌دهد مقادیر میرایی بدنه سد در مودهای مختلف ارتعاشی در محدوده ۲ الی ۵ درصد قرار دارد. مقادیر میرایی بدست آمده از روش اول در مودهای بالا بیش از مودهای پایین برآورد گردید بطوریکه در مودهای پایین ارتعاشی از مقادیر ۲٪ شروع می‌شد و در مودهای بالای شناسایی شده به مقدار ۵٪ می‌رسید. وقوع چنین پدیده‌ای در اکثر سازه‌های فولادی و بتنی یک امر شناخته شده‌ای است ولی با توجه به اینکه پدیده مذکور، در مقادیر میرایی بدست آمده از روش دوم و همچنین در نتایج آزمایش ارتعاش محیطی مشاهده نشد، تایید وقوع آن در سدهای خاکی به تحقیقات بیشتری نیاز دارد [۱]. در مجموع، نتایج آزمایشهای ارتعاشی صورت گرفته در سدهای خاکی دنیا نشان می‌دهد که نسبت میرایی مودهای مختلف در حدود ۵-۲٪ بوده است ولی به دلیل اینکه نتایج مذکور بر مبنای تعداد محدودی آزمایش ارتعاش اجباری و محیطی روی سدهای خاکی بدست آمده است بنابراین جهت رسیدن به نتایج مطمئن تر باید مطالعات مذکور در سدهای خاکی بیشتری ادامه یابد.

#### نتایج تحلیل رکوردهای انفجار ثبت شده در بدنه سد مارون

##### مشخصات سد مخزنی مارون

سد مخزنی مارون، در جنوب غربی ایران و در ۱۹ کیلومتری شمال شرق بهبهان بر روی رودخانه مارون احداث گردیده است. این سد که از نوع سنگریزه‌ای با هسته رسی است با حجم مخزن  $1/2$  میلیارد متر مکعب دارای ارتفاع حداکثر  $165m$  از روی فونداسیون، طول تاج  $345$  متر و عرض تاج  $15$  متر می‌باشد. بدنه این سد متشکل از ۹ نوع مصالح خاکی گوناگون می‌باشد که جمعا حجمی حدود  $8/6$  میلیون متر مکعب را شامل می‌گردد. طراحی این سد توسط شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس و با همکاری شرکت مهندسی مشاور رم کنسولت - بخارست از کشور رومانی صورت گرفته است و احداث آن در سال ۱۳۷۷ پایان پذیرفته است [۷]. موقعیت سد مارون در نقشه ایران در شکل (۳) نشان داده شده و مقطع تیپ و همچنین پلان این سد در شکل (۴) مشاهده می‌شود.

محل احداث سد مارون ( $30/71^{\circ} N$  و  $50/35^{\circ} E$ ) در منطقه‌ای واقع شده است که در گذشته، زلزله‌های شدیدی در آن اتفاق افتاده است. دو گسل بزرگ بهبهان و آراژان مهمترین گسلهای نزدیک به بدنه سد می‌باشند که بزرگی و شدت قوی‌ترین زمین‌لرزه حاصل از گسیختگی این گسلها به ترتیب  $(I_s=IX$  و  $M=7/2$ ) و  $(I_s=IX$  و  $M=7/1$ ) برآورد شده است [۸].

