

# تأثیر شدت و محل آسیب در بدنه‌ی سد بتنی قوسی در خصوصیات مودی سازه

امیرمیرثم گیاهی (دانشجوی دکتری)

جعفر عسگری مارثانی\* (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی

حسن احمدی (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی

محمدصادق روحانی هاش (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشکده عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی

مهندسی عمران شریف، پاییز ۱۴۰۰ (دوره ۲ - شماره ۳/۲، ص. ۳-۹) (پژوهشی)

شناسایی خرابی‌های سازه‌ی با روش‌های ارتعاش - مینا از جمله مسائلی بوده است که به دلیل ماهیت غیرمخرب‌باش، بسیار به آن توجه شده است. این موضوع در مورد سدهای بتنی قوسی، اهمیتی دوچندان دارد و عدم شناسایی خرابی‌های موضعی در ابرسازه‌های ذکر شده و گسترش آن، ایجاد خرابی‌های کلی و ناگهانی و به دنبال آن تحمیل خسارت‌های عمده‌ی جانی و مالی را در سطح ملی و جهانی در پی خواهد داشت. در مطالعه‌ی حاضر، به بررسی آثار خرابی در ویژگی‌های مودال در سدهای بتنی قوسی پرداخته شده است. برای این منظور مدل اجزاء محدود یک سد بتنی قوسی، با سناریوهای مختلف خرابی، شامل: ۹ محل مختلف و ۳ سطح از خرابی به همراه تغییر در ویژگی‌های مودال سیستم قبل و بعد از وقوع خرابی بررسی شده است. نتایج پارامترهای مودال سازه‌ی سالم و سیستم‌های آسیب دیده نشان می‌دهند که بسامدهای طبیعی سیستم، حساسیت کمتری نسبت به شکل مودهای سیستم در برابر خرابی دارند. همچنین، خرابی‌های موجود در قسمت‌های بالایی و میانی، اثر بیشتری در تغییرات مشخصات مودال سیستم نسبت به مناطق پایینی از بدنه‌ی سد می‌گذارند.

واژگان کلیدی: پایش سلامت، سد بتنی قوسی، خصوصیات مودی، شدت و محل آسیب، بسامد طبیعی، شکل مود.

giahi.org@gmail.com  
j\_asgari@iauctb.ac.ir  
Hghamadi@iraui.ac  
m.s.rohanimanesh@iauctb.ac.ir

## ۱. مقدمه

سدها از مهم‌ترین و بزرگ‌ترین سازه‌های مهندسی هستند که برای منظوره‌های مختلف، از جمله: تأمین آب شرب و کشاورزی، تولید برق، جلوگیری از سیلاب‌های فصلی و ... طراحی و اجرا می‌شوند. تجربیات بشر نشان داده است که در صورت ایجاد خرابی در آنها، خسارت‌های جبران‌ناپذیر مالی و جانی و محیط‌زیستی ایجاد خواهد شد. بنابراین، بحث ایمنی و عملکرد مناسب سدها، درجه‌ی اهمیت بسیار بالایی هم به لحاظ طراحی سازه‌های جدید و هم برای پایش سلامت سازه‌های قدیمی دارد. در میان انواع سدهای بتنی، سدهای قوسی هم به لحاظ اقتصادی و هم به لحاظ قابلیت اعتماد، انتخاب خوبی برای مهار آب‌های سطحی هستند. سدهای بتنی قوسی، به خصوص در مقایسه با سدهای بتنی وزنی، بسیار اقتصادی‌تر هستند و سرعت اجرایی بالاتری دارند. با این حال، سدهای بتنی قوسی نیازمند بتن و

قالب‌بندی با کیفیت‌تر و گران‌تری نسبت به سدهای بتنی دیگر هستند و طراحی پیچیده‌تری نیز دارند.<sup>[۱-۳]</sup> به طور کلی احتمال ایجاد خرابی در مدت زمان بهره‌برداری به دلایل متفاوتی از جمله: عدم برآورد دقیق ضوابط و پارامترهای آیین‌نامه‌ها در زمان طراحی سازه، عدم رعایت اصول صحیح ساخت در زمان اجرا، عدم نگهداری و بهره‌برداری صحیح، بالا رفتن سن سازه و همچنین وقوع بارهای ویژه و غیرمترقبه نظیر زلزله همواره وجود دارد. در صورتی که خرابی‌های جزئی در ابرسازه‌های اشاره شده به موقع تشخیص داده نشوند، منشأ ایجاد خرابی‌های کلی در سازه می‌شوند و در این شرایط با توجه به درجه‌ی اهمیت بالای آنها لازم است که در کوتاه‌ترین زمان ممکن، اطلاعات مورد نیاز در خصوص وضعیت سلامت سازه‌ی و شدت آسیب‌های وارده به آنها به دست آورده شود، تا بتوان در اسرع وقت نسبت به تأمین ایمنی و تعمیر و مقاوم‌سازی سازه‌های مهم مذکور اقدام کرد.<sup>[۴]</sup> در مبحث پایش سلامت سازه، خرابی به عنوان تغییراتی در پارامترهای فیزیکی مدل تلقی می‌شود. به علت ارتباط

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۱۱/۱۲، اصلاحیه ۱۳۹۹/۱۲/۲۰، پذیرش ۱۳۹۹/۱۲/۲۷

DOI:10.24200/J30.2021.57305.2901

بین پارامترهای فیزیکی و پارامترهای دینامیکی مدل، خرابی می‌تواند از تغییرات به وجود آمده در پارامترهای دینامیکی تشخیص داده شود که این به عنوان مفهوم بنیادی روش‌های ارتعاش - مینا<sup>۱</sup> تلقی می‌شود. از سوی دیگر، شناسایی آسیب به کلیدی روش‌ها و شیوه‌هایی اطلاق می‌شود که وجود خرابی را تشخیص می‌دهد و موقعیت و میزان خرابی را بیان می‌کند.<sup>[۵]</sup> ریتر<sup>۲</sup> (۱۹۹۳) روش‌های شناسایی خسارت را در قالب ۴ سطح: تعیین وجود خسارت در سازه، تعیین محل و مختصات هندسی آسیب، تعیین شدت آسیب وارده به اعضاء سازه، و تخمین عمر باقیمانده قابل بهره‌برداری سازه طبقه‌بندی کرده است.<sup>[۶]</sup> برای تشخیص خرابی در سازه‌ها در صورت قابل مشاهده بودن خرابی در سازه می‌توان از مشاهده مستقیم بهره برد، ولی همواره محدودیت‌هایی در این زمینه وجود دارد و باید از آزمایش بر روی سازه استفاده شود. آزمایش‌های مذکور به دو دسته مخرب و غیرمخرب تقسیم‌بندی می‌شوند، که دسته دوم به علت عدم خسارت وارد بر سازه، مقبولیت بالاتری دارند.<sup>[۷]</sup> آزمایش‌های مختلفی تاکنون برای تشخیص خواص دینامیکی سازه‌ها پیشنهاد شده‌اند. در این میان، آزمون مودال یکی از مهم‌ترین آزمایش‌هایی است که عملاً برای درک پاسخ ارتعاشی سیستم‌های سازه‌ای استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که در ابتدا، نتایج آزمایش مودال فقط برای تأیید نتایج نظری محاسبات مربوط به شکل مودهای نوسان‌گرها استفاده می‌شد، اما در سال‌های پیشین اثبات شده است که نتایج آزمایش‌های غیرمخرب مودال می‌توانند در زمینه‌ی سنجش خرابی سازه‌ی نیز استفاده شوند.<sup>[۸-۱۱]</sup> روش‌های تشخیص آسیب در سازه با استفاده از نتایج آزمایش‌های اندازه‌گیری ارتعاش‌ها معمولاً بر این فرض استوار هستند که خرابی در یک سیستم، خواص دینامیکی (مانند جرم، سختی، یا میرایی) را تغییر می‌دهد. مسلماً تغییرات اشاره شده در ویژگی‌های ذاتی سیستم، نظیر: بسامد طبیعی، شکل مود و نسبت میرایی نمود پیدا خواهد کرد.

از لحاظ تاریخی، شناسایی خرابی با استفاده از پارامترهای مودال سازه‌ی از اواخر دهه‌ی هفتاد قرن بیستم آغاز شده و در ابتدا، به تغییرات بسامد طبیعی سیستم در آسیب سازه‌ها توجه شده است. برای مثال، در این زمینه می‌توان به پژوهش کاولی و آدامز<sup>۳</sup> (۱۹۷۹)،<sup>[۱۱]</sup> اشاره کرد. در سال ۱۹۹۰ نیز استابز به همراه اسکوادا<sup>۴</sup> حساسیت بسامد را نسبت به وجود خرابی بر صفحات FRP بررسی کرده است.<sup>[۱۲]</sup> روش استفاده شده‌ی آنها بر مبنای کاربرد یک تابع خطا بر حسب بسامد مربوط به مود شکل مأم سیستم قرار داشت. با وجود این، بعضی از پژوهشگران به جای بررسی تأثیر آسیب در تغییرات بسامد، بر روی تغییر شکل مودها به علت خرابی سازه‌ی کار کرده‌اند. به طور نمونه وست<sup>۵</sup> (۱۹۸۶)،<sup>[۱۳]</sup> با معرفی مفهوم MAC<sup>۶</sup>، قصد داشت تا یک رابطه‌ی ریاضی بین شکل مودهای تحلیلی و نتایج به دست آمده از آزمایش ایجاد کند. علاوه بر این، برخی از پژوهشگران نیز بر روی روش‌های دیگری، از جمله: استفاده از مشتقات شکل مودها برای شناسایی آسیب استفاده کرده‌اند.<sup>[۱۴]</sup> در همین رابطه، می‌توان به پژوهش پندی<sup>۷</sup> و همکاران (۱۹۹۱) اشاره کرد،<sup>[۱۵]</sup> که نشان داد قدرمطلق تغییرات در انحنای اشکال مودی می‌تواند شاخص خوبی برای شناسایی آسیب در تیرها باشد. برخی از پژوهشگران همچنین از انعطاف‌پذیری سازه به عنوان معیاری برای تشخیص آسیب و موقعیت آن در سازه بهره برده‌اند.<sup>[۱۶]</sup> استفاده از روش‌های احتمالاتی نیز اخیراً بسیار مورد توجه پژوهشگران حوزه‌ی تشخیص خرابی سازه‌ی قرار گرفته است. در این راستا، قاسمی و همکاران (۲۰۱۷)،<sup>[۱۸]</sup> یک روش بر مبنای شبیه‌سازی مونت - کارلو<sup>۸</sup> برای در نظر گرفتن آثار عدم قطعیت‌ها در ایجاد یک مدل احتمالاتی بدل<sup>۹</sup> پیشنهاد کرده‌اند. لذا با استفاده از الگوریتم EIGMM<sup>۱۰</sup> برای به‌روزرسانی مدل اخیر، یک روش پیشنهادی را بر روی سازه‌های خرابی اعمال کرده و دریافته‌اند که روش پیشنهاد شده در تشخیص خرابی سازه‌ها

با تلاش محاسباتی کمتری می‌تواند نسبت به روش اجزاء محدود مستقیم عمل کند.

