

تعیین محل بهینه سنسورها به کمک معیار اطمینان مودی در شناسایی پارامترهای مودال سدهای بتنی وزنی

سجاد اسماعیلزاده^۱

حسن احمدی*^۲

عباس حسینی^۳

چکیده

تعیین محل بهینه سنسورها به منظور شناسایی پارامترهای مودال، خصوصاً در سازه‌های عظیم مانند سدها، یکی از موضوعات عملی و پرکاربرد در تشخیص خرابی و پایش سلامت سازه‌ها است. هدف اصلی این تحقیق دستیابی به بیشترین اطلاعات مودال از پاسخ دینامیکی (اشکال مودی) یک سد بتنی وزنی به وسیله مینیمم کردن المان‌های غیرقطری ماتریس معیار اطمینان مودی است. برای این منظور در گام اول، یک مدل اجزاءمحدود از سد بلواستون برای آنالیز مودال در نظر گرفته شده و مودهای مؤثر در تحلیل ارتعاشی بر مبنای نسبت‌های مشارکت جرمی مودال، تعیین می‌گردند. سپس، با تعریف سه سناریو برای محل قرارگیری سنسورها (در بالا-دست، مرکز و پایین-دست سد) از میان نقاط کاندیدا شده، بهترین نقاط بر مبنای میزان استقلال شکل مودها از یکدیگر تعیین می‌شوند. نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها نشان می‌دهند که ارتفاع محل بهینه سنسورها (با فرض داشتن یک سنسور بر روی تاج) در سناریوهای مختلف تقریباً یکسان بوده و در ارتفاع یک سوم میانی سد قرار دارند. در مجموع، با توجه محدودیت‌های عملی (عدم دسترسی) و محدودیت‌های اقتصادی (محدودیت در تعداد سنسور) نتایج به دست آمده می‌تواند به طور مؤثری در ابزاربندی سدها به کار گرفته شود.

واژه‌های کلیدی

محل بهینه سنسورها، معیار اطمینان مودی، پارامترهای مودال، سد بتنی وزنی.

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی عمران-آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی عمران، تهران، ایران.

^۲ استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد رودهن، گروه مهندسی عمران، تهران، ایران hgahmadi@riau.ac.ir

^۳ استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی عمران، تهران، ایران.

مقدمه

سدهای بتنی وزنی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ابر سازه‌های موجود در مهندسی عمران، مانند تمام سازه‌های دیگر، در معرض خرابی و صدمه دیدن در طول عمر می‌باشند. احتمال این خرابی‌ها با افزایش عمر سازه و عوامل محیطی مانند زلزله افزایش می‌یابد. در بسیاری از موارد، خرابی‌های جزئی در داخل سازه ممکن است به تدریج افزایش یافته و منجر به خرابی کل سازه گردد که می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیر جانی و مالی فراوانی را در پی داشته باشد (دارما^۱، ۲۰۱۳). به‌طور مثال، جلوگیری از رشد ترک‌های جزئی یکی از عواملی است که باید حتماً در سازه‌های بتنی مورد توجه باشد؛ زیرا رشد ترک یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد خرابی در این نوع سازه‌ها بوده است (تأمین^۲، ۲۰۱۰)؛ بنابراین، مهندسی همواره به دنبال این موضوع هستند که با اعمال روش‌هایی با تشخیص به موقع خرابی‌های کوچک و اعمال استراتژی‌هایی برای تعمیر سازه، از خرابی کلی سازه جلوگیری کنند.

به‌طور کلی در مهندسی سازه، خرابی به‌صورت تغییرات روی داده در مواد و هندسه سازه است که عملکرد سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ و فرایند اجرای تشخیص خرابی و تعیین استراتژی‌های لازم در سازه، به‌عنوان پایش سلامت سازه‌ای (SHM)^۳ شناخته می‌شود (داسون^۴، ۱۹۷۶). این موضوع بحث روز بسیاری از رشته‌های مهندسی (عمران، مکانیک و هوافضا) است و توسط محققین زیادی برای سنجش سلامت سازه‌ها و اطمینان از عملکرد مناسب آن‌ها به کار گرفته می‌شود (پاوار^۵، ۲۰۱۰). یک موضوع اساسی در این رابطه، شامل تشخیص خرابی از روی مجموعه‌ای از وسایل اندازه‌گیری (همان سنسورها) است. علاوه بر مشکل وجود نویز^۶ در سنسورها، معمولاً در عمل به علت محدودیت در منابع مالی و تجهیزات تعداد سنسورها نیز محدود است. همچنین، عدم دسترسی به برخی نقاط سازه برای برداشت

اطلاعات نیز مشکل دیگری است که در عمل وجود دارد (رایش و لیسکای^۷، ۲۰۱۲)؛ بنابراین، شناخت محل‌های بهینه برای نصب تعداد محدودی از سنسورها به‌منظور کسب بیشترین اطلاعات از پاسخ سیستم‌ها برای تشخیص خرابی در آن‌ها موضوعی بسیار کاربردی و مهم است.

روش‌های تشخیص خرابی در مجموع به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند. (۱) روش‌های شناسایی دینامیکی با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایش‌های دینامیکی؛ (۲) روش‌های شناسایی استاتیکی با استفاده از داده‌های آزمایش‌های استاتیکی (باختری نژاد و همکاران^۸، ۲۰۰۵). با این وجود، در کارهای عملی شیوه تعیین پارامترهای سازه با استفاده از داده‌های دینامیکی (در حالت کلی این داده‌ها می‌توانند شامل جابه‌جایی، سرعت یا شتاب باشند، ولی در کل این تحقیق منظور از سنسورها، وسایل اندازه‌گیری جابه‌جایی در سازه است) که به علت طبیعت غیر مخرب^۹ بودنشان، در مقایسه با روش‌های استاتیکی بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. در روش‌های دینامیکی نیز عموماً از شیوه شناسایی پارامترهای مودال^{۱۰} استفاده می‌شود که بر روی پارامترهایی نظیر شکل مود، فرکانس و میرایی متمرکز است.

اوینس^{۱۱} در همین راستا نقص‌های روش شناسایی مودال را بدین صورت نقل کرده است (اویونس، ۲۰۰۰؛ اویونس و ساندرز^{۱۲}، ۱۹۸۶؛ هو^{۱۳} و اویونس، ۲۰۰۰؛ لیون^{۱۴} و اویونس، ۱۹۸۸):

- از لحاظ محاسباتی هزینه‌بر بودن در تشخیص، زیرا شامل فرایندهای بهینه‌سازی می‌باشند.
- آسیب‌پذیر بودن در برابر اضافه کردن نویز
- صرفاً مناسب برای میرایی کم و سازه‌هایی با رفتار خطی

۷. Raich and Riszka

۸. Bakhtari-Nejad

۹. non-destructive

۱۰. Modal parameters identification

۱۱. Ewins

۱۲. Saunders

۱۳. Ho

۱۴. Lieven

۱. Damage detection

۲. Tamin

۳. Structural health monitoring

۴. Dawson

۵. Pawar

۶. Noise

امواج (فلین^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۱) و بررسی پایداری شیب‌های خاکی (تانگ^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۰) توسط محققین مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

در همین زمینه، گوپتا^{۱۲} و همکارانش، معیارهای بهینه‌سازی مختلف برای جانمایی محل حس‌گرهای پیزوالکتریک^{۱۳} بر روی سازه‌های هوشمند را به صورت جامع مورد توجه قرار دادند. برانت^{۱۴} و همکاران نیز با استفاده از الگوریتم ژنتیک، محل بهینه سنسورها برای شبیه‌سازی کنترل فعال سازه‌های صفحه‌ای با تکیه‌گاه‌های سازه‌ای را مورد مطالعه قرار دادند. همچنین در تحقیق دیگری فلین و تد^{۱۵}، یک روش بایسین^{۱۶} را برای جانمایی بهینه سنسورها در پایش سلامت سازه‌ای با کاربرد کنترل فعال سازه‌ها، به کار گرفته شده است. آن‌ها یک معیار بهینه‌سازی کلی^{۱۷} را با استفاده از تئوری خرابی به دست آوردند و به کمک آن با مینیمم کردن تابع هدف به پیکربندی بهینه سنسورها پرداختند (فلین و تد^{۱۸}، ۲۰۱۰).

همان‌طور که می‌دانیم، هرچه ابعاد سازه بزرگ شود و به دنبال آن درجات آزادی سازه افزایش یابند، محاسبه محل بهینه برای سنسورها به منظور تعیین پارامترهای مودال دشوارتر و وقت‌گیرتر می‌گردد (لانجیون^{۱۹} و همکاران، ۲۰۱۳). به عبارت دیگر، در سازه‌های عظیم، جمع‌آوری و تحلیل تعداد زیادی از داده‌ها عملاً خیلی هزینه‌بر خواهد بود. به همین دلیل محققین مختلف کوشیده‌اند تا با اعمال تکنیک‌ها و روش‌های گوناگون محل بهینه سنسورها در سازه‌های خیلی بزرگ را به خوبی تخمین بزنند. به طور مثال، لیان^{۲۰} و همکاران بهینه‌یابی محل سنسورها در سازه‌های عظیم را مورد مطالعه قرار دادند و بر مبنای بهینه‌سازی کلی مسئله، یک تابع برازنده^{۲۱} بر حسب توزیع سنسورها، ماتریس

اگرچه، استفاده از اطلاعات مودال دارای مزایای زیر نیز هست (مارولا^۱، ۲۰۱۰):

- سادگی برای شناسایی خرابی
 - مناسب برای تشخیص خرابی‌های بزرگ
 - تأکید بر روی جنبه‌های اصلی دینامیکی سازه
- مطالعات اولیه در سنجش پارامترهای مودال سازه، تغییرات فرکانس طبیعی را به عنوان معیار خرابی در نظر می‌گرفتند. در همین مورد، فارر^۲ و همکاران تغییر در فرکانس طبیعی را به منظور شناخت خرابی پل به کار گرفتند و اعلام کردند که خرابی‌های کوچک را نمی‌توان وسط تغییر در فرکانس طبیعی سیستم تشخیص داد (فارر و جرگی^۳، ۱۹۹۸). همچنین، برای بهبود این تکنیک پیشنهاد شده است که در کاربردهای عملی آزمایش‌ها در یک محیط کنترل شده (جایی که عدم قطعیت‌های اندازه‌گیری حداقل باشند) صورت بگیرد (مارولا، ۲۰۱۰). در دسته دیگری از روش‌ها، مانند آنچه در این تحقیق فرض می‌شود، تغییرات در اشکال مودی یا مشتق آن‌ها به عنوان نشانه خرابی در سازه در نظر گرفته می‌شوند. در این زمینه، معیار اطمینان مودی (MAC)^۴ یک روش شناخته شده است که در آن، درجه وابستگی مودها با یکدیگر مورد توجه قرار می‌گیرد (آلمنج^۵، ۲۰۰۳).

تعیین محل بهینه سنسورها برای دریافت بیشترین اطلاعات از سیستم، به علت کاربرد بالایی که در سیستم‌های مهندسی دارد در گستره عظیمی از رشته‌ها با به کارگیری روش‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد و تاکنون در سیستم‌های مختلفی از جمله تشخیص خرابی در پل‌های کابلی (جانگ و همکاران^۶، ۲۰۱۰)؛ شناسایی خستگی در سازه‌های فلزی (کاستاز^۷، ۲۰۱۱)؛ تخمین پارامترهای ریخته‌گری (مچرزاک و منداکیوویز^۸، ۲۰۱۰)؛ سیستم‌های انتقال آب (درینی و همکاران^۹، ۲۰۱۰)؛ سازه‌های هدایت-

۱۰. Flynn

۱۱. Tang

۱۲. Gupta

۱۳. piezoelectric

۱۴. Braunt

۱۵. Flynn and Todd

۱۶. Bayesian

۱۷. Global Optimization Criterion

۱۸. flynn and Todd

۱۹. Longjun

۲۰. Lian

۲۱. Fitness function

۱. Marwala

۲. Farrar

۳. Farrar and Jauregui

۴. modal-assurance- criterion

۵. Allemang

۶. Jang

۷. Costas

۸. Majchrzak and Mendakiewicz

۹. Dorini

مواد و روش‌ها

همان‌طور که در قسمت قبل اشاره شد، با توجه به محدودیت‌های موجود در اندازه‌گیری پاسخ‌های دینامیکی سیستم‌هایی با درجات آزادی بالا مانند سدهای بتنی، در صورتی که داده‌های موردنیاز برای شناسایی پارامترهای سازه به‌درستی صورت نگیرد، تشخیص سلامت سیستم سازه‌ای دچار مشکل می‌گردد. در این قسمت به بحث در مورد انتخاب نقاط اندازه‌گیری در یک آزمایش ارتعاشی می‌پردازیم. به‌طور مثال فرض کنید نیاز به اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های ارتعاشی یک سازه برای تعیین مودهای ارتعاشی آن وجود دارد. به‌طور معمول با استفاده از تعداد محدودی از سنسورها در محل‌هایی که آن‌ها نصب می‌گردند این کار انجام می‌گردد. حال، سؤالی که در اینجا مطرح است این است که چطور می‌توان با انتخاب بهترین محل برای جایگذاری سنسورها به بیشترین اطلاعات رسید (با داشتن محدودیت در تعداد و همچنین محل‌های اندازه‌گیری). به همین منظور، تاکنون روش‌ها و تکنیک‌های متعددی توسط محققین مختلف برای جانمایی بهینه سنسورها در سیستم‌های سازه‌ای مختلف به‌منظور دریافت بیشترین اطلاعات از سیستم به‌کار گرفته شده‌اند. به‌طور کلی، روش‌های به‌کار گرفته‌شده برای تعیین محل بهینه سنسورها برای شناسایی پارامترهای مودال را می‌توان به‌صورت زیر طبقه‌بندی کرد:

- روش‌های مبتنی بر کاهش درجات آزادی سازه
- روش‌های مؤثر غیر وابسته
- روش‌های مبتنی بر ماتریس انرژی

همان‌طور که در قسمت بعدی ذکر خواهد شد، باید توجه داشت که روش‌های بالا در بسیاری از اوقات دارای اشتراکاتی نیز هستند و به‌هم وابستگی‌هایی نیز دارند و کاملاً از هم مستقل نیستند (سایتو^۴، ۲۰۰۹).

با توجه به اینکه با افزایش درجات آزادی، بر پیچیدگی حل افزوده‌شده و مدت‌زمان تحلیل افزایش می‌یابد، روش‌های مبتنی بر کاهش درجات آزادی سازه^۵، به دنبال آن هستند

اطلاعات سازه و تعامد مود شکل‌ها معرفی نمودند. در مطالعه دیگری نیز، با استفاده از الگوریتم^۱ IMPSO و آزمایش مودال بر روی سد قوسی لاکسیوا^۲ تحت ارتعاش محیطی شبیه‌سازی‌شده، جانمایی بهینه سنسورها در سازه‌های بزرگ بررسی گردید و نتایج نشان‌دهنده این موضوع بود که تابع برازنده انتخابی با دقت مناسب می‌تواند فرکانس‌ها و شکل مودهای چندبعدی را تشخیص دهد (لانجیون و همکاران، ۲۰۱۳). به‌طور کلی کارهای صورت گرفته در زمینه پایش سلامت سدها عمدتاً شامل پژوهش‌های آزمایشی و اندازه‌گیری‌های انجام‌شده بر روی سازه است. به‌طور مثال، آلبا^۳ و همکاران با اندازه‌گیری جابه‌جایی یک سد قوسی توسط حس‌گرهای غیر-تماسی، عوامل افزایش بار آب و تغییرات درجه حرارت را بررسی نمودند. در این تحقیق، جابه‌جایی‌های به‌دست‌آمده با اندازه‌گیری‌های ناشی از مختصات سنج نصب‌شده بر روی مقطع مرکزی سد، به‌منظور اعتبارسنجی به‌کار گرفته شدند و مطابقت خوبی بین نتایج حاصل گردید (آلبا و همکاران، ۲۰۰۸).

درنهایت، با توجه به اینکه عملکرد ایمن سدهای بتنی وزنی از اهمیت بالایی برخوردار است و در عمل با توجه به محدودیت‌های موجود در ابزاربندی و نصب سنسورها، پارامترهای مودال سازه برای تعیین عملکرد سازه و تشخیص خرابی در آن، باید به‌درستی تعیین شوند. با نظر به تحقیقات گذشته به نظر می‌رسد که این بحث با توجه به پیچیدگی‌های موجود در مدل‌سازی و تحلیل سدهای بتنی وزنی، مغفول مانده است. از طرفی، اکثر کارهای صورت گرفته در زمینه شناسایی مودال سازه‌های بزرگ مانند سدها به اندازه‌گیری‌های آزمایشی پرداخته‌اند؛ بنابراین، در این تحقیق، روش MAC (که تاکنون عمدتاً بر روی سازه‌های ساختمانی، نظیر تیر و قاب و پل‌ها به‌کار گرفته شده است) برای تشخیص محل بهینه سنسورها، با توجه به محدودیت‌های عملی در به‌کارگیری وسایل اندازه‌گیری، به‌منظور شناسایی پارامترهای مودال سدهای بتنی وزنی به‌کار گرفته می‌شود.

۱. integer-encoding multi-swarm particle swarm optimization
 ۲. Laxiwa
 ۳. Alba

۴. Saito

۵. Reduction of DOFs

$$\omega_{ss} = \sqrt{\frac{k_{ss}}{m_{ss}}} \quad (1)$$

که در آن، k_{ss} و m_{ss} به ترتیب نمایانگر سختی و جرمی قرار گرفته روی قطر اصلی هستند. در این روش پس از محاسبه ω_{ss} ها، بزرگ ترین مقدار آن ها (متناظر با درجه آزادی دارای اینرسی کم و سختی زیاد که مشارکت زیادی در حرکت سازه ندارد) و در هر گام تکراری حذف می گردد (سایتو، ۲۰۰۹).

موضوع پیدا کردن محل های قیدی بهینه برای بیشینه کردن فرکانس طبیعی اساسی^۸ یک سیستم نیز موضوع دیگری است که ارتباط معناداری با انتخاب بهینه درجات آزادی master در روش گویان دارد و می تواند در دسته بندی اول قرار گیرد. باید توجه داشت که مسئله پیدا کردن تعداد محل بهینه قیود به آسانی آنچه به نظر می رسد نیست و لازم است تا الگوریتم های ریاضی بهینه سازی با محاسبات سنگین در این مورد به کار گرفته شوند (ژو و ژانگ^۹، ۲۰۰۶). بدین ترتیب با یک مسئله بهینه سازی قطعی با پاسخ یگانه روبه رو نیستیم بلکه با یک مسئله بهینه یابی با تابع هدف نسبی و الگوریتم حل غیرقطعی روبه رو هستیم که منجر به دستیابی به پاسخ های متفاوت و در نتیجه مکان های متفاوت سنسورها برای یک سازه ی معین می شود.

روش های مؤثر غیر وابسته (EFI)^{۱۰} برای جایگذاری بهینه سنسورها نیز عموماً بر این اصل استوار هستند که تا حد امکان شکل مودهای اندازه گیری شده از هم مستقل باشند. روش های بسیار زیادی در این زمینه تاکنون به کار گرفته شده اند که یکی از معروف ترین آن ها تکنیکی است که بر مبنای ماتریس اطلاعات فیشر (FIM)^{۱۱}، مطابق رابطه (۲) تعریف می گردد (یدوایا^{۱۲}، ۱۹۹۴).

$$FIM = \phi^T \phi \quad (2)$$

ϕ در رابطه (۲) بیانگر ماتریس اشکال مودی سازه است.

تا با کاهش مؤثر درجات آزادی در نقاط خاصی از دامنه حل، بدون آنکه از دقت مسئله کاسته شود، تعداد معادلات مسئله را کاهش دهند. به طور کلی، موضوع کاهش و انتخاب درجات آزادی در مدل اجزا محدود سازه ها به تکنیک های مختلفی قابل اعمال است. به طور مثال کاهش درجات آزادی در وجه مشترک بین زیر سازه ها^۱ توسط براهیم^۲ و همکاران مورد بررسی قرار گرفته است؛ آن ها روشی برای کاهش درجات آزادی سازه قبل از مونتاژ کردن زیر سازه ها ارائه دادند که در آن از بردارهای پایه ای بر مبنای تجزیه آنالیز مودال ثانویه در مشارکت ماتریسی درجات آزادی موجود در وجوه مشترک و قطع مودها بر مبنای مقادیر تجزیه ای تکین استفاده شده است (براهیم، ۱۹۹۵). در تحقیق دیگری نیز، کاستونیر^۳ و همکاران، تکنیکی را برای کاهش تعداد درجات آزادی بین وجهی به وسیله اعمال آنالیز مودال و برش مودها به کمک تکنیک^۴ (CMS) را ارائه نموده اند (کاستانیر و پیرر^۵، ۲۰۰۱).

گروه دیگری از تکنیک های کاهش درجات آزادی که به روش های کاهش مرتبه گویان^۶ معروف هستند؛ با انتخاب درجات آزادی master و slave به کاهش مرتبه سیستم می پردازند. این کلاس از روش ها، نتایجی را ایجاد می کنند که تمایل دارند مسئله بهینه سازی شده از مسئله اصلی را حل کنند (سایتو، ۲۰۰۹). اولین بار الگوریتمی برای انتخاب درجات آزادی master به وسیله هنشل و انگ^۷ ارائه شد که در آن درجات آزادی master جایی انتخاب می شوند که اینرسی بالا و سختی کم است و به همین صورت درجات آزادی slave در نقاطی با اینرسی کم و سختی زیاد انتخاب می گردند (هنشل و انگ، ۱۹۷۵). این فرایند می تواند به صورت خودکار با محاسبه مقدار فرکانس رادیانی ω_{ss} ، طبق رابطه (۱) که با ثابت کردن تمام درجات آزادی به جز درجه آزادی نام تعریف می گردد، صورت پذیرد.

