نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی
سال دوم / شماره ششم / پاییز ۱۳۹۴

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
2nd Year / No. 6 / November 2015

تخمین پاسخ لرزه‌ای سدهای بتنی به کمک ماشین بردار پشتیبان

ندا مهین خاکی[۱]
سید محمود حسینی[۲]
محمدرضا فدائی تهرانی*[۳]

چکیده

کاربرد روش ماشین بردار پشتیبان (SVM)، در تحلیل مسائل مهندسی رویکرد جدیدی است که در دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق از مدل SVM برای پیش‌بینی پاسخ لرزه‌ای سد بتنی تحت تأثیر بارهای لرزه‌ای استفاده شده است. برای فراهم کردن داده‌های آموزش مدل از تحلیل اجزاء محدود سد بتنی وزنی شفارود در نرم‌افزار ANSYS و جهت استفاده از ماشین بردار پشتیبان از نرم‌افزار WinSVM استفاده شده است. پس از تکمیل فرایند آموزش مدل، پاسخ لرزه‌ای به‌دست‌آمده از دو روش مورد مقایسه و راستی آزمایی قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده توانایی بالای ماشین بردار پشتیبان در تعیین رفتار لرزه‌ای سدهای بتنی است. به‌طوری‌که خطای مدل در تمامی شرایط بارگذاری کمتر از هفت درصد بوده است؛ بنابراین، با توجه به امکان استفاده از داده‌های ثبت‌شده ابزار دقیق سدها برای آموزش ماشین بردار پشتیبان، استفاده از این روش جهت تعیین پاسخ سدهای بتنی تحت تأثیر بارگذاری‌های مختلف در شرایط نزدیک به واقعیت توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی

ماشین بردار پشتیبان، پاسخ لرزه‌ای، سد بتنی، شفارود.

۱. مدرس دانشگاه آزاد اسلامی، واحد سما، کرج، ایران.
۲. استاد و عضو هیئت علمی پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران.
۳* . مدرس مجتمع عالی آموزشی و پژوهشی صنعت آب و برق، اصفهان، ایران، mrft1359@gmail.com.

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۲/۱۳
تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۷/۱۵

مقدمه

تأمین ایمنی سدها در برابر نیروهای ناشی از زلزله یکی از زمینه‌های تخصصی و پیچیده است که سال‌های طولانی ذهن محققین را به خود مشغول کرده است. هرچند در دو دهه اخیر با توجه به توسعه روش‌های عددی محاسباتی و بالا رفتن توانایی پردازش کامپیوترها پیشرفت‌های قابل‌ملاحظه‌ای در حل چنین سامانه‌های پیچیده‌ای صورت گرفته است، ولی به دلیل تعداد پارامترهای تأثیرگذار و رفتارهای غیرخطی اجزاء مختلف پی، بدنه و مخزن هنوز امکان تعیین پاسخ لرزه‌ای سدها به‌صورت کامل و دقیق امکان‌پذیر نیست.

بر طبق توصیه‌های کمیته بین‌المللی سدهای بزرگ[1] (ICOLD)، سدهای بزرگ باید قادر به تحمل بیشینه زمین‌لرزه محتمل[2] (MCE)، باشند. این زمین‌لرزه قوی‌ترین زلزله‌ای است که در ناحیه یک سد با دوره بازگشت چندین هزار سال می‌تواند رخ دهد. بر اساس تجربیات اخیر یک زلزله متوسط درصورتی‌که در نزدیک به سطح رخ دهد، می‌تواند سبب شتاب ماکزیمم حدود ۰/۵g گردد که می‌توان به زلزله ناپا در کالیفرنیا در سپتامبر سال ۲۰۰۰ اشاره کرد که در فاصله ۷ کیلومتری از گسل مؤثر شتاب ماکزیمم زمین در حدود ۰/۴۹g را ثبت نموده است. این در حالی است که در گذشته برای تحلیل و طراحی بسیاری از سدها از تقریب معادل استاتیکی برای شتاب ۰/۱g تا ۰/۲g استفاده شده است. به‌طور مثال سد پایه‌دار هسین فنگ کینگ[3] چین در زلزله ۱۹۶۲، سد وزنی کوینا[4] در هند در سال ۱۳۶۷، سد قوسی پاکیما[5] در کالیفرنیا در سال‌های ۱۹۷۱ و ۱۹۹۴ در معرض بارهای ناشی از لرزش شدید زمین قرار گرفتند که در زمان طراحی و ساخت مورد انتظار نبوده است.