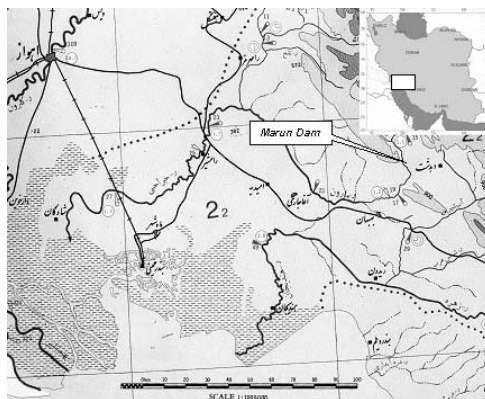


### آزمایشهای انفجار در سایت سد مارون

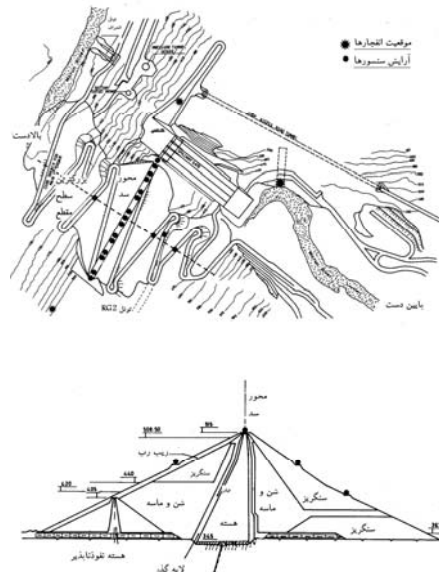
نیروگاه ۱۲۵ مگاواتی در حال احداث سد مخزنی مارون واقع در تکیه‌گاه سمت چپ و پایین دست سد، در زمان انجام آزمایشهای ارتعاش محیطی در مراحل پایانی حفاری (با انفجار مواد ناریه) قرار داشت و این، فرصت مناسبی جهت تحریک بدنه سد با محرکهایی با محتوی فرکانسی بالاتر از تحریکات محیطی بود. انجام آزمایش انفجار در کنار آزمایش ارتعاش محیطی سد از این منظر حائز اهمیت بود که در آزمایش ارتعاش محیطی برخلاف آزمایش انفجار، مودهای پایین ارتعاشی سد به راحتی تحریک می‌شوند و بنابراین، شناسایی مودهای مختلف سد تسهیل می‌گردد. قبل از انجام انفجارهای اصلی در سایت، دو انفجار کوچک با وزن مواد ناریه ۵ و ۱۵ کیلوگرم در دامنه های چپ و راست بدنه سد جهت کالیبره کردن دستگاههای لرزه نگار انجام شد. پس از انجام انفجارهای کالیبراسیون و ایده گرفتن از حداکثر دامنه سرعت و شتاب در بدنه سد، آمادگی جهت ثبت ارتعاشات بدنه سد به انفجارهای سنگین نیروگاه در حال احداث سد ایجاد شد و باقیمانده انفجارهای نیروگاه با وزنه‌های مواد ناریه ۱۰۰، ۵۰۰ و ۸۰۰ کیلوگرم به ترتیب در تاریخهای ۱۳۷۹/۳/۸، ۱۳۷۹/۴/۸ و ۱۳۷۹/۳/۱۸ ثبت گردید. در جریان هر کدام از آزمایشها، علاوه بر پنجره زمانی مربوط به ثبت انفجار، دو پنجره زمانی نیز جهت ثبت ارتعاشات محیطی قبل و بعد از انفجار با طول زمانی ۳ دقیقه،  $Gain=100$  و نرخ نمونه برداری  $SPS=200Hz$  تعریف شد. پنجره مربوط به ثبت ارتعاشات حاصل از انفجار، با طول زمانی ۴۵ ثانیه، نرخ نمونه برداری  $SPS=200Hz$  و  $Gain=1$  (بسته به وزن مواد ناریه و موقعیت حسگر) تعیین گردید. در انفجار ۱۰۰ کیلوگرمی از چاشنی‌های انفجاری ۲ زمانه با تاخیر ۲ms و در انفجارهای ۵۰۰ و ۸۰۰ کیلوگرم از ۳ تاخیر ۱ms استفاده شد.

### محاسبه میراییهای مودی

پس از پردازش رکوردهای ثبت شده پاسخ بدنه سد خاکی مارون به ارتعاشات انفجار در جهت بالادست - پایین دست (U-D) چهار مود ارتعاشی سد شناسایی شد که در جدول (۱) قابل مشاهده است. برای هر مود ارتعاشی شناخته شده، یک نسبت میرایی معادل، بوسیله یک منحنی یک درجه آزادی هم اندازه با پیک PSD آن مود، بدست می‌آید. از آنجا که آزمایش ارتعاش اجباری بر روی این سد صورت نگرفته است، برآورد نسبتهای میرایی با استفاده از روشهایی که در بخشهای قبل شرح داده شد و در مورد سد خاکی مسجد سلیمان نیز استفاده شده است امکان پذیر نمی‌باشد. لذا شناسایی میرایی به راحتی و با استفاده از سیگنالهای تغییر مکان تجزیه شده در فرکانس تشدید، بدست می‌آید. این روش تعریف خوبی از پیکهای PSD در هر فرکانس تشدید، بدون تداخل ناشی از مودهای نزدیک و یا پیکهای فرکانسی دیگر سیگنال ارائه می‌دهد [۵]. شکل (۵) روند مذکور را برای تخمین نسبت میرایی مود دوم نامتقارن نشان می‌دهد. گراف بالایی در این شکل، تاریخچه زمانی سرعت ثبت شده در وسط تاج سد را برای انفجار ۸۰۰ کیلوگرم مواد ناریه ارائه می‌دهد. گراف دوم در این شکل، تاریخچه زمانی تغییر مکان حاصل از انتگرال رکورد سرعت ثبت شده و گراف سوم تاریخچه زمانی تغییر مکان تجزیه شده در فرکانس تشدید ۴/۸Hz می‌باشد. گرافهای پایین، شکلهای PSD تاریخچه زمانی تجزیه شده و اصلی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در گراف مربوط به PSD رکورد اصلی، منحنی پیک مربوط به فرکانس مودی ۴/۸ هرتز به علت تداخل پیکهای فرکانسی مجاور قابل تشخیص نمی‌باشد و محاسبه پهنای منحنی چگالی طیفی در اطراف این فرکانس مشکل بوده و تخمین درصد میرایی از روش نیم توان با خطا همراه خواهد شد.