در همین راستا، پژوهش‌های مختلفی نیز با تمرکز به بخش پایش سلامت و تشخیص خرابی سدها، توجه خود را به سازه‌های مهم ذکر شده معطوف کرده‌اند. برای نمونه، آلوز و هال<sup>۱۱</sup> (۲۰۰۶)،<sup>[۱۹]</sup> برای شناسایی مودال یک سد بتنی قوسی و کالیبراسیون مدل اجزاء محدود آن، ضمن بررسی ۱۷ حسگر (شتاب‌نگار) نصب شده بر روی سد پاکویما<sup>۱۲</sup> تحت ارتعاش‌های ناشی از زلزله، ویژگی‌های دو مود ابتدایی سازه را با استفاده از شناسایی سیستمی<sup>۱۳</sup> تعیین کرده‌اند. علاوه بر این، با بررسی اطلاعات ثبت شده از یک ارتعاش اجباری صورت گرفته بر روی سد و مقایسه‌ی دو مجموعه‌ی اشاره شده از اطلاعات نشان دادند که در حالت دوم سیستم بسیار سخت‌تر از حالت اول عمل می‌کند. علت این اختلاف به بروز رفتار غیرخطی در سازه (از دست رفتن سختی سنگ‌های فونداسیون سازه) در هنگام زلزله‌ی سال ۲۰۰۱ نسبت داده شده است. سو و وو<sup>۱۴</sup> (۲۰۰۷)، نیز پژوهشی بر روی مدل شناسایی رفتار سدها بر مبنای شبکه‌ی مویک<sup>۱۵</sup> ارائه کرده‌اند<sup>[۲۱]</sup> و در آن یک روش جدید برای حذف تکراری نورون‌های اضافی بر طبق استقلال بین خروجی شبکه و گره‌های موجود در لایه‌ی پنهان<sup>۱۶</sup> ارائه کرده و دریافته‌اند که روش ارائه شده به خوبی می‌تواند آثار پارازیت را در نظر بگیرد. همچنین یقین و همکاران (۱۳۹۰)،<sup>[۲۱]</sup> با استفاده از تبدیل مویک ایستا<sup>۱۷</sup>، شناسایی ترک سدهای بتنی قوسی را تحت آنالیز بسامدی بررسی و سد دو قوسی کارون ۱ (شهید عباس‌پور) با ارتفاع ۲۰۰ متر را با استفاده از نرم‌افزار آباکوس تحلیل کردند. مدل در نظر گرفته شده شامل دو حالت سالم (بدون ترک) و ترک‌خورده بود و سیگنال‌های خروجی در نرم‌افزار متلب<sup>۱۸</sup> با استفاده از تبدیل مویک پردازش شدند. در پژوهش دیگری، مفیدی و سیدیور (۱۳۹۳)، به شناسایی خرابی در سدهای بتنی قوسی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی چندمرحله‌ی، بر روی تغییرات در بسامد طبیعی سازه بحث کردند.<sup>[۲۲]</sup> متغیر خرابی در پژوهش اخیر به صورت کاهش مدول کشسانی المان‌ها در نظر گرفته شده است. تابع هدف نیز بر مبنای تغییرات به وجود آمده در بسامدهای سازه‌ی خراب نسبت به سازه‌ی سالم تعریف شده است. ایشان با اعمال الگوریتم مذکور و یافتن جواب بهینه دریافته‌اند که روش ارائه شده به خوبی قادر است تا با تعیین موقعیت و شدت خرابی، در شناسایی خرابی در یک سد قوسی واقعی (با در نظر گرفتن آثار مربوط به نویز) استفاده شود. لین<sup>۱۹</sup> و همکاران (۲۰۱۴)،<sup>[۲۳]</sup> نیز تحلیل بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت مورچه‌ها<sup>۲۰</sup> را بر روی پایداری کلی سدهای قوسی بلند بر مبنای پایش زمین‌بررسی کردند. در پژوهش ذکر شده، تابع هدف بر مبنای پارامترهای مکانیکی بتن بدنه و سنگ پی تعریف شده و جابه‌جایی‌ها، توزیع تنش و نهایتاً پایداری کلی سد بررسی شده است. همچنین چنگ<sup>۲۱</sup> و همکاران (۲۰۱۵)،<sup>[۲۴]</sup> به بررسی روش پایش سلامت سدهای بتنی بر مبنای آزمایش ارتعاش محیطی (AVT) <sup>۲۲</sup> و تحلیل اصل کرنل<sup>۲۳</sup> پرداخته‌اند. هدف اصلی ایشان، تشخیص پارامترهای مودال سازه بود که در آن، نتایج آزمایشگاهی به دست آمده از محل سازه به کمک یک مدل اجزاء محدود نیز صحت‌سنجی شده است. علاوه بر این، میلیو<sup>۲۴</sup> و همکاران (۲۰۱۶)،<sup>[۲۵]</sup> نیز پایش سلامت سازه‌ی با استفاده از روش‌ها و مدل‌سازی چندپارامتری اعمال شده بر روی سد قوسی پرتوسیالو<sup>۲۵</sup> در ایتالیا را بررسی کردند و نشان دادند که مزیت استفاده از روش SAR<sup>۲۶</sup>، کاهش زمان بازبینی و ارائه‌ی داده‌ها با کمترین زمان تأخیر بوده است. در پژوهش اخیر، تغییر شکل‌های فصلی برای سد مذکور اندازه‌گیری و مدل HTT نیز برای بررسی تغییر شکل‌های غیرخطی استفاده شده است. تأکید اصلی نوشتار ذکر شده بر روی پایش سلامت سازه‌ی سدها به کمک پردازش اطلاعات ابزارهای اندازه‌گیری (نظیر پاندول) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ی GPS بوده است.

مشاهده می‌شود که سیستم‌های بررسی شده اکثراً شامل المان‌های سازه‌ی ساده، مانند: قاب، تیر و خرپا (که معادلات حاکم بسیار ساده‌تر از رفتار یک سد دارند) بوده است. علت این‌که کمتر به سدهای بتنی قوسی در این زمینه توجه شده است، را می‌توان در پیچیدگی موجود در مدل‌سازی، تحلیل و در نظر گرفتن اندرکنش بین محیط‌های مختلف همچنین وجود درجه‌های آزادی بالای سدها نسبت به سایر سازه‌ها جستجو کرد.<sup>[۲۶-۲۳]</sup> لذا در پژوهش حاضر، به بررسی اثر خرابی در تغییر در خصوصیات مودی سدهای بتنی قوسی پرداخته شده است، که از نتایج آن می‌توان در پایش سلامت سازه‌ی در ابرسازه‌های مذکور بهره برد.

## ۲. مواد و روش‌ها

همان‌طور که در بخش قبل ذکر شده است، آسیب‌های سازه‌ی بر روی پارامترهای دینامیکی یک سیستم ارتعاشی مؤثر است. با توجه به این‌که میرایی در سازه‌ها (طبق فرض رایجی) معمولاً به عنوان یک ترکیب خطی از ماتریس‌های جرم و سختی در نظر گرفته می‌شود، می‌توان فرض کرد که در اثر خرابی‌های سازه‌ی، ماتریس‌های جرم  $[m]$  و سختی  $[k]$  تغییر خواهند کرد. در این حالت، ماتریس‌های جرم و سختی در سازه‌ی آسیب‌دیده  $[m_d]$  و  $[k_d]$  را می‌توان به ترتیب مطابق روابط ۱ و ۲ بیان کرد:

$$[m_d] = [m] + [\Delta m] \quad (۱)$$

$$[k_d] = [k] + [\Delta k] \quad (۲)$$

که در آنها،  $[\Delta m]$  و  $[\Delta k]$  به ترتیب بیان‌گر تغییرات جرم و سختی سیستم در اثر ایجاد خرابی هستند. همچنین می‌توان تغییرات مذکور را به پارامترهای مودال سیستم، یعنی: بردار بسامد  $[\Omega]$  و ماتریس اشکال مودی  $[\Phi]$  مطابق رابطه‌ی ۳ و ۴ نسبت داد:

$$[\Omega_d] = [\Omega] + [\Delta \Omega] \quad (۳)$$

$$[\Phi_d] = [\Phi] + [\Delta \Phi] \quad (۴)$$

که در آنها، زیرنویس  $d$  بیان‌گر وجود خرابی در سیستم است. در شناسایی خرابی، اغلب فرض می‌شود که تغییرات جرم و سختی نسبت به ماتریس‌های جرم و سختی کوچک هستند؛ بنابراین، تغییر در شکل‌های مودی در اثر آسیب سازه‌ی را می‌توان با استفاده از یک ماتریس تبدیل  $[\alpha]$ ، به صورت رابطه‌ی ۵ بیان کرد:

$$[\Delta \Phi] = [\Phi] [\alpha] \quad (۵)$$

در نتیجه، رابطه‌ی بین شکل‌های مودی در دو حالت سالم و آسیب‌دیده در یک سازه به صورت رابطه‌ی ۶ در می‌آید:

$$[\Phi_d] = [\Phi] ([I] + [\alpha]) \quad (۶)$$

که در آن،  $[I]$  بیان‌گر یک ماتریس واحد است. در این حالت، با فرض این‌که ماتریس مودال سازه بر اساس جرم مودال، نرمال‌سازی شده است، خصوصیت تعامد مودها به صورت رابطه‌های ۷ و ۸ بیان می‌شود:

$$[\Phi_d]^T [m_d] [\Phi_d]^T = [I] \quad (۷)$$

$$[\Phi_d]^T [k_d] [\Phi_d]^T = [\Omega_d] \quad (۸)$$

همچنین ژو<sup>۲۷</sup> و همکاران (۲۰۱۶)،<sup>[۲۶]</sup> در مورد تعیین محل بهینه‌ی حسگرها بر روی یک سد بتنی با استفاده از الگوریتم ژنتیک کوانتومی بحث کرده و هدف اصلی ایشان، شناسایی پارامترهای مودال سازه بوده است. برای این منظور با ارائه‌ی یک معیار مؤثر و غیروابسته با استفاده از روش انرژی کرنشی مودال (MSE) ۲۸، جانمایی بهینه‌ی حسگرها بر روی وجه بالادست سدهای بتنی قوسی بلند را ارائه کرده‌اند. در نهایت، چن<sup>۲۹</sup> و همکاران (۲۰۱۷)،<sup>[۲۷]</sup> یک روش ترکیبی در جانمایی بهینه‌ی حسگرها برای پاسخ دینامیکی سازه‌های هیدرولیکی<sup>۳۰</sup> پیشنهاد کرده‌اند، که در آن با ترکیب روش معیار اطمینان مودی (MAC) ۳۱ با روش انرژی کرنشی مودال، یک روش جدید به منظور کاهش اثر محل‌های اولیه‌ی حسگرها معرفی شده است. در پژوهش اخیر، شبیه‌سازی بر روی یک سد قوسی با در نظر گرفتن ۲۰ عدد حسگر و ۶ مود ارتعاشی اولیه‌ی سازه انجام شده است. همچنین در آن مرزایا و معایب روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌هایی مانند MAC، معیار انرژی جنبشی مودال<sup>۳۲</sup>، ماتریس اطلاعات فیشر<sup>۳۳</sup> و معیار میانگین ریشه‌ی مجذور خطا<sup>۳۴</sup> بررسی شده است.

