

# تعیین مشخصات دینامیکی سد مارون با استفاده از آزمایشهای ارتعاش محیطی و روش عددی FEM

محمد کاظم جعفری\*، محمد داودی\*\* و مهران سید رزاقی\*\*

پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

(دریافت مقاله ۸۱/۲/۲۴ - دریافت نسخه نهایی ۸۱/۱۱/۱۲)

چکیده - تعیین مشخصات دینامیکی سازه‌های مهم از جمله سدهای خاکی در مناطق لرزه خیز جهان از اهمیت ویژه ای برخوردار است. بر این مبنا برای اولین بار در ایران آزمایش ارتعاش محیطی بر روی سد مخزنی مارون صورت گرفته است و به کمک روشهای جدید پردازش سیگنال، مشخصات دینامیکی این سد از جمله فرکانسها، اشکال و میراییهای مودی بدنه سد به دست آمده اند. همچنین مدل‌های اجزای محدود این سد با استفاده از نرم افزار رایانه ای ANSYS تهیه شده است و با بالا بردن دقت مدلسازی از نظر شرایط هندسی، مشخصات مصالح، شرایط مرزی - تکیه گاهی و نهایتاً کالیبراسیون مدل FEM سد با نتایج آزمایشات ارتعاش محیطی، مدل عددی سد مارون در محدوده کرنشهای کوچک تدقیق شده است.

واژگان کلیدی: سد خاکی - مشخصات دینامیکی - آزمایشات ارتعاش محیطی - تحلیل مودال

## Evaluation of Dynamic Characteristics of Marun Embankment Dam Using Ambient Vibration Test and FEM

M.K. Jafari, M. Davoodi and M. Razzaghi

International Institute of Earthquake Engineering and Seismology

**Abstract:** *There is a worldwide interest in the proper design of embankment dams to resist earthquake loadings. For the first time in Iran, a complete ambient vibration survey due to low-level loads such as wind, machinery activities, low level tectonic activities, and water exit from bottom outlet was performed on Marun embankment dam. These kinds of ambient vibration tests are suitable for manifesting the lower vibration modes of the dam body. Using different signal processing methods such as Power Spectra Density, the results of in-situ tests have been used to evaluate the natural frequencies, mode shapes and modal damping of the dam body. Besides ambient vibration tests, the 3-D modal analysis of the dam body was performed using ANSYS software. The foundation and abutment flexibility effects on dynamic characteristics of the dam body was investigated and the dynamic soil properties were used from Engineer's report and some empirical relations. Also initial shear modulus of the dam body and foundation materials were evaluated by refraction survey. In this paper, the test procedures, related signal processing results, numerical analysis results and its comparison with the dynamic characteristics of the dam body obtained from the full-scale dynamic tests will be presented. Finally, calibrating procedures of the numerical model (based on increasing the accuracy of dam body geometry, soil and rock material parameters and foundation and abutment flexibility) will be discussed.*

**Keywords:** *Embankment Dam, Dynamic Characteristics, Ambient Vibration Test, Modal Analysis.*

\*\* دانشجوی دکترا

\* دانشیار

$k_2$ ضریب ثابت	CPS و $S_{XY}$ طیف همبستگی متقاطع
$L$ مود ارتعاشی طولی	$C_s$ و $\gamma_{xy}$ طیف ارتباط
NFFT تعداد نقاط هر پنجره از رکورد	$e$ نسبت تخلخل مصالح خاکی
OCR نسبت پیش تحکیمی	$f_i$ آمین فرکانس مودی سد
PSD و $S_{xx}$ تابع چگالی طیفی توان	FEM روش تحلیل اجزاء محدود
$R_{xx}$ تابع خود همبستگی	FFT تبدیل فوریه سریع
$R_{xy}$ تابع همبستگی متقاطع	$G_o$ مدول برشی دینامیکی بیشینه مصالح خاکی
U-D مود ارتعاشی بالادست و پایین دست	H ارتفاع حداکثر تاج سد از روی فونداسیون
V مود ارتعاشی قائم	h ضخامت بستر الاستیک
$v$ ضریب پواسون	$h_1$ ضخامت تکیه گاههای جانبی الاستیک
$\sigma'_o$ تنش موثر متوسط	$\sqrt{-1}$ j

#### ۱- مقدمه

و اجباری را با توجه به پیشرفتهای اخیر در روشهای پردازش سیگنال می توان به عنوان روش مناسبی برای تعیین مشخصات درجای دینامیکی مودی شامل فرکانسها، اشکال و میراییهای مودی سدهای خاکی و نیز سایر انواع سازه های مهم به شمار آورد. در این راستا آزمایش ارتعاش محیطی از چنان جایگاهی برخوردار است که معمولاً توصیه می شود در برخی بازدیدهای دوره ای سد انجام گیرد. با وجود اینکه چنین مطالعاتی تا کنون بر روی سدهای خاکی در داخل کشور انجام نشده است ولی مدت زمانی است که در دنیا این مطالعات بر روی سدهای مذکور آغاز شده است و در برخی موارد نیز ادامه دارد. به منظور آگاهی و استفاده از تجربیات دیگر کشورها در زمینه نحوه انجام آزمایش و پردازش نگاشتهای حاصل از آزمایشهای ارتعاشی در جا، ادبیات فنی در قالب مطالب منتشر شده در گزارشها، مجله ها و کنفرانسهای سرتاسر دنیا بررسی و مشخص شد که آزمایشهای ارتعاش محیطی بر روی مدل واقعی سدهای خاکی از سال ۱۹۷۶ آغاز شده است و تا به حال بر روی ۱۶ سد خاکی بزرگ با اهداف متفاوت صورت پذیرفته است. آزمایش ارتعاش اجباری بر روی مدل واقعی سدهای خاکی بزرگ نیز در فاصله زمانی ۱۹۸۰-۱۹۶۶ بر روی ۱۱ سد انجام

با توجه به روند رو به گسترش ساخت سدهای خاکی در کشور در سالهای اخیر و همچنین وضعیت بالای لرزه خیزی کشور، ضروری است شناخت بیشتری در مورد رفتار این سدها در حین وقوع زمین لرزه حاصل شود. بررسی رفتار لرزه ای سدهای خاکی معمولاً به چهار روش صورت می پذیرد: "استفاده از نگاشتهای ثبت شده از پاسخ سد به زلزله های واقعی"، "روشهای آزمایشگاهی بر روی مدل های کوچک مقیاس"، "انجام آزمایشات ارتعاشی در جا" و نهایتاً "انجام تحلیلهای عددی". بررسی رفتار سدهای خاکی با استفاده از زلزله های واقعی به دلیل نیاز به ابزار گذاری دقیق بر روی بدنه سد از یک طرف و وقوع زمین لرزه در منطقه احداث سد از طرف دیگر اغلب دشوار و گاهی دست نیافتی است. انجام آزمایشهای آزمایشگاهی بر روی مدل های کوچک مقیاس از سد مانند آزمایش میز لرزان و یا گریز از مرکز نیز، گرچه امکان اعمال نیروهای ارتعاشی دلخواه را فراهم می کند ولی با مشکلاتی از قبیل هزینه سنگین آزمایش و مطالعه بر روی مدل کوچک شده سد به جای مطالعه بر روی اندازه واقعی مواجه است. در این میان آزمایشهای ارتعاشی در جا مانند آزمایش ارتعاش محیطی

شامل فرکانسها، اشکال و میراییهای مودی سد به دست آمد و به کمک آن، مدل عددی تحلیل دینامیکی سد در محدوده کرنشهای کوچک با انجام مقایسه بین رفتار دینامیکی پیش بینی شده و رفتار مشاهده شده (بعد از ساخت سد) تدقیق شد. با کالیبراسیون مدل عددی در کرنشهای کوچک می توان دورنمای واقعتری از رفتار سد را در زمین لرزه های بزرگ آتی با استفاده از روشهای عددی غیر خطی به دست آورد. در مقاله حاضر نحوه انجام آزمایش ارتعاش محیطی بر روی سد، پردازش رکودهای حاصله، تحلیل عددی صورت گرفته بر روی سد، مقایسه بین نتایج آزمایش و تحلیل و در نهایت تدقیق مدل عددی ارائه می شود.

## ۲- معرفی سد مخزنی مارون

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 سنگریزه ای با هسته رسی است با حجم مخزن ۱/۲ میلیارد متر مکعب دارای ارتفاع حداکثر ۱۶۵m از روی فونداسیون، طول تاج ۳۴۵ متر و عرض تاج ۱۵ متر است. بدنه این سد متشکل از ۹ نوع مصالح خاکی گوناگون است که جمعا حجمی حدود ۸/۶ میلیون مترمکعب را شامل می شود. طراحی این سد توسط شرکت مهندسان مشاور مهاب قدس و با همکاری شرکت مهندسان مشاور رم کانسالت- بخارست<sup>۲</sup> از کشور رومانی صورت گرفته و احداث آن در سال ۱۳۷۷ پایان پذیرفته است [۲]. موقعیت سد مارون در نقشه ایران در شکل (۱) نشان داده شده و مقطع تیپ و همچنین پلان این سد در شکل (۲) مشاهده می شود.

## ۳- مشخصات دستگاههای استفاده شده در آزمایش

### ارتعاش محیطی

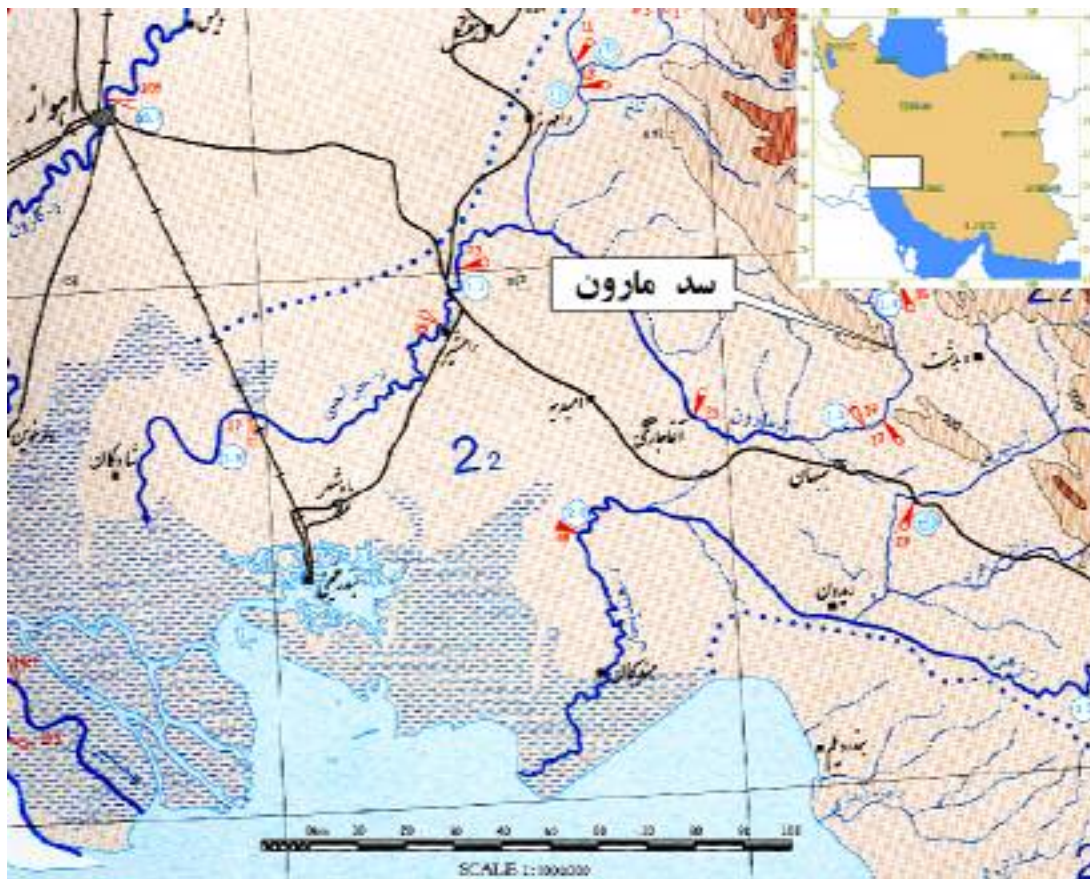
#### ۳-۱- حسگرهای SS-1

لرزه سنجهای پریود کوتاه SS-1 که ساخت کارخانه

شده است. در مرجع [۱] مشخصات عمده کلیه آزمایشها و پردازشهای صورت گرفته در سدهای مذکور جمع آوری شده و در چند مورد خاص به تفصیل شرح داده شده است.

روشهای عددی تحلیل دینامیکی سدهای خاکی دارای محدودیتهایی اند که عمدتا مربوط به عدم تطابق کامل مدل از لحاظ شرایط هندسی، مشخصات مصالح و شرایط مرزی و تکیه گاهی با خصوصیات واقعی سد است. ولی با وجود این، به دلیل هزینه پایین انجام تحلیل در مقایسه با دیگر روشها از یک طرف و نیاز به تهیه مدل عددی برای بررسی کاملتر رفتار لرزه ای سد در زمین لرزه های قوی از طرف دیگر، در کلیه مطالعات رفتار لرزه ای سدهای خاکی از روش عددی استفاده می شود. در مجموع توصیه می شود دو روش آزمایشهای ارتعاشی محیطی و تحلیلهای عددی به صورت هم زمان در مطالعه پارامترهای لرزه ای سدهای خاکی استفاده شود و از این رهگذر، علاوه بر دسترسی به مشخصات در جای دینامیکی سد، مدل عددی سد نیز برای استفاده در مطالعات کاملتر تدقیق شود.

با توجه به خطر بالای لرزه خیزی در کشور و ضرورت تدقیق مدل های محاسباتی تحلیل و طراحی سازه های بزرگ در مقابل زمین لرزه با انجام آزمایشهای ارتعاشی در جا بر روی سازه های واقعی<sup>۱</sup>، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله در چارچوب برنامه تحقیقاتی خود، انجام آزمایشهای ارتعاش محیطی و اجباری بر روی سدهای خاکی را به موازات انجام این آزمایشها بر روی سدهای بتنی، ساختمانهای بلند و سکوی نفتی دریایی برای اولین بار در ایران در دستور کار خود قرار داده است. بدین منظور پس از مطالعه سدهای خاکی موجود در کشور، دو سد خاکی مارون و مسجد سلیمان در استان خوزستان به دلیل خصوصیات خاص آنها انتخاب شد و بر روی سد مارون، آزمایشهای ارتعاش محیطی و آزمایش ژئوسایز میک در بهار و تابستان ۱۳۷۹ با موفقیت انجام شد. با انجام آزمایشها و مطالعات تحلیلی مربوطه، پارامترهای ارتعاشی سد در محدوده کرنشهای کوچک



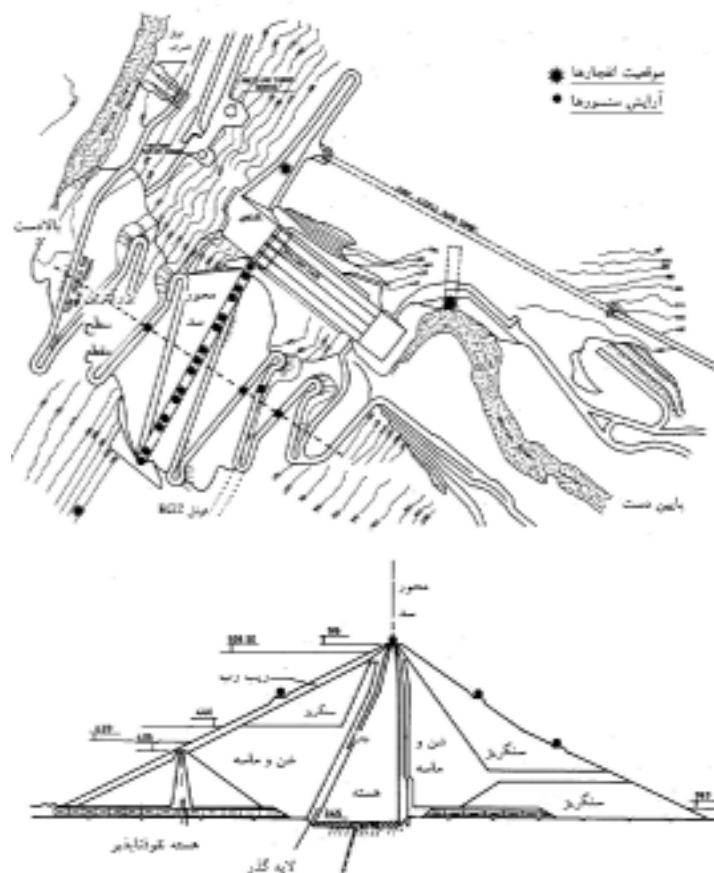
شکل ۱- موقعیت سد مارون بر روی نقشه ایران

نمی‌شود. در مجموع، قابلیت‌های مذکور باعث شده است که حسگرهای SS-1 به طور وسیعی در مطالعات صحرایی مورد استفاده قرار گیرند [۳].

### ۲-۳- ثباتهای SSR-1

ثباتهای SSR-1 ساخت کارخانه کینمتریکس می‌توانند نگاشتهای حسگرهای SS-1 را ضبط کنند. این دستگاهها در حالت معمولی قابلیت ضبط سه کانال را (که تا شش کانال نیز قابل افزایش است) دارند و قادر به نرخ نمونه برداری تا ۱۵۰۰ نمونه در ثانیه (بسته به تعداد کانالهای ضبط) هستند. در این ثباتها وضوح اسمی<sup>۵</sup> و محدوده دینامیکی<sup>۶</sup> مبدل A/D برابر ۱۶ بیت است. هنگام ضبط نگاشتهای، اطلاعات نخست بر روی دیسک سخت این ثبات ضبط می‌شود و سپس به فلاپی دیسک و یا رایانه منتقل می‌شود [۴].

کینمتریکس اند دارای خصوصیات حساسیت بالا، قابلیت تنظیم فرکانس طبیعی، ساختمان محکم و با دوام و ضد آب با ابعاد ۱۴۰ میلی متر قطر، ۳۰۵ میلی متر طول و وزن ۵ کیلوگرم هستند. خروجی سنسور متناسب با سرعت ارتعاش محل استقرار آن است و فرکانس طبیعی حسگر نیز در حالت معمولی برابر یک هرتز است. محدوده کارکرد حسگرها از ۰/۱ هرتز تا حداقل ۵۰ هرتز است و این در حالی است که نسبت میرایی را می‌توان با تغییر یک مقاومت خارجی، بر روی میرایی اسمی ۰/۷ تنظیم کرد. در این حالت دامنه پاسخ فرکانسی در محدوده بالای فرکانس طبیعی حسگر تقریباً افقی است و در مقادیر کوچکتر از فرکانس طبیعی با شیب ۴۰ dB/dec کاهش می‌یابد. بدلیل اینکه حسگرهای مذکور به صورت نافع<sup>۳</sup> عمل می‌کنند نیازی به نیروی محرکه خارجی ندارند و در رکودهای ثبت شده نیز مشکلات ظهور ولتاژهای با مقادیر DC<sup>۴</sup> مشاهده



شکل ۲- پلان و مقطع تیب سد مارون. به همراه موقعیت انفجارهای سایتی و نحوه استقرار حسگرها در تاج شیبهای بالادست-پایین دست

ضعیف، حرکت آب از تونل تخلیه تحتانی و کارکرد پمپهای آب برای انتقال آب از مخزن به تاج سد از جمله منابع ایجاد ارتعاشات محیطی در سایت سد هستند. در این آزمایش، پاسخ نقاط مشخصی از بدنه سد با استفاده از ۹ دستگاه حسگر SS-1 و ۴ دستگاه ثابت SSR-1 اندازه گیری شد. به علت محدودیت تعداد لرزه نگارها و تک مولفه ای بودن آنها امکان نصب حسگر و ثبت ارتعاشات در جهت افقی و یا قائم). لرزه نگارها به نحوی آرایش یافتند که بتوانند مقاطع مهم سد را پوشش دهند. شکل (۲) نحوه آرایش حسگرها در طول تاج سد (نیمه چپ، نیمه راست و کل طول تاج) و همچنین در طول مقطع بیشینه سد و شکل (۳) نیز تصویری از یکی از آرایشهای مذکور را نشان می دهد. در آزمایشهای مذکور، حسگرها در جهات بالا

#### ۴- آزمایش ارتعاش محیطی

برای به دست آوردن پارامترهای ارتعاشی در جای بدنه سد مارون، آزمایشهای ارتعاشی محیطی بر روی بدنه سد انجام شد که در این مقاله به تشریح نحوه انجام آزمایش، پردازش رکوردهای حاصله و نتایج به دست آمده از آن می پردازیم.

#### ۴-۱- نحوه انجام آزمایش

در آزمایش ارتعاش محیطی سد مارون که در خرداد ماه ۱۳۷۹ انجام شد، پاسخ سد به ارتعاشاتی که به صورت معمول در طبیعت وجود دارد به دست آمد. برخورد باد و امواج دریاچه با بدنه سد، فعالیتهای مکانیکی و راهسازی و تزریق، حمل و نقل وسایط نقلیه، رفت و آمد افراد، حرکات زمین ساختی



شکل ۳- نمایشی از تاج سر (دید از سمت راست به چپ) و نمونه‌ای از آرایش حسگرها

#### ۴-۲- پردازش رکوردهای ثبت شده در آزمایش ارتعاش

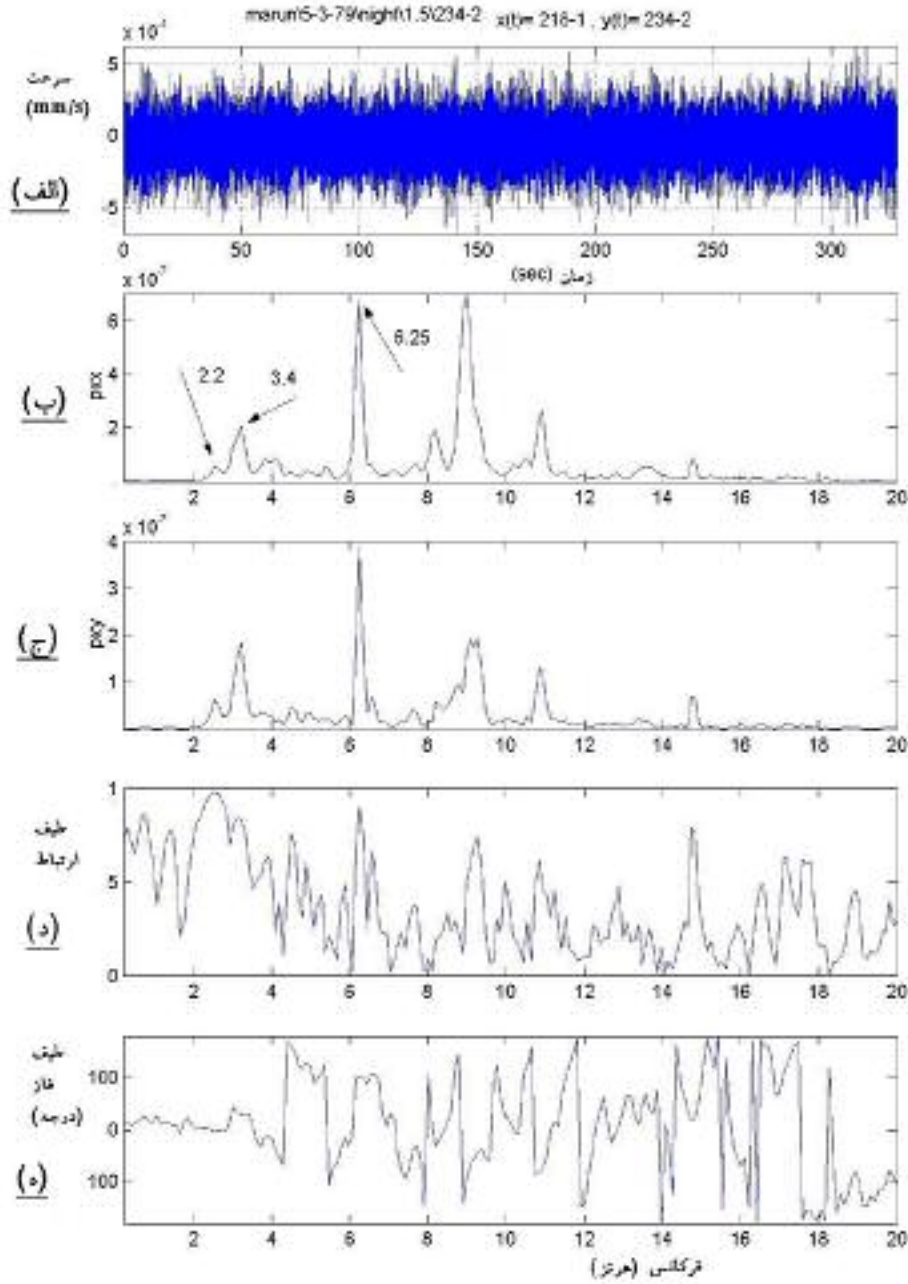
##### محیطی

در آزمایش ارتعاش محیطی سد مارون با وجود اینکه حرکات برخی نقاط تکیه گاهی و جناحین سد در سطح تماس سد و فونداسیون اندازه گیری شده است، به دلیل اثرگذاری اندرکنش سد- فونداسیون بر روی نگاشتهای مذکور، آنها را نمی‌توان به عنوان سیگنال ورودی سیستم استفاده کرد. از سوی دیگر تحقیقات و مقالات زیادی در دسترس است که نشان می‌دهد در محدوده تقریبهای قابل قبول مهندسی می‌توان نیروی ناشی از لرزه‌های کوچک زمین، ترافیک و غیره را نوفه سفید با تابع چگالی طیفی ثابت فرض کرد [۶۵]. در نتیجه اگر چنین رکوردهایی شرایط مانا<sup>۷</sup> بودن را دارا باشند، با استفاده از روشهای کلاسیک پردازش سیگنال می‌توان فرکانسها، اشکال و میراییهای مودی بدنه سد را به دست آورد.

در روشهای کلاسیک، هنگامی که دسترسی به محرک ورودی امکانپذیر نباشد، برای محاسبه پارامترهای دینامیکی از تابع چگالی طیف توان PSD<sup>۸</sup> مطابق معادله (۱) و از طیف همبستگی متقاطع CPS<sup>۹</sup> بین دو نقطه مطابق معادله (۲) استفاده

دست- پایین دست (U-D)، طول تاج (L) و قائم (V) مستقر شدند و در هر کدام از جهات مذکور ارتعاشات نقاط محل استقرار خود را به صورت همزمان ثبت کردند. برای مشخص کردن خطای ناشی از نحوه استقرار حسگرها بر روی قسمتهای خاکی بدنه سد، از سه دستگاه حسگر با فاصله حداقل از یکدیگر استفاده شد. بدین صورت که یک دستگاه بر روی یک قطعه سنگ بزرگ گیردار در زمین، دستگاه دوم بر روی یک قطعه بلوک بتنی ۵۰×۵۰×۵۰Cm مدفون در زمین و دستگاه سوم نیز مستقیماً بر روی خاک سفت قرار گرفت و کلیه دستگاهها به صورت همزمان، ارتعاشات محیطی را ثبت کردند. نتایج آزمایش از تطابق کامل دامنه و محتوی فرکانسی نگاشتهای دو حسگر اخیر حکایت می‌کرد که بر این اساس، در ادامه آزمایش، کلیه حسگرها مستقیماً بر روی خاک سفت محکم شدند. در هر کدام از آرایشهای اصلی آزمایش ارتعاش محیطی، مشخصات پارامترهای دستگاهی طوری تعریف شد که در طول یک شبانه روز، هر ساعت به مدت ۵/۵ دقیقه رکورد گیری پیوسته با نرخ نمونه برداری ۱۰۰ هرتز صورت گیرد.





شکل ۴- الف- تاریخچهٔ زمانی سرعت ثبت شده در نقطه‌ای از تاج سد خاکی مارون (واقع در ۱/۴ طولی سمت راست) در آزمایش ارتعاش محیطی ب- چگالی طیف توان رکورد ج- دامنه طیف توان متقاطع رکورد مذکور نسبت به نقطهٔ مرجع واقع در مرکز تاج د- طیف ارتباط دو رکورد مذکور ه- فاز طیف توان متقاطع دو رکورد

$$S_{xx}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (۱)$$

$$S_{xy}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (۲)$$

می‌شود و در صد اطمینان به صحت نتایج، با استفاده از طیف ارتباط  $CS^1$  طبق معادلهٔ (۳) کنترل می‌شود. (به توضیحات مربوط به شکل (۴) مراجعه شود).

$$\gamma_{xy}(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)} \quad (3)$$

در معادلات فوق متغیرهای  $S_{XX}$  عبارت از تابع چگالی طیف توان،  $S_{XY}$  طیف همبستگی متقاطع،  $\gamma_{xy}$  طیف ارتباط،  $R_{XX}$  تابع خود همبستگی<sup>۱۱</sup>،  $R_{XY}$  تابع همبستگی متقاطع<sup>۱۲</sup> و  $j = \sqrt{-1}$  است [۷].