با توجه به واقع شدن کشور ایران در مناطق با پتانسیل لرزه‌خیزی بالا توجه به این موضوع اهمیت بیشتری می‌یابد؛ بنابراین، بررسی مجدد رفتار سازه‌های مختلف ازجمله سدها با استفاده از دانش روز لازم به نظر می‌رسد، چرا که مطالعات اخیر نشان داده که روش‌های قبلی طراحی برخلاف انتظار، محافظه‌کارانه نبوده و علاوه بر این تعداد زیادی از سدها در مناطق با زلزله‌خیزی بالا، به علت دوره بازگشت طولانی زمین‌لرزه‌های بزرگ، هنوز تکان‌های پیش‌بینی‌شده توسط مطالعات لرزه‌خیزی را تجربه نکرده‌اند (هاتاچارجی[6] (۱۹۹۴) و کالاییر و کاراتون[7] (۲۰۰۵)).

تاریخچه مطالعه و تحلیل رفتار سدهای بتنی طولانی و از زمان‌های دور بوده است. در ابتدا تحلیل‌ها ساده‌تر و مبتنی بر فرض‌های ساده کننده متعدد بوده که با توسعه دانش این فرضیات به‌تدریج به شرایط واقعی نزدیک‌تر شده است. چوپرا[8] و همکاران (۱۹۷۳) به‌عنوان اولین قدم با استفاده از تحلیل الاستیک خطی، رفتار لرزه‌ای و پیش‌بینی ترک در سدهای بتنی را موردبررسی قرار دادند. در این تحقیق سدهای بتنی وزنی کوینا در هند و پین فلت در ایالات‌متحده آمریکا بدون در نظر گرفتن اندرکنش دریاچه و پی تحت زلزله کوینا، تحلیل گردید. قائمیان و همکاران (۲۰۰۰)، تحلیل لرزه‌ای غیرخطی دوبعدی سد وزنی را با در نظر گرفتن اندرکنش سد و دریاچه ارائه نمودند. در این تحقیق از مدل ترک پخش‌شده برای نشان دادن پاسخ سد و ترک‌خوردگی بدنه آن استفاده شد و اندرکنش سد و دریاچه در حوزه زمان با استفاده از روش Staggered بررسی شده و نتایج با حالتی که جرم افزوده بکار رفته، مورد مقایسه قرار گرفته‌است. تفاوت‌های مشاهده شده در این تحقیق اهمیت مدل‌سازی دریاچه جهت بررسی پاسخ واقعی سد را نشان داد. رحیم‌زاده و فدایی در سال ۱۳۸۴ مطالعات خود را در خصوص بررسی تأثیر جرم پی در رفتار لرزه‌ای سدهای بتنی قوسی انجام دادند. آن‌ها برای انجام مطالعات خود سد کارون۴ در ایران را در نرم‌افزار اجزاء محدود ANSYS مدل‌سازی نموده و با اعمال رکوردهای زلزله نزدیک به گسل و دور از گسل به بررسی تأثیر جرم پی بر رفتار لرزه‌ای سدهای بتنی قوسی پرداختند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعات حذف جرم پی باعث کاهش سطح تنش و تغییر مکان تاج سد در سدهای بتنی می‌گردد. همچنین در شرایط یکسان رکوردهای نزدیک به گسل پاسخ

[1] International Commission on Large Dams
[2] Maximum Considered Earthquake
[3] Hsinfengkiang
[4] Koyna
[5] Pacoima
[6] Bhattacharjee
[7] Calayir & Karaton
[8] Chopra

شدیدتری نسبت به رکوردهای مربوط به زمین‌لرزه‌های دور از گسل ایجاد خواهند نمود. ساوانت[1] و همکاران (۲۰۱۳) نسبت به بررسی رفتار هیدرودینامیکی سدهای بتنی تحت تأثیر تکان‌های شدید زمین‌لرزه‌های خاص پرداختند و الگوی رفتاری بدنه بتنی تحت این شرایط را ارائه نمودند.

در این تحقیق برای به دست آوردن نمونه‌هایی از رفتار سد بتنی وزنی تحت تحریک زلزله و سایر متغیرهای مؤثر در بارگذاری سد از تئوری شبکه‌های عصبی و مدل ماشین بردار پشتیبان[2] (SVM) استفاده شده است. برای این منظور از شبکه‌های عصبی در شبیه‌سازی (یادگیری) رفتار لرزه‌ای سد بتنی وزنی شفارود (گزارش شرکت مهاب قدس) استفاده شده و از آن برای تخمین جابه‌جایی تاج سد تحت بارگذاری لرزه‌ای استفاده به‌عمل‌آمده است. جهت نشان دادن توانایی این روش به دلیل عدم دسترسی به داده‌های ابزار دقیق سد، از نتایج تحلیل با استفاده از یکی از برنامه‌های مناسب موجود، جهت آموزش شبکه عصبی استفاده شده است. امتیاز اصلی این روش آن است که می‌تواند به‌طور مستقیم با داده‌های آزمایشگاهی یا داده‌های واقعی ثبت‌شده طی لرزش‌های تجربه‌شده که توسط ابزار دقیق سد یا به هر روش دیگر اندازه‌گیری شده، به کار گرفته شود. برای این منظور سد شفارود به‌عنوان سد نمونه انتخاب شده است. لازم به ذکر است که روش ارائه‌شده کلی بوده و برای بررسی رفتار سدهای بتنی قوسی و سدهای پشت‌بنددار و یا حتی با تغییراتی برای سدهای خاکی نیز قابل توسعه خواهد بود. در این روش نخست باید یک شبکه عصبی برای یادگیری رفتار دینامیکی سد، آموزش داده شود. برای این منظور به نمونه‌های اولیه جهت آموزش شبکه عصبی نیاز است. نمونه‌های اولیه از رفتار سد موردنظر تحت تحریک زلزله مشخصی به‌صورت زوج داده‌های ورودی- خروجی از جابه‌جایی تاج سد تهیه شده است. پس از آموزش، شبکه عصبی قادر به تحلیل رفتار دینامیکی سد، تحت تحریکی که تاکنون با آن مواجه نبوده، خواهد بود (منهاج، ۱۳۸۱).

مطالعات قبلی نشان می‌دهد از شبکه‌های آموزش‌دیده می‌توان برای درون‌یابی روی الگوهای ورودی جدید استفاده کرد. در واقع شبکه‌های عصبی قادر به یادگیری روابط از داده‌های ورودی و خروجی هر مسئله هستند. در تحلیل لرزه‌ای سدها با استفاده از شبکه‌های عصبی اگر بردارهای ورودی و خروجی با استفاده از آزمایش به‌دست‌آمده باشند، طبیعت مسئله و خصوصیات فیزیکی آن در این بردارها نهفته است که درنتیجه شبکه عصبی قادر به درک آن‌ها به‌صورت ضمنی و پیش‌بینی رفتار واقعی سد است. این ایده امکان توسعه مدل‌های توانا جهت تعیین رفتار غیرخطی با در نظرگیری تمام پارامترهای مؤثر را فراهم می‌کند. با استفاده از شبکه عصبی احتیاجی به مجموعه قوانین خاصی جهت حل مسئله وجود نیست و تکیه اساسی بر تربیت تدریجی سامانه است. برای حل یک مسئله با استفاده از شبکه عصبی ابتدا لازم است که پارامترهای مؤثر در حل مسئله شناسایی شوند، که با توجه به نوع مسئله می‌توان این پارامترها را تعیین نمود. این پارامترها به‌صورت بردارهای ورودی و خروجی با روش‌های موجود برای آموزش شبکه‌های عصبی، به شبکه آموزش داده می‌شوند (زینکویچ[3] (۱۹۹۹) و سینگ[4] و همکاران (۲۰۰۹)).

روش تحقیق

با توجه به تلاش طبیعت برای انجام کار با حداقل انرژی، می‌توان نحوه حل مسائل از سوی طبیعت را یک روش قدرتمند برای حل مسائل پیچیده دانست. به همین دلیل است که بشر برای حل مشکلات مربوط به خود، همواره به فکر مدل‌سازی ریاضی مسائل طبیعی بوده است. شبکه‌های عصبی، مدل‌های محاسبه‌ای پردازش موازی هستند که از ساختمان و نحوه عمل مغز انسان اقتباس شده‌اند. این شبکه‌ها از تعداد زیادی واحدهای پردازشگر ساده به نام گره، که با یکدیگر ارتباط دارند، تشکیل شده‌اند. هر گره قادر است از طریق راه‌های ورودی دارای وزن، سیگنال‌هایی را دریافت کرده و پس از به دست آوردن حاصل جمعی از وزن-های ورودی و ارزیابی تابع انگیزش خود، سیگنال‌های خروجی را از طریق راه‌هایی خروجی به واحدهای دیگر بفرستد. سپس خروجی کل شبکه محاسبه و با خروجی واقعی مقایسه می‌شود و وزن‌های شبکه با استفاده از الگوریتم‌های موجود تصحیح می‌شود. حاصل این محاسبات تابعی از وزن‌های اتصالات شبکه خواهد بود. درواقع شبکه، اطلاعاتی را که یاد گرفته است در این وزن‌ها ذخیره می‌کند و با این روش شبکه‌های عصبی مصنوعی،

[1] Sawant
[2] Support Vectors Machine
[3] Zeinkiewicz
[4] Singh

به عنوان سامانه های یادگیر در طی مراحل یادگیری رفتار خود را به تدریج بهبود می‌بخشند (سینگ و همکاران، ۲۰۰۹).

نخستین کاربرد شبکه‌های عصبی در کنترل سامانه‌ها توسط ویدرو در سال ۱۹۶۳ ارائه شده است. در بین سال‌های ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۰ شبکه‌های عصبی به نام CMAC توسط آلبوس برای کنترل سریع بازوهای ربات معرفی و مورد استفاده قرار گرفت. در سال‌های ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۰، بسیاری دیگر از شبکه‌های عصبی استاتیکی و دینامیکی و معماری IC آن‌ها پیشنهاد و پیاده‌سازی و در دهه بعدی استفاده از این ابزار در گرایش‌های مختلف مهندسی عمومیت بسیاری یافت. در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ از شبکه‌های عصبی در مدل‌سازی و شبیه‌سازی سامانه‌ها به‌ویژه سامانه‌های غیرخطی به‌صورت گسترده‌تری استفاده شده است (زینکوویچ، ۱۹۹۹).

بر اساس تجربیات مختلف، در شبکه‌های عصبی مصنوعی داده‌های به‌دست‌آمده محدود بوده و به‌طورکلی دارای الگویی غیریکنواخت و تعداد ابعاد بالا هستند و فقط درون فضای ورودی و با توزیع پراکنده شکل می‌گیرند. لذا دست‌یابی شبکه عصبی سنتی به تولید مدل‌هایی که بتواند روی این داده‌ها منطبق شود دشوار بوده و به نتایج مطلوبی منتهی نمی‌شود. ماشین بردار پشتیبان به‌عنوان یک روش مؤثری برای مدل‌سازی این‌گونه داده‌ها پیشنهاد شده است. این روش با افزایش ابعاد مسئله و با استفاده از نگاشت کرنل یک چهارچوب کاری یکپارچه را برای اکثر مدل‌ها فراهم نموده و امکان مقایسه بین نتایج را به وجود می‌آورد (هاستی[1] و همکاران، ۲۰۰۴). در واقع SVM یک شیوه جدید برای توابع جداساز هوشمند در اهداف تشخیص الگو (کلاس‌بندی) یا برای انجام تخمین توابع در مسائل رگرسیون، فراهم نموده است.

برای اولین بار ایده ماشین بردار پشتیبان توسط وپنیک[2] (۱۹۹۵) مطرح و در سال‌های بعدی توسعه داده شد به‌طوری‌که در سال‌های پس از ۲۰۱۰ کاربردهای مهمی در شاخه‌های مختلف علوم مهندسی پیدا نموده و مطالعات تکمیلی آن هنوز از زمینه‌های جذاب علمی به شمار می‌رود. لازم به ذکر است که الگوریتم‌های شبیه‌سازی هوشمند کلاسیک مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی[3] (ANNs) قدر مطلق خطا یا مجموع مربعات خطای داده‌های آموزش را حداقل می‌کنند ولی ماشین بردار پشتیبان اصل کمینه‌سازی خطای ساختاری را به کار می‌گیرد. بدین ترتیب مدلی که بعد VC[4] آن حداقل شده است، ایجاد می‌شود. تئوری توسعه داده‌شده توسط وپنیک نشان می‌دهد وقتی بعد VC مدل کم باشد، خطای مدل به‌طور مناسبی کم است که این مسئله به معنای اجرای خوب مدل روی اطلاعات آزمایشی است.

این ویژگی یک خاصیت جالب در محاسبات هوشمند است، زیرا مدلی که فقط روی زوج‌های اطلاعات آموزشی خوب اجرا شود، مدل خوبی نیست. بلکه مدلی که خوب تعمیم یابد یک ابزار مناسب به شمار می‌رود. اجرای خوب روی اطلاعات آموزشی شرط لازم و ضروری است ولی شرط کافی برای یک مدل قابل‌قبول نیست. در مدل‌های کلاسیک مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی، ساختار شبکه قبل از آموزش مشخص است و بهینه نمی‌شود ولی در مدل‌های SVM ساختار شبکه نیز به همراه وزن‌ها بهینه‌سازی می‌شود. علاوه بر آن SVM می‌تواند خروجی‌های احتمالاتی نیز داشته باشد. در حقیقت SVM توسعه‌ای از مفهوم شبکه عصبی است که نه تنها به کم بودن خطای کل مدل در پیش‌بینی نتایج توجه دارد بلکه سعی می‌کند در هر مرحله خطای مربوط به همان مرحله را کمینه نماید (هاستی و همکاران، ۲۰۰۴).

مواد و روش‌ها

در این پژوهش نمونه‌های اولیه از رفتار دینامیکی سد شفارود تحت تحریک زلزله‌های مختلف به‌صورت زوج داده‌های ورودی-خروجی توسط نرم‌افزار ANSYS تهیه شده است. پس از تربیت شبکه عصبی برای یک سد مشخص، شبکه قادر به تحلیل رفتار دینامیکی سد تحت تحریکی که تاکنون با آن مواجه نبود، خواهد بود. برای اثبات کارایی این روش برای چند زلزله این آزمون انجام شده است. در طول مطالعه مراحل زیر انجام گرفته است:

مرحله اول: بررسی شبکه‌های عصبی و ماشین بردار پشتیبان SVM و انتخاب مدل مناسب؛

[1] Hastie
[2] Vapnik
[3] Artificial Neural Networks
[4] Vapnik-Chervonenkis (VC) Dimension

مرحله دوم: مدل‌سازی، بارگذاری و تحلیل رفتار سدهای بتنی تحت بارهای زلزله و فراهم نمودن داده‌های مورد نیاز جهت آموزش؛

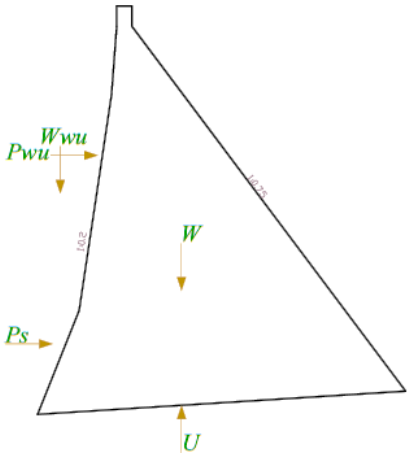
مرحله سوم: آموزش مدل WinSVM با داده‌های به‌دست‌آمده از قسمت قبل و راستی آزمائی مدل آموزش دیده و تفسیر نتایج.

در شکل (۱) مقطع حداکثر بدنه سد شفارود که برای تحلیل‌های این مطالعه انتخاب شده است به همراه مدل اجزاء محدود ساخته‌شده در محیط نرم‌افزار ANSYS نشان داده شده است. مشخصات اصلی این سد شامل ارتفاع از پی ۱۵۹ متر، عرض تاج سد ۶ متر و حداکثر عرض کف برابر ۱۴۶ متر است (گزارش شرکت مهاب قدس).

لازم به ذکر است با توجه به اینکه سد شفارود از نوع بتنی وزنی است و به‌صورت بلوک‌های مجزا ساخته می‌شود، رفتار آن را می‌توان با تقریب مناسب به‌صورت مسطح در نظر گرفت. جهت بررسی تأثیر متقابل سد و پی، پی در هر طرف تا حدود ۱/۵ برابر ارتