

آزمایشهای ارتعاش اجباری در سدهای خاکی

تدوین: محمد کاظم جعفری، استادیار و عضو هیأت علمی پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک پژوهشگاه محمد داودی، دانشجوی دکترای ژئوتکنیک لرزه ای پژوهشگاه

۱- چکیده

ریاضی برای پیش بینی رفتار لرزه ای سدها استفاده می شود. بدین منظور همواره توصیه می شود دقت مدل های ریاضی و فرضیات مربوط به آنها با استفاده از اطلاعات تجربی موجود و یا با اندازه گیری مستقیم پارامترهای دینامیکی سد کنترل گردد. البته نمی توان انتظار داشت که نتایج نظری و عملی دقیقاً بر هم منطبق گردند، زیرا هر دو روش با مشکلاتی روبرو هستند.

اندازه گیری مستقیم پارامترهای دینامیکی سدهای خاکی به دو روش کلی آزمایشگاهی و محلی صورت می گیرد که هر روش مزایا و معایبی دارد؛ ولی، آزمایشهای محلی به دلیل مطالعه رفتار لرزه ای سد در مقیاس واقعی از اهمیت ویژه ای برخوردار است. آزمایشهای محلی را در حالت کلی می توان به سه گروه "آزمایشهای ارتعاش محیطی"، "آزمایشهای ارتعاش اجباری" و "ارتعاش سد تحت زمین لرزه قوی" تقسیم بندی کرد. گروه نخست در شماره پیشین پژوهشنامه بررسی شد و در این مقاله به بررسی گروه دوم می پردازیم.

۳- تاریخچه آزمایشهای ارتعاش اجباری در سدهای خاکی

آزمایش مدل واقعی سدها با استفاده از یک یا چند دستگاه لرزاننده از دهه ۱۹۵۰ آغاز شد [۱] و طبق گزارشهای منتشر شده، اولین سد خاکی به ارتفاع ۶۱ متر در سال ۱۹۶۶ در کالیفرنیا با چهار دستگاه لرزاننده تحت آزمایش ارتعاش اجباری قرار گرفت و فرکانسها و اشکال مدی اندازه گیری شده با مقادیر به دست آمده از مدل تیر برشی مقایسه گردید [۲]. در سال ۱۹۷۰ سد خاکی دیگری در مکزیک به ارتفاع ۱۴۵ متر با دو دستگاه لرزاننده تحت آزمایش قرار گرفت و هشت فرکانس اول سد و اشکال مدی مربوطه به دست آمد. مقادیر حاصل از آزمایش با نتایج یک مدل عددی ساده، مدل *FEM* سه بعدی و نگاشتهای زمین لرزه مقایسه و مشخص گردید که بین نتایج

در سازه های مهم مانند سدهای خاکی بررسی این نکته اهمیت دارد که آیا سدها در عمل نیز مانند آنچه در طراحی فرض شده است رفتار می کنند؟ بهترین روش برای بررسی دقت مدل های ریاضی و تئوریهای مربوط به آنها در پیشگویی رفتار لرزه ای سدها، استفاده از آزمایشهای با مقیاس کامل است. در آزمایشهای درجا، نگاشت ارتعاشات بدنه سد که به صورت طبیعی وجود دارند و یا به صورت مصنوعی ایجاد می گردند مطالعه می شوند و از نتایج آزمایشها برای ارزیابی و توسعه مدل های ریاضی، بهبود بخشیدن به روشهای طراحی لرزه ای و برآورد نحوه کارکرد سدهای موجود در زمین لرزه های شدید استفاده می گردد. در این مقاله، به آزمایش ارتعاش اجباری در سدهای خاکی به دلیل مزایایی مانند استفاده از ژنراتورهای ارتعاشی با قابلیت اعمال نیروی قابل کنترل (از نظر موقعیت، جهت، بزرگی و تکرارپذیری بارگذاری)، وارد نمودن انرژی متمرکز بر تاج سد، نسبت بالای سیگنال به نوفه در داده های اندازه گیری شده، ثابت نگهداشتن فرکانس بارگذاری در حالت ارتعاش دائم سد (در مجموع دقت بیشتر محاسبه پارامترهای ارتعاشی بدنه سد) و استفاده بهینه از ثباتها اشاره می شود. بدین منظور، ابتدا تاریخچه انجام آزمایشهای ارتعاش اجباری در سدهای خاکی مرور و سپس به توضیح جایگاه این روش، مشخصات دستگاههای لرزاننده، نحوه انجام آزمایش و پردازش داده ها پرداخته خواهد شد. در ادامه چندین مورد از آزمایشهای ارتعاش اجباری در سدهای خاکی تشریح و در نهایت به نتایج حاصل از انجام آزمایشها اشاره می شود.

۲- مقدمه

سدهای خاکی در مقایسه با انواع دیگر سدها بیشترین تعداد را در جهان داراست و در مناطق لرزه خیزی مانند ایران تأمین پایداری لرزه ای این سدها اهمیت ویژه ای دارد. در روشهای معمول طراحی از مدل های

آزمایشها و مدل‌های عددی انطباق خوبی وجود دارد؛ ولی، اولین فرکانس ارتعاش طولی سد مبهم است؛ زیرا، نتایج حاصل از نگاهشهای زمین لرزه با نتایج مدل‌های عددی همخوانی دارد اما با نتایج آزمایش ارتعاش اجباری سازگار نیست [۳].

در سال ۱۹۷۴ با انجام آزمایش ارتعاش اجباری با دو دستگاه لرزاننده روی یک سد خاکی به ارتفاع ۵۶ متر در اسکویبه (در کشور مقدونیه) فرکانسها و اشکال مدی بدنه سد به دست آمد و با نتایج یک مدل عددی الاستیک مقایسه شد [۴]. در سال ۱۹۷۶ در کشور ژاپن آزمایش ارتعاش اجباری با یک دستگاه لرزاننده روی سه سد خاکی به ارتفاعهای ۹۵، ۱۱۹ و ۶۴/۵ متر انجام شد و فرکانسها، اشکال مدی و میراییهای مدی به دست آمده از نتایج آزمایش با مقادیر حاصل از سه روش تحلیلی مدل تیر برشی، *FEM* و تحلیل برگشتی و با نتایج آزمایش ارتعاش محیطی و نگاهشهای زمین لرزه ضعیف مقایسه شد. همچنین در این آزمایش که در سطوح مختلف آب مخزن انجام گرفت تأثیر ارتفاع آب مخزن روی مقادیر فرکانسها و میراییهای مدی بررسی و مشخص گردید که فرکانسهای تشدید حداکثر ۶٪ تغییر می‌کنند و میراییهای مدی بدون تغییر باقی می‌مانند. علاوه بر این آزمایشها، پاسخ سد به چند زمین لرزه ضعیف نیز ثبت گردید و مشخص شد که در حین زمین لرزه چند مد اول غالبند [۵].

در سال ۱۹۷۷ سدی به ارتفاع ۱۰۳ متر در ژاپن تحت آزمایش ارتعاش اجباری قرار گرفت که به دلیل عدم دسترسی به جزئیات، از نتایج آزمایش اطلاعی در دست نیست [۶]. در سال ۱۹۷۸ یک سد خاکی به ارتفاع ۸۳ متر در کالیفرنیا با دو دستگاه لرزاننده تحت آزمایش قرار گرفت و فرکانسها و اشکال مدی محاسبه شده با مقادیر حاصل از مدل تیر برشی و تحلیل دینامیکی سه بعدی مقایسه شد. همچنین میرایی مصالح بدنه سد به دست آمده از نتایج آزمایش ارتعاش اجباری با مقادیر حاصل از زمین لرزه قوی مقایسه گردید و مشخص شد که میرایی معادل ویسکوز، از ۲٪ در کرنشهای کوچک تا ۱۰٪ در زمین لرزه تغییر می‌کند [۷]. در سال ۱۹۷۹ یک سد خاکی در ژاپن به ارتفاع ۹۰ متر که روی یک بستر ضخیم رسوبی از مصالح سیمانته نشده، ساخته شده بود و دارای دو خاکریز در پنجه بالادست و پایین دست برای افزایش پایداری سد بود. با استفاده از یک دستگاه لرزاننده در جهت افقی تحت آزمایش ارتعاش اجباری قرار گرفت و نتایج حاصل از این آزمایش با مقادیر حاصل از نگاهشهای زمین لرزه، آزمایش ارتعاش محیطی، آزمایش انفجار در منابع قرضه و تحلیل عددی *FEM* مقایسه-

گردید. هدف از انجام این مطالعات، بررسی تأثیر لایه ضعیف فونداسیون و وجود زونهای وزنی در بالادست و پایین دست سد بر پارامترهای دینامیکی یک سد خاکی بود و مشخص گردید که این سد از نظر فرکانسهای تشدید و تابع بزرگنمایی ارتعاش، مشابه سدهای ساخته شده روی فونداسیون سنگی است. همچنین فونداسیون خاکی نمی‌تواند ارتعاش را مقید کند بلکه به صورت جزئی از سد ارتعاش می‌کند [۸].

در سالهای ۱۹۷۹ و ۱۹۸۰ برای رفع برخی ابهامهای موجود در طراحی لرزه ای سدهای بزرگ خاکی، روی یک سد خاکی به ارتفاع ۹۰ متر در انگلیس آزمایش ارتعاش اجباری با استفاده از چهار دستگاه لرزاننده انجام شد و فرکانسهای تشدید و اشکال مدی حاصله با نتایج تحلیل عددی دو بعدی و سه بعدی با چهار و هشت المان در طول تاج سد مقایسه و مشخص شد که جایگاه تحلیل عددی دو بعدی در طراحی لرزه ای سدهای خاکی زونی محل اشکال است. همچنین برای پیش بینی دقیقتر رفتار لرزه ای سد باید در مدل‌های عددی، تغییرات خواص مصالح با عمق در نظر گرفته شوند [۹، ۱۰، ۱۱]. در سال ۱۹۸۰ برای بررسی تأثیر سطح آب مخزن بر روی پارامترهای دینامیکی سد، آزمایش ارتعاش اجباری با دو دستگاه لرزاننده بر روی یک سد خاکی با رویه بتنی در مقدونیه در دو حالت مخزن خالی و پر انجام شد و مقادیر فرکانسهای تشدید، اشکال مدی و میراییهای ویسکوز مدی با نتایج حاصل از مدل تیر برشی مقایسه و مشخص گردید که بر خلاف پیش بینی، فرکانسهای تشدید در دو حالت مخزن خالی و پر تغییر نمی‌کند. انجام این مطالعه تأکیدی بر این مطلب بود که در تحلیل دینامیکی سدهای خاکی با رویه بتنی در حالت مخزن پر باید سد و آب مخزن را به صورت یک سیستم واحد در نظر گرفت [۱۲].

برای سهولت مقایسه کلیه آزمایشهای ارتعاش اجباری در سدهای خاکی که تاکنون گزارش شده اند، این آزمایشها با توضیح مختصری در جدول (۱) جمع آوری شده اند.

۴- جایگاه آزمایشهای ارتعاش اجباری و محیطی در آزمایشهای محلی سدهای خاکی

روشهای مختلفی برای انجام آزمایش محلی بر روی سدها وجود دارد. در آزمایش ارتعاش اجباری، به دلیل استفاده از ژنراتورهای ارتعاشی با قابلیت اعمال نیروی قابل کنترل، وارد نمودن انرژی متمرکز بر تاج سد، نسبت بالای سیگنال به نوفه در داده های اندازه گیری شده و ثابت نگه داشتن فرکانس بارگذاری در حالت ارتعاش دائم سد،

جدول (۱): آزمایشهای ارتعاش اجباری انجام شده در سدهای خاکی

شماره	نام سد	ارتفاع سد (متر)	سال انجام آزمایش	کشور	هدف از آزمایش	مرجع
۱	باکوئت (Bouquet)	۶۰	۱۹۶۶	آمریکا	محاسبه f_i و ϕ_i و مقایسه با مدل تیر برشی	کیتلی (Keightley) ۱۹۶۶ [۲]
۲	ال اینفیرنیلو (El Infiernillo)	۱۴۵	۱۹۷۰	مکزیک	محاسبه f_i و ϕ_i و مقایسه با 3D-FEM و SM و نگاهشتهای زمین لرزه	ال گمال (Elgamal) و همکاران ۱۹۹۳ [۳]
۳	ماوروو (Mavrovo)	۵۶	۱۹۷۴	مقدونیه	محاسبه f_i و ϕ_i و D_i و مقایسه با نتایج یک مدل عددی الاستیک	پتروفسکی (Petrovski) و همکاران ۱۹۷۶ [۴]
۴	۱) کی سن یاما (Kisenyama) ۲) شیموکوتوری (Shimokotory) ۳) تاتاراقی (Tataragi)	۹۵ ۱۱۹ ۶۴/۵	۱۹۷۶	ژاپن	محاسبه f_i ، ϕ_i و D_i و مقایسه با نتایج آزمایش ارتعاش محیطی، سه روش تحلیلی و نگاهشتهای زمین لرزه ضعیف + بررسی تأثیر ارتفاع آب مخزن بر مقادیر D_i و ϕ_i	تاکاهاشی (Takahashi) و همکاران ۱۹۷۶ [۵] و [۶]
۵	نیکاپو (Nikappu)	۱۰۳	۱۹۷۷	ژاپن	---	تاکاهاشی (Takahashi) و همکاران ۱۹۷۷ [۶]
۶	سانتافلیسیا (Santa Felicia)	۸۳	۱۹۷۸	کالیفرنیا	محاسبه f_i و ϕ_i و مقایسه با نتایج مدل تیر برشی و مدل تحلیلی سه بعدی + مقایسه D_i حاصل از آزمایش با مقادیر حاصل از نگاهشتهای زمین لرزه قوی	اسکات (Scott) و همکاران ۱۹۷۸ [۷]
۷	کاسا (Kassa)	۹۰	۱۹۷۹	ژاپن	بررسی تأثیر لایه ضعیف فونداسیون و دو خاکریز در پنجه بالادست و پایین دست سد بر پارامترهای دینامیکی یک سد خاکی + مقایسه با نتایج نگاهشتهای زمین لرزه، ارتعاش محیطی، انفجار و تحلیل عددی FEM	اهماچی (Ohmachi) و همکاران ۱۹۷۹ [۸]
۸	لین بریانی (Llyn Brianne)	۹۰	۱۹۷۹ و ۱۹۸۰	انگلیس	محاسبه f_i و ϕ_i و مقایسه با نتایج تحلیل عددی دو بعدی و سه بعدی با ۴ و ۸ المان در طول تاج سد	سورن (Severn) و همکاران ۱۹۹۱، ۱۹۸۰، ۱۹۷۹ [۹، ۱۰ و ۱۱]
۹	راما (Rama) (یک سد خاکی با رویه بتنی)	۹۶	۱۹۸۰	مقدونیه	محاسبه پارامترهای دینامیکی در حالت های مخزن خالی و پیربرای بررسی تأثیر سطح آب مخزن در رفتار لرزه ای سدهای خاکی با رویه بتنی + مقایسه با نتایج مدل تیر برشی	پاسکالوف (Paskalov) و همکاران ۱۹۸۰ [۱۲]

پارامترهای ارتعاشی بدنه سد با دقت بیشتری اندازه گیری می شود و در مقایسه با دیگر آزمایشها، اطلاعات کاملتر و دقیقتری از خواص دینامیکی سازه را ارائه می نماید. در کنار مزایای مذکور، این روش با قیودی نیز همراه است. به دلیل نیاز به دستگاههای لرزاننده عظیم با قابلیت کنترل فرکانس بارگذاری با دقت $0/05$ هرتز یا بیشتر [۱]، این دستگاهها سنگین بوده و قیمت بالایی دارند. نیاز به چنین دستگاههایی باعث می شود آزمایش ارتعاش اجباری نسبت به انواع دیگر آزمایشها از نظر زمان و هزینه آزمایش گرانتر تمام شود. تعداد کم آزمایشهای انجام شده با این روش نیز مؤید این مطلب است. البته مزایای اشاره شده قیودی از جمله هزینه های بالا، مشکلات حمل و نقل، ساخت جایگاه استقرار دستگاه و پیچیدگی مراحل مختلف آزمایش را توجیه می نماید. از معایب دیگر آزمایش ارتعاش اجباری (که در آزمایش ارتعاش محیطی نیز وجود دارد)، دامنه کوچک ارتعاش ایجاد شده در بدنه سد نسبت به زمانی است که سد تحت تأثیر زمین لرزه قوی قرار می گیرد. در این حالت، بررسی رفتار مصالح به ناحیه الاستیک محدود می شود و این آزمایش نمی تواند رفتار غیرخطی مصالح را مدل کند. حتی اگر بتوان از دستگاههای لرزاننده قویتر استفاده کرد، در مهندسی زلزله، پارامترهای غیرخطی حاصل از ارتعاش هارمونیک در مقایسه با پارامترهای حاصل از حرکات نامانای زمین لرزه اعتبار کمتری دارد [۱۳]. بدین علت توصیه می شود از آزمایش ارتعاش اجباری برای افزایش دقت مدل های ریاضی پایه استفاده - شود تا سپس با برون یابی رفتار غیرخطی، پیش بینی رفتار واقعی سدها در زمین لرزه امکان پذیر گردد [۱۴].

۵- مشخصات دستگاههای لرزاننده (Shakers)

در آزمایش ارتعاش اجباری، سد با استفاده از یک یا چند دستگاه لرزاننده تحت فرکانس و دامنه بارگذاری کنترل شده در جهت موردنظر به ارتعاش در می آید. برای اتصال دستگاههای لرزاننده به تاج سدهای خاکی، برخلاف سدهای بتنی که به راحتی انجام می گیرند، باید از بلوک بتنی مسلح استفاده کرد. ابعاد این بلوک معمولاً $1 \times 2 \times 2$ متر انتخاب می گردد [۱۰]. دستگاههای مولد ارتعاش که برای اعمال نیروهای هارمونیک استفاده می شوند از چند جرم دورانی نامتعادل کمک می گیرند که توسط موتور الکتریکی، با فرکانس موردنظر به دور محور خود دوران نموده نیروی خارج از مرکز ایجاد می کنند. محدوده فرکانس ارتعاشی دستگاهها معمولاً $0/1$ تا 20 هرتز با قابلیت تغییر

فرکانس تا $0/01$ هرتز است که به راحتی محدوده فرکانسی موردنظر در سدها و بقیه سازه های مهندسی عمران را پوشش می دهد [۱۰]. مقدار نیروی ایجاد شده در هر دستگاه را می توان با تغییر فرکانس، تغییر وزن جرمهای گردان و تغییر زاویه بین جرمهای گردان کنترل کرد که مورد دوم تنها در حالت عدم کارکرد دستگاه امکان پذیر است [۱۰]. در دستگاههای لرزاننده ای که از سه جرم دورانی استفاده می شود، برای تعویض جهت نیرو از قائم به افقی و یا برعکس، می توان در حالت عدم کارکرد دستگاه، فاز دو جرم کناری را نسبت به مرکزی تغییر داد [۱۵]. این کار در دستگاههایی که از دو جرم گوه ای شکل دورانی تشکیل یافته است و در جهت مخالف هم دوران می کنند با تنظیم موقعیت ابتدایی وزنه ها حاصل می شود [۷]. دامنه نیروی سینوسی اعمالی توسط دستگاهها با توان دوم فرکانس متناسب است؛ ولی، از نظر طراحی مکانیکی، دامنه نیرو به یک مقدار حداکثری مانند 10 تن محدود می شود [۱۳] و هنگامی که حداکثر وزنه ها به هر دستگاه الحاق شده است مقدار فرکانس دورانی نیز از یک مقدار حداکثری، مانند $2/1$ هرتز تجاوز نمی کند [۱۰]. معمولاً برای تحریک مدهای پایین، باید هر دستگاه لرزاننده بتواند در فرکانس یک هرتز، نیروی $0/1$ تن را بر بدنه سد اعمال کند [۱۰ و ۱۶]. برای ایجاد انواع مدهای متقارن و نامتقارن در سدهای خاکی از چندین دستگاه لرزاننده استفاده می شود. هر کدام از دستگاهها با دستورهای صادره از دستگاه کنترلی مربوط به خود (Slave Control) که در نزدیکترین موقعیت به آنها قرار دارد کار می کنند. از طرف دیگر کلیه دستگاههای کنترل کننده مستقل به دستگاه کنترل مرکزی (Master Control) متصل هستند تا هماهنگی لازم از نظر فرکانس، دامنه و اختلاف فاز ارتعاش بین دستگاهها ایجاد شود و ارتعاش موردنظر بر بدنه سد وارد گردد. دستگاه کنترل مرکزی معمولاً در موقعیتی قرار می گیرد که حداکثر 200 متر از دستگاه کنترل هر لرزاننده فاصله داشته باشد [۱۰]. با ایجاد اختلاف فاز 180 درجه بین دستگاههای ارتعاشی که هنگام کارکرد دستگاهها نیز امکان پذیر است، می توان مدهای غیرمتقارن را تحریک کرد. معمولاً اختلاف فاز بین دستگاهها را می توان با دقت $0/01$ رادیان کنترل نمود [۱۴].

۶- نحوه انجام آزمایش ارتعاش اجباری در سدهای خاکی

آزمایشهای ارتعاش اجباری در سدهای خاکی به روشهای مختلف انجام می گیرد؛ ولی، به نظر می رسد که با انجام مراحل نتایج بهتری

حاصل آید. این مراحل عبارتند از:

۱- قبل از شروع آزمایش، ابتدا محاسبات عددی بدنه سد انجام شود تا ایده ای از فرکانسهای تشدید و اشکال مدی مربوط به دست آید. نتایج محاسبات عددی در مراحل مختلف آزمایش ارتعاش اجباری کمک شایانی می کند.

۲- دستگاههای مولد ارتعاش در موقعیت و جهتی که بیشترین تحریک را در بدنه سد ایجاد کند نصب گردد. در این مرحله نتایج محاسبات عددی راهنمای خوبی می باشد؛ ولی، معمولاً بهتر است موقعیت دستگاهها، روی محور تاج و متقارن نسبت به مرکز تاج انتخاب گردد.

۳- پس از همزمان کردن دستگاههای مولد ارتعاش، کلیه دستگاهها در یک جهت اصلی با فرکانس بزرگی (که اندازه گیری فرکانسهای تشدید کوچکتر از آن مورد نظر است) شروع به نوسان می کنند و به صورت همزمان خاموش می شوند. هنگامی که فرکانس ارتعاش وزنه های دستگاهها به تدریج کاهش می یابد به فرکانسهای تشدید پایین ترسد می رسد و در این فرکانسها حالت تشدید مختصری در دامنه ارتعاش سد ایجاد می شود. در این مرحله با قرار دادن تعداد زیادی لرزه نگار (مثلاً ۹ دستگاه *SSI*) در طول تاج سد می توان ارتعاش آزاد سد را پس از خاموش کردن دستگاههای لرزاننده ثبت کرد و مقادیر پیک پاسخها را که به فرکانسهای تشدید ارتباط دارند مشاهده نمود. این کار در حالات مختلف اختلاف فاز، بین دستگاهها تکرار می شود تا کلیه مدهای متقارن و نامتقارن سد به دست آید. در این مرحله نیز نتایج محاسبات عددی می تواند در دستیابی سریع به جوابها کمک کند. همچنین با تعویض جهت بارگذاری در هر کدام از سه جهت اصلی، مدهای بالادست- پایین دست، طولی و قائم سد به دست می آید. در این مرحله، حداکثر نیرویی که توسط دستگاهها بر بدنه سد وارد می شود باید به مقداری محدود شده باشد که در حین عبور فرکانس دستگاهها از فرکانسهای تشدید سد، اطمینان کافی جهت عدم وقوع خسارت وجود داشته باشد.

۴- با انجام مرحله قبل، فرکانسهای تشدید سد به صورت تقریبی و به سرعت حاصل می شود. مرحله چهارم برای اندازه گیری دقیق فرکانسهای تشدید سد انجام می شود. بدین صورت که

دستگاهها در جهت مورد نظر و با اختلاف فاز به دست آمده از مرحله قبل تحت فرکانس تقریبی نوسان می کنند و فرکانس تشدید در چندین پله کوچک در اطراف فرکانس تقریبی تغییر داده می شود و مقادیر پاسخ سد مانند مرحله سوم ثبت می گردد. با پردازش نگاشتهای ثبت شده مقدار دقیق فرکانس تشدید مشخص می شود. معمولاً برای پیدا کردن مقدار دقیق فرکانسهای تشدید سد، از ابتدا فرکانسهای ارتعاشی دستگاهها در پله های افزایشی $0/1$ تا $0/01$ هرگز از $0/8$ هرگز شروع می شود و تا 10 هرگز ادامه می یابد. این روش طولانی و خسته کننده است؛ در حالی که طبق مراحل سوم و چهارم، فرکانسهای تشدید سد به سهولت به دست می آیند.

۵- با مشخص شدن دقیق فرکانسهای تشدید سد، بدنه سد تحت یکی از این فرکانسها به ارتعاش در آمده و اشکال مدی اندازه گیری می شوند. بدین منظور از دو سری لرزه نگار سه مؤلفه ای استفاده می شود که یکی متحرک و دیگری ثابت است. لرزه نگار متحرک در موقعیتهای مختلف تاج و شیروانی پایین دست با توجه به پیشرفت آزمایش و نیاز به رکوردگیری در نقاط فراموش شده و یا درک جزئیات بیشتری از پاسخهای مدی در نقاط مورد نظر، توسط مهندس مسؤل آزمایش با بی سیم هدایت می شود.

۶- هنگامی که دستگاههای لرزاننده تحت فرکانس تشدید معینی نوسان می کنند ناگهان خاموش می شوند و کاهش دامنه نوسان جهت محاسبه میرایی مدی اندازه گیری می شود. این عمل جهت افزایش دقت چندین بار تکرار می گردد.

۷- مراحل پنجم و ششم برای کلیه فرکانسهای تشدید مورد نظر تکرار می شود.

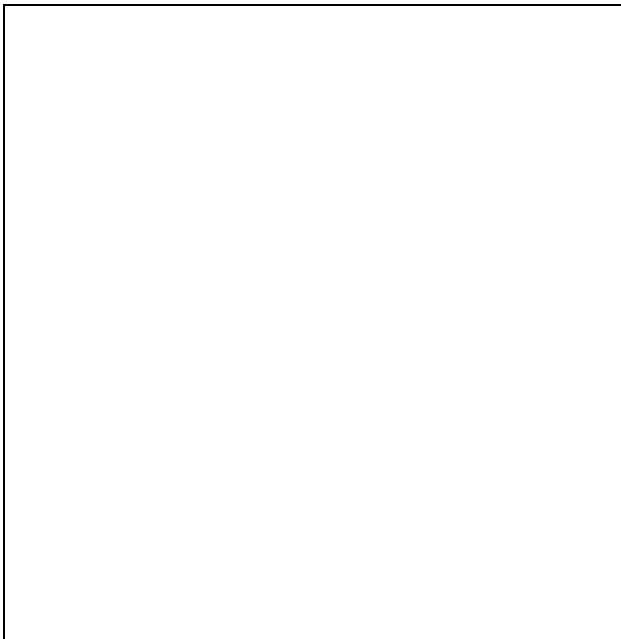
۷- پردازش داده های آزمایش ارتعاش اجباری

با انجام آزمایش ارتعاش اجباری، پاسخ لرزه ای نقاط مختلفی از بدنه سد توسط سنسورهای رکوردگیری می شود. اطلاعات به دست آمده برای تعیین پارامترها و خصوصیات دینامیکی سد، باید پردازش شوند و پارامترهای مدی مانند فرکانسها، اشکال و میراییهای مدی به دست آیند. بدین منظور، هنگامی که با تغییر فرکانس بارگذاری، حداکثر مقادیر پاسخ در حالت ارتعاش دائم در نقاط مورد نظر

بزودی منتشر خواهد شد.

۸-۱- آزمایشهای ارتعاش اجباری سد خاکی کی سن یاما [۵]

پلان و مقطعی از سد خاکی کی سن یاما با دره ۷ شکل که با ارتفاع ۹۵ متر و طول تاج ۲۶۷ متر در کشور ژاپن ساخته شده است در شکل (۱) مشاهده می‌شود. در سال ۱۹۷۶ برای انجام آزمایش ارتعاش اجباری، یک دستگاه لرزاننده در مرکز تاج مستقر گردید و با اعمال نیروی هارمونیک در جهات طولی و بالادست-پایین دست سد، پاسخ سد توسط لرزه نگارهای نشان داده شده در شکل (۱) ثبت گردید. برای بررسی تأثیر ارتفاع آب مخزن بر فرکانسهای طبیعی و نسبت میرایی، آزمایش، در حالات مختلف ارتفاع آب مخزن انجام شد.



شکل (۱): پلان و مقطع سد خاکی کی سن یاما

نمونه ای از منحنی های تشدید و اشکال مدی حاصل از آزمایش در حالت تحریک در جهت X در شکلهای (۲ و ۳) نشان داده شده است. اهم، نتایج حاصل از این آزمایش عبارتند از:

- در حالت ارتفاع پایین آب مخزن، اولین و دومین فرکانس تشدید در جهت X (بالادست-پایین دست) به ترتیب برابر $2/1$ و $3/7$ هرتز به دست می‌آید در حالی که اولین فرکانس تشدید در جهت Y (طولی سد) و قائم به ترتیب برابر $2/4$ و $2/9$ هرتز حاصل می‌شود.
- با افزایش ارتفاع آب مخزن، فرکانسهای طبیعی سد کاهش-

رکوردگیری می‌شوند، طیف پاسخ با تقسیم کردن مقادیر حداکثر تغییر مکان ایجاد شده در هر فرکانس به دامنه بارگذاری به دست می‌آید که در این صورت پیکهای موجود در طیف پاسخ، مقادیر مربوط به فرکانسهای تشدید را نشان می‌دهند [۱۳].

دامنه نیروی حاصل از دستگاه لرزاننده با توان دوم فرکانس نسبت مستقیم دارد؛ بنابراین، برای محاسبه حداکثر تغییر مکان ایجاد شده در هر فرکانس ناشی از نیروی با دامنه ثابت، باید کلیه دامنه های ارتعاش به دست آمده در طول یک آزمایش (با فرض ثابت ماندن متغیرهایی مانند زاویه UB) بر توان دوم فرکانس نظیر تقسیم گردند. همچنین با توجه به اینکه منحنی شتاب مشتق دوم منحنی تغییر مکان است و معمولاً در آزمایش ارتعاش اجباری، پاسخ شتاب نقاط مختلف سد ثبت می‌گردد، با تقسیم مقادیر دامنه شتاب بر توان دوم فرکانس، دامنه تغییر مکان در هر فرکانس به دست می‌آید. با توجه به مطالب مذکور، می‌توان با تقسیم کردن دامنه شتاب ثبت شده بر توان چهارم فرکانس، دامنه تغییر مکان متناظر با آن را برای نیروی سینوسی با دامنه ثابت به دست آورد [۱۷].

در آزمایش ارتعاش اجباری مقادیر میرایی را می‌توان با روشهای مختلف به دست آورد. در اولین روش، با توقف بارگذاری، کاهش دامنه ارتعاش آزاد سد اندازه گیری می‌شود و سپس نسبت میرایی به دست می‌آید. در روش دوم، از روش پهنای نوار استفاده می‌شود و در روش سوم با انطباق یک مدل کامپیوتری به داده های آزمایش، مقادیر میرایی بدنه سد به دست می‌آید [۱۳] و [۱۷]. برای یافتن شکل مدها هنگامی که فرکانس بارگذاری یکی از فرکانسهای تشدید باشد، پاسخ و فاز نقاط مختلفی از سد در حالت ارتعاش دائم رکوردگیری می‌شود و با استفاده از نسبت مقادیر به دست آمده، اشکال مدی سد محاسبه می‌شود [۱۳] و [۱۷].

۸- نمونه هایی از آزمایش ارتعاش اجباری در سدهای خاکی

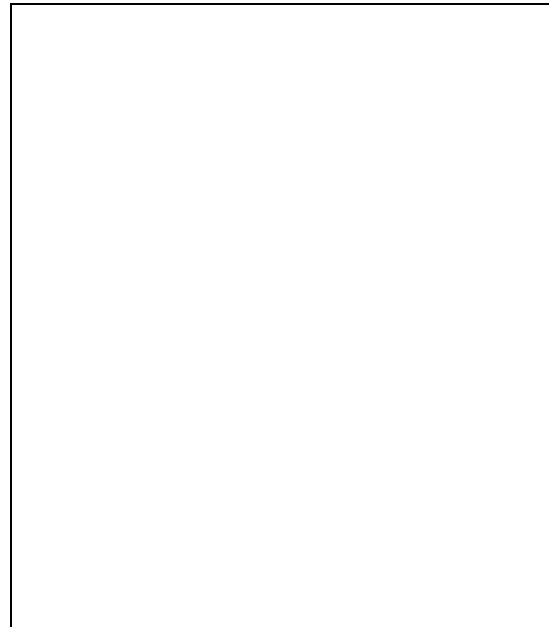
برای مشاهده برخی از نتایج آزمایشهای ارتعاش اجباری در سدهای خاکی، دو نمونه از آزمایشهای مندرج در جدول (۱) شرح داده می‌شود. لازم به ذکر است در شماره پیشین پژوهشنامه، به آزمایشهای ارتعاش محیطی این دو سد اشاره شد. البته تفصیل این آزمایشها به همراه شرح کاملی از انواع آزمایشهای ارتعاشی درجا و نمونه های متعددی از هر روش آزمایش به صورت گزارش جامع در دست تهیه است و

راست می‌باشد. تکیه گاه و بستر این سد در سمت چپ از رسوبات ضخیم سیمانته نشده از جنس مواد آتشفشانی تشکیل یافته است. در سال ۱۹۷۹ با استفاده از یک دستگاه لرزاننده از نوع جرم نامتعادل با قابلیت ایجاد حداکثر نیروی 25 tf مستقر در تاج سد، نیروی هارمونیک در جهت افقی بر بدنه سد وارد گردید و پاسخ نقاط مختلف بدنه سد اندازه گیری شد. در شکل (۴) محل استقرار دستگاه لرزاننده (با حرف f) و نتایج آزمایش در محدوده فرکانسهای $2/4$ الی $4/2$ هرتز در حالت تحریک عمود بر محور سد (در جهت بالادست - پایین دست) ملاحظه - می‌شود. در این شکل که نحوه تغییرات دامنه شتاب در جهت نیروی اعمالی و در نقاط اندازه گیری روی تاج بر حسب فرکانس بارگذاری ترسیم شده است یک روند افزایشی با فرکانس دارد و علت آن نیز در این نکته نهفته است که نیروی بارگذاری با توان دوم فرکانس متناسب است. این شکل همچنین نحوه تغییرات شتاب در تاج سد در فرکانسهای $2/8$ ، $3/2$ و $3/6$ هرتز را نشان می‌دهد و مشخص می‌سازد که منحنی تغییرات شتاب در ناحیه مرکز طولی تاج دارای افتادگی و در طرفین تاج دارای مقادیر بیشتری است. چنین رفتاری مختص این سد خاکی نیست و در تحلیل ارتعاش آزاد سدهای پاره سنگی با روش اجزای محدود سه بعدی مشاهده - می‌شود. این رفتار را می‌توان به صورت ارتعاش عمومی سد در نظر گرفت که در فرکانسهای اندکی بالاتر از فرکانس طبیعی سد اتفاق می‌افتد.



شکل (۴): نحوه تغییرات شتاب تاج سد کاسا با فرکانس بارگذاری در آزمایش ارتعاش اجباری. در این شکل، مقطع طولی سد مشاهده می‌شود.

۹- نتایج حاصل از چندین آزمایش ارتعاش اجباری در سدهای خاکی



شکل (۲): منحنی های تشدید (در جهت X) حاصل از آزمایش ارتعاش اجباری در سد کی سن یاما



شکل (۳): مدهای ارتعاش (در جهت X) حاصل از آزمایش ارتعاش اجباری در سد کی سن یاما

می‌یابد؛ ولی، اختلاف این فرکانسها در حالت حداکثر و حداقل ارتفاع آب، از 6% تجاوز نمی‌کند.

- هنگامی که بدنه سد در جهت X تحریک می‌شود، دامنه پاسخ در نزدیک تاج شدیداً افزایش می‌یابد.

- نسبت میرایی اولین مد ارتعاشی در جهت X و Y و در حالات مختلف ارتفاع آب مخزن، برابر 4 تا 6 درصد است.

۸-۲- آزمایش ارتعاش اجباری سد خاکی کاسا [۸]

سد خاکی کاسا که با ارتفاع 90 متر و طول تاج 487 متر در کشور ژاپن ساخته شده است دارای شکل دره نامتقارن در طرفین چپ و

- 5-Nose, M. & Takahashi, T. & Kunii, K. "Results of Earthquake Observations and Dynamic Test on Rockfill Dams and Their Consideration", 12th International Congress on Large Dams, Mexico, C. 9, 919-934, 1976.
- 6-Gazetas, G. & Abdel-Gaffar, A.M., "Earth Dam Characteristics from Full-Scale Vibrations", Proc. of 10th Int. Conf. on Soil Mechanics & Foundation Engineering, 207-210, 1981.
- 7-Scott, R.F. & Abdel-Ghaffar, A.M., "Forced Vibration Tests of an Earth Dam", Water Power & Dam Construction, 41-45, October, 1978.
- 8-Ohmachi, T. & Higurashi, T., "on the Dynamic Behaviour of Kassa Dam Constructed on a Volcanic Mud Flow Deposit", 12th International Congress on Large Dams, New Delhi, Q51,R10, 945-961, 1979.
- 9-Severn, R. T. & Jeary, A. P. & Ellis, B. R. & Dungar, R. "Prototype Dynamic Studies on a Rockfill Dam and on Buttress Dam", 13th International Cong. on Large Dams, New Delhi, Q. 51, R. 16, 1075-1096, 1979.
- 10-Severn, R. T. & Jeary, A. P. & Ellis, B. R. "Forced Vibration Tests and Theoretical Studies on Dams" Proc. of the Institution of civil Engineering, Vol. 69, Part 2, 605-634, 1980.
- 11-Severn, R.T., "Field and Laboratory Studies for Earthquake Engineering", Experimental and Numerical Methods in Earthquake Engineering, 23-45, 1991.
- 12-Paskalov, T. & Talaganov, K. & Galbov, S., "Comparative Analysis of a Rock-Fill Dam", 7th WCEE, Istanbul, Vol. 6, 125-132, 1980.
- 13-Negro, P. & Magonette, G.E., "Experimental Methods in Structural Dynamics", European Earthquake Engineering, Vol. X11, N.1, 1998.
- 14-Ellis, B. R. & Jeary, A.P. "on the Forced Vibration Testing of Dams" Proc. of 8th WCEE, Sanfrancisco, California, Vol. 5, 119-126, 1984.
- 15-Okamoto, A., "Introduction to Earthquake Engineering", Univ. of Tokyo Press., 1973.
- 16-Seco e Pinto, P.S., "Dynamic Analysis of Embankment Dams", Proc. of the Seminar on Soil Dynamics and Geotechnical Earthquake Engineering, Seco e Pinto (editor), 1993a., Balkema, Rotterdam, 159-269, 1993.

۱۷- آقا کوچک، علی اکبر؛ معماری، علی محمد، "آزمایشات

لرزه ای بر روی ساختمانهای واقعی"، جلد اول و جلد دوم، تهران:

پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۷۲.

با وجود اینکه سدهای خاکی در مقایسه با انواع دیگر سدها بیشترین تعداد را در جهان داراست، ولی آزمایشهای ارتعاش اجباری بسیار کمی روی آنها انجام شده است که یکی از علل آن به مشکلات نحوه استقرار دستگاههای مولد ارتعاش در تاج سد مربوط می شود. با انجام این آزمایش، فرکانسهای تشدید، میرایی و اشکال مدی سد به دست می آید که با استفاده از پارامترهای مذکور، نه تنها مدل عددی سازه کنترل می شود، بلکه به عنوان داده های ورودی برای پیش بینی رفتار سد در زمین لرزه نیز استفاده می گردد.

نتایج آزمایشهای ارتعاش اجباری روی چندین سد خاکی نشان- می دهد که میرایی سد در حدود ۲-۵ درصد بوده است مگر در یک مورد که میرایی اولین سد بالادست-پایین دست سد گلندوون برابر ۱۶/۳ درصد اندازه گیری شد. در مورد اخیر برای حصول اطمینان به صحت نتایج، دو آزمایش مستقل انجام شد و در اثنای آزمایش، موقعیت تحریک و رکوردگیری تغییر یافت و نتیجه مذکور به دست آمد [۱۴].

نتایج مزبور بر مبنای تعداد محدودی آزمایش ارتعاش اجباری بر روی سدهای خاکی به دست آمده است؛ بنابراین، برای رسیدن به نتایج مطمئن تر، باید در آینده انجام آزمایشها ادامه یابد (هرچند در طول سالهای اخیر نسبتاً کم شده است). جزئیات آزمایشها و نتایج مقایسه با مدلهای ریاضی دقیقاً گزارش شوند و البته مقایسه در هر دو مقادیر فرکانسها و اشکال مدی صورت گیرد.

۱۰- مراجع

- 1-Lu, G.P. & Qin, H.C., "Some Developements in Prototype Test on Dams", Proc. of Ninth World Conference on Eart Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan, Vol. VI, 277-282, 1988.
- 2-Keightley, W.O. "Vibration Characteristics of an Earth Dam", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 56, No. 6, 1207-1226, December, 1966.
- 3-Elgamal, A. M. & Gunturi, R.V., "Dynamic Behaviour and Seismic Response of EL Infiernillo Dam", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 22, 665-684. 1993.
- 4-Petrovski, J. & Paskalov, T. & Jurukovski, D., "Dynamic Full Scale Test of an Earthfill Dam", Geotechnique, Vol. 24 (2), 193-206, 1974.