شکل (۳): موقعیت سد مارون بر روی نقشه ایران



شکل (۴): پلان و مقطع تیپ سد مارون، موقعیت انفجارهای سایتی و نحوه استقرار حس گرها در تاج و شیبهای بالا دست پایین دست

جدول (۱): فرکانسهای مودی شناسایی شده و همچنین اشکال مودی و نسبتهای میرایی مودی سد مارون حاصل از آزمایش انفجارهای

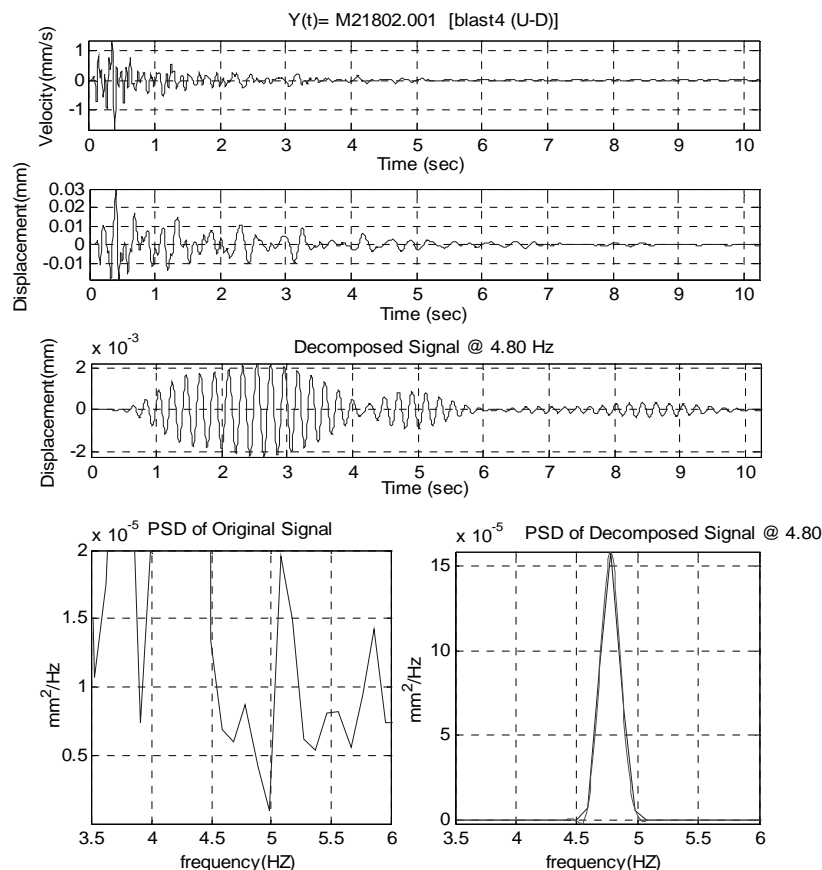
سایتی در جهت بالادست - پایین دست سد

شماره	فرکانس مودی	شکل مودی	نسبت میرایی مودی (%)
۱	۲/۱۵	اول متقارن	۳/۲
۲	۲/۶۵	اول نامتقارن	۲/۶
۳	۴/۲۰	سوم متقارن	۱/۸
۴	۴/۸۰	دوم نامتقارن	۱/۴

در حالیکه با تجزیه رکورد اصلی در فرکانس مذکور و استفاده از طیف PSD این رکورد، پیک مود دوم ارتعاش ناشی از انفجار به خوبی نشان داده شده و از پیکهای تشدید دیگر جدا شده و نسبت میرایی مربوطه به راحتی و با دقت بیشتری محاسبه شده است. بطور مشابه نسبت میرایی در فرکانس ۴/۸ هر تزی، برای همه رکوردهای ثبت شده در بدنه سد خاکی مارون محاسبه شده و در انتها نسبت میرایی نهایی در این مود، با میانگین گیری بین مقادیر بدست آمده از هر رکورد محاسبه می گردد. مقادیر نسبتهای میرایی در مودهای مختلف شناسایی شده سد مارون در جدول (۱) قابل مشاهده می باشد. به علت محدود بودن ارتعاشات به حد خطی انتظار می رفت نسبتهای میرایی مقادیر کوچکی داشته باشند که میرایی های به دست آمده در سد خاکی مارون این انتظار را بر آورده کرده است.

#### جمع بندی و نتیجه گیری

نتایج آزمایشهای ارتعاشی صورت گرفته در سدهای خاکی دنیا نشان می دهد که نسبت میرایی مودهای مختلف در حدود ۵-۲٪ بوده است. در مطالعات مذکور، به علت تداخل ناشی از مودهای نزدیک در طیف PSD رکوردهای ثبت شده، استفاده از روش نیم توان با مشکل مواجه می شد. لذا جهت کاهش اثرات تداخل مودی در محاسبات میرایی به روش نیم توان در سد مارون، از سیگنالهای تک فرکانسی تجزیه شده در فرکانس تشدید استفاده شده است. در مجموع، نتایج مطالعات نشان می دهد که در سد خاکی مارون نیز مقادیر نسبتهای میرایی مودهای مختلف در محدوده ۵-۲٪ قرار دارند ولی از آنجا که در اکثر سازه های فولادی و بتنی، مقادیر میرایی در مودهای بالا بیش از مودهای پایین برآورد می شود، در مورد سد خاکی مارون نیز چنین روندی پیش بینی می شد که برخلاف انتظار، مقادیر میرایی بدست آمده برای سد خاکی مارون در مودهای پایین بیش از مودهای بالا برآورد گردید. این نتایج نشان می دهد در مودهای پایین ارتعاشی، نسبت میرایی از مقادیر ۳/۲٪ شروع شده و در مودهای بالای شناسایی شده به مقدار ۱/۴٪ می رسد. لازم به ذکر است که با توجه به مطالعات صورت گرفته بر روی سدهای بتنی و خاکی مختلف، هنوز یک روند مشخصی بین میرایی و شماره مودهای تحریک مشاهده نمی شود بنابراین، جهت نتیجه گیری مطمئن تر در این زمینه باید مطالعات بیشتری صورت گیرد.



شکل (۵): تخمین نسبت میرایی مود دوم نامتقارن حاصل از رکورد انفجار ثبت شده در سد مارون. از بالا به پایین به ترتیب: تاریخچه زمانی سرعت ثبت شده در وسط تاج سد برای انفجار ۸۰۰ کیلوگرم مواد ناریه، تاریخچه زمانی تغییر مکان حاصل از انتگرال رکورد سرعت ثبت شده، تاریخچه زمانی تغییر مکان تجزیه شده در فرکانس تشدید  $4/8\text{ Hz}$ ، طیف PSD رکورد اصلی در سمت چپ و طیف PSD رکورد تجزیه شده در فرکانس  $4/8$  هر تیز در سمت راست.

## مراجع

- ۱- داودی، محمد (۱۳۸۲) ارزیابی مشخصات دینامیکی سدهای خاکی با استفاده از آزمایشهای ارتعاش محیطی و اجباری. پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تز دکترا؛
- 2- Clough R.W. , Penzien J., (1975) Dynamics of Structures. *McGraw – Hill*.
- 3-Bendat J.S., Piersol A.G., (1993) Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis. *John Willey & Sons Inc., Second Edition*.
- 4-DE Stefano, Ceravolo, Bonato, Knaflitz, (1996) Analysis of Ambient Vibration Data from Queensborough Bridge Using Cohen Class Time-Frequency Distributions. *Proceedings, 14<sup>th</sup> International Modal Analysis Conference*, 470-476.
- 5-Ghanaat Y., Chen H.Q., Redpath B.B., Hall R.L., Marjanishvili S.M., (1999) 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*.
- 6-Hall J.F., (1988) The Dynamic and Earthquake Behaviour of Concrete Dams: Review of Experimental Behaviour and Observational Evidence. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 7(2) , 58-121.
- ۷- فرهنگی، بیژن (۱۳۷۷) سدسازی معاصر ایران. کمیته ملی سدهای بزرگ ایران، تهران.
- ۸- مهتاب قدس (ب)، (۱۳۶۵) تحلیل دینامیکی سد مارون. گزارش شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، تهران.