در شکل (۴-الف) رکورد ارتعاش محیطی نقطه ای از تاج سد در جهت بالا دست- پایین دست، در شکل (۴-ب)، چگالی طیف توان PSD، در شکل (۴-ج و ه)، طیف توان متقاطع CPS رکورد مذکور نسبت به نقطه مرجع واقع در مرکز تاج و در شکل (۴-د) و طیف ارتباط CS دو رکورد مذکور، به عنوان نمونه نشان داده شده است. به هنگام ثبت ارتعاشات، از تعداد نمونه برداری در ثانیه برابر ۱۰۰ و به هنگام پردازش ارتعاشات که با استفاده از نرم افزار MATLAB-6 [۸] انجام شده است، از تعداد نقاط NFFT هر کدام از جزء رکوردها برای محاسبات تبدیل فوریه FFT برابر ۱۰۲۴ نقطه، میزان نمونه‌های روی هم افتاده جزء رکوردها برابر نصف NFFT و برابر ۵۱۲ نقطه و نهایتاً از پنجره هنینگ<sup>۱۳</sup> استفاده شده است. محاسبات طیف نیز با استفاده از پریودوگرام<sup>۱۴</sup> متوسط گیری شده ولج<sup>۱۵</sup> انجام شده است [۹]. در طیف PSD چندین پیک مشاهده می‌شود که هر کدام یا نشان دهنده یکی از مودهای ارتعاش بدنه سد و یا مشخص کننده یک پیک در محرک ورودی است. برای تشخیص این دو از یکدیگر از خواص عمود بودن<sup>۱۶</sup> اشکال مودی استفاده می‌کنیم. طبق این اصل، هنگامی که بدنه سد در یکی از مودهای ارتعاشی تحریک می‌شود و میرایی مقادیر کوچکی دارد، کلیه نقاط نسبت به یکدیگر بسته به شکل مود ارتعاشی یا هم فاز و یا با ۱۸۰ درجه در فاز مخالف اند [۱۰].

برای استفاده از این اصل، فاز بین دو نقطه اندازه گیری را از فاز طیف همبستگی متقاطع آنها پیدا می‌کنیم. با این توضیح، روش کار چنین خواهد بود: هر پیک از منحنی PSD را هنگامی می‌توان به عنوان فرکانس تشدید مربوط به یک مود ارتعاشی در نظر گرفت که اولاً پیک مذکور در منحنی CPS نیز

مشاهده شود، ثانياً دامنه طیف CS در فرکانس مذکور مقادیر بزرگتری داشته باشد به طوری که با نزدیک شدن به واحد اطمینان بیشتر می‌شود، ثالثاً در فرکانس مذکور فاز بین نقطه رکورد گیری شده و نقطه مرجع نزدیک به صفر یا ۱۸۰ درجه باشد. برای اطمینان به این مطلب که فرکانسهای مذکور در کلیه رکوردها نیز مشاهده می‌شوند و در نتیجه به یکی از فرکانسهای تشدید تعلق دارند، باید طیفهای PSD و CPS برای کلیه نقاط رکوردگیری به دست آیند. به عبارت دیگر تنها پیکهایی از محتوی فرکانسی را می‌توان به عنوان بهترین تقریب از فرکانسهای تشدید بدنه سد در نظر گرفت که این پیکها با اختلاف فاز صفر یا ۱۸۰ درجه در کلیه رکوردها به وضوح مشاهده شوند. البته برای سهولت کار می‌توان طیف همبستگی متقاطع را نسبت به یک نقطه مرجع در بدنه سد به دست آورد. بر این اساس و با توجه به شکل (۴) سه فرکانس ۲/۲، ۳/۴ و ۶/۲۵ هرتز که دارای پیکهایی در منحنیهای PSD، CPS و CS می‌باشند و به ترتیب فاز موافق، موافق و مخالف با نقطه مرجع دارند و همچنین در رکوردهای پردازش شده دیگر نقاط سد نیز مشاهده می‌شوند، به عنوان بهترین تقریب از سه فرکانس تشدید بدنه سد در جهت بالادست-پایین دست به دست آمد.

نحوه تحریک سد با توجه به نوع بارگذاری محیطی و جهت برخورد باد با بدنه سد به گونه ای بوده است که در فرکانس ۲/۲ هرتز باعث تحریک اولین مود متقارن بالا دست-پایین دست، در محدوده فرکانسی ۳/۴-۳/۲ هرتز باعث تحریک دومین مود متقارن بالا دست-پایین دست و در محدوده فرکانسی ۶/۳-۶/۲ هرتز نیز باعث تحریک سومین مود متقارن مود بالا دست-پایین دست شده است.

## ۵- تحلیل‌های عددی انجام شده بر روی سد مارون

در سال ۱۳۶۵ در راستای تحلیل دینامیکی انجام شده بر روی بدنه سد مارون، فرکانسها و اشکال مودی سد با روش المان محدود و با نرم افزار SAPIV توسط مشاور طراح سد بدست آمد [۷]. نتایج تحلیل مذکور از اختلاف نسبتاً زیاد بین



جدول ۱- مشخصات مدل‌های نهایی استفاده شده در تحلیل مودال سد مارون

نام	شرح مدل
مدل ۱	مدل ساده که در آن از پنج مقطع عرضی در مدلسازی استفاده شده است.
مدل ۲	مدلی که از لحاظ هندسی دقیقترین مدل مورد استفاده است و در مدلسازی از ۱۱ مقطع عرضی استفاده شده است.
مدل ۳	این مدل از لحاظ هندسی مشابه مدل ۲ است، ولی مشخصات مصالح آن در ۴ تراز ارتفاعی به صورت خطی افزایش داده شده است.
مدل ۴	این مدل از لحاظ هندسی مشابه مدل ۲ است، ولی مشخصات مصالح خاکی آن در ۸ تراز ارتفاعی به صورت خطی افزایش داده شده است.
مدل A	این مدل از لحاظ هندسی مشابه مدل‌های ۲، ۳ و ۴ است، اما در تعیین مشخصات مصالح از تحلیل استاتیکی خطی استفاده شده است.
مدل B	کاملاً مشابه مدل A است ولی برای تعیین مشخصات مصالح آن از تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی استفاده شده است.
مدل سه بعدی سد با تکیه‌گاه جانبی	مدل سه بعدی سد همراه با ضخامتی از سنگ بستر به ارتفاع ۱۶۵ متر و ضخامتهای مختلفی از تکیه‌گاههای جانبی معادل (۰/۵، ۰/۳، ۰/۱ و .) برابر ارتفاع بیشینه سد
مدل سه بعدی سد و بستر سنگی	مدل سه بعدی سد همراه با ضخامتهای مختلفی از سنگ بستر (۱/۵، ۱، ۰/۵ و .) برابر ارتفاع بیشینه سد

۱-۵- تاثیر شرایط هندسی بر نتایج تحلیل مودال سد مارون  
جهت بررسی اثر شرایط هندسی بر نتایج مودال از دو مدل سه بعدی استفاده شد. در مدل شماره یک که یک مدل نسبتاً ساده از سد است مدل سد با استفاده از پنج مقطع عرضی به دست آمده از نقشه‌های اجرایی بدنه و فونداسیون تهیه شد و در مدل شماره ۲ نیز جهت تهیه مدل بدنه و فونداسیون ۱۱ مقطع عرضی با استفاده از نقشه‌های اجرایی استخراج گردید که به مراتب از لحاظ فرم هندسی بدنه و فونداسیون دقیق تر از مدل شماره یک می‌باشد. این مدل متشکل از ۳۸۵ بلوک (حجم) مختلف می‌باشد که هر یک از آنها بصورت یک منشور است. چهار وجه جانبی هر منشور، مقاطع عرضی سد (که در مدلسازی از آنها استفاده شده است) و نیز مرز زونهای مختلف

فرکانسهای مودی تحلیل و آزمایش ارتعاش محیطی حکایت می‌کند. بطوریکه در اولین فرکانس مودی این اختلاف به ۲۷٪ می‌رسد و در مودهای بالاتر افزایش می‌یابد. بر این اساس، به منظور بدست آوردن مشخصات دینامیکی سد مارون و تعیین حساسیت نتایج خروجی تحلیل مودال به عوامل موثر (مشخصات هندسی، مشخصات مصالح و شرایط مرزی - تکیه گاهی) چندین مدل اجزاء محدود سه بعدی از سد مارون با استفاده از برنامه ANSYS تهیه شد و مورد تحلیل مقدار ویژه (مودال) قرار گرفت. جدول (۱) فهرست کلیه مدل‌های نهایی مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. در بخشهای آتی تاثیر هر یک از عوامل موثر بر روی نتایج تحلیل مودال سد مارون مورد بررسی قرار می‌گیرند.

جدول ۲- مشخصات مکانیکی مصالح به کار رفته در تحلیل مودال سد مارون بر اساس مقادیر پیشنهادی

مشاور طراح سد [۱۲]

ناحیه و نوع مصالح	وزن مخصوص $\frac{N}{m^3} \times 10^3$	مدول یانگ $\frac{N}{m^2} \times 10^9$	ضریب پواسون
هسته رسی	۲۰/۶	۰/۲۶ - ۰/۰۸	۰/۴
مصالح فیلتر	۱۹/۵	۰/۵۴ - ۲/۲۶	۰/۴۲
شن پوسته بالادست	۲۰/۵	۱/۰۶ - ۴/۲۱	۰/۴۲
شن پوسته پایین دست	۲۱	۱/۴۸ - ۳/۵۷	۰/۴۲
سنگریز پوسته بالادست	۲۱	۱ - ۲/۵	۰/۳۸
سنگریز پوسته پایین دست	۲۱	۰/۸۷ - ۲/۶۱	۰/۳۸
سنگ پی	-*	۱۲	۰/۳۱

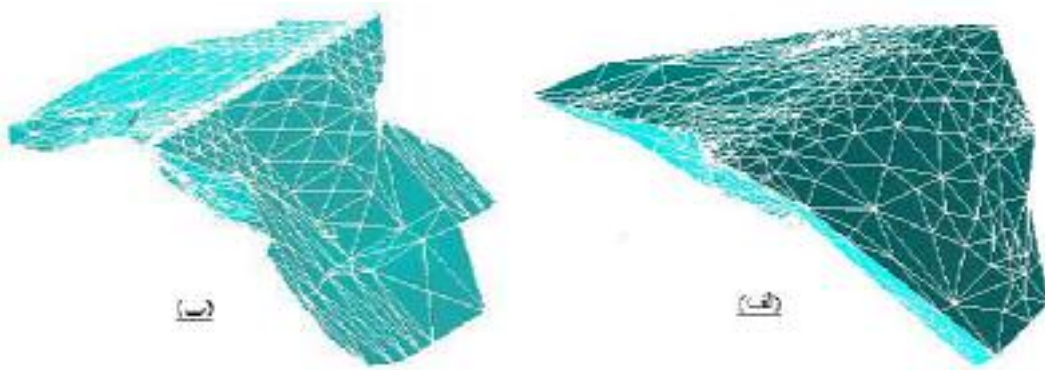
\*- در انجام تحلیلهای مودی که تأثیر بستر سنگی و تکیه گاههای جانبی بر مشخصات مودی سد در نظر گرفته می شود جرم بستر سنگی صفر و یا مقدار بسیار ناچیزی وارد می شود در غیر اینصورت به دلیل حجم زیاد فونداسیون نسبت به بدنه سد، فرکانسهای طبیعی سازه از مقدار واقعی دور می شود و به سمت فرکانسهای طبیعی بستر میل می کند.

صلب در نظر گرفته شدند. شبکه بندی هر دو مدل مطابق شکل (۵) بصورت خودکار توسط نرم افزار ANSYS انجام شد و از المانهای Solid هشت گرهی برای شبکه بندی مدل استفاده گردید، و سپس تحلیل مودال جهت به دست آوردن مقادیر مشخصه هر دو مدل انجام شد. مقایسه فرکانسهای طبیعی ۱۵ مود اول ارتعاش این دو مدل در جدول (۳) ارائه شده است. نتایج تحلیلها نشان می دهد که اختلاف نسبی بین فرکانسهای طبیعی به دست آمده از تحلیل مودال این دو مدل بین ۲ الی ۶/۵ درصد می باشد.

#### ۲-۵- تأثیر مشخصات مصالح بر نتایج تحلیل مودال سد مارون

جهت بررسی تأثیر مشخصات مصالح بر نتایج تحلیل مودال در مجموع چهار مدل سه بعدی مورد تحلیل مودال قرار گرفتند. (مدلهای ۳، ۴، A و B). برای رسیدن به یک مقایسه منطقی، شرایط مرزی - تکیه گاهی و شرایط هندسی کلیه

سد می باشد. جهت ایجاد تغییرات در مشخصات مصالح در ارتفاع سد هشت مقطع تقریباً افقی از سد که بطور متوسط ۲۰ متر از یکدیگر فاصله دارند مد نظر قرار گرفت که وجوه بالایی و پایینی بلوکها به این صفحات محدود می شوند. به منظور مقایسه نتایج تحلیل مودال دو مدل شماره ۱ و ۲ و به این منظور که تفاوتی موجود بین نتایج تحلیل مودال این دو مدل صرفاً ناشی از تفاوت مشخصات هندسی دو مدل مذکور باشند، مشخصات مصالح، ارتفاع تراز آب پشت سد و شرایط تکیه گاهی در هر دو مدل یکسان در نظر گرفته شد. براین اساس در هر دو مدل از مشخصات دینامیکی مصالح ارائه شده توسط مشاور طراح سد جدول (۲) استفاده گردید [۸]. مدول برشی بیشینه مصالح هر زون بصورت خطی در ارتفاع سد تغییر داده شد. همچنین ارتفاع تراز آب مخزن از روی فونداسیون برابر با ۱۲۰m در نظر گرفته شد که منطبق با شرایط واقعی مخزن در زمان انجام آزمایشات ارتعاش محیطی است. از لحاظ شرایط مرزی - تکیه گاهی هر دو مدل بر روی بستر



شکل ۵- مدل‌های اجزای محدود سه بعدی سد مارون در حالت‌های الف- مدل شماره (۱) ب- مدل شماره (۲)

صلب در تمام مدل‌ها اعمال گردید. جهت گذر از خطاهای ناشی از شرایط هندسی، کلیه مدل‌ها از لحاظ هندسی منطبق با مدل شماره ۲ در نظر گرفته شدند. مشخصات مصالح در دو مدل شماره ۳ و ۴ با استفاده از مقادیر پیشنهادی ارائه شده توسط مشاور طراح سد جدول (۲) می‌باشند با این تفاوت که در مدل شماره ۳ تغییرات مدول برشی مصالح هر زون در عمق سد بصورت خطی و در مدل شماره ۴ این تغییرات در ۸ تراز ارتفاعی در مدل اعمال شده است. این دو مدل نیز با المان‌های solid هشت گرهی و کاملاً مشابه با مدل‌های قبلی شبکه بندی شدند و مورد تحلیل مودال قرار گرفتند.

در دو مدل A و B مشخصات دینامیکی مصالح در نقاط مختلف سد نه براساس تراز ارتفاعی بلکه بر اساس تنش‌های استاتیکی المان‌های مختلف بدنه سد مورد استفاده قرار گرفتند. برای این منظور سد مارون به روش اجزاء محدود و به کمک نرم افزار ANSYS مورد تحلیل استاتیکی خطی و غیر خطی قرار گرفت. در انجام تحلیل‌های استاتیکی از مشخصات مصالح ارائه شده توسط مشاور طرح که در جدول (۴) خلاصه شده است استفاده شد [۹] و مدل در اکر - پر اگر جهت بیان رفتار خاک در تحلیل غیر خطی مورد استفاده قرار گرفت. در انجام تحلیل‌های استاتیکی فرض گردید که آبیگری مخزن بصورت سریع صورت گرفته و خطوط جریان پایداری در هسته سد ایجاد نشده است. با توجه به زمان آبیگری سد مارون، این فرض در زمان انجام آزمایشات ارتعاش محیطی منطقی به نظر می‌رسد.

جدول ۳- تأثیر شرایط هندسی بر فرکانسهای طبیعی سد مارون بر حسب هرتز

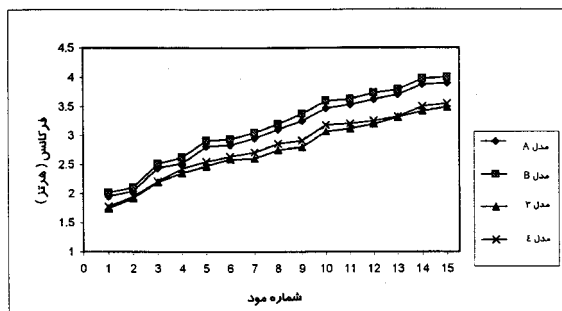
شماره مود	مدل ۱	مدل ۲
۱	۱/۶۸	۱/۷۴
۲	۱/۸۹	۱/۹۱
۳	۲/۱۳	۲/۲۱
۴	۲/۳۱	۲/۴۱
۵	۲/۵۱	۲/۵۹
۶	۲/۵۵	۲/۶۳
۷	۲/۶۵	۲/۷۰
۸	۲/۶۹	۲/۸۴
۹	۲/۸۶	۲/۹۰
۱۰	۲/۹۸	۳/۱۸
۱۱	۳/۰۲	۳/۲۲
۱۲	۳/۱۱	۳/۲۳
۱۳	۳/۲۴	۳/۳۲
۱۴	۳/۴۰	۳/۴۳
۱۵	۳/۴۵	۳/۵۰

مدل‌ها یکسان در نظر گرفته شد. به عبارت دیگر ارتفاع آب پشت سد در تمامی مدل‌ها ۱۲۰m در نظر گرفته شد و فرض پی

جدول ۴- مشخصات مصالح برای تحلیل استاتیکی سه بعدی

بدنه سد [۱۳]

مصالح	مدول یانگ KN/m <sup>2</sup> × 10 <sup>3</sup>	ضریب پواسون
شن تراسی	۱۳۰	۰/۲۲
سنگ ریز	۱۰۰	۰/۲۵
فیلترهای بخش پایین دست	۶۰	۰/۳۳
فیلترهای بخش بالا دست	۴۵	۰/۳۵
هسته رسی	۲۰	۰/۴



شکل ۶- تأثیر نحوه اعمال مشخصات مصالح بر فرکانسهای طبیعی ۱۵ مدل اول ارتعاشی سد مارون

$$G_0 = \frac{3230(2.97 - e)^2}{1 + e} (\text{OCR})^k \sigma'_0{}^{1/2} \quad (5)$$

در این معادله OCR نسبت پیش تحکیمی است و سایر پارامترها نظیر معادله (۴) هستند. در دو معادله اخیر،  $\sigma'_0$  و  $G_0$  نیز بر

حسب  $\frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$  هستند و  $K$  نیز ضریب ثابتی است که وابسته به اندیس خمیری است. در مورد مصالح شنی پوسته معادله سید<sup>۱۹</sup> بکار گرفته شد [۱۵] که عبارت است از:

$$G_0 = 1000K_2 (\sigma'_0)^{1/2} \quad (6)$$

در این معادله  $G_0$  و  $\sigma'_0$  بر حسب پوند بر فوت مربع هستند و  $K_2$  برای شنها بر حسب دانسیته نسبی بین ۸۰ تا ۱۸۰ متغیر است.

پس از به دست آوردن مشخصات مصالح در هریک از بلوکها این مشخصات به مدل‌های A و B اعمال شدند، به این ترتیب که در مدل A از پارامترهای مصالح به دست آمده از تنشهای استاتیکی خطی و در مدل B از پارامترهای مصالح به دست آمده از تنشهای استاتیکی غیر خطی و روابط تجربی استفاده شد. این دو مدل نیز پس از شبکه بندی مورد تحلیل مودال قرار گرفتند. شکل (۶) نشان دهنده تأثیر خصوصیات مصالح بر مشخصات دینامیکی سد مارون است.

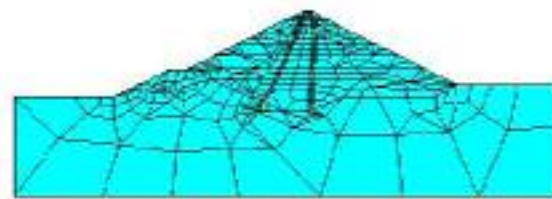
همان گونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود انجام تحلیل استاتیکی برای به دست آوردن تنشهای موثر متوسط در نقاط مختلف بدنه سد و استفاده از روابط تجربی برای برآورد مدول

بر این اساس فشار آب مخزن به صورت یک فشار هیدروستاتیکی بر روی سطح خارجی هسته در مجاورت بالا دست قرار داده شد و وزن مخصوص مصالح فیلتر و پوسته بالاست در زیر سطح آب به صورت غوطه ور در نظر گرفته شد. در اینجا یاد آوری این نکته ضروری به نظر می‌رسد که در بررسی تأثیر آب مخزن بر نتایج تحلیل مودال سدهای خاکی (به جز سدهای خاکی با رویه بتنی)، به دلیل تخلخل بالا و شیب کم پوسته بالا دست، از فشار هیدروستاتیکی مخزن بر روی رفتار دینامیکی سد می‌توان صرف نظر کرد [۱۴] و صرفاً تغییرات دانسیته و سختی مصالح قسمت اشباع شده را در نظر گرفت.

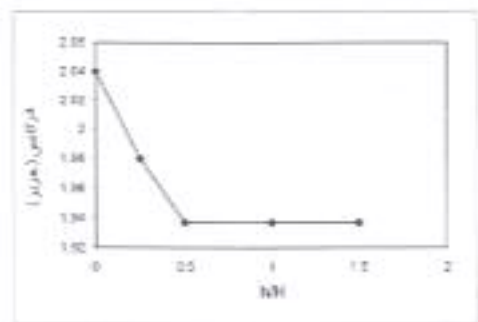
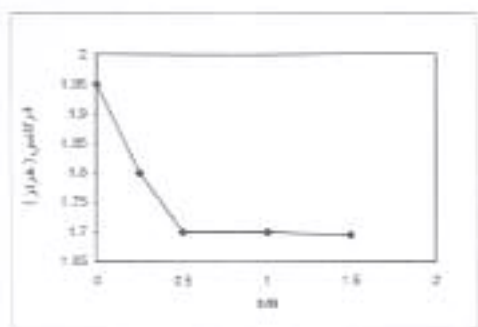
پس از انجام تحلیل‌های استاتیکی، متوسط تنشهای موثر اصلی موجود در هر یک از ۳۸۵ بلوک حجمی سد مورد محاسبه قرار گرفت و در هر یک از بلوکها مدول برشی دینامیکی بیشینه مصالح ( $G_0$ ) با استفاده از روابط تجربی که حداکثر مدول برشی دینامیکی را براساس سطح تنشهای جانبی بیان می‌کنند به دست آمد. برای این منظور در مورد مصالح فیلتر از معادله هاردین-بلک<sup>۱۷</sup> برای نمونه‌های ماسه ای تیز گوشه استفاده شد [۱۵] که عبارت است از:

$$G_0 = \frac{3230(2.17 - e)^2}{1 + e} \sigma'_0{}^{1/2} \quad (4)$$

که در آن  $G_0$  مدول برشی دینامیکی بیشینه،  $e$  نسبت تخلخل و  $\sigma'_0$  تنش موثر متوسط است. در مورد مصالح هسته رسی از معادله هاردین-درنویچ<sup>۱۸</sup> استفاده شد [۱۵] که عبارت است از:



شکل ۷- مقطع میانی بالادست- پایین دست مدل اجزای محدود سد مارون با در نظر گرفتن ضخامت بستر سنگی برابر H



شکل ۸- تأثیر ضخامتهای مختلف بستر الاستیک بر الف- اولین فرکانس مودی ب- دومین فرکانس مودی سد مارون

مدل عددی تأثیر به مراتب کمتری بر نتایج تحلیل مودال می‌گذارد.

در هر حال در نظر گرفتن ضخامت بستر سنگی مطابق شکل (۸) موجب کاهش فرکانسهای طبیعی سیستم در حدود ۱۵٪ می‌شود. همچنین تحلیل‌های انجام شده نشان می‌دهند که افزایش ضخامت تکیه گاههای جانبی الاستیک ( $h_1$ ) موجب کاهش فرکانس طبیعی ارتعاش سد می‌شود ولی همان گونه که در جدول (۵) مشاهده می‌شود مقدار این تغییر در بیشترین حالت مدول شده کمتر از ۳٪ است که اختلاف مربوط به فرکانس طبیعی سیستم با تکیه گاههای جانبی صلب و سیستم با تکیه‌گاه جانبی الاستیک به ضخامت  $h_1=0.5H$  است. نتایج این بخش از تحلیلها نیز در شکل (۹) مشاهده می‌شود. در نهایت در انجام تحلیل‌های مودال نهایی از مدل عددی استفاده شد که ضخامت بستر سنگی انعطاف پذیر آن  $h=H$  در نظر گرفته شد و ضخامت تکیه گاههای جانبی انعطاف پذیر آن  $0.1H$  مد نظر قرار گرفت که شکل (۷) مقطع میانی بالا دست- پایین دست

برشی دینامیکی بیشینه مصالح، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نتایج تحلیل مودال سد می‌گذارد و مقادیر فرکانسهای مودی سد را نسبت به حالتی که مدول برشی بیشینه بر اساس تراز ارتفاعی تغییر داده شد، در حدود ۱۶٪ افزایش می‌دهد. نکته دیگری که از این شکل مشخص می‌شود، تأثیر ناچیز استفاده از تحلیل استاتیکی غیر خطی به جای خطی بر نتایج خروجی تحلیل مودال است، به طوری که اختلاف نسبی فرکانسهای طبیعی سیستم در دو مدل A و B حداکثر ۴٪ است.

### ۳-۵- تأثیر اصلاح شرایط تکیه گاهی بر نتایج تحلیل مودال سد مارون

سد مارون بر روی یک بستر سنگی قرار گرفته است که مدول برشی آن بر مبنای اطلاعات به دست آمده از گزارشهای مشاور طراح سد [۱۲] و نیز نتایج مطالعات لرزه ای سطحی که در این پژوهش بر روی بدنه و بستر سد صورت گرفته است [۱۶] برابر با  $G_0 = 12 \times 10^6 \frac{KN}{m^2}$  و ضریب پواسون آن  $\nu = 0.3$  برآورد شده است. بر این اساس به منظور در نظر گرفتن اثر انعطاف پذیری تکیه گاهها بر مشخصات ارتعاشی سد مارون، ضخامتهای مختلفی از سنگ بستر و تکیه گاههای جانبی به صورت درصدی از ارتفاع کلی سد (H) در نظر گرفته شد. نتایج این تحلیلها نشان می‌دهد که فرکانس طبیعی ده مود اول ارتعاشی سد تا زمانی که ضخامت بستر سنگی برابر با  $0.5H$  در نظر گرفته می‌شود، سیر نزولی قابل توجهی دارد و از این ضخامت به بعد افزایش ضخامت لایه انعطاف پذیر بستر در

جدول ۵- اثر انعطاف پذیری تکیه گاههای جانبی بر فرکانسهای مودی مدل سه بعدی سد مارون بر حسب هرتز

به ازای مقادیر مختلف  $h1/H$

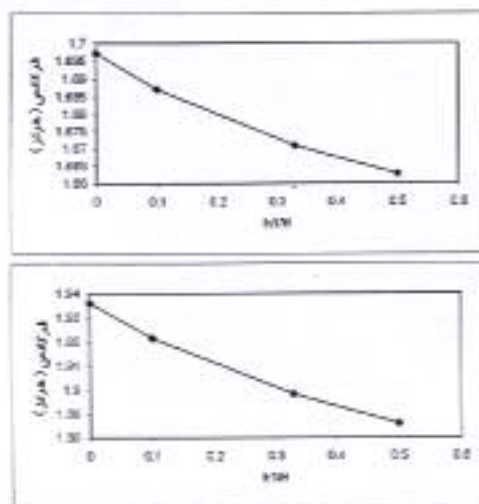
$h1/H$	۰	۰/۱	۰/۳۳	۰/۵
مود ۱	۱/۷۰	۱/۶۹	۱/۶۷	۱/۶۶
مود ۲	۱/۹۴	۱/۹۲	۱/۹۰	۱/۸۸
مود ۳	۲/۱۹	۲/۱۸	۲/۱۷	۲/۱۶
مود ۴	۲/۲۹	۲/۲۸	۲/۲۶	۲/۲۶
مود ۵	۲/۶۰	۲/۵۹	۲/۵۸	۲/۵۸
مود ۶	۲/۶۷	۲/۶۶	۲/۶۵	۲/۶۴
مود ۷	۲/۷۵	۲/۷۴	۲/۷۳	۲/۷۲
مود ۸	۲/۹۳	۲/۹۱	۲/۸۸	۲/۸۷
مود ۹	۲/۹۷	۲/۹۵	۲/۹۴	۲/۹۳
مود ۱۰	۳/۰۸	۳/۰۷	۳/۰۵	۳/۰۴

مودال می شود به طوری که فرکانسهای طبیعی سیستم به سمت فرکانسهای طبیعی بستر سنگی میل می کند [۱۷].

۵-۴- استفاده از آزمایشهای لرزه ای سطحی برای افزایش

#### دقت نتایج تحلیل مودال

مطالعات لرزه ای سطحی در سال ۱۳۷۹ بر روی بدنه و تکیه گاههای سد مارون به منظور شناخت پارامترهای دینامیکی مصالح قسمتهای مختلف سد و تکیه گاهها انجام گردیده است [۱۶]. با انجام آزمایشهای ژئوسایزیمیک سطحی بر روی بدنه سد در مجموع شش پروفیل لرزه ای انکساری برداشت شده است که شامل سه پروفیل در پوسته بالادست، یک پروفیل در پوسته پایین دست، یک پروفیل در تاج سد و یک پروفیل در تونل RG2 واقع در تکیه گاه راست می باشد [۱۶]. در این آزمایشها که از دو نوع منبع ایجاد موج (با استفاده از ضربه چکش بر روی صفحه فولادی مدفون در خاک و دو انفجار سبک در تکیه گاههای سد) استفاده شده است، ۲۴ دستگاه ژئوفون برای ثبت اولین موجهای رسیده به نقاط مورد نظر به کار رفته است.



شکل ۹- تأثیر ضخامت‌های مختلف تکیه گاههای جانبی الاستیک بر الف- اولین فرکانس مودی ب- دومین فرکانس مودی سد مارون

آن نشان داده شده است. شایان ذکر است در این تحلیلها جرم بستر سنگی صفر در نظر گرفته شد، زیرا در نظر گرفتن جرم سنگ در مدل تحلیلی با توجه به حجم نسبتا بزرگ توده سنگی در مدل عددی موجب بروز خطای بزرگی در نتایج تحلیل

جدول ۶- مقایسه فرکانسهای مودی حاصل از تحلیلهای عددی و آزمایشهای ارتعاش محیطی

مدلهای FEM			آزمایشهای درجا	
مدل A (الف)	مدل A همراه با فونداسیون (ب)	مدل با استفاده از آزمایشهای ژئوسایز میک (ج)		
جهت U-D				
۱/۹۵	۱/۷۰	۱/۹۹	۲/۱	f1
۲/۴۴	۲/۲۹	۲/۹۴	۳/۳	f2
۳/۱۰	-	-	-	f3
جهت L				
۲/۰۴	۱/۹۴	۲/۳۲	۲/۵	f1
۲/۸۴	۲/۶۰	۳/۱۹	۳/۲	f2
۳/۴۷	-	-	-	f3
جهت V				
۲/۵۲	۲/۱۹	۲/۵۵	۳	f1
۲/۸۱	-	۳/۰۸	۳/۴	f2

در این موارد فرکانس مودی ارائه نشده است و مربوط به حالاتی است که شکل مودی مورد نظر از تحلیلهای عددی و یا آزمایش ارتعاشی درجا به دست نیامده و یا قابل تشخیص نبوده است.

کالیبره نمودن مدل FEM با نتایج آزمایشات ارتعاش محیطی سد می‌باشد. مهمترین نکته ای که در کالیبراسیون مدل‌های عددی با نتایج آزمایشات ارتعاشی در جا باید به آن توجه نمود، اینست که در انجام مقایسه بین این دو گروه از نتایج، باید فرکانسها و اشکال مودی متناظر آنها بصورت توأم مورد مقایسه قرار گیرند و انجام مقایسه تنها بر مبنای یکی از آنها صحیح نمی‌باشد [۱۸].

براین اساس اشکال مودی به سه گروه کلی تقسیم شدند که عبارت‌اند از مود ارتعاشی بالا دست- پایین دست (U-D)، مود ارتعاشی طولی (L) و مود ارتعاشی قائم (V). در هریک از این سه گروه نیز اولین مود متقارن، اولین مود نامتقارن و دومین مود متقارن تعیین شدند. به این ترتیب همانگونه که در جدول (۶) مشاهده می‌شود نتایج حاصل از تحلیلهای عددی انجام شده بر روی سه مدل با نتایج آزمایشات ارتعاشی محیطی مورد مقایسه قرار گرفتند که مدل‌های مذکور عبارت‌اند از:

مطالعه نتایج آزمایشهای ژئوسایز میک نشان می‌دهد که مقادیر مربوط به مدول برشی بیشینه مصالح پوسته که از آزمایشها ژئوسایز میک به دست آمده است، بین ۱/۳ تا ۱/۷ برابر نتایج ارائه شده توسط مشاور طرح می‌باشد. لذا در این مرحله مقدار نسبت مدول برشی حداکثر به دست آمده از آزمایشهای لرزه‌ای سطحی به مقدار آن از گزارشهای ارائه شده توسط مشاور برابر با ۱/۵ در نظر گرفته شد و بر این اساس مشخصات مصالح در مدل نهایی اصلاح گردید. در بخش آینده به بررسی تأثیر این اصلاح بر افزایش دقت خروجی تحلیلهای FEM پرداخته خواهد شد.

## ۶- کالیبراسیون نتایج تحلیل عددی با آزمایشات ارتعاش محیطی

به طور کلی هدف نهایی از کلیه تحلیلهای عددی انجام شده در این تحقیق و استخراج فرکانسها و اشکال مودی



الف) مدل A که دقیق ترین مدل از نظر شرایط هندسی می باشد.

ب) مدل A همراه با فونداسیون انعطاف پذیر که دقیق ترین مدل موجود از لحاظ شرایط هندسی و تکیه گاهی است.

ج) مدل نهایی که در آن از نتایج آزمایشات ژئوسایز میک برای تعیین مشخصات مصالح استفاده شد.

همان گونه که در جدول (۶) مشاهده می شود مقادیر  $f_1$ ،  $f_2$  و  $f_3$  بر ترتیب بیانگر فرکانس طبیعی ارتعاشی نظیر اولین مود متقارن، اولین مود نامتقارن و دومین مود متقارن هر یک از مودهای ارتعاشی U-D، L و V می باشند. نکته ای که در این جدول قابل توجه است این است که مقادیر فرکانس نظیر برخی از اشکال مودی در این جدول ارائه نشده اند. عدم ارائه این مقادیر در جدول مزبور به این دلیل است که شکل مودی مورد نظر از تحلیل های عددی و یا آزمایش ارتعاشی در جا بدست نیامده یا قابل تشخیص نبوده است.

مقایسه انجام شده نشان می دهد که مدل A که در آن از نتایج تحلیل استاتیکی و نیز روابط تحلیلی برای تعیین مدول برشی مصالح استفاده شد و بر روی بستر صلب در نظر گرفته شد، با اختلاف نسبی ۷ درصد در فرکانس مود پایه تطابق مطلوبی با نتایج آزمایشات ارتعاش محیطی دارد و به نسبت مدل های ۱، ۲، ۳ و ۴ نتایج بهتری را ارائه می کند. این مسئله به نوبه خود بیانگر اهمیت استفاده از تنش های استاتیکی موثر در جا در برآورد مشخصات مکانیکی مصالح خاکی است. با در نظر گرفتن تاثیر فونداسیون انعطاف پذیر بر مشخصات دینامیکی سد مارون، نتایج به مقدار قابل توجهی تغییر می کنند (۱۵ درصد کاهش در فرکانس مود اول ارتعاش). این مسئله نشانگر تاثیر زیاد عملکرد انعطاف پذیر فونداسیون بر رفتار دینامیکی سدهای خاکی است. با استفاده از مدل نهایی که در بند (ج) توضیح داده شد نتایج تحلیلی مجدداً به نتایج آزمایشات ارتعاشی در جا نزدیک شدند به طوری که اختلاف فرکانس طبیعی مود ارتعاشی پایه حاصل از تحلیل عددی و آزمایشات ارتعاشی در جا به ۵٪ می رسد که این امر نشان دهنده نقش

استفاده از مطالعات لرزه ای سطحی در تعیین مشخصات مصالح سد برای دستیابی به یک مدل تحلیلی دقیق است. در شکل (۱۰) اشکال مودی مربوط به ۳ مود اول ارتعاشی بدنه سد (در اشکال سمت راست پلان و در اشکال سمت چپ دید از بالا دست به پایین دست) مشاهده می شود.

نکته ای که ذکر آن در این بخش ضروری به نظر می رسد، این است که در این بررسیها صرفاً مودهای پایینتر با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته اند زیرا مقایسه مودهای بالاتر با یکدیگر به دلیل محتوای فرکانسی بالاتر این مودها، نیاز به استفاده از محرکهایی با محتوای فرکانسی بالاتر دارد.

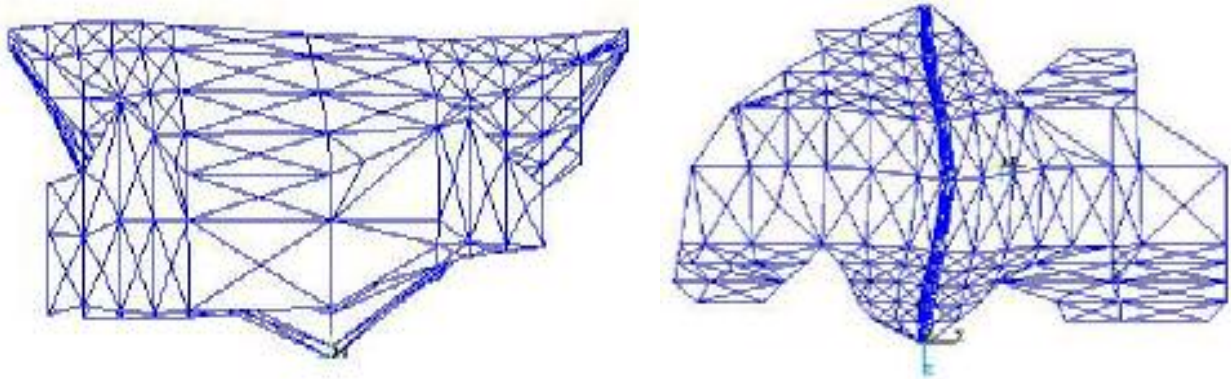
## ۷- نتیجه گیری

۱- برآورد دقیق مشخصات دینامیکی و تدقیق مدل عددی یک سد خاکی بزرگ با استفاده از آزمایش ارتعاشی در جا، اولین تجربه موفق در ایران بود که بر روی سد خاکی - مخزنی مارون انجام شد.

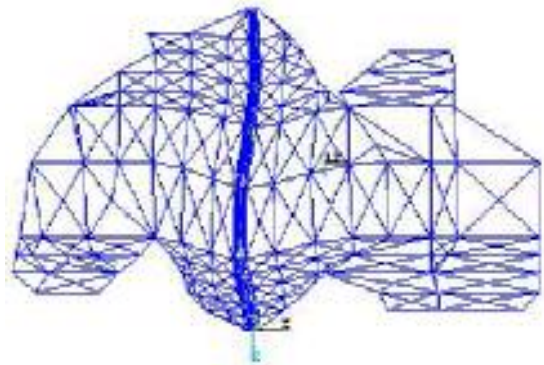
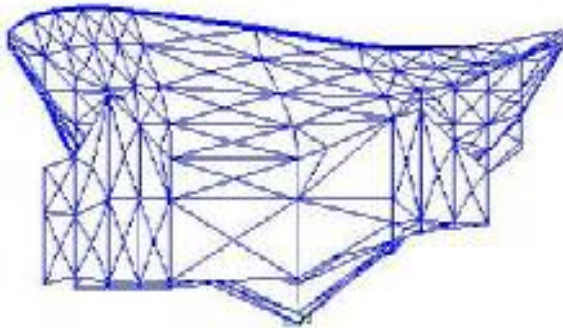
۲- مقایسه نتایج حاصل از آزمایش ارتعاش محیطی و تحلیل عددی صورت گرفته قبلی حکایت از اختلاف زیاد بین فرکانسهای مودی بدنه سد دارد به طوری که در اولین فرکانس مودی به ۲۷٪ می رسد و در مودهای بالاتر افزایش می یابد.

۳- تحلیل های FEM انجام شده در این پژوهش نتایج دقیقتری ارائه می کنند. در تحلیل های مذکور، مدل عددی با توجه به اطلاعات موجود از شکل هندسی و مشخصات مصالح بدنه و پی سد و نتایج آزمایشهای ژئوسایز میک با دقت بیشتری تهیه شده است به طوری که فرکانس طبیعی اولین مود در جهت بالادست-پایین دست تنها حدود ۵٪ با نتایج آزمایشهای ارتعاش محیطی اختلاف نشان می دهد. در روند تحلیل های صورت گرفته، نتایج زیر نیز به دست آمد.

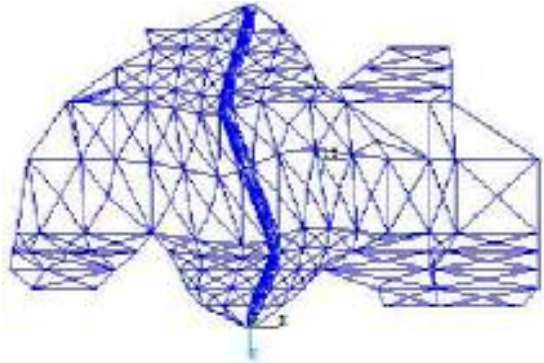
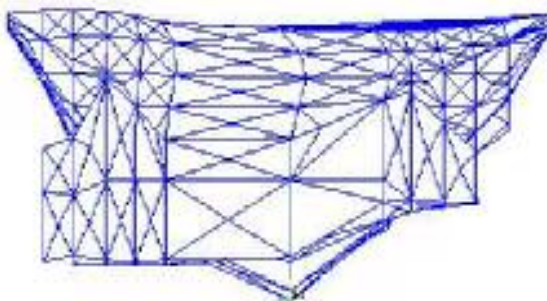
- انجام تحلیل استاتیکی و استفاده از روابط تجربی برای برآورد مدول برشی دینامیکی بیشینه مصالح مقادیر فرکانسهای مودی سد را نسبت به حالتی که مدول برشی بیشینه بر اساس تراز ارتفاعی تغییر داده شد. در حدود ۱۶٪ افزایش می دهد.



الف - مود اول



ب - مود دوم



ج - مود سوم

شکل ۱۰ - شکل‌های مودی سه بعدی سد مارون حاصل از تحلیل FEM  
(در شکل سمت راست پلان و در سمت چپ دید از بالادست به پایین دست)

- استفاده از آزمایش‌های ژئوسایزمیک در برآورد صحیح مشخصات بدنه سد و بستر آن و افزایش دقت مدل تحلیل دارای اهمیت ویژه‌ای است به طوری که با افزایش دقت

- انعطاف پذیر در نظر گرفتن بستر سنگی و تکیه‌گاه‌های جانبی نسبت به حالت صلب در نظر گرفتن موجب کاهش فرکانس اولین مود ارتعاشی سد به میزان ۱۵٪ می‌شود.

- مدل عددی دقیقتری از بدنه و پی سد تهیه شود. در این راستا افزایش دقت شکل هندسی بدنه، مدل کردن بستر و تکیه‌گاههای جانبی انعطاف پذیر (که ضخامت آن باید با توجه به شرایط موجود برآورد شود)، انجام تحلیل استاتیکی برای تخمین تنشهای استاتیکی موثر در جا و ایده گرفتن از نتایج آزمایشات ژئوسایزیمیک برای انتخاب مشخصات مکانیکی مصالح بدنه و پی سد حائز اهمیت می‌باشد. در این مرحله نتایج آزمایش ارتعاش محیطی می‌تواند به عنوان معیار مناسبی جهت کنترل صحت نتایج تحلیلهای عددی قلمداد شود.

نیاز و همچنین از همکاران پخش الکترونیک دستگاهی پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله و دیگر همکارانی که در مراحل مختلف آزمایشها و تحلیلهای صورت گرفته بر روی سد صمیمانه همکاری نمودند تشکر و قدردانی می‌شود.

مشخصات مکانیکی مصالح به کمک این آزمایشها فرکانس اولین مود ارتعاشی سد نسبت به حالتی که مشخصات مکانیکی مصالح با استفاده از تحلیل استاتیکی و روابط تجربی به دست آمده‌اند، به میزان  $14/8$  درصد افزایش می‌یابد و با نتایج حاصل از آزمایش ارتعاش محیطی تنها  $5\%$  اختلاف نشان می‌دهد.

۴- با توجه به مطالعات انجام گرفته در این تحقیق توصیه می‌شود جهت برآورد دقیقتر مشخصات دینامیکی سدهای خاکی موارد ذیل رعایت شود:

- در صورت امکان طی بازدیدهای دوره ای سد، آزمایش ارتعاش محیطی بر روی بدنه سد صورت گیرد.

## قدردانی

در انتها از مساعدت مسئولین محترم سازمان آب و برق خوزستان، شرکت مهندسین مشاور مه‌اب قدس و همکاری صمیمانه مسئولین و کارمندان محترم کارفرما، مشاور و پیمانکار سد مارون مقیم در سایت به دلیل مساعدت در انجام آزمایشهای در جا بر روی سد و دسترسی به نقشه‌ها و اطلاعات فنی مورد

## واژه نامه

- |                              |                                |                                      |
|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| 1. prototype                 | 8. power spectral density      | 15. Welch method                     |
| 2. Romconsult-Bucharest      | 9. cross correlation spectrum  | 16. orthogonality                    |
| 3. passive                   | 10. coherence spectra          | 17. Hardin-Black                     |
| 4. DC offset voltage problem | 11. auto correlation function  | 18. Hardin-Drnevich                  |
| 5. nominal resolution        | 12. cross correlation function | 19. seed                             |
| 6. dynamic range             | 13. hanning window             | 20. seismic refraction investigation |
| 7. Stationary                | 14. periodogram                |                                      |

## مراجع

۱. جعفری، م. ک.، داودی، م.، "آزمایشهای ارتعاش اجباری و محیطی در سدهای خاکی"، تهران، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، بهار ۱۳۸۱.
۲. فرهنگ، ب.، سدسازی معاصر ایران کمیته ملی سدهای بزرگ ایران، تهران، ۱۳۷۷.
3. Manual of "Operating Instructions for Model SS-1 Ranger Seismometer," Kinematics Inc., Pasadena, Calif., 1990.
4. Manual of "solid state Recorder SSR-1," Kinematics Inc., Pasadena, Calif., 1990.
5. Newland, D. E., An "Introduction to Random Vibration and Spectral Analysis," Longman Scientific and Technical, 1984.
۶. آقاچوک، ع. ا.، معماری، ع. م.، "آزمایشهای لرزه‌ای بر

روی ساختمانهای واقعی"، جلد اول و دوم، تهران، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۷۲.

7. Bendat, J. S., Piersol, A.G., "Engineering Application of Correlation and Spectral Analysis," John Willey and Sons Inc., Second Edition, 1993
8. Help of "MATLAB software, Signal Processing Toolbox", Ver. 6, Mathworks Inc., 2000.
9. Welch, P. D., "The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Averaging over Short, Modified Periodograms" *IEEE Trans. Audio Electroacoust.*, Vol. AU-15, pp. 70-73, June 1967.
10. Chanaat, Y., Chen, H.Q., Redpath, B.B., Hall, R.L. Marjanishvili, S.M., "Measurment and Prediction of Dam-Water-Foundation Interaction at longyangxia Dam.," Report to the US N.S.F.R.C., QUEST Structres, Calif., 1999
11. Tarkeshodooz, Jafari, M.K. Gudarzi, F., Popvici, "Advanced procedures for Earthquake Analysis of some Large Iranian Dams," SEE, IIEES, 1991

۱۲. "تحلیل دینامیکی سد مارون" گزارش شرکت مهندسان مشاور مهتاب قدس، تهران، ۱۳۶۵.

۱۳. "تجزیه و تحلیل استاتیکی و پایداری و کنترل زهاب سد مارون"، گزارش شرکت مهندسان مشاور مهتاب قدس، تهران، ۱۳۶۵.

14. Gazetas, G., "Seismic Response of Earth Dams, Some Recent Developments," *SDEE, Vol. 6, No. 1, 1987.*

15. Das, B. M., "Principles of soil Dynamic" Pwskent pub .co 1992

۱۶. "گزارش مقدماتی مطالعات لرزه ای سطحی در محل سد مارون" پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ۱۳۷۹.

۱۷. حاج مومنی، ع.، "ارزیابی خصوصیات دینامیکی یک سد بتنی قوسی با مقایسه نتایج مدل ریاضی و آزمایشات ارتعاش محیطی" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، زمستان ۱۳۷۹.

18. Severn, R.T., Jerry, "Forced Vibration Test and Theoretical Studies on Dams," Proc. Of the Institution of Civil Engng. Vol. 69, Part 2 PP. 605-635, 1980.