۸. constraint locations to maximize the fundamental natural frequency

۹. Zhu and W. Zhang

۱۰. Effective Independence method

۱۱. Fisher information matrix

۱۲. Udawadia

۱. Reducing the number of interface DOF

۲. Brahimi

۳. Castonier

۴. Component Mode Synthesis

۵. Castanier and Pierre

۶. Guyan

۷. Henshell and Ong

تعریف نمود که در ادبیات پژوهشی به روش KEMRO^۸ معروف است (ژو و آیو^۹، ۲۰۱۲).

$$KE = \phi^T M \phi \quad (۵)$$

این روش بسیار شبیه به روش FIM است، اما در آن به جای ماکزیمم کردن دترمینان ماتریس اطلاعات فیشر، ماکزیمم مقدار انرژی جنبشی محاسبه می‌گردد. از دیگر روش‌های موجود در این دسته‌بندی نیز می‌توان به روش‌های: ضرب برداری مقادیر ویژه؛ ضرب تجمعی شکل مودها؛ و محاسبه نقاط باقیمانده، اشاره نمود (رجوع شود به مئو و زومپانو^{۱۰}، ۲۰۰۵؛ لی^{۱۱} و همکاران، ۲۰۰۸؛ باکر^{۱۲}، ۲۰۰۸).

روش حداقل سازی ماتریس اطمینان مودی (Min- MAC)

معیار اطمینان مودی (MAC)^{۱۳} با توجه به درایه‌های غیرقطری ماتریس MAC تعریف می‌شود. هرچه مقدار بیشینه درایه غیرقطری ماتریس کمتر باشد نشان‌دهنده استقلال خطی بیشتر شکل مودهای برداشت شده است. این معیار که در این تحقیق نیز به کار گرفته شده است، بر مبنای سنجش مربع کسینوس زاویه بین مود شکل‌ها به صورت رابطه (۶) عمل می‌کند.

$$MAC_{ij} = \frac{(\phi_i^T \phi_j)^2}{(\phi_i^T \phi_i)(\phi_j^T \phi_j)} \quad (۶)$$

در رابطه (۶)، ϕ_i و ϕ_j به ترتیب شکل مود i ام و j ام سازه هستند.

مقدار واحد برای ماتریس MAC، نشان‌دهنده این است که دو مود کاملاً وابسته هستند؛ درحالی‌که مقدار صفر نشان‌دهنده غیر وابسته بودن دو مود است (مارولا، ۲۰۱۰). باید توجه داشت که ممکن است در عمل مقادیر غیرقطری ماتریس نزدیک واحد نباشند که علت آن احتمالاً در خطای روش اجزا محدود یا خطای موجود در اندازه‌گیری هست

اگر در رابطه (۲) دترمینان ماتریس فیشر صفر شود، یعنی ستون‌های ماتریس اطلاعات به صورت خطی به هم وابسته بوده‌اند؛ بنابراین هدف این روش، انتخاب بهترین درجات آزادی (برای جانمایی سنسورها) به صورتی است که دترمینان ماتریس فیشر ماکزیمم گردد و یک فرایند سعی و خطا را برای خارج نمودن درجات آزادی نیاز دارد (کامر^۱، ۱۹۹۱). همان‌طور که می‌دانیم، در این روش محل‌های کاندیدا شده برای جانمایی بهینه سنسورها بر مبنای مشارکت استقلالی آن‌ها با مود هدف، درجه‌بندی می‌گردند و محل‌هایی که کمترین درجه را به خود اختصاص داده‌اند به تدریج حذف می‌شوند. در همین رابطه می‌توان ماتریس تصویر تعامدی E^2 را به صورت رابطه (۳) برحسب ماتریس فیشر، تعریف کرد.

$$E = \phi(FIM)^{-1} \phi^T \quad (۳)$$

هر درایه قطری از ماتریس E بیانگر نسبت مشارکت درجه آزادی i ام در مرتبه^۳ این ماتریس است. به دلیل نامتغیر بودن^۴ این ماتریس، مرتبه ماتریس برابر جمع عناصر قطری روی آن می‌گردد و در نتیجه کار بر روی آن ساده‌تر می‌شود (کاسترو و فریسول^۵، ۲۰۱۳).

و در نهایت در دسته‌بندی سوم، روش‌های مبتنی بر انرژی، همان‌طور که از اسمشان مشخص است بر مبنای انرژی حاصل از شکل مودهای اندازه‌گیری شده از سیستم قرار دارند. به‌طور نمونه، در روش مرسوم به بهینه‌سازی مرتبه ماتریس انرژی (EMRO)^۶، الگوریتمی برای دستیابی به پیکربندی محل سنسورها به وسیله ماکزیمم کردن انرژی کرنشی سیستم (SE) طبق رابطه (۴) به کار گرفته می‌شود.

$$SE = \phi^T K \phi \quad (۴)$$

که در آن K ماتریس سختی سیستم را نشان می‌دهد (همز^۷، ۱۹۹۴).

مشابه روش EMRO، اگر از ماتریس جرم سیستم M استفاده شود، می‌توان رابطه (۵) را معادل با انرژی سیستم

۸. Kinetic energy matrix rank optimization
 ۹. Zhao, and Ou
 ۱۰. Meo and Zumpano
 ۱۱. Li
 ۱۲. Bakir
 ۱۳. Modal Assurance Criterion (MAC)

۱. Kammer
 ۲. orthogonal projection matrix
 ۳. Rank
 ۴. idempotent
 ۵. Castro and Friswell
 ۶. Energy matrix rank optimization
 ۷. Hemez

در مدل سازی اجزا محدود، خصوصیات مکانیکی مصالح بتن بدنه سد بلواستن مطابق مرجع (یانکی^۳ و همکاران، ۲۰۰۰) به صورت: وزن مخصوص برابر ۲۴/۸۳ کیلو نیوتن بر مترمربع؛ مدول ارتجاعی بتن برابر ۳۳/۵۵۸ گیگا پاسکال و همچنین ضریب پواسون ۰/۲۲۵ فرض شده اند.

علاوه بر این، در مدل سازی اندرکنش سد- مخزن فرض هایی به شرح زیر صورت گرفته اند:

(۱) دریاچه سد به صورت مستطیلی، با طول سه برابر ارتفاع سد (همان طور که توسط (بایرکتار^۴ و همکاران، ۲۰۱۰، توصیه شده است)؛

(۲) به منظور سهولت در مدل سازی، از ارتفاع آزاد^۵ مخزن دریاچه در مقابل با ارتفاع آب بالادست صرف نظر شده است، یعنی ارتفاع سد و مخزن در تحلیل سیستم یکسان است؛

(۳) نوع اندرکنش آب و سازه به صورت *tie* (که در آن گره های موجود در سطح مشترک دو محیط به هم مقید می شوند) در نرم افزار آباکوس مدل شده است (فائمیان^۶، ۲۰۰۰)؛

(۴) شرط مرزی انتهای-دور^۷ به صورت غیرانعکاسی فرض می شود، به عبارت دیگر امواج فشاری تولید شده در مخزن، پس از برخورد با انتهای دریاچه به داخل سیستم برنمی گردند (عالم باقری^۸، ۲۰۱۶).

(۵) فشار هیدرودینامیک در بالای دریاچه، با صرف نظر از امواج سطحی، صفر در نظر گرفته می شود.

(۶) فرض می گردد که در کف مخزن شرایط مرزی غیرجذب کننده^۹ وجود دارد (عالم باقری و سید کاظمی^{۱۰}، ۲۰۱۴).

(۷) وزن مخصوص و مدول بالک آب به ترتیب برابر ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۲/۲ گیگا پاسکال در نظر گرفته شده اند.

علاوه بر این، در مدل سازی اندرکنش سد و پی؛ فرض می شود که پی سد ناتراوا^{۱۱} و صلب بوده، هیچ گونه لغزشی بین سد و پی اتفاق نخواهد افتاد. در نهایت با فرض های

(کارن و دهرمان^۱، ۱۹۸۴). همچنین، به علت طبیعت کسری رابطه (۶) نحوه نرمال کردن اشکال مودی تأثیری بر مقدار این رابطه ندارد.

به طور کلی، برای محاسبه محل بهینه سنسورها با استفاده از معیار MAC، فرایند تشریح شده در زیر باید صورت بگیرد: (۱) تعدادی نقطه (به تعداد کمتر از تعداد کل سنسورها) به عنوان نقاط اولیه برای سنسورها انتخاب می شوند.

(۲) نقاط کاندیدا جدید برای محل بهینه سنسورها انتخاب می گردند و ماتریس MAC برای آن ها محاسبه می شود. در واقع با اضافه کردن نقاط کاندیدا به نقاط اولیه و محاسبه کسینوس زاویه بین دو بردار، ماتریس MAC به دست می آید؛ سپس، بزرگ ترین درایه غیرقطری مربوط به ماتریس مشخص شده و ذخیره می گردد.

(۳) گام های قبلی برای تمام نقاط منتخب تکرار می شوند تا بیشترین عناصر غیرقطری ماتریس ها همگی ذخیره شوند. پس از آن، از میان تمام عناصر غیرقطری محاسبه شده، کمترین مقدار شناسایی می شود. در این زمان باید تعیین شود که این مقدار مینیمم مربوط به کدام درایه بوده است؟ شماره درایه متناظر در این حالت محل سنسور بهینه را، بر مبنای بیشترین استقلال خطی شکل مودها، نشان می دهد. (۴) تکرار گام های ۲ و ۳ برای یافتن محل بهینه تمام سنسورها.

مدل سازی

در این تحقیق، سد بلواستن برای مدل سازی مسئله یافتن محل بهینه سنسورها در سدهای بتنی وزنی در نظر گرفته شده است. این سد در ایالت ویرجینیا غربی در کشور آمریکا در سال ۱۹۳۰ به منظور کنترل سیلاب و احداث نیروگاه برق-آبی ساخته شده است (USACE, 1995). طول کل تاج سد حدود ۶۲۹ متر و ارتفاع سد در بلندترین مقطع غیر سرریز شونده (همان طور که در شکل (۱) نمایش داده شده است) حدوداً برابر ۵۳ متر است (الینگود و تکی^۱، ۲۰۰۳). شکل (۱) هندسه بلوک شماره ۱۲ (بزرگ ترین مونولیت سد) را که در تحلیل استفاده می شود را نشان می دهد.