اسماعیل‌زاده و همکاران (۲۰۱۸)،<sup>[۲۸]</sup> نیز بر روی یک سد بتنی وزنی مطالعات و پژوهش‌هایی انجام دادند و با استفاده از روش MAC به تعیین محل آسیب بر روی سد بتنی وزنی با روش هیلبرت - هانگ<sup>۳۵</sup> پرداخته و بر اساس تغییر در بسامدهای نقاط آسیب‌دیده، پارامتری به نام خطای بسامد نسبی معرفی کرده‌اند. نتایج به دست آمده نشان داد که بر اساس ملاک پیشنهادی، می‌توان طول صحیح و موقعیت خسارت را در سد بتنی وزنی مشخص کرد.

همچنین بو-ون<sup>۳۶</sup> و همکاران (۲۰۲۰)،<sup>[۲۹]</sup> یک سد بتنی را برای مطالعه‌ی موردی انتخاب کردند و با تغییر در خصوصیات مواد تشکیل‌دهنده‌ی بدنه، شکل‌های مختلف مقطع بدنه را طراحی کردند و بر مبنای رفتار الاستوخیمیری سیستم مخزن سد - مخزن برای ۶ حالت مختلف تحلیل تنش انجام دادند. مدل‌های انعطاف‌پذیری بتن آسیب‌دیده (CDP)، اجزاء محدود با دیدگاه لاگرانژی و مدل تماس سطح به سطح از جمله مدل‌های استفاده شده توسط ایشان در تحلیل‌های انجام شده بوده و در پایان، از طریق مطالعه‌ی مقایسه‌ی، یک طرح بهینه از ساختار سد ترکیبی مشخص و ارائه شده است.

زانگ<sup>۳۷</sup> و همکارانش (۲۰۱۷)،<sup>[۳۰]</sup> نیز در مورد محل آسیب سد بتنی تحقیقات گسترده‌ی انجام دادند و دریافتند که نه فقط از سیستم تشخیص آسیب لرزه‌ی در پایش فرایند آسیب لرزه‌ی با اندازه‌گیری تاریخچه‌ی تنش دینامیکی می‌توان استفاده کرد، بلکه ویژگی مذکور در شناسایی توزیع آسیب در منطقه‌ی آسیب‌دیده‌ی سد نیز کاربرد دارد. همچنین حمیدیان و همکاران (۲۰۱۸)،<sup>[۳۱]</sup> روشی برای تشخیص آسیب در ساختارهای پیوسته‌ی نامنظم دوبعدی و سه‌بعدی بر اساس روش موجک ترکیبی ارائه داده و با استفاده از یک مدل شبکه‌ی عصبی و بر اساس خروجی‌های جابه‌جایی و تنش از تحلیل سازه‌های آسیب‌دیده، محل آسیب سازه را شناسایی کرده‌اند. در روش ارائه شده برای تشخیص آسیب، پاسخ‌های حاصل از تحلیل قبل و بعد از آسیب به گونه‌ی بررسی شد که روش مذکور، راندمان بالایی در شناسایی محل آسیب در سازه داشته است.

گومز<sup>۳۸</sup> و همکاران (۲۰۲۰)،<sup>[۳۲]</sup> نیز روش بهینه‌سازی را با استفاده از ماتریس اطلاعات فیشر (FIMFA) ۳۹ ارائه کرده‌اند، که در آن حسگرهای بهینه شده در شناسایی خسارت‌ها، عمدتاً برای سازه‌های پیچیده و بزرگ بسیار مؤثر بوده است. همچنین ایشان نشان دادند که برای فرایند شناسایی بهینه‌ی آسیب، روش FIMFA این پتانسیل را دارد که به طیف گسترده‌ی از کاربردهای SHM در سازه‌های پیچیده گسترش یابد.

در مجموع، با نگاه کلی بر مطالعات صورت گرفته در زمینه‌ی تشخیص خرابی

اول تا دهم، برای مطالعه‌های حاضر و هلگرن،<sup>[۳۷]</sup> در جدول ۲ ارائه شده است، که مطابق آن، نتایج حاصل از هر دو مدل از تطابق خوبی با هم داشته‌اند.

#### ۴. مدل سازی

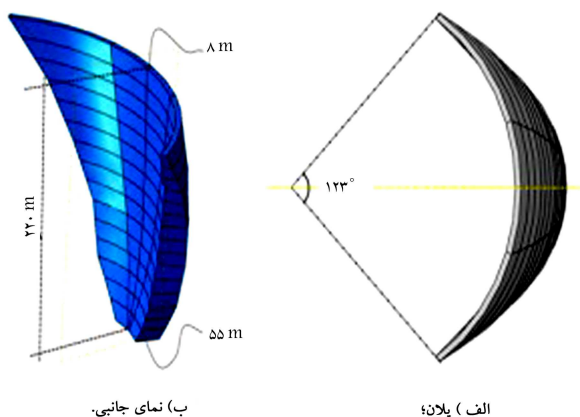
به منظور ایجاد مدل اجزاء محدود در تحلیل روش بررسی شده، یک سد بتنی دو قوسی در نظر گرفته شده است. هندسه‌ی سازه با توجه به سد قوسی مطالعه شده از رساله دکترای ماکسیم پیترز<sup>[۳۴]</sup> (۲۰۱۰)، انتخاب شده است. در همین رابطه، در شکل ۱ دو نمای دید از بالا و کنار سد بتنی دو قوسی مورد نظر مشاهده می‌شود. خواص مکانیکی مصالح بتنی به کار رفته در ساخت سد بتنی مذکور نیز در جدول ۳ ارائه شده است:

برای مدل سازی به روش اجزاء محدود در نرم افزار آباکوس<sup>۴۴</sup>، المان شش وجهی توپُر و سه بعدی از نوع R8D3C، مطابق آنچه در شکل ۲ مشاهده می‌شود، در نظر گرفته شده است. همچنین در انتگرال گیری، روش گوس ۸ نقطه‌یی استفاده شده است. در شکل ۳ مدل اجزاء محدود سه بعدی سد بتنی در نرم افزار آباکوس نمایش داده شده است.

به منظور تعیین ویژگی‌های مودال سازه‌ی سالم، بر اساس فرضیات ارائه شده در بخش قبل، در ابتدا یک تحلیل خطی مودال در نرم افزار آباکوس صورت گرفته است. همان طور که قبلاً ذکر شده است، در نظر گرفتن تمام مودهای ارتعاشی در تحلیل

جدول ۲. مودهای بسامدی در سد مطالعه شده.

مود	مطالعه‌ی حاضر	هلگرن <sup>[۳۷]</sup>
۱	۱/۴۲	۱/۵۲
۲	۱/۴۳	۱/۵۴
۳	۲/۰۸	۲/۰۵
۴	۲/۳۶	۲/۲۷
۵	۲/۶۳	۲/۵۳
۶	۲/۹۹	۲/۹۴
۷	۳/۲۵	۳/۱۹
۸	۳/۲۸	۳/۳۲
۹	۳/۶۸	۳/۷۲
۱۰	۳/۹۹	۳/۹۰



شکل ۱. هندسه‌ی مدل در نظر گرفته شده برای سد بتنی دو قوسی.

در نهایت با جای گذاری و ترکیب روابط بیان شده، تغییرات ماتریس جرم به علت خرابی  $[\Delta m]$ ، می‌تواند به صورت رابطه‌ی ۹ نوشته شود:

$$[\Delta m] = [m] [\Phi] \times \left( 2 [I] - [\Phi]^T [m] [\Phi_d] - [\Phi_d]^T [m] [\Phi] \right) \times [\Phi]^T [m] \quad (9)$$

و به طور مشابه و به همین ترتیب، تغییرات ماتریس سختی در اثر آسیب سازه‌یی از رابطه‌ی ۱۰ به دست می‌آید:

$$[\Delta k] = [m] [\Phi] \times \left( [\Omega] + [\Omega_d] - [\Phi]^T [k] [\Phi_d] \right) \left( -[\Phi_d]^T [k] [\Phi] \right) \times [\Phi]^T [m] \quad (10)$$

به طور کلی روش‌های تشخیص خرابی در سازه به دو دسته‌ی اصلی تقسیم می‌شوند:

#### ۱) روش‌های مبتنی بر بسامد طبیعی<sup>۴۰</sup>

آسیب‌یابی سازه بر اساس تغییرات بسامد طبیعی آن، قدیمی‌ترین و معروف‌ترین روش برآورد خرابی است. آسیب در سازه سبب کاهش سختی و کاهش میرایی و کاهش بسامد در سازه می‌شود.

#### ۲) روش‌های مبتنی بر شکل‌های مودی<sup>۴۱</sup>

شکل مودی، پارامتر منحصر به فردی از یک سازه است، که بیان‌گر تغییر مکان نسبی اعضاء مختلف سازه در یک مود خاص و در برگزیده‌ی اطلاعات مکانی سازه است. آسیب سازه سبب تغییر در شکل مود در مجاورت ناحیه‌ی آسیب دیده می‌شود. بنابراین شناسایی تغییرات بسامد طبیعی و شکل‌های مودی سازه از پارامترهای اصلی تشخیص خرابی محسوب می‌شوند.

#### ۳. راستی آزمایی

جهت صحت‌سنجی مدل از پژوهش هلگرن<sup>[۳۷]</sup> (۲۰۱۵) استفاده شده است. در پژوهش حاضر، از یک سد بتنی قوسی با ارتفاع ۲۲ متر، که به صورت متقارن و دو قوسی است، برای مدل سازی استفاده شده است، که در آن طول تاج سد ۴۳ متر و طول دهانه‌ی سد قسمت پایین ۸۰ متر است. همچنین عرض تاج ۸ متر و ضخامت سد در قسمت پایین ۵۵ متر در نظر گرفته شده است. ارتفاع سد ۲۲ متر است. مشخصات مصالح استفاده شده در سد بتنی ذکر شده در جدول ۱ ارائه شده است.

بارهایی که به سازه وارد شده است، شامل بارهای وزن سد به همراه نیروی هیدرودینامیک آب مخزن بوده است. نتایج حاصل از تحلیل مودال، در مودهای

جدول ۱. مشخصات سد و آب پشت سد مطالعه شده.<sup>[۳۷]</sup>

وزن مخصوص (kg/m <sup>3</sup> )	نسبت پواسون	مدول کشسانی	
۲۴۰۰	۰/۲	۲۷	سد بتنی
۰	۰/۱۶۷	۲۵	فونداسیون
۱۰۰۰	-	۲۲	آب

جدول ۳. خواص مکانیکی بتن استفاده شده در سد. [۳۷]

مقدار	کمیت	واحد
۲۱	وزن مخصوص	کیلو نیوتن بر متر مربع
۲۳/۵	مدول کشسانی	گیگاپاسکال
۰/۳	ضریب پواسون	-

جدول ۴. تعیین شکل مودهای مؤثر سیستم با استفاده از نسبت‌های جرم مشارکتی مودال.

شماره‌ی مود	$U_x$	$U_y$	$U_z$	$Sum(U_x)$	$Sum(U_y)$	$Sum(U_z)$
۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۹
۲	۰/۲۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۵	۰/۰۰	۰/۰۰
۳	۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۸	۰/۰۰	۰/۰۰
۴	۰/۲۳	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۵۱	۰/۰۲	۰/۰۰
۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۵۱	۰/۰۰	۰/۱۰
۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۶	۰/۵۱	۰/۰۰	۰/۲۶
۷	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۵۴	۰/۰۱	۰/۲۶
۸	۰/۰۱	۰/۱۳	۰/۰۰	۰/۵۵	۰/۱۳	۰/۲۶
۹	۰/۰۱	۰/۴۳	۰/۰۰	۰/۵۶	۰/۴۳	۰/۲۶
۱۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۵۶	۰/۰۰	۰/۲۸

جدول ۵. سه سطح خرابی در نظر گرفته شده به همراه مدول‌های کشسانی متناظر.

شدت خرابی	درصد کاهش سختی	مدول کشسانی (گیگاپاسکال)
I	٪۱۰	۱۴/۸۵
II	٪۳۰	۱۱/۵۵
III	٪۵۰	۸/۲۵

## ۵. مدل‌سازی خرابی

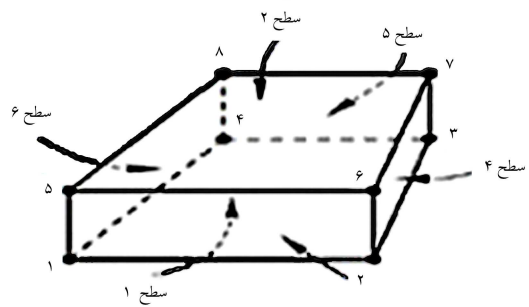
با تقسیم سد به ۳ ناحیه‌ی فوقانی، میانی و تحتانی، ۳ مکان خرابی در هر ناحیه و در مجموع ۹ مکان خرابی در نظر گرفته شده است (شکل ۵). لازم به ذکر است که در پژوهش حاضر، بر مبنای فرض کاهش سختی و نرم شدن سیستم در اثر وجود خرابی، آسیب به عنوان کاهش مدول کشسانی ماده E مدل‌سازی شده است. لذا، در جدول ۵ سه سطح آسیب (شامل ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد) و مدول یانگ مربوط به آنها ارائه شده است.

## ۶. نتایج و بحث

### ۶.۱. تغییرات بسامدهای طبیعی

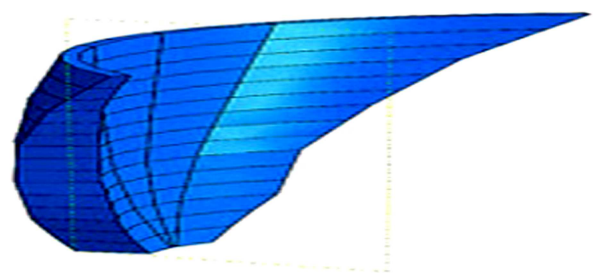
در بخش کمونی، با به کارگیری تحلیل مودال، نتایج به دست آمده در قالب مقادیر بسامد به علت آسیب در مناطق مختلف سد و همچنین با شدت‌های مختلف در جدول ۶ ارائه شده است. سپس با استفاده از معادله‌ی ۱۱، تغییرات نسبی بسامد به علت شدت‌های متفاوت خرابی در مناطق مختلف سد محاسبه شده است:

$$e_f^i = \frac{f_{ud}^i - f_d^i}{f_{ud}^i} \quad (11)$$



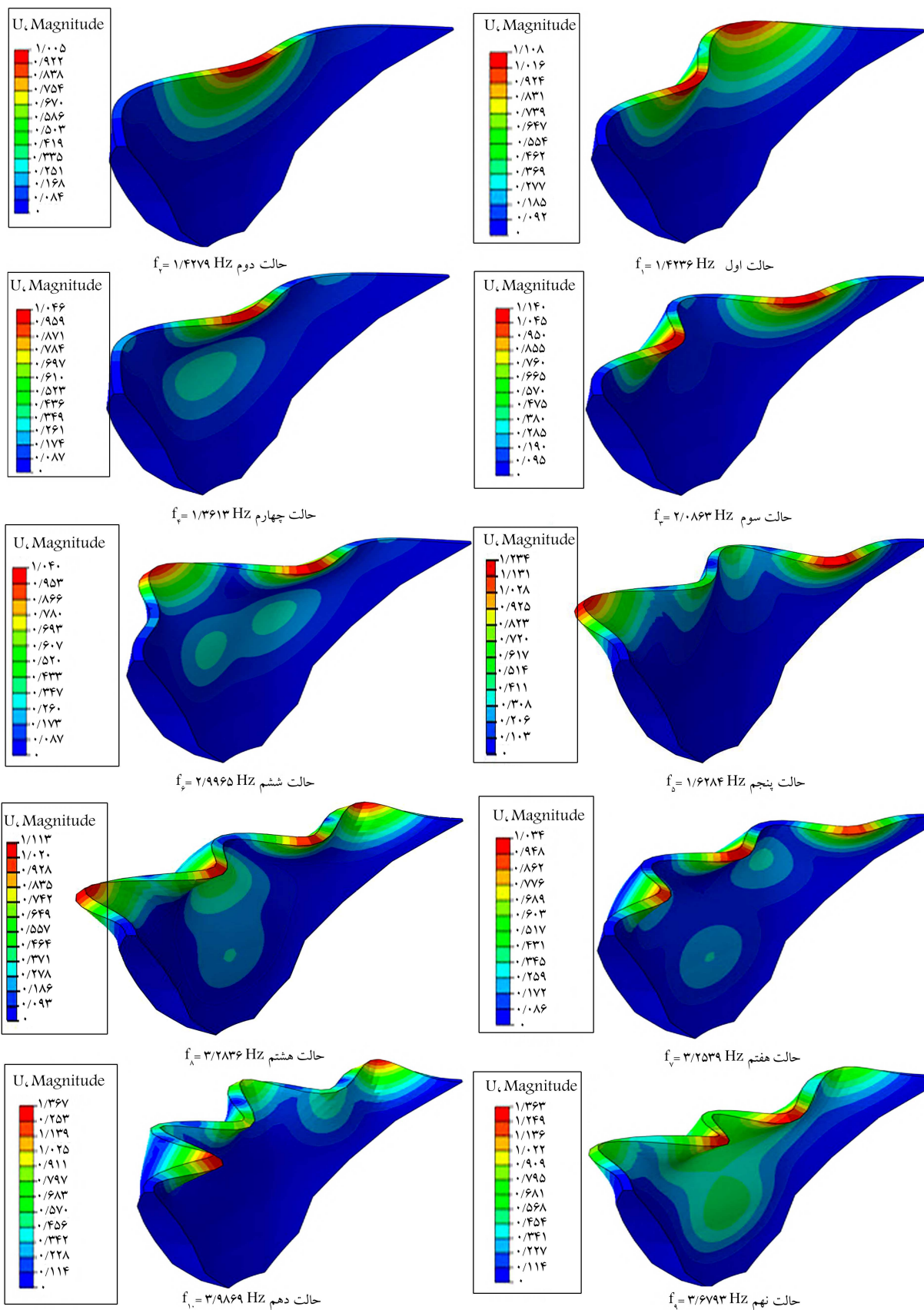
المان ۸ گره‌ی

شکل ۲. نمایی از المان استفاده شده در تحلیل. [۳۱]



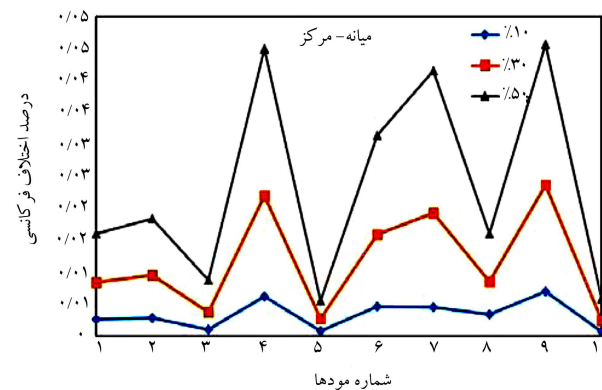
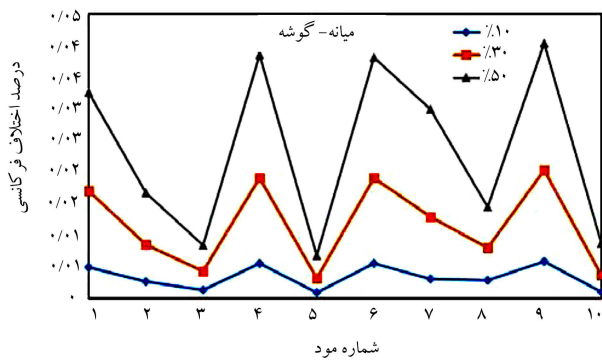
شکل ۳. مدل اجزاء محدود سه‌بعدی ساخته شده برای سد بتنی قوسی. [۳۶]

سدهای بتنی قوسی به علت وجود درجه‌های آزادی بسیار بالا در سیستم‌های مذکور غیرممکن است؛ لذا، باید به صورتی مودهایی با اثر بیشتر در پاسخ ارتعاشی سازه را تعیین کرد. در مطالعه‌ی حاضر، مطابق جدول ۴ از پارامتر نسبت جرم مشارکتی مودال ۴<sup>۵</sup> برای تعیین مودهای پراهمیت در سیستم استفاده شده است. شکل‌های مودی ذکر شده به همراه دوره‌ی تناوب و بسامد طبیعی ارتعاشی خود در شکل ۴ مشاهده می‌شوند.

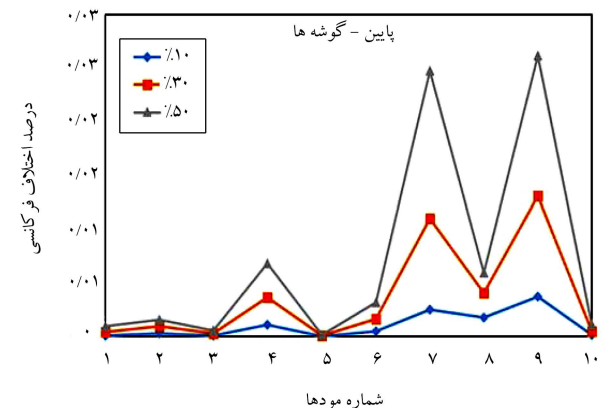
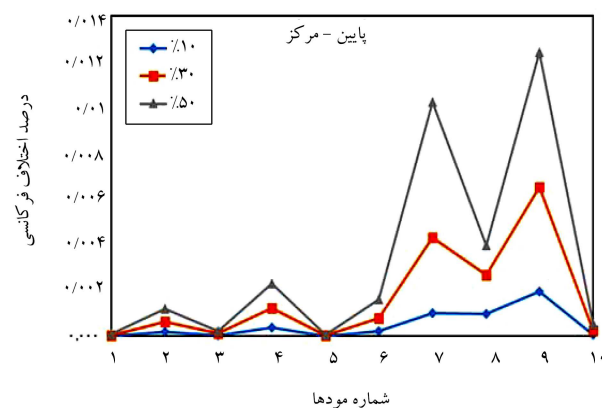


شکل ۴. حالت‌های مختلف سازه‌ی سالم.

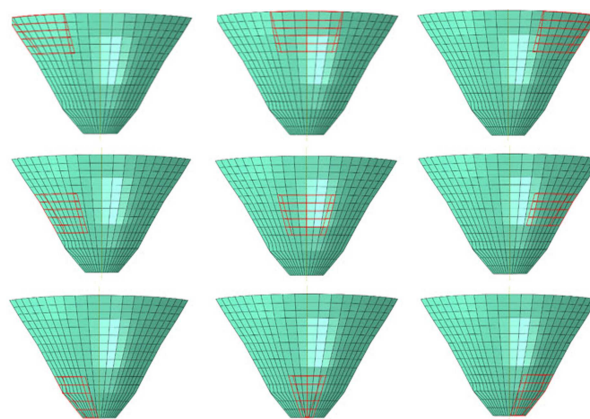




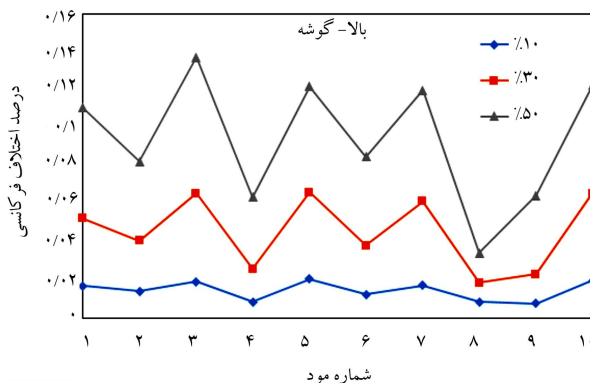
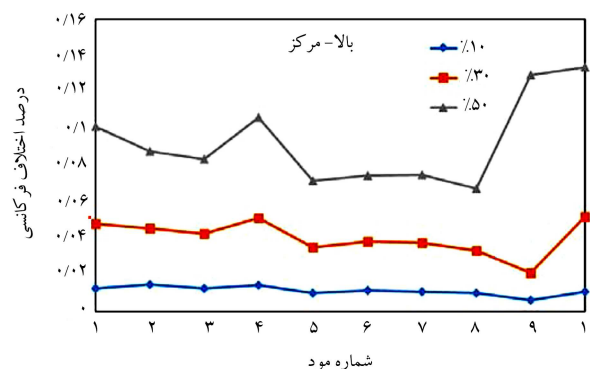
شکل ۷. تغییرات بسامدهای طبیعی در اثر وجود خرابی با شدت‌های مختلف در تراز میانی سد بتنی قوسی.



شکل ۸. تغییرات بسامدهای طبیعی در اثر وجود خرابی با شدت‌های مختلف در پایین سد بتنی قوسی.



شکل ۵. سناریوهای مختلف خرابی در مکان‌های مختلف در بدنه سد بتنی قوسی.



شکل ۶. تغییرات بسامدهای طبیعی در اثر وجود خرابی با شدت‌های مختلف در بالای سد بتنی قوسی.

که در آن،  $e_f^i$  اختلاف نسبی بسامد مربوط به مود  $\lambda_m^i$ ،  $f_{i,d}^i$  بسامد طبیعی سیستم بدون وجود خرابی (در سازه سالم) در مود  $\lambda_m^i$  و  $f_{i,d}^i$  بسامد طبیعی متناظر با مود  $\lambda_m^i$  سیستم در اثر وجود خرابی (در سازه آسیب‌دیده) هستند.

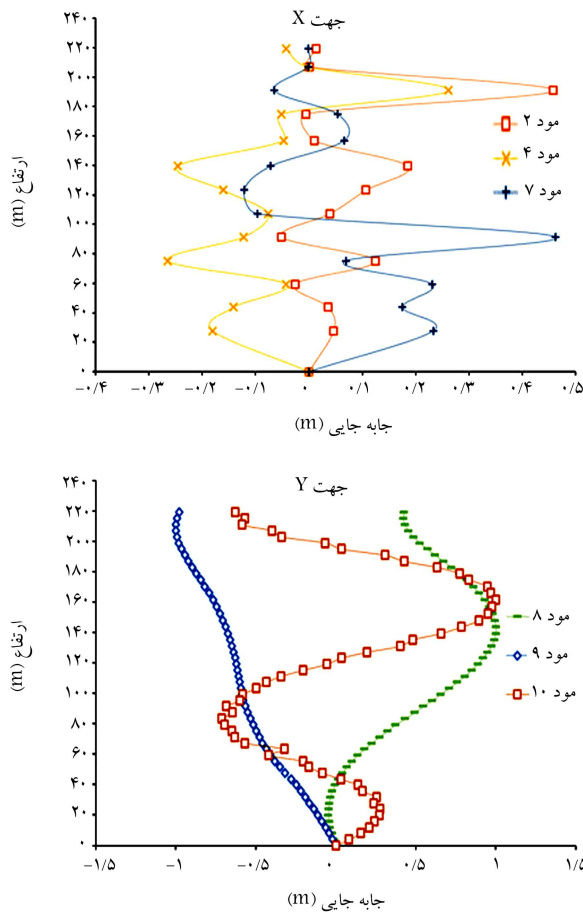
در ادامه، اختلاف بسامد نسبی ناشی از شدت‌های خرابی مختلف در مناطق مختلف بدنه سد محاسبه و نتایج در شکل‌های ۶ الی ۸ مشاهده می‌شوند. در گراف‌های ارائه شده، محور افقی بیانگر شماره مودهای سازه و محور قائم نشانگر درصد اختلاف بسامدی مربوط به هر مود (که طبق رابطه ۱۱ به دست آمده است)، هستند. لازم به ذکر است که مقادیر مذکور برای سه سطح خرابی (۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد) به دست آمده‌اند.

مطابق شکل ۶، اگر خرابی‌های سطح I، II و III در قسمت بالایی سد ایجاد شوند، تغییرات بسامدهای دو مود ابتدایی سازه به ترتیب به میزان بیشینه‌ی

جدول ۶. مقادیر ۱۰ بسامد اول سازه به علت آسیب در نواحی مختلف سد.

بسامدهای سازه‌های آسیب‌دیده در ناحیه‌ی فوقانی سد										شماره‌ی مود
راست			مرکز			چپ			بسامدهای سازه‌های سالم	
%۵۰	%۳۰	%۱۰	%۵۰	%۳۰	%۱۰	%۵۰	%۳۰	%۱۰	سالم	
۱/۲۶۹۳۳	۱/۳۴۹۵	۱/۴۰۰۰۹	۱/۲۷۹۸۴	۱/۳۵۶۰۹	۱/۴۰۶۶۹	۱/۲۶۹۳۳	۱/۳۴۹۵	۱/۴۰۰۰۹	۱/۴۲۴۱۲	۱
۱/۳۱۲۶۶	۱/۳۷۰۵۸	۱/۴۰۸۶۴	۱/۳۰۳۵۸	۱/۳۶۳۶۸	۱/۴۰۸۱۲	۱/۳۱۲۶۶	۱/۳۷۰۵۸	۱/۴۰۸۶۴	۱/۴۲۸۶۸	۲
۱/۸۰۷۱۳	۱/۹۵۱۶۳	۲/۰۴۸۲۴	۱/۹۱۴۲۶	۱/۹۹۹۶۸	۲/۰۶۲۳۹	۱/۸۰۷۱۳	۱/۹۵۱۶۳	۲/۰۴۸۲۴	۲/۰۸۸۲۹	۳
۲/۲۱۴۷۳	۱/۳۰۲۴	۲/۳۴۳۳۸	۲/۱۱۲۵۸	۲/۲۴۲۴۷	۲/۳۲۹۷۷	۲/۲۱۴۷۳	۱/۳۰۲۴	۲/۳۴۳۳۸	۲/۳۶۳۵۴	۴
۲/۳۱۹۱۶	۲/۴۵۹۰۸	۲/۰۵۷۹۸۲	۲/۴۴۴۹۵	۲/۵۴۱۵۲	۲/۶۰۷۷۵	۲/۳۱۹۱۶	۲/۴۵۹۰۸	۲/۰۵۷۹۸۲	۲/۶۳۳۵۲	۵
۲/۷۴۶۹۱	۲/۸۸۳۳۷	۲/۰۹۶۱۰۶	۲/۷۷۴۷	۲/۸۸۳۹۴	۲/۹۶۴۴۴	۲/۷۴۶۹۱	۲/۸۸۳۳۷	۲/۰۹۶۱۰۶	۲/۹۹۸۱۷	۶
۲/۸۷۸۲۱	۳/۰۶۲۲۵	۳/۰۲۰۶۲۱	۳/۰۱۸۶۷	۳/۱۳۹۹۷	۳/۲۲۷۱۱	۲/۸۷۸۲۱	۳/۰۶۲۲۵	۳/۰۲۰۶۲۱	۳/۲۶۲۱۸	۷
۳/۱۷۶۰۱	۳/۲۲۶۲۱	۳/۰۲۵۹۶۶	۳/۰۶۷۱۹	۳/۱۷۸۵۷	۳/۲۵۵۶۳	۳/۱۷۶۰۱	۳/۲۲۶۲۱	۳/۰۲۵۹۶۶	۳/۲۸۷۵۸	۸
۳/۴۴۴۶۹	۳/۵۹۵۲	۳/۰۶۵۱۷۸	۳/۰۲۰۳۷۱	۳/۰۶۰۲۹۴	۳/۶۵۹۰۸	۳/۴۴۴۶۹	۳/۵۹۵۲	۳/۰۶۵۱۷۸	۳/۶۸۰۳۱	۹
۳/۵۱۵۴۷	۳/۷۳۲۰۴	۳/۰۹۱۵۳۹	۳/۰۴۶۰۳۸	۳/۰۷۸۶۹۲	۳/۰۹۵۱۶۵	۳/۵۱۵۴۷	۳/۷۳۲۰۴	۳/۰۹۱۵۳۹	۳/۹۹۴۴۷	۱۰
بسامدهای سازه‌های آسیب‌دیده در ناحیه‌ی میانی سد										شماره‌ی مود
راست			مرکز			چپ			بسامدهای سازه‌های سالم	
%۵۰	%۳۰	%۱۰	%۵۰	%۳۰	%۱۰	%۵۰	%۳۰	%۱۰	سالم	
۱/۳۷۷۹۳	۱/۳۹۹۹۴	۱/۴۱۷۱	۱/۴۰۱۳۸	۱/۴۱۲۲	۱/۴۲۰۵۶	۱/۳۷۷۹۳	۱/۳۹۹۹۴	۱/۴۱۷۱	۱/۴۲۴۱۲	۱
۱/۴۰۴۸۹	۱/۴۱۶۵۲	۱/۰۴۲۴۹۴	۱/۴۰۲۵۴	۱/۴۱۵۱۴	۱/۴۲۴۶۶	۱/۴۰۴۸۹	۱/۴۱۶۵۲	۱/۴۲۴۹۴	۱/۴۲۸۶۸	۲
۲/۰۷۰۸۲	۲/۰۷۹۳	۲/۰۸۵۶۳	۲/۰۷۰۰۳	۲/۰۸۰۶۵	۲/۰۸۶۲۷	۲/۰۷۰۸۲	۲/۰۷۹۳	۲/۰۸۵۶۳	۲/۰۸۸۲۹	۳
۲/۲۷۳	۲/۳۱۸۴۳	۲/۳۵۰۵۵	۲/۲۵۷۲۸	۲/۳۱۱۶۶	۲/۳۴۹۰۱	۲/۲۷۳	۲/۳۱۸۴۳	۲/۳۵۰۵۵	۲/۳۶۳۵۴	۴
۲/۶۱۵۹۵	۲/۶۲۵۳۱	۲/۰۶۳۱۱۹	۲/۶۱۹۱۶	۲/۶۲۶۴۱	۲/۶۳۱۴۶	۲/۶۱۵۹۵	۲/۶۲۵۳۱	۲/۰۶۳۱۱۹	۲/۶۳۳۵۲	۵
۲/۸۸۴۴۱	۲/۹۴۱۱۱	۲/۰۹۸۱۵۷	۲/۹۰۴۱	۲/۹۵۰۶۱	۲/۹۸۴۳۴	۲/۸۸۴۴۱	۲/۹۴۱۱۱	۲/۰۹۸۱۵۷	۲/۹۹۸۱۷	۶
۳/۱۶۴۷	۳/۲۲۰۰۸	۳/۰۲۵۵۲۸	۳/۱۲۶۷۷	۳/۱۹۹۵۷	۳/۲۴۷۶۴	۳/۱۶۴۷	۳/۲۲۰۰۸	۳/۰۲۵۵۲۸	۳/۲۶۲۱۸	۷
۳/۲۴۰۳۳	۳/۲۶۱۳۵	۳/۰۲۷۸۳۳	۳/۲۳۵۱۱	۳/۲۵۹۸۶	۳/۲۷۶۵۷	۳/۲۴۰۳۳	۳/۲۶۱۳۵	۳/۰۲۷۸۳۳	۳/۲۸۷۵۸	۸
۳/۵۳۲۳۲	۳/۰۶۵۵۱	۳/۰۶۵۸۸۷	۳/۰۵۱۲۵۵	۳/۰۵۹۳۴۲	۳/۰۶۵۵۰۳	۳/۵۳۲۳۲	۳/۰۶۵۵۱	۳/۰۶۵۸۸۷	۳/۶۸۰۳۱	۹
۳/۹۵۹۸۸	۳/۹۷۹۸۱	۳/۰۹۹۰۶۳	۳/۰۹۷۱۳۱	۳/۰۹۸۴۶۳	۳/۰۹۹۱۸۵	۳/۹۵۹۸۸	۳/۹۷۹۸۱	۳/۰۹۹۰۶۳	۳/۹۹۴۴۷	۱۰
بسامدهای سازه‌های آسیب‌دیده در ناحیه‌ی تحتانی سد										شماره‌ی مود
راست			مرکز			چپ			بسامدهای سازه‌های سالم	
%۵۰	%۳۰	%۱۰	%۵۰	%۳۰	%۱۰	%۵۰	%۳۰	%۱۰	سالم	
۱/۴۲۲۷۸	۱/۴۲۳۵۷	۱/۴۲۳۹۸	۱/۴۲۴	۱/۴۲۴۰۶	۱/۴۲۴۱	۱/۴۲۲۷۸	۱/۴۲۳۵۷	۱/۴۲۳۹۸	۱/۴۲۴۱۲	۱
۱/۴۲۶۴۴	۱/۴۲۷۳۵	۱/۰۴۲۸۲۶	۱/۴۲۶۹۷	۱/۴۲۷۷۷	۱/۴۲۸۴	۱/۴۲۶۴۴	۱/۴۲۷۳۵	۱/۴۲۸۲۶	۱/۴۲۸۶۸	۲
۲/۰۸۷۰۸	۲/۰۸۷۶۵	۲/۰۸۸۱	۲/۰۸۷۸	۲/۰۸۸۰۲	۲/۰۸۸۲۱	۲/۰۸۷۰۸	۲/۰۸۷۶۵	۲/۰۸۸۱	۲/۰۸۸۲۹	۳
۲/۳۴۷۳۶	۲/۳۵۴۹۳	۲/۰۳۶۰۹۳	۲/۳۵۸۱۱	۲/۳۶۰۶۲	۲/۳۶۲۶۴	۲/۳۴۷۳۶	۲/۳۵۴۹۳	۲/۰۳۶۰۹۳	۲/۳۶۳۵۴	۴
۲/۶۳۳۰۸	۲/۶۳۳۲۹	۲/۰۶۳۳۴۵	۲/۶۳۳۳۳	۲/۶۳۳۴۲	۲/۶۳۳۴۹	۲/۶۳۳۰۸	۲/۶۳۳۲۹	۲/۰۶۳۳۴۵	۲/۶۳۳۵۲	۵
۲/۹۸۸۷۴	۲/۹۹۳۳۷	۲/۰۹۹۶۷۶	۲/۹۹۳۳۹	۲/۹۹۵۷۷	۲/۹۹۷۴۸	۲/۹۸۸۷۴	۲/۹۹۳۳۷	۲/۰۹۹۶۷۶	۲/۹۹۸۱۷	۶
۳/۱۸۱۶۵	۳/۲۲۶۳۳	۳/۰۲۵۳۹۵	۳/۰۲۲۸۸	۳/۰۲۴۸۰۵	۳/۰۲۵۸۸۵	۳/۱۸۱۶۵	۳/۲۲۶۳۳	۳/۰۲۵۳۹۵	۳/۲۶۲۱۸	۷
۳/۲۶۸۰۲	۳/۲۷۴۳۳	۳/۰۲۸۱۶۸	۳/۰۲۷۴۵	۳/۰۲۷۸۷۹	۳/۰۲۸۴۳۴	۳/۲۶۸۰۲	۳/۲۷۴۳۳	۳/۰۲۸۱۶۸	۳/۲۸۷۵۸	۸
۳/۵۸۴۲۹	۳/۰۶۳۲۱۸	۳/۰۶۶۶۵۱	۳/۰۶۳۴۶۱	۳/۰۶۵۶۳۵	۳/۰۶۷۳۱۲	۳/۵۸۴۲۹	۳/۰۶۳۲۱۸	۳/۰۶۶۶۵۱	۳/۶۸۰۳۱	۹
۳/۹۹۰۱۹	۳/۹۹۲۵۲	۳/۰۹۹۳۹۴	۳/۰۹۹۲۲۶	۳/۰۹۹۳۴۳	۳/۰۹۹۴۱۸	۳/۹۹۰۱۹	۳/۹۹۲۵۲	۳/۰۹۹۳۹۴	۳/۹۹۴۴۷	۱۰





شکل ۹. شکل مودهای مؤثر در جهت های X و Y.

$$\bar{e}_{\phi}^i = \frac{\sum_{j=1}^n e_{\phi}^{i,j}}{n} ; e_{\phi}^{i,j} = \frac{\phi_{ud}^{i,j} - \phi_d^{i,j}}{\phi_{ud}^{i,j}} \quad (12)$$

که در آنها،  $\bar{e}_{\phi}^i$  نشانگر اختلاف شکل مود  $i$ م مربوط به نقطه  $z$ ؛  $\phi_{ud}^{i,j}$  جابه جایی مود  $i$  سیستم در نقطه  $z$  در حالت بدون وجود خرابی (در سازی سالم)؛  $\phi_d^{i,j}$  جابه جایی مود  $i$  سیستم در نقطه  $z$  در حالت وجود خرابی (در سازی آسیب دیده) و  $n$  تعداد نقاط ارتفاعی است که در آنها، شکل مود اندازه گیری شده است.

همانند آنچه در مورد بسامدهای سیستم انجام شده است، در بخش حاضر نیز با توجه به تقارن سازه ای موجود، شش محل خرابی (۹ حالتی که سه حالت با هم یکسان هستند) و سه سطح خرابی طبق جدول ۳ در نظر گرفته شده است، که نتایج آن در شکل های ۱۰ الی ۱۲ مشاهده می شوند. در کلیه نمودارهای اشاره شده، محور افقی، نشانگر شماره ی مودهای ارتعاشی و محور قائم، بیانگر مقدار اختلاف شکل مودی طبق رابطه ی ۱۲ به ازاء سه سطح خرابی ۱۰٪، ۳۰٪ و ۵۰٪ هستند. برای نقطه ی بالای سد نیز روابط مذکور محاسبه شده است.

نمودارهای ارائه شده در سمت چپ و راست شکل ۱۰ به ترتیب مربوط به تغییرات شکل مودی برای خرابی های اتفاق افتاده در مرکز و گوشه بالای سیستم هستند. در خرابی های مربوط به مرکز، درصد تغییرات شکل مودی به ترتیب برای شدت های خرابی ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد به ترتیب به میزان بیشینه ۳/۲، ۳/۲ و ۴/۱۷ بوده است. همچنین، وقتی خرابی ها در بالا و مرکز اتفاق افتاده است، بیشینه درصد های خرابی مربوط به مودهای ۷ و ۸ و میزان کمینه ی آنها متناظر با

در حدود ۰/۱، ۰/۴۱، ۰/۱ و ۱ درصد است. همچنین بیشینه درصد تغییرات نسبی در بسامدهای سیستم، در حالتی که خرابی ها در قسمت بالایی سد و در گوشه های قوس اتفاق افتاده است (نتایج مربوط به جناح چپ و راست به علت تقارن یکی هستند)، تقریباً مشابه حالت قبل بوده است. با در نظر گرفتن شماره ی مودهای ارتعاشی نیز ملاحظه می شود که بیشترین حساسیت در حالتی بوده است که خرابی در بالا و مرکز سد و در مودهای ۴، ۹ و ۱۰ به وقوع پیوسته اند. در حالی که اگر خرابی ها در گوشه های چپ و راست تراز بالای سازه باشند، بسامدهای ۳، ۵، ۷ و ۱۰ بیشترین تغییرات در بسامد را نشان می دهند. کمترین حساسیت بسامدها به خرابی نیز در حالت خرابی مرکزی مربوط به مودهای ۲، ۵، ۷ و ۸ بوده و در خرابی های رخ داده در گوشه ها، مودهای ۲، ۴ و ۸ کمترین تحریک را داشته اند.

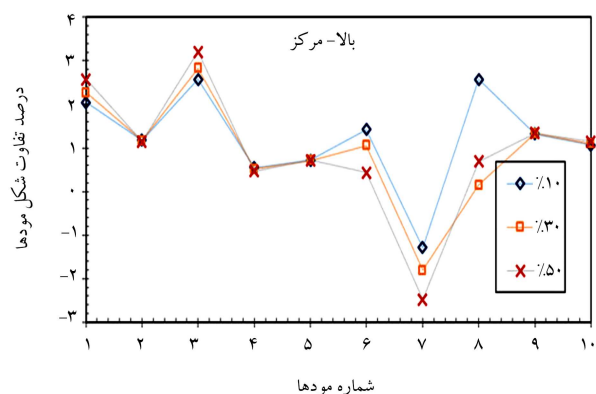
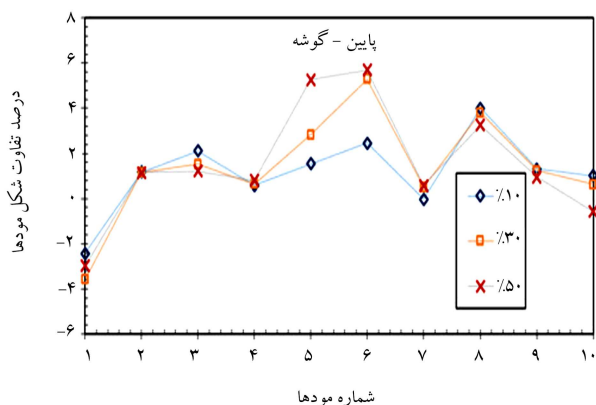
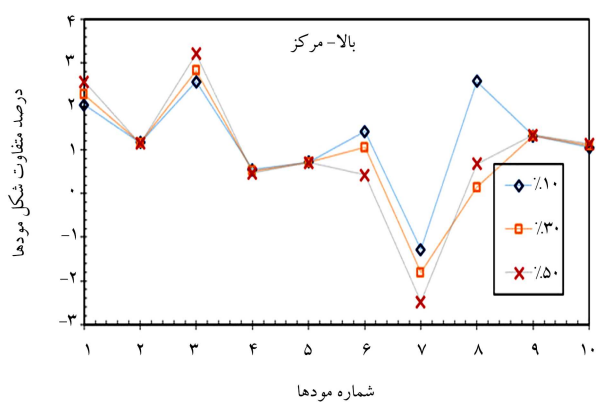
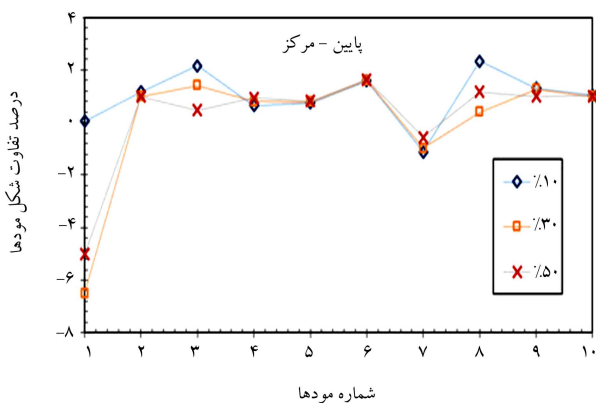
در شکل ۷ نیز، که مربوط به آسیب های اتفاق افتاده در تراز میانی سد است، ملاحظه می شود که کاهش مدول سختی سد در نقاط مرکزی به میزان ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد بیشینه، توانسته است به ترتیب تغییرات بسامدی ۰/۰۲۵، ۰/۰۰۹ و ۰/۰۱۷ درصدی را در پی داشته باشد. و این در حالتی است که همین شدت های خرابی زمانی که در کناره های قوس و نقاط نزدیک به تکیه گاه سد قوسی اتفاق افتاده است، به مرتبه ی بالاتر و به مقداری در حدود ۰/۰۰۵، ۰/۰۱۷ و ۰/۰۳۲۵ درصد رسیده اند. همچنین مودهای ۲، ۴، ۷ و ۹ در خرابی میانی و مرکزی و مودهای ۴، ۶ و ۷ نیز در خرابی میانی و گوشه، بیشترین درصد تغییرات بسامد را داشته اند. اگرچه مودهای ۳ و ۸ در حالت اول و همچنین مودهای ۳، ۸ و ۱۰ نیز در حالت دوم، کمترین تغییرات بسامدی را تجربه کرده اند.

در نهایت، نتایج نشان داده شده در شکل ۸ نیز حاکی از آن هستند که تغییرات ۱۰ بسامد ابتدایی سیستم وقتی خرابی در مرکز و پایین اتفاق افتاده است، توانسته اند به بیشینه درصد های ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۶۵ و ۰/۰۱۳ برسند؛ در حالی که در مورد آسیب های موجود در گوشه ها و پایین سد، اعداد مذکور افزایش یافته (به خصوص در سطح خرابی ۵۰٪) و به حدود ۰/۰۰۴، ۰/۰۱۴ و ۰/۰۲۵ درصد رسیده اند. همچنین مودهای ۷ و ۹ به ترتیب بیشترین تغییرات و مودهای ۱، ۳، ۵ و ۱۰ کمترین تغییرات بسامدی در خرابی پایین - مرکز را داشته اند. وقتی محل خرابی در پایین و مرکز بوده است، بیشترین حساسیت در مودهای ۷ و ۹ و کمترین نیز در مودهای ۱، ۳، ۵ و ۶ مشاهده می شود.

## ۲.۶. تغییرات شکل - مودها

بعد از مطالعه ی تغییرات بسامدهای طبیعی سیستم در اثر وجود خرابی، در بخش حاضر به بررسی آثار آسیب های سازه ای با شدت های مختلف و در محل های گوناگون بر روی شکل مودهای ارتعاشی سیستم پرداخته شده است. در این حالت، با توجه به نتایج جدول ۴، پنج شکل مؤثر مودی در جهت X و پنج شکل مودی مؤثر در جهت Y، مطابق شکل ۹ انتخاب شده اند.

بر خلاف حالت قبل، که اختلاف بسامدی از روی یک کمیت اسکالر در هر مود تعیین می شد، در این حالت پارامتر مورد نظر (شکل مود)، ماهیت برداری دارد و در واقع برای هر مود، آرایه یی از اعداد است، که در ارتفاع سازه تعریف شده اند. به همین منظور، در این جا برای ارزیابی اثر خرابی شکل مودهای سازه در مناطق مختلف بدنه ی سد، متوسط تغییرات شکل مودها در اثر شدت های آسیب مختلف ( $\bar{e}_{\phi}^i$ )، طبق روابط ۱۲ به عنوان یک شاخص خرابی تعیین می شود:



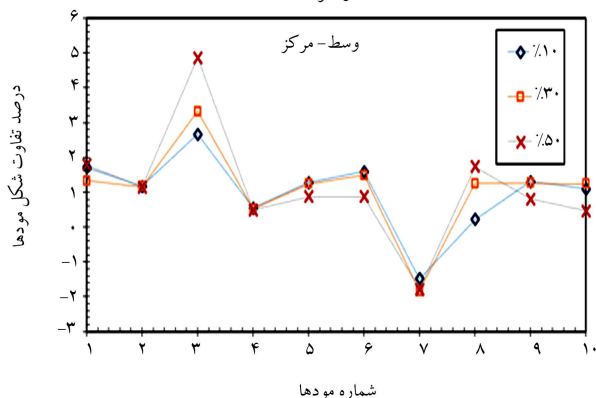
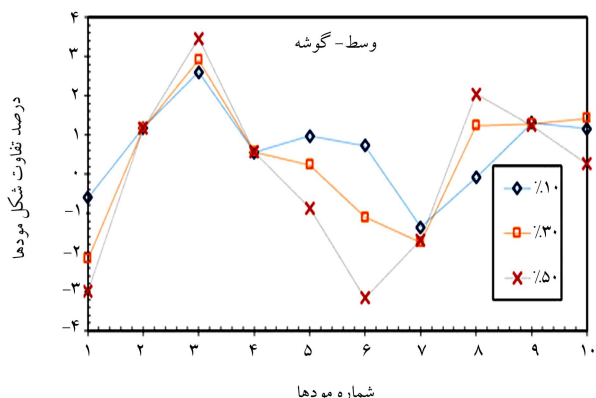
شکل ۱۰. تغییرات شکل مودها در اثر وجود خرابی با شدت‌های مختلف در بالای سد بتنی قوسی.

شکل ۱۲. تغییرات شکل مودها در اثر وجود خرابی با شدت‌های مختلف در پایین سد بتنی قوسی.

مودهای ۲، ۴، ۵، ۹ و ۱۰ بوده است. این در حالی است که در خرابی‌های مربوط به گوشه و بالا، تغییرات بیشینه‌ی شکل‌های مودی مربوط به مودهای ۱، ۳ و ۷ بوده و کمینه‌ها نیز در مودهای ارتعاشی ۲ و ۴ تا مودهای ۶، ۹ و ۱۰ رخ داده‌اند. همچنین نقطه‌ی بالای سد به عنوان نقطه‌ی مینا انتخاب شده است.

مطابق نتایج مربوط به خرابی‌های اتفاق افتاده در ارتفاع میانی از سد، در مرکز قوس و همچنین در گوشه‌ها در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، که در گراف سمت راست، آسیب‌های سازه‌یی ایجاد شده در مرکز قوس در تراز میانی به ازاء سه سطح خرابی ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد به ترتیب به میزان بیشینه‌ی تغییرات ۲/۶۷، ۳/۳۲ و ۴/۸۷ درصد در شکل مودها را در پی داشته است. به طوری که شکل مودهای ۳، ۵، ۶، ۸ و ۱۰ بیشترین و شکل مودهای ۲، ۴، ۷ و ۹ کمترین حساسیت نسبت به خرابی را نشان داده‌اند. در نمودار سمت چپ از شکل ۱۱، نیز درصد تغییرات شکل مودی نسبت به حالت مرکزی مشاهده می‌شود، که در این حالت، بیشینه‌ی تغییرات شکل مودی در مودهای ۱، ۵، ۶، ۸ و ۱۰ به وقوع پیوسته است. در حالی که کمینه‌ی تغییرات شکل مودی مربوط به مودهای ۲، ۴، ۷ و ۹ بوده است.

مطابق نمودار سمت راست در شکل ۱۲، نیز که مربوط به خرابی‌های اتفاق افتاده در قسمت پایین و گوشه‌ی (نزدیک به تکیه‌گاه) سد قوسی است، مشاهده می‌شود که بیشینه‌ی تغییرات نسبی در شکل مودها به ازاء سه سطح خرابی منظور شده، به ترتیب در حدود ۱/۵۳، ۲/۸۳ و ۵/۲۷ درصد است. مودهای ۱، ۳ و ۸ نیز بیشترین حساسیت و مودهای ۲، ۴، ۵، ۶، ۷ و ۱۰ نیز کمترین حساسیت مود شکل‌ها نسبت به خرابی در نواحی مذکور را نشان می‌دهند. همچنین در نمودار سمت چپ در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود در هنگامی که خرابی‌ها در نواحی پایین



شکل ۱۱. تغییرات شکل مودها در اثر وجود خرابی با شدت‌های مختلف در تراز میانی سد بتنی قوسی.

و به ازاء تمام محل‌های خرابی، مقادیر کوچک‌تر از ۲٪ را به ازاء تمام مودهای مؤثر ارتعاشی نشان می‌دهند. همچنین، با افزایش شدت آسیب‌ها برای سطوح خرابی متوسط (II) و شدید (III)، بیشینه‌ی میزان تغییرات نسبی بسامدی سیستم به ترتیب به ازاء تمامی محل‌های خرابی، برابر ۷ و ۸ درصد را نشان می‌دهند.

• با در نظر گرفتن حساسیت شماره‌ی مودهای ارتعاشی نسبت به هر دو معیار تغییرات بسامدی و شکل مودی نیز با نگاه کلی به نتایج به دست آمده، ملاحظه می‌شود که نظم خاصی در مورد شماره‌ی مودهایی که مقادیر بیشینه و کمینه را داشته‌اند، وجود ندارد. به عبارت دیگر، الگوی خاصی در این حالت بر حسب شماره‌ی مودها وجود نداشته است، که این موضوع می‌تواند از لحاظ پیدا کردن محل خرابی از روی الگوهای مختلف ذکر شده (بر حسب محل‌های متفاوت آسیب در بدنه‌ی سد) در روش‌های عملی مفید واقع شود.

• در نهایت با مقایسه‌ی کلی بین تمام نتایج حاصل شده، مشاهده می‌شود که خرابی‌های اتفاق افتاده در گوشه‌های قوس نسبت به مرکز قوس (خصوصاً وقتی شاخص خرابی بر حسب شکل مود تعریف می‌شود)، تأثیر بیشتری در تغییر در خصوصیات مودال سیستم دارند.

و مرکزی سد بوده‌اند، درصد تغییرات در شکل مودها نسبت به حالت قبل کاهش یافته و برای شدت‌های خرابی در نظر گرفته شده به ترتیب به میزان بیشینه‌ی حدود ۱۸/۲، ۵/۶ و ۱/۵ درصد رسیده است. مودهای ۵، ۶ و ۱۰ نیز در این حالت بیشترین تأثیر را از خرابی پذیرفته‌اند، ولی مودهای ۲، ۴، ۸ و ۹ کمترین تغییرات در اثر خرابی در شکل مودها را از خود بروز داده‌اند.

## ۷. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، اثر وجود سه سطح از آسیب‌های سازه‌ی در محل‌های مختلف از بدنه‌ی سد قوسی در پارامترهای مودال سیستم بررسی و با تعریف دو اندیس خرابی بر مبنای تغییرات بسامد و همچنین شکل مود برای ۱۰ مود ارتعاشی ابتدایی سازه، آثار خرابی در رفتار دینامیکی سیستم‌های مذکور مطالعه شده است. به طور کلی مهم‌ترین یافته‌های به دست آمده را می‌توان در قالب این موارد خلاصه کرد:

• اثر خرابی‌های کوچک (سطح خرابی I) در بسامدهای سیستم، بسیار ناچیز است

## پانویس‌ها

1. basic vibration methods
2. Rytter
3. Cawley & Adams
4. Stubbs & Osegueda
5. West
6. modal assurance criterion
7. Pandey
8. Monte-Carlo
9. surrogate
10. enhanced ideal gas molecular movement
11. Alves & Hall
12. Pacoima
13. system identification
14. Su & Wu
15. wavelet network
16. hidden layer
17. stationary wavelet transformation
18. MATLAB
19. Lin
20. ant colony
21. Cheng
22. ambient vibration testing
23. Kernel principal
24. Millillo
25. Pertusillo
26. synthetic operator radar
27. Zhu
28. modal strain energy
29. Chen
30. hydro-structures
31. modal assurance criterion
32. modal kinetic energy criterion
33. fisher information matrix
34. root-mean square error criterion
35. Hilbert-Hung
36. Bo-Wen Shi
37. Zhang
38. Gomes

39. fisher information matrix firefly algorithm
40. frequency-based damage detection
41. modal shape-based damage detection
42. Hellgren
43. Maxime Peeters
44. ABAQUS
45. modal participating mass ratio

## منابع (References)

1. Army Corps of Engineers, U.S. "Distribution restriction statement approved for public release: distribution is unlimited", (1994).
2. Pedro, J.O. "arch dams designing and monitoring for safety", *Springer-Verlag Wien*, 367, pp.654-671 (1999).
3. USBR, "Design of Arch Dams", (1977).
4. Choi, Kyung K. and Nam-Ho Kim. "Structural sensitivity analysis and optimization 1: linear systems", *Springer Science & Business Media*, **125**, pp.751-769 (2004).
5. Doebling, S.W., Farrar, C.R. and Prime, M.B. "A summary review of vibration-based damage identification methods", *Shock Vib. Dig.*, **30**(2), pp. 91-105 (1998).
6. Rytter, A. "Vibrational based inspection of civil engineering structures", *Dept. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University* (1993).
7. Chang, P.C. and Liu, S.C. "Recent research in nondestructive evaluation of civil infrastructures", *J. Mater. Civ. Eng.*, **15**(3), pp. 298-304 (Jun 2003).
8. Jafarkhani, R. and Masri, S.F. "Finite element model updating using evolutionary strategy for damage detection", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **26**(3), pp. 207-224 (2011).
9. Kim, H. and Melhem, H. "Damage detection of structures by wavelet analysis", *Eng. Struct.*, **26**(3), pp. 347-362 (2004).

10. Beskhyroun, S., Wegner, L.D. and Sparling, B.F. "New methodology for the application of vibration-based damage detection techniques", *Struct. Control Heal. Monit.*, **19**(1), pp. 88-106 (2011).
11. Cawley, P. and Adams, R.D. "The location of defects in structures from measurements of natural frequencies", *J. Strain Anal. Eng. Des.*, **14**(2), pp. 49-57 (1979).
12. Stubbs, N. and Osegueda, R. "Global non-destructive damage evaluation in solids", *Int. J. Anal. Exp. Modal Anal.*, **5**(2), pp. 67-79 (1990).
13. West, W.M. "Illustration of the use of modal assurance criterion to detect structural changes in an orbiter test specimen", *Proceedings in Air Force Conference on Aircraft Structural Integrity* (1986).
14. Marwala, Ts. "Finite-element-model updating using computational intelligence techniques: applications to structural dynamics", *Springer*, **153**, pp. 978-1 (2010).
15. Pandey, A., Biswas, M. and Samman, M. "Damage detection from mode changes in curvature", *J. Sound Vib.*, **145**(2), pp. 321-332 (1991).
16. Jaishi, B. and Ren, W. " "Damage detection by finite element model updating using modal flexibility residual", *Journal of Sound and Vibration*, **290**(1-2), pp. 369-387 (2006).
17. Pandey, A.K. and Biswas, M. "Damage detection in structures using changes in flexibility", *J. Sound Vib.*, **169**(1), pp. 3-17 (Jan 1994).
18. Ghasemi, M.R., Ghiyasi, R. and Varaei, H. "Probability-Based Damage Detection of Structures Using Kriging Surrogates and Enhanced Ideal Gas Molecular Movement Algorithm", *springer international publishing*, pp.628-636 (Apr 2017).
19. Alves, S.W. and Hall, J.F. "System identification of a concrete arch dam and calibration of its finite element model", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **35**(11), pp. 1321-1337 (Apr 2006).
20. Su, H. and Wu, Z. "Identification model for dam behavior based on wavelet network", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **22**(6), pp. 438-448 (2007).
21. Lotfollahi Yaghin, M.A, Shamsaii, A. and Hesari, M.A. "Using static wavelet transform to detect cracks in arched concrete dams, under frequency analysis with FEM", *World Applied Sciences Journal*, **3**(4), pp.691-704 (2008).
22. Mofidi, A.A and Seyedpour, S.M. "Identification of failure in concrete arched dams using multi-stage differential evolution optimization algorithm and changes in natural frequencies of the structure", *In the 8<sup>th</sup> National Congress of Civil Engineering* (1393).
23. Lin, P., Liu, X., Chen, H. and et al. "Ant colony optimization analysis on overall stability of high arch Dam basis of field monitoring", *Scientific World Journal 2014*, **109**, pp.325-337 (2014).
24. Cheng, L., Yang, J., Zheng, D. and et al. "The health monitoring method of concrete dams based on ambient vibration testing and kernel principle analysis", *Shock and Vibration*, **2015**(5), pp. 1-11 (2015).
25. Milillo, P., Perissin, D., Salzer, J.T. and et al. "Monitoring dam structural health from space : Insights from novel InSAR techniques and multi-parametric modeling applied to the Pertusillo dam Basilicata , Italy", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **52**(2016), pp. 221-229 (2016).
26. Zhu, K., Gu, C., Qiu, J. and et al. "Determining the optimal placement of sensors on a concrete arch dam using a quantum genetic algorithm", *Journal of Sensors 2016*, **205**, pp.425-441 (2016).
27. Chen, B., Huang, Z., Zheng, D. and et al. "A hybrid method of optimal sensor placement for dynamic response monitoring of hydro-structures", *International Journal of Distributed Sensor Networks*, **13**(5), pp.15-50 (2017).
28. Esmailzadeh, S., Ahmadi, H. and Hosseini, S.A. "Damage detection of concrete gravity dams using hilbert-huang method", *Journal of Applied Engineering Sciences*, **8**(2), pp. 7-16 (2018).
29. Shi, B.W., Li, M.C., Song, L.G. and et al. "Deformation coordination analysis of CC-RCC combined dam structures under dynamic loads", *Water Science and Engineering*, **13**(2), pp. 162-170 (2020).
30. Zhang, Y., Feng, X., Fan, Z. and et al. "Experimental investigations on seismic damage monitoring of concrete dams using distributed lead zirconate titanate sensor network", *Advances in Structural Engineering*, **20**(2), pp. 170-179 (2017).
31. Hamidian, D., Salajegheh, E. and Salajegheh, J. "Irregular continuum structures damage detection based on wavelet transform and neural network", *KSCE Journal of Civil Engineering*, **22**(11), pp. 4345-4352 (Nov 2018).
32. Gomes, G.F. and Pereira, J.V. "Sensor placement optimization and damage identification in a fuselage structure using inverse modal problem and firefly algorithm", *Evolutionary Intelligence*, **3**, pp. 1-21 (Mar 2020).
33. Chopra, A.K. "Earthquake analysis of concrete dams: factors to be considered", *In 10<sup>th</sup> U.S. National Conference on Earthquake Engineering* (2014).
34. Peeters, Maxime "Theoretical and experimental modal analysis of nonlinear vibrating structures using nonlinear normal modes", *Ph.D. Thesis, University of Liège* (2010).
35. National Research Council, "Earthquake engineering for concrete dams: design, performance, and research needs", *National Academies Press*, **7**, pp.123-139 (1991).
36. Wang, B.S. and He, Z.C. "Crack detection of arch dam using statistical neural network based on the reductions of natural frequencies", *J. Sound Vib.*, **302**(4-5), pp. 1037-1047 (2007).
37. Hellgren, R. "Influence of fluid structure interaction on a concrete dam during seismic excitation: parametric analyses of an arch dam-reservoir-foundation system", *Thesis for: Master, KTH Royal Institute of Technology* (2014).