۳. Yankey

۴. Bayraktar

۵. free-board

۶. Ghaemian

۷. Far-end

۸. Alembagheri

۹. no absorbing boundary condition

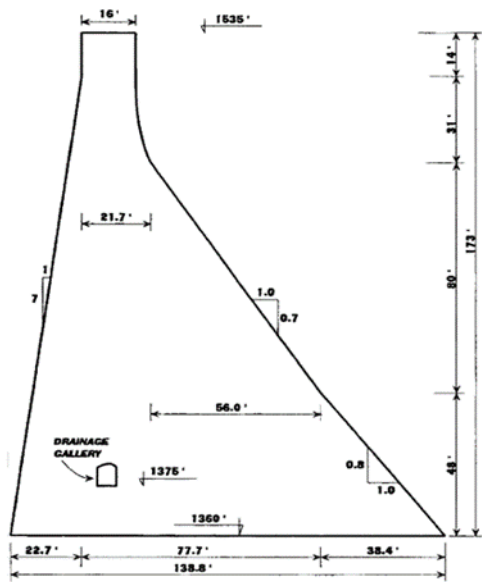
۱۰. lembagheri and Seyedkazemi

۱۱. impervious

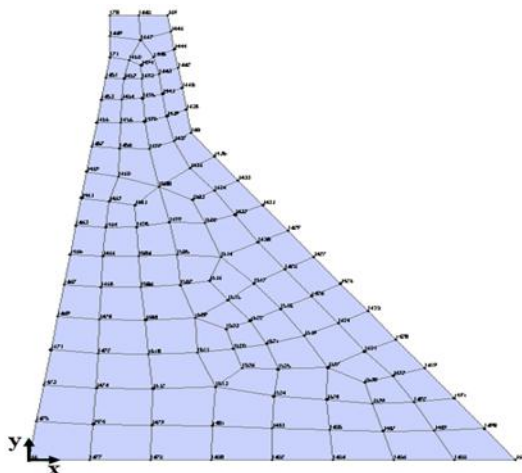
۱. Carne and Dohrmann

۲. Ilingwood and Tekie

مشخصات شماره و ارتفاع گره‌های در نظر گرفته شده در هر سناریو و همچنین جابه‌جایی مربوط به مودهای مؤثر سیستم مطابق با این نقاط در جداول ۳ تا ۵ آورده شده‌اند. شایان ذکر است که نقاط به ترتیب از بالا به پایین شماره‌گذاری شده‌اند. در شکل‌های ۴ تا ۶ نیز، جابه‌جایی‌های مودال مربوط به هر سناریو نمایش داده شده است.



شکل (۱): هندسه مونولیت غیر سرریز شونده سد بلواستن (باقلانی و همکاران، ۲۰۱۴)



شکل (۲): شماره‌گذاری گره‌ها در مدل اجزا محدود بلواستن

در ادامه با در نظر گرفتن بالاترین نقطه بر روی تاج سد (نقطه شماره ۱) به عنوان محل بهینه برای اولین سنسور، با محاسبه مقادیر ماتریس MAC، نقطه بهینه دوم طوری محاسبه می‌شود که بیشترین استقلال خطی بین اشکال مودی ایجاد گردد. برای توصیف بهتر فرایند محاسبه

صورت گرفته در قسمت قبلی، یک مدل اجزا محدود دوبعدی برای سد بتنی وزنی ساخته می‌شود. با توجه به عرض زیاد سدهای بتنی در عمل، در این تحقیق فرض می‌شود که حالت کرنش-صفحه‌ای^۱ برای تحلیل مناسب است. در همین رابطه، شکل (۲) نمایی از نقاط گره‌ای و المان‌های چهار گره‌ای غیرمنظم را در بدنه سد نمایش می‌دهد.

در این بخش، با استفاده از آنالیز مودال، فرکانس‌ها و دوره تناوب‌های مربوط به ۱۰ مود ارتعاشی ابتدایی سازه محاسبه شده و در جدول (۱) آورده شده است.

همان‌طور که می‌دانیم، در کاربردهای عملی و خصوصاً در زمانی که درجات آزادی سیستم افزایش می‌یابد، عملاً در نظر گرفتن تمام مودهای ارتعاشی در تحلیل سازه، غیرممکن است؛ بنابراین، باید به نحوی مودهایی با اثر بیشتر در رفتار ارتعاشی سازه را شناسایی کرد. در این مطالعه نیز با توجه به درجات آزادی سیستم موردنظر، برای شناسایی مودهای مهم‌تر، از پارامتر نسبت جرم مشارکتی مودال^۲ بهره گرفته می‌شود. به همین منظور در جدول (۲) نسبت‌های جرم مشارکتی مودال (و مقادیر تجمعی آن‌ها) با در نظر گرفتن جهت‌های X و Y، آورده شده‌اند. در این جدول، U_x و U_y نسبت جرم مشارکتی مودال در جهت‌های X و Y رانشان می‌دهند. در نظرگیری مودهای در جهت Y، هنگام ایجاد زلزله‌های با مؤلفه قائم شدید، که نتایج آن باید با سنسورهایی که جابه‌جایی قائم سازه را ثبت می‌کنند بررسی شود، می‌تواند مؤثر واقع گردد.

نتایج و بحث

در این بخش، مطابق شکل (۳)، سه نوع سناریوی مختلف برای جانمایی حس‌گرهای کاندیدا شده برای دریافت بیشترین اطلاعات مودال از سازه در نظر گرفته شده است. سناریو شماره ۱ شامل گره‌های بالادست سد، سناریو شماره ۲ مربوط به گره‌های میانی و در نهایت سناریو شماره ۳ مربوط به گره‌های میانی سازه است.

۱. plane-strain

۲. modal participating mass ratio

محل های بهینه برای سنسورها، بعد از تعیین اولین نقطه (۷) $MAC(1, j) \quad j = 1, 2, \dots, n$ بهینه ماتریس زیر باید محاسبه شود:

شماره مود	دوره تناوب (ثانیه)	فرکانس (هرتز)	فرکانس دورانی (رادیان بر ثانیه)
۱	۰/۱۲۵۵۷۳	۷/۹۶۳۵	۰۳۶/۵۰
۲	۰/۰۷۳۵۸۵	۱۳/۵۹	۸۵/۳۸۶
۳	۰/۰۶۰۴۴۲	۱۶/۵۴۵	۱۰۳/۹۵
۴	۰/۰۴۴۳۴۳	۲۲/۵۵۱	۱۴۱/۶۹
۵	۰/۰۳۴۹۷۲	۲۸/۵۹۵	۱۷۹/۶۶
۶	۰/۰۳۳۹۳	۲۹/۴۷۲	۱۸۵/۱۸
۷	۰/۰۲۲۹۲۸	۴۳/۶۱۵	۲۷۴/۰۴
۸	۰/۰۲۲۵۳۳	۴۴/۳۷۹	۲۷۸/۸۴
۹	۰/۰۲۱۰۰۹	۴۷/۵۹۸	۲۹۹/۰۷
۱۰	۰/۰۲۰۸۶۸	۴۷/۹۱۹	۳۰۱/۰۹

جدول (۱): فرکانس ها و دوره تناوب های مربوط به ۱۰ مود ابتدایی سد بلواستن

جدول (۲): نسبت های جرم مشارکتی مودال در جهت X و Y برای انتخاب مودهای ارتعاشی مؤثر سیستم

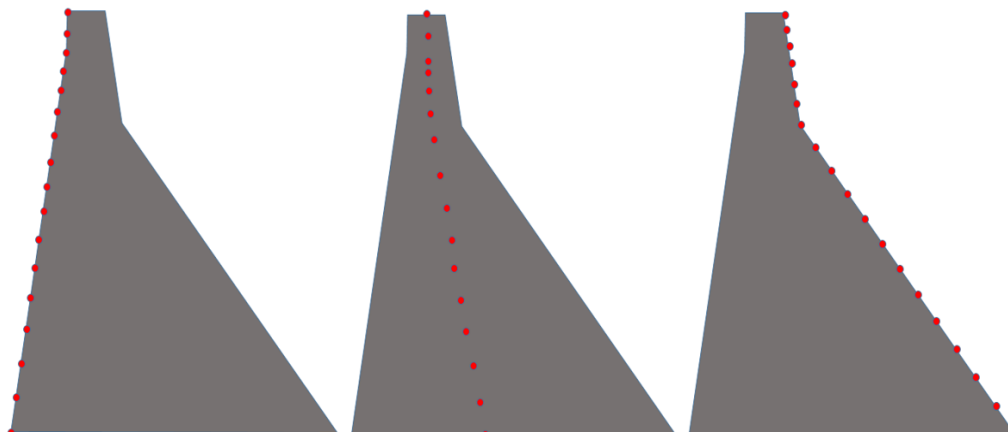
شماره مود	U_x	$\sum U_x$	U_y	$\sum U_y$
۱	۰/۳۵۸۵۳	۰/۳۵۸۵۳	۰/۰۰۷۱۹	۰/۰۰۷۱۹
۲	۸/۴۷۷E-۲۰	۰/۳۵۸۵۳	۵/۱۲۵E-۱۹	۰/۰۰۷۱۹
۳	۰/۳۰۶۱۵	۰/۶۶۴۶۹	۰/۰۱۰۲۲	۰/۰۱۷۴۱
۴	۰/۰۵۵۷۹	۰/۷۲۰۴۸	۰/۵۸۳۷۶	۰/۶۰۱۱۶
۵	۹/۹۲۲E-۲۰	۰/۷۲۰۴۸	۱/۰۹۱E-۱۶	۰/۶۰۱۱۶
۶	۰/۱۲۵۴۲	۰/۸۴۵۹	۰/۰۵۳۳۱	۰/۶۵۴۴۷
۷	۴/۴۴۵E-۱۷	۰/۸۴۵۹	۱/۵۵۴E-۱۴	۰/۶۵۴۴۷
۸	۰/۰۶۴۴	۰/۹۱۰۳	۰/۰۰۱۲	۰/۶۵۵۶۷
۹	۰/۰۰۰۶	۰/۹۱۰۹	۰/۱۲۵۱۳	۰/۷۸۰۸۱
۱۰	۳/۷۷۲E-۱۶	۰/۹۱۰۹	۳/۲۱۱E-۱۶	۰/۷۸۰۸۱

سناریو ۱

سناریو ۲

سناریو ۳

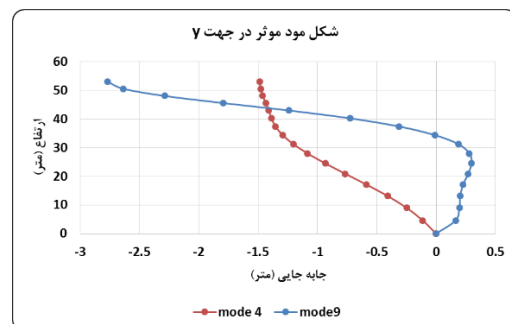
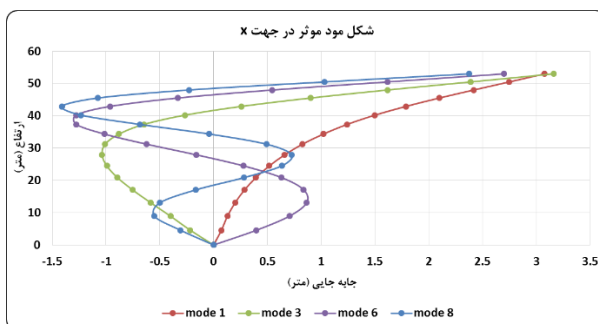
شکل (۳): سناریوهای مختلف برای قرارگیری محل سنسورهای بهینه



تعیین محل بهینه سنسورها به کمک معیار اطمینان مودی در شناسایی پارامترهای مودال سدهای بتنی وزنی.....۴۵

جدول (۳): مشخصات نقاط در نظر گرفته در سناریوی شماره ۱

شماره نقاط	ارتفاع (متر)	مود مؤثر اول	مود مؤثر دوم	مود مؤثر سوم	مود مؤثر چهارم	مود مؤثر پنجم	مود مؤثر ششم
۱	۵۳	۳/۰۷۷۱	۳/۱۶۰۵	-۱/۴۸۴	۲/۷۰۰۸	۲/۳۷۶۲	-۲/۷۶۸۸
۲	۵۰/۵	۲/۷۴۹	۲/۳۹۰۲	-۱/۴۷۸۱	۱/۶۱۵۴	۱/۰۳۳	-۲/۶۳۳۹
۳	۴۸	۲/۴۱۷۸	۱/۶۱۵۳	-۱/۴۶۲۷	۰/۵۴۷۱	-۰/۲۲۹۶	-۲/۲۸۵
۴	۴۵/۵۲۵	۲/۰۹۹۶	۰/۹۰۱۸	-۱/۴۳۳۲	-۰/۳۳۰۷	-۱/۰۷۵۷	-۱/۷۹۳۱
۵	۴۲/۹۲۹	۱/۷۸۹	۰/۲۵۹۵	-۱/۴۱۰۲	-۰/۹۶۱۱	-۱/۴۱۲۱	-۱/۲۴
۶	۴۰/۲۰۸	۱/۴۹۹۳	-۰/۲۶۶۴	-۱/۳۸۷۲	-۱/۲۷۷۳	-۱/۲۳۱۶	-۰/۷۲۵۳
۷	۳۷/۳۵۵	۱/۲۴۲۱	-۰/۶۴۶۷	-۱/۳۵۲۲	-۱/۲۷۵۹	-۰/۶۸۷۱	-۰/۳۱۱۱
۸	۳۴/۳۶۴	۱/۰۲۱۷	-۰/۸۷۸۶	-۱/۲۹۲۹	-۱/۰۱۶	-۰/۰۳۹۳	-۰/۰۱۱۸
۹	۳۱/۲۲۸	۰/۸۲۷	-۱/۰۰۸۵	-۱/۲۰۲۷	-۰/۶۲۳۱	۰/۴۹۰۴	۰/۱۸۷
۱۰	۲۷/۹۳۹	۰/۶۶۱۴	-۱/۰۳۶۸	-۱/۰۸۱۸	-۰/۱۶۲	۰/۷۲۷۴	۰/۲۸۰۶
۱۱	۲۴/۴۹۲	-۰/۵۱۷۸	-۰/۹۹۲۶	-۰/۹۳۳۷	۰/۲۷۹۴	۰/۶۳۳۱	۰/۲۹۹۳
۱۲	۲۰/۱۸۷۷	۰/۳۹۳۶	-۰/۸۹۴	-۰/۷۶۵۱	۰/۶۳۱۵	۰/۲۸۳۷	۰/۲۶۹۸
۱۳	۱۷/۰۸۷	۰/۲۸۸۳	-۰/۷۵۳۸	-۰/۵۸۵۸	۰/۸۳۷۷	-۰/۱۶۳۳	۰/۲۲۷۶
۱۴	۱۳/۱۱۴	۰/۲۰۰۴	-۰/۵۸۵۶	-۰/۴۰۸۳	۰/۸۶۵۵	-۰/۴۹۷۷	۰/۲۰۲۱
۱۵	۸/۹۴۸	۰/۱۲۹۱	-۰/۴۰۱۴	-۰/۲۴۷	۰/۷۰۵۹	-۰/۵۵۱۲	۰/۱۹۶۷
۱۶	۴/۵۸	-۰/۰۷۲۶	-۰/۲۱۶۱	-۰/۱۱۲۲	-۰/۳۹۷۹	-۰/۳۰۷۵	۰/۱۶۳۹
۱۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

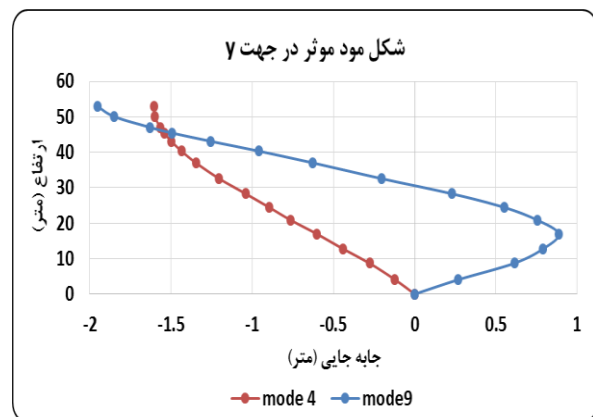
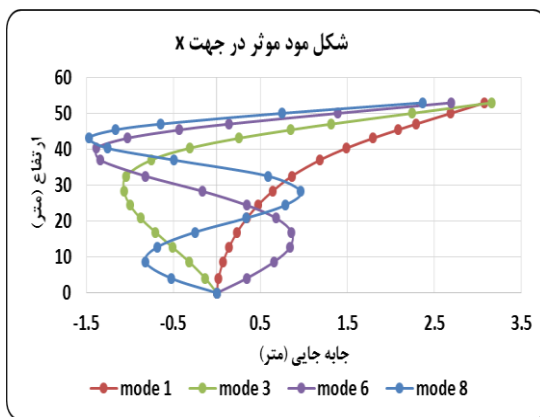


شکل (۴): شکل مودهای مؤثر در جهت‌های X و Y در سناریوی شماره ۱

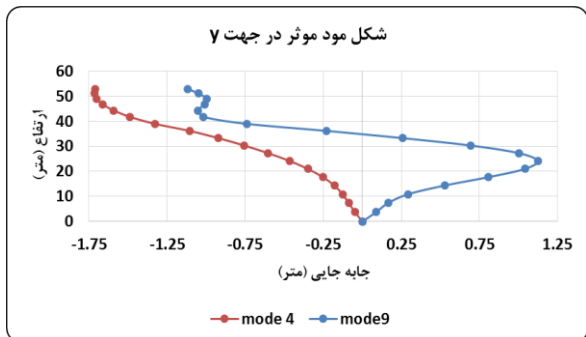
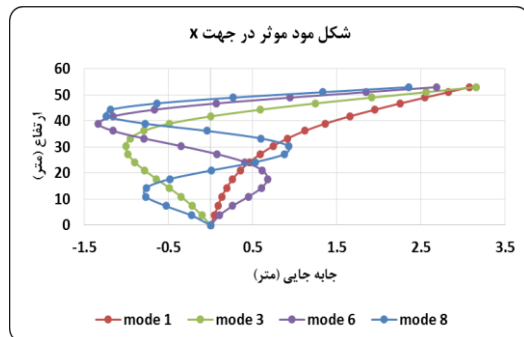
جدول (۴): مشخصات نقاط در نظر گرفته در سناریوی شماره ۲

شماره نقاط	ارتفاع (متر)	مود مؤثر اول	مود مؤثر دوم	مود مؤثر سوم	مود مؤثر چهارم	مود مؤثر پنجم	مود مؤثر ششم
۱	۵۳	۳/۰۷۶۹	۳/۱۵۹۲	-۱/۶۰۲۶	۲/۶۹۵۱	۲/۳۶۶۸	-۱/۹۵۳۵
۲	۵۰/۰۶۷	۲/۶۸۸۹	۲/۲۴۳۴	-۱/۵۹۸۵	۱/۳۹۰۴	۰/۷۴۶۵	-۱/۸۴۸
۳	۴۷/۰۵۸	۲/۲۸۹۴	۱/۳۱۵۱	-۱/۵۶۶۷	۰/۱۳۶۸	-۰/۶۵	-۱/۶۲۹۲
۴	۴۵/۴۴۷	۲/۰۸۱۲	۰/۸۴۹۵	-۱/۵۴۲	-۰/۴۲۹۹	-۱/۱۶۳۳	-۱/۴۹۲۲
۵	۴۳/۱۲۲	۱/۷۹۶۴	۰/۲۵۳۸	-۱/۴۹۷۸	-۱/۰۲۷۶	-۱/۴۷۱۹	-۱/۲۵۴۹
۶	۴۰/۳۴	۱/۴۸۸۶	-۰/۳۱۵۱	-۱/۴۳۵۱	-۱/۳۸۴۷	-۱/۲۵۷۲	-۰/۹۵۹
۷	۳۷/۰۵۹	۱/۱۸۶	-۰/۷۵۵	-۱/۳۴۶۸	-۱/۳۴۴	-۰/۴۹۶۹	-۰/۶۲۹۷

۸	۳۲/۵۸۲	-۰/۸۶۳۶	-۱/۰۴۲۱	-۱/۲۰۳۴	-۰/۸۲۲۷	۰/۵۸۵۱	-۰/۲۰۳۲
۹	۲۸/۳۴۱	-۰/۶۳۹۸	-۱/۰۶۶۱	-۱/۰۴۰۸	-۰/۱۶۵۴	۰/۹۶۲۹	۰/۲۲۷
۱۰	۲۴/۴۵۸	-۰/۴۷۲	-۰/۹۹۸۳	-۰/۸۹۵۶	۰/۳۴۱۲	۰/۷۸۵۵	۰/۵۵۰۶
۱۱	۲۰/۸۴۵	-۰/۳۴۵	-۰/۸۷۸۸	-۰/۷۶۱۸	۰/۶۷۹۹	۰/۳۳۵۷	۰/۷۵۶۸
۱۲	۱۶/۹۵	۰/۲۳۲۶	-۰/۷۰۷۳	-۰/۶۰۰۹	۰/۸۵۶۸	-۰/۲۴۹۶	۰/۸۸۶۴
۱۳	۱۲/۷۸۴	۰/۱۴۱۲	-۰/۵۱۳۱	-۰/۴۴۲۱	۰/۸۴۱۷	-۰/۶۸۵۴	۰/۷۹۰۷
۱۴	۸/۷۰۲	-۰/۰۷۰۴	-۰/۳۱۹۴	-۰/۲۷۷۸	۰/۶۵۸۹	-۰/۸۲۴۸	۰/۶۱۳۳
۱۵	۴/۰۷۵	۰/۰۱۹۴	-۰/۱۳۳۲	-۰/۱۲۱۴	۰/۳۴۲۸	-۰/۵۲۴۴	۰/۲۶۹۱
۱۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰



شکل (۵): شکل مودهای مؤثر در جهت‌های X و Y در سناریوی شماره ۲



شکل (۶): شکل مودهای مؤثر در جهت‌های X و Y در سناریوی شماره ۳

جدول (۵): مشخصات نقاط در نظر گرفته در سناریوی شماره ۳

شماره نقاط	ارتفاع (متر)	مود مؤثر اول	مود مؤثر دوم	مود مؤثر سوم	مود مؤثر چهارم	مود مؤثر پنجم	مود مؤثر ششم
۱	۵۳	۳/۰۷۵۸	۳/۱۵۵۱	-۱/۷۱۱۴	۲/۶۸۴۶	۲/۳۵۲۷	-۱/۱۱۸۹
۲	۵۱/۰۵۹	۲/۸۲۱۵	۲/۵۵۹۵	-۱/۷۱۱۴	۱/۸۴۶۹	۱/۳۳۳۹	-۱/۰۴۷۸
۳	۴۸/۹۷۵	۲/۵۴۵۵	۱/۹۱۲۶	-۱/۷۰۰۸	۰/۹۴۲۳	۰/۲۶۷۶	-۰/۹۹۵۴
۴	۴۶/۷۳۹	۲/۲۵۲۹	۱/۲۴۲۹	-۱/۶۶۱۴	۰/۰۶۵۹	-۰/۶۴۱۷	-۱/۰۱۱۳
۵	۴۴/۳۳۹	۱/۹۵۲۳	۰/۵۹۲۲	-۱/۵۹۱۲	-۰/۶۶۸	-۱/۱۸۸	-۱/۰۵۱۷
۶	۴۱/۷۶۴	۱/۶۵۲۲	۰/۰۰۰۰۲	-۱/۴۸۶۵	-۱/۱۶۱۵	-۱/۲۴۱۸	-۱/۰۱۶۲
۷	۳۹	۱/۳۶۲۱	-۰/۴۹۱	-۱/۳۲۷۲	-۱/۳۳۳۸	-۰/۷۸۱۵	-۰/۷۳۹۸
۸	۳۶/۱۹۵	۱/۱۱۹	-۰/۷۹۵۶	-۱/۱۰۶۲	-۱/۱۵۷۴	-۰/۰۴۲۸	-۰/۲۲۸۹

۹	۳۳/۳۱۵	۰/۹۱۴	-۰/۹۵۸۲	-۰/۹۲۲۳	-۰/۷۹۲۳	۰/۵۹۶۸	۰/۲۵۶
۱۰	۳۰/۳۶	-۰/۷۴۰۵	-۱/۰۰۹۱	-۰/۷۵۶	-۰/۳۴۹	۰/۹۲۷۵	۰/۶۹۱۹
۱۱	۲۷/۳۲۷	۰/۵۹۰۹	-۰/۹۸۳	-۰/۶۰۴۴	۰/۰۷۲۲	۰/۸۷۹۵	۱/۰۰۱۱
۱۲	۲۴/۲۱۴	۰/۴۶۱۱	-۰/۹۰۳۱	-۰/۴۶۷۱	۰/۴۰۸۷	۰/۵۲۷۵	۱/۱۲۴۱
۱۳	۲۱/۰۱۹	-۰/۳۵۱۱	-۰/۷۸۴	-۰/۳۴۸۹	۰/۶۱۴۴	۰/۰۰۷۲	۱/۰۴۱۱
۱۴	۱۷/۷۴	۰/۲۶۱۵	-۰/۶۴۲۸	-۰/۲۵۲۷	۰/۶۷۵۶	-۰/۴۸۳۲	۰/۸۰۸
۱۵	۱۴/۳۷۴	۰/۱۸۹	-۰/۴۹۴۲	-۰/۱۷۹۶	۰/۶۰۴۶	-۰/۷۶۵۵	۰/۵۲۵۹
۱۶	۱۰/۹۱۹	۰/۱۳۱۴	-۰/۳۵۰۱	-۰/۱۲۷۱	۰/۴۴۶۴	-۰/۷۶۸۳	۰/۲۹۳۸
۱۷	۷/۳۷۴	-۰/۰۸۵۷	-۰/۲۲۰۵	-۰/۰۸۷۶	۰/۲۵۸۴	-۰/۵۳۱۳	۰/۱۶۵
۱۸	۳/۷۳۵	-۰/۰۴۳۶	-۰/۱۰۵۲	-۰/۰۴۷۱	۰/۱۰۳۶	-۰/۲۲۸	۰/۰۸۷۴
۱۹

در ادامه این فرایند، باید از میان تمام عناصر غیر قطری ماکزیمم به دست آمده، کمترین مقدار شناسایی گردد که در واقع بیانگر نقطه‌ای است که بیشترین استقلال خطی بین مودها را ایجاد کرده است. به طور نمونه، در جدول (۶) روند محاسبه نقطه بهینه دوم (با در نظر گرفتن مودهای مؤثر جهت X) را در سناریوی شماره ۱ نشان می‌دهد.

که در آن، n تعداد نقاط کاندیدا شده برای محل بهینه سنسورها را نمایان می‌سازد.

پس از محاسبه ماتریس MAC، بزرگ‌ترین عنصر غیر قطری هر ماتریس مطابق رابطه (۸) باید محاسبه شود.

$$\max \{ \text{Nondiagonal}[MAC(l, j)] \} \quad j=1,2,\dots,n \quad (8)$$

جدول (۶): نمونه محاسبات ماتریس MAC مربوط به تعیین نقطه بهینه دوم در سناریو شماره ۱، با در نظر گرفتن مودهای جهت X

MAC ۱.۲	۱	۰/۸۹۸۸۸۹۱۸۲	۰/۹۴۲۶۰۷۴۹۴	۰/۸۳۹۱۴۸۳۷	MAC ۱.۹	۱	۰/۷۴۴۰۲۲۴۳۲	۰/۹۳۰۷۴۰۳۹	۰/۹۶۷۴۶۳۸۰۴
	۰/۸۹۸۸۸۹۱۸۲	۱	۰/۹۸۰۱۹۵۴۳۴	۰/۹۰۵۸۰۰۵۹۳		۰/۷۴۴۰۲۲۴۳۲	۱	۰/۹۳۱۸۲۴۹۷۷	۰/۵۳۲۸۸۴۹۳
	۰/۹۴۲۶۰۷۴۹۴	۰/۹۸۰۱۹۵۴۳۴	۱	۰/۹۷۱۱۲۴۳۶۸		۰/۹۳۰۷۴۰۳۹	۱	۰/۹۳۱۸۲۴۹۷۷	۰/۸۱۲۶۱۹۳۲۸
	۰/۸۳۹۱۴۸۳۷	۰/۹۰۵۸۰۰۵۹۳	۰/۹۷۱۱۲۴۳۶۸	۱		۰/۹۶۷۴۶۳۸۰۴	۰/۵۳۲۸۸۴۹۳	۰/۸۱۲۶۱۹۳۲۸	۱
MAC ۱.۳	۱	۰/۹۴۱۰۵۷۸۵۶	۰/۶۹۱۴۱۰۸۶۷	۰/۳۷۸۹۰۱۰۲۵	MAC ۱.۱۰	۱	۰/۸۰۴۲۷۴۴۹	۰/۹۹۹۳۰۹۲۹	۰/۹۶۲۶۳۸۹۹۴
	۰/۹۴۱۰۵۷۸۵۶	۱	۰/۸۸۶۴۲۱۸۰۷	۰/۶۲۱۶۸۱۰۱۴		۰/۸۰۴۲۷۴۴۹	۱	۰/۸۲۴۷۰۱۶۴۸	۰/۶۵۶۲۲۴۶۸
	۰/۶۹۱۴۱۰۸۶۷	۰/۸۸۶۴۲۱۸۰۷	۱	۰/۹۰۱۷۹۹۲۵۱		۰/۹۹۹۳۰۹۲۹	۱	۰/۸۲۴۷۰۱۶۴۸	۰/۹۶۲۶۳۸۹۹۴
	۰/۳۷۸۹۰۱۰۲۵	۰/۶۲۱۶۸۱۰۱۴	۰/۹۰۱۷۹۹۲۵۱	۱		۰/۹۶۲۶۳۸۹۹۴	۰/۶۵۶۲۲۴۶۸	۰/۹۶۲۶۳۸۹۹۴	۱
MAC ۱.۴	۱	۰/۸۹۳۷۵۲۰۷۲	۰/۵۳۲۴۸۸۶۸۹	۰/۲۴۶۲۵۰۵۰۹	MAC ۱.۱۱	۱	۰/۸۶۰۳۶۴۱۶	۰/۹۸۱۷۶۳۳۴۸	۰/۹۹۹۱۴۵۳۹۵
	۰/۸۹۳۷۵۲۰۷۲	۱	۰/۸۳۳۰۸۸۴۴۴	۰/۵۶۵۶۹۳۴۳		۰/۸۶۰۳۶۴۱۶	۱	۰/۷۵۴۴۶۳۷۳	۰/۸۳۹۴۹۱۶۲۳
	۰/۵۳۲۴۸۸۶۸۹	۰/۸۳۳۰۸۸۴۴۴	۱	۰/۹۱۳۴۲۷۷۵۲		۰/۹۸۱۷۶۳۳۴۸	۱	۰/۷۵۴۴۶۳۷۳	۰/۹۸۸۷۵۹۸۴۴
	۰/۲۴۶۲۵۰۵۰۹	۰/۵۶۵۶۹۳۴۳	۰/۹۱۳۴۲۷۷۵۲	۱		۰/۹۹۹۱۴۵۳۹۵	۰/۸۳۹۴۹۱۶۲۳	۰/۹۸۸۷۵۹۸۴۴	۱
MAC ۱.۵	۱	۰/۸۱۲۱۴۷۶۷۲	۰/۳۹۳۵۰۳۰۸۶	۰/۲۱۸۱۶۳۳۴۸	MAC ۱.۱۲	۱	۰/۹۱۵۰۷۷۲۸۶	۰/۹۴۶۹۷۶۱۷۵	۰/۹۶۷۷۶۴۰۸
	۰/۸۱۲۱۴۷۶۷۲	۱	۰/۸۱۵۱۴۵۹۲۲	۰/۶۴۶۸۰۶۵۱		۰/۹۱۵۰۷۷۲۸۶	۱	۰/۷۴۶۱۲۶۶۸۸	۰/۹۸۶۷۹۱۴۰۱
	۰/۳۹۳۵۰۳۰۸۶	۰/۸۱۵۱۴۵۹۲۲	۱	۰/۹۶۳۵۵۱۵۱۸		۰/۹۴۶۹۷۶۱۷۵	۱	۰/۷۴۶۱۲۶۶۸۸	۰/۸۳۹۰۰۱۷۰۶
	۰/۲۱۸۱۶۳۳۴۸	۰/۶۴۶۸۰۶۵۱	۰/۹۶۳۵۵۱۵۱۸	۱		۰/۹۶۷۷۶۴۰۸	۰/۹۸۶۷۹۱۴۰۱	۰/۸۳۹۰۰۱۷۰۶	۱
MAC ۱.۶	۱	۰/۷۲۶۷۸۵۲۵۸	۰/۳۶۱۹۹۶۴۵۶	۰/۳۴۸۹۱۴۲۱۴	MAC ۱.۱۳	۱	۰/۹۵۷۸۱۳۰۹	۰/۹۳۵۴۵۴۵۴۶	۰/۸۹۳۷۹۷۱۴
	۰/۷۲۶۷۸۵۲۵۸	۱	۰/۸۶۵۷۰۶۳۹۷	۰/۸۵۶۲۵۱۴۴۵		۰/۹۵۷۸۱۳۰۹	۱	۰/۷۹۹۹۴۳۵۷۱	۰/۶۹۵۴۵۵۰۶۸
	۰/۳۶۱۹۹۶۴۵۶	۰/۸۶۵۷۰۶۳۹۷	۱	۰/۹۹۹۸۱۳۲۴۴		۰/۹۳۵۴۵۴۵۴۶	۱	۰/۷۹۹۹۴۳۵۷۱	۰/۶۹۵۴۵۵۰۶۸
	۰/۳۴۸۹۱۴۲۱۴	۰/۸۵۶۲۵۱۴۴۵	۰/۹۹۹۸۱۳۲۴۴	۱		۰/۸۹۳۷۹۷۱۴	۰/۹۸۵۴۶۱۴۷	۰/۶۹۵۴۵۵۰۶۸	۱
	۱	۰/۶۷۸۸۵۷۸۹۳	۰/۴۵۴۹۶۲۷۸۹	۰/۷۰۴۲۸۶۴۶۲		۱	۰/۹۸۴۷۹۲۰۲۵	۰/۹۵۲۶۸۷۰۵۲	

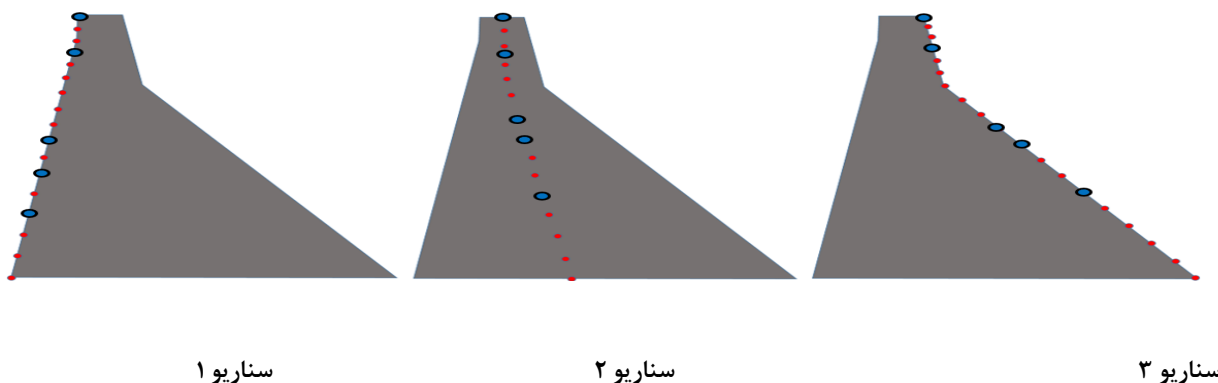
MAC ۱.۷	-۰/۶۷۸۸۵۷۸۹۳	۱	-۰/۹۴۸۹۰۶۷۳۹	۰/۹۹۹۲۳۵۹۹۲	MAC ۱.۱۴	-۰/۹۸۴۷۹۲۰۲۵	۱	-۰/۸۸۸۴۴۸۷۷۹	-۰/۹۴۵۹۷۹۸۵۴	
	-۰/۴۵۴۹۶۲۷۸۹	-۰/۹۴۸۹۰۶۷۳۹	۱	-۰/۹۳۶۰۵۳۱۵۴		-۰/۹۵۳۶۸۷۰۵۲	-۰/۸۸۸۴۴۸۷۷۹	۱	-۰/۷۰۴۱۴۸۷۸۲	-۰/۷۰۴۱۴۸۷۸۲
	-۰/۷۰۴۳۸۶۴۶۲	-۰/۹۹۹۲۳۵۹۹۲	-۰/۹۳۶۰۵۳۱۵۴	۱		-۰/۸۷۷۰۸۵۴۵	-۰/۹۴۵۹۷۹۸۵۴	-۰/۷۰۴۱۴۸۷۸۲	۱	
MAC ۱.۸	۱	-۰/۶۸۸۳۷۵۵۵۵	-۰/۷۰۸۸۸۳۳۹۳	-۰/۹۹۹۰۲۱۹۱۶	MAC ۱.۱۵	۱	۰/۹۹۷۶۵۵۱۵۲	-۰/۹۸۵۶۱۹۱۴۹	-۰/۹۵۰۵۰۶۹۷۸	
	-۰/۶۸۸۳۷۵۵۵۵	۱	-۰/۹۹۹۵۰۰۵۷۲	-۰/۷۱۶۹۶۲۷۵۸		-۰/۹۹۷۶۵۵۱۵۲	۱	-۰/۹۷۱۸۲۵۱۳۷	-۰/۹۶۹۳۷۵۲۸۸	
	-۰/۷۰۸۸۸۳۳۹۳	-۰/۹۹۹۵۰۰۵۷۲	۱	-۰/۷۳۶۸۷۵۳۱۲		-۰/۹۸۵۶۱۹۱۴۹	-۰/۹۷۱۸۲۵۱۳۷	۱	-۰/۸۸۵۹۰۴۸۴۱	
	-۰/۹۹۹۰۲۱۹۱۶	-۰/۷۱۶۹۶۲۷۵۸	-۰/۷۳۶۸۷۵۳۱۲	۱		-۰/۹۵۰۵۰۶۹۷۸	-۰/۹۶۹۳۷۵۲۸۸	-۰/۸۸۵۹۰۴۸۴۱	۱	

اول، اگر همین روند ادامه پیدا کند می‌توان به بقیه نقاط بهینه دسترسی پیدا کرد. جدول (۷) در همین رابطه، نتایج نهایی نقاط بهینه بر مبنای سناریوهای مختلف را با در نظر گرفتن جهت‌های X و Y نشان می‌دهد.

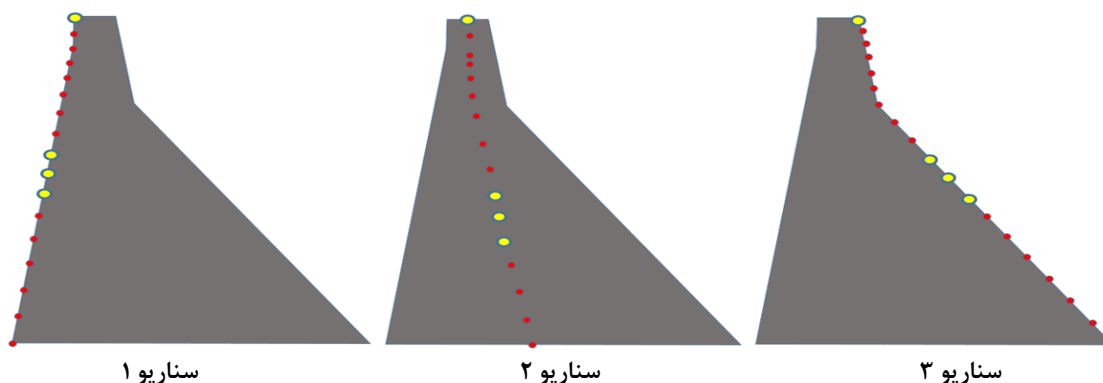
همان‌طور که از جدول (۶) مشاهده می‌شود، از میان تمام عناصر غیر قطری بیشینه مربوط به ماتریس‌های MAC محاسبه شده، کمترین مقدار، با نقطه شماره ۴ مطابقت دارد. پس از محاسبه نقاط ۱ و ۴ به‌عنوان دو نقطه بهینه

جدول (۷): نتایج نهایی محل‌های سنسور بهینه در سناریوهای مختلف و در نظر گرفتن جهت مودهای مؤثر

سناریوهای مختلف	محل نقاط بهینه با در نظر گرفتن مودهای جهت X	محل نقاط بهینه با در نظر گرفتن مودهای جهت Y
سناریو #۱	۱، ۱۰، ۴، ۱۴، ۱۲	۹، ۱، ۱۰، ۱۱
سناریو #۲	۱، ۴، ۹، ۱۲، ۸	۱، ۱۱، ۱۲، ۱۰
سناریو #۳	۱، ۴، ۱۱، ۱۴، ۱۰	۱، ۱۱، ۱۲، ۱۰



شکل (۷): محل بهینه سنسورها برای دریافت بیشترین اطلاعات از شکل مود در جهت X سازه در سناریوهای مختلف



شکل (۸): محل بهینه سنسورها برای دریافت بیشترین اطلاعات از شکل مود در جهت Y سازه در سناریوهای مختلف

- همچنین، با فرض اینکه یک سنسور بر روی تاج سد واقع شده است (این نقطه در عمل دسترسی خوبی برای قرار دادن سنسور دارد)، مطابق شکل (۷) نتایج حاکی از آن است که در مورد مودهای جهت- X ، محل بهینه سنسورها عمدتاً در یک سوم میانی ارتفاع و همچنین ناحیه بین تاج و گردن بدنه سد، قرار داشته‌اند.
- مشابه مودهای جهت X ، مطابق شکل (۸)، با در نظر گرفتن نتایج مود شکل‌های جهت Y (که نتایج آن‌ها در زمان زلزله‌های قائم می‌تواند کاربرد داشته باشد)، محل بهینه سنسورها در یک سوم میانی ارتفاع سد قرار داشته‌اند.
- به‌طور کلی، با توجه به شکل‌های ۷ و ۸ و نتایج حاصل شده از معیار MAC، می‌توان استنباط کرد که برای دست‌یابی به بهترین اطلاعات در مورد شکل مودهای سد بتنی وزنی، در عمل که معمولاً با محدودیت در تعداد حس‌گر مواجه هستیم، قرار دادن یک حس‌گر بر روی تاج سد (با توجه به راحتی دسترسی در عمل) و همچنین جانمایی بقیه در یک سوم میانی سد می‌تواند در ابزاربندی بهینه این سازه‌ها مؤثر واقع گردد. طبق شکل‌های (۴ تا ۶) این موضوع از لحاظ فیزیکی می‌تواند مربوط به تجمع نقاط عطف اشکال مودی در این ناحیه باشد.

منابع:

- 1- Baghlani, M. Sattari, M. H. Makiabadi, and S. Smith, (2014), "Application of genetic programming in shape optimization of concrete gravity dams by metaheuristics," Cogent Eng. vol. 1, no. 1, p. 982348.
- 2- Bayraktar, T. Türker, M. Akköse, and Ş. Ateş, (2010), "The effect of reservoir length on seismic performance of gravity dams to near- and far-fault ground motions," Nat. Hazards, vol. 52, no. 2, pp. 257-275.
- 3- M. Raich and T. R. Liskai, (2012), "Multi-objective optimization of sensor and excitation layouts for frequency response function-based structural damage identification," Comput. Civ. Infrastructure. Eng. vol. 27, no. 2, pp.95-117.
- 4- Saito, (2009), "Nonlinear vibration analysis of cracked structures — application to turbomachinery rotors with cracked blades."

اولین نکته‌ای که از شکل‌های (۷) و (۸) مشاهده می‌شود این است که در هر دو جهت X و Y ، محل حس‌گرهای بهینه تقریباً یکسان هستند؛ به عبارت دیگر، نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که ارتفاع محل سنسورهای بهینه در بالادست، میانه و پایین دست سد تقریباً شبیه هم می‌باشند. شکل (۷) که مربوط به مود شکل‌های جهت X می‌باشد، نشان می‌دهد که با فرض قرارگیری یک سنسور بر روی تاج سد، محل بهینه بقیه سنسورها تقریباً در یک سوم میانی ارتفاع و در ناحیه گردن سد قرار دارند. همچنین، با در نظر گرفتن شکل (۸) مشاهده می‌شود که محل بهینه سنسورها (با فرض داشتن یک سنسور روی تاج سد) در این حالت نیز عمدتاً در یک سوم میانی از ارتفاع سد قرار گرفته‌اند. علت این موضوع را می‌توان با توجه به شکل‌های ۴-۶ بدین صورت توجیه نمود که نقاط عطف مربوط به شکل‌های مودی مؤثر سازه عمدتاً در این نقاط قرار داشته و بنابراین قرارگیری سنسورها (با تعداد محدود) در این نواحی بهتر می‌تواند در برآزش اشکال مودی سازه مؤثر واقع شود.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق بر مبنای دست‌یابی به بیشترین اطلاعات از شکل مودهای ارتعاشی سازه، محل بهینه سنسورها در سد بتنی-وزنی بلواستون بررسی شده است. معیار MAC (که تاکنون اغلب برای قاب‌های ساختمانی و پل‌ها به کار گرفته شده) برای اولین بار بر روی این سیستم با درجات آزادی بالا به کار گرفته شده است. در مجموع مهم‌ترین یافته‌های حاصل شده از این مطالعه را می‌توان به شرح زیر بیان نمود:

- نتایج به دست آمده از مقایسه سه سناریوی مختلف برای نقاط کاندیدای بهینه (در بالادست، وسط و پایین دست بدنه سد) نشان می‌دهند که ارتفاع قرارگیری سنسورهای بهینه در سناریوهای مختلف یکسان است. به عبارت دیگر می‌توان گفت که محل قرارگیری سنسورهای برای برآزش بهینه اشکال مودی تابعی از عرض سد نیست و تنها به ارتفاع وابستگی دارد. (رجوع شود با شکل (۷) و (۸))

- placement in water distribution systems,” *J. Water Resour. Plan. Manag.* vol. 136, no. 6, pp. 62.
- 21- Yankey, R. Deschamps, M. McCray, and D. J. Bentler, (2000), “Parametric study and subsurface exploration plan for Bluestone Dam BT - Sessions of Geo-Denver 2000 - Slope Stability 2000, GSP 101, August 5, 2000 - August 8, 2000,” vol. 289, pp. 355–371.
- 22- Zhu and W. Zhang, (2006), “Maximization of the structural natural frequency with optimal support layout,” *Struct. Multidiscip. Optim.* vol. 31, no. 6, pp. 462–469.
- 23- N. Dharma Raj Dhakal, (2013), “Different Techniques of Structural of Health Monitoring,” *Int. J. Civil, Struct. Environ. Infrastructure. Eng. Res. Dev.* vol. 3, no. June, pp. 55–66.
- 24- K. Brahim, (1995), “Reduction of Junction Degree of Freedom in Certain Methods of Dynamic Substructure Synthesis,” *Lab. Mech. Appl.*
- 25- M. Alembagheri and M. Seyedkazemi, (2014), “Seismic Performance Sensitivity and Uncertainty Analysis of Gravity Dams,” *Pacific Conf. Earthq. Eng.* no. 056, pp. 1–6.
- 26- M. Alembagheri, (2016), “Earthquake damage estimation of concrete gravity dams using linear analysis and empirical failure criteria,” *Soil Dyn. Earthq. Eng.* vol. 90, pp. 327–339.
- 27- M. Ghaemian, (2000), “Concrete Dams: Seismic Analysis, Design and Retrofitting”, Sharif University of Technology.
- 28- M. I. Alba, G. Bernardini, A. Giussani, P. Paolo, F. Roncoroni, M. Scaioni, P. Valgoi, and K. Zhang, (2008), “Measurement of dam deformations by terrestrial interferometric techniques,” *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* vol. 37, no. B1, pp. 133–139.
- 29- M. Meo and G. Zumpano, (2005), “On the optimal sensor placement techniques for a bridge structure,” *Eng. Struct.* vol. 27, no. 10, pp. 1488–1497.
- 30- M. P. Castanier, Y. C. Tan, and C. Pierre, (2001), “Characteristic constraint modes for component mode synthesis,” *AIAA J.* vol. 39, no. 6, pp. 1182–1187.
- 31- Mohd Nasir Tamin, (2010). “Damage and Fracture of Composite Materials and Structures”, vol. 5.
- 32- N. A. J. Lieven and D. J. Ewins, (1988), “Spatial correlation of mode shapes, the coordinate modal assurance criterion (COMAC),” in *Proceedings of the sixth international modal analysis conference*, vol. 1, pp. 690–695.
- 33- N. W. Xu, C. N. Tang, S. H. Wu, G. L. Li, and J. Y. Yang, (2010), “Optimal Design of Microseismic Monitoring Networking and Error Analysis of Seismic Source Location for Rock Slope,” *Adv. Mater. Res.* vol. 163–167, pp. 2991–2999.
- 34- P. Bakir, (2008), “An integrated methodology for damage identification in existing buildings using optimal sensor placement techniques,” *14th World Conf. Earthq.*
- 35- P. K. Costas Papadimitriou, y, Claus-Peter Fritzen and E. Ntotsios, (2011). “Fatigue predictions in the entire body of metallic structures from a limited number of
- 5- Dawson, (1976), “Vibration condition monitoring techniques for rotating machinery,” *Shock Vib. Dig.* vol. 8.
- 6- Li, D. Li, X. Zhao, and J. Ou, (2012), “Optimal sensor placement in health monitoring of suspension bridge,” *Sci. China Technol. Sci.* vol. 55, no. 7, pp. 2039–2047.
- 7- M. and H. W. Longjun He, Jijian Lian†, (2013), “Optimal multiaxial sensor placement for modal identification of large structures,” *Struct. Control Heal. Monit.*
- 8- Bruce Ellingwood and Paulos Tekie, (2003), “Dams, Fragility Analysis of Concrete Gravity,” *ASCE*, no. June, pp. 41–48.
- 9- F. FM Hemez, (1994), “An energy-based optimum sensor placement criterion and its application to structural damage detection,” in *XII International Modal Analysis Conference (IMAC)*, pp. 1568–1575.
- 10- R. Farrar and D. a Jauregui, (1998), “Comparative study of damage identification algorithms applied to a bridge: I. Experiment,” *Smart Mater. Struct.* vol. 7, no. 5, pp. 720–731.
- 11- C. Kammer, (1991), “Sensor Placement for On-Orbit Modal Identification and Correlation of Large Space Structures,” *J. Guide. Control. Dyn.* vol. 14(2), no. August, pp. 251–259.
- 12- J. Ewins and H. Saunders, (1986), “Modal Testing: Theory and Practice,” *J. Vib. Acoust. Stress Reliab. Des.* vol. 108, no. 1, p. 109.
- 13- J. Ewins, (2000), “Model validation: Correlation for updating,” *Sadhana*, vol. 25, no. 3, pp. 221–234.
- 14- D.S. Li, C.P. Fritzen, and H.N. Li, (2008), “Extended MinMAC algorithm and comparison of sensor placement methods,” *Proc. IMAC-XXVI*, Florida, USA.
- 15- B. Flynn and M. D. Todd, (2010), “A Bayesian approach to optimal sensor placement for structural health monitoring with application to active sensing,” *Mech. Syst. Signal Process.* vol. 24, no. 4, pp. 891–903.
- 16- B. Flynn, M. D. Todd, P. D. Wilcox, B. W. Drinkwater, and a. J. Croxford, (2011), “Maximum-likelihood estimation of damage location in guided-wave structural health monitoring,” *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* vol. 467, no. 2133, pp. 2575–2596.
- 17- E. Majchrzak and J. Mendakiewicz, (2010), “Optimum location of sensors used for mold parameters estimation,” *Arch. FOUNDRY Eng.* vol. 10, no. 1, pp. 97–100.
- 18- Bakhtiari-Nejad, a. Rahai, and a. Esfandiari, (2005), “A structural damage detection method using static noisy data,” *Eng. Struct.* vol. 27, no. 12 SPEC. ISS. pp. 1784–1793.
- 19- E. Udawadia, (1994), “Methodology for optimum sensor locations for parameter identification in dynamic systems,” *J. Eng. Mech.* vol. 120, no. 2, pp. 368–390.
- 20- Dorini, P. Jonkergouw, Z. Kapelan, and D. Savic, (2010), “SLOTS: Effective algorithm for sensor

- vibration sensors using Kalman filtering,” *Struct. Control Heal. Monit.* vol. 18, no. May 2011, pp. 554–573.
- 36- P. M. Pawar, (2011), *Structural Health Monitoring Using Genetic Fuzzy System*. Springer.
- 37- R. Castro-Triguero, S. Murugan, R. Gallego, and M. I. Friswell, (2013), “Robustness of optimal sensor placement under parametric uncertainty,” *Mech. Syst. Signal Process.* vol. 41, no. 1–2, pp. 268–287.
- 38- R. D. Henshell and H. Ong, (1975), “Automatic masters for eigenvalue economization.PDF,” *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* vol. 3, no. July 1974, pp. 375–393.
- 39- R. J. Allemang, (2003), “The modal assurance criterion - Twenty years of use and abuse,” *Sound Vib.* vol. 37, no. 8, pp. 14–21, 2003.
- 40- S. Jang, H. Jo, S. Cho, K. Mechtov, J. A. Rice, S. H. Sim, H. J. Jung, C. B. Yun, B. F. Spencer, and G. Agha, (2010), “Structural health monitoring of a cable-stayed bridge using smart sensor technology: deployment and evaluation,” *Smart Struct. Syst.* vol. 6, no. 5–6, pp. 439–459.
- 41- T. G. Carne and C. R. Dohrmann, (1984), “A modal test design strategy for model correlation,” *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 64, pp. 291–316.
- 42- Ts. Marwala, (2010), “Finite -Element -Model Updating Using Computational Intelligence Techniques”. Springer.
- 43- USACE, “Gravity Dam Design, (1995), ” US Army Corps of Engineers.
- 44- Y. K. Ho and D. J. Ewins, (2000), “On the structural damage identification with mode shapes,” in *Proceedings of the European COST F3 Conference on System Identification & Structural Health Monitoring*, pp. 677–684.

Predicting Seismic Slope Displacements of Embankment Dams Using Fuzzy Systems

Hamed Javdanian *¹

Abstract

Iran, as a leading country in the dam construction industry, is located in one of the earthquake-prone regions of the world. Dams are important sources of hydroelectric power. Failure of these structures causes catastrophic damage. Therefore, evaluating the behavior of dams under seismic loading is an important issue. The present study focuses on the prediction of the slope displacements of embankment dams under earthquake loading. Real deformation in embankment dams due to earthquakes were gathered and analyzed. The amount of seismic slope displacement of embankment dams was predicted using fuzzy systems. Contributions of the effective variables were evaluated through a parametric study. Ultimately, the performance of the developed model was compared with existing analytical methods. Results indicate the acceptable accuracy of the proposed fuzzy-based model in estimating the slope displacement of embankment dams. This can be considered as an effective step in reducing the uncertainty involved in the deformation analysis of embankment dams.

Keywords

Embankment dam, Earthquake, Slope displacement, ANFIS.

1*. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran, javdanian@sku.ac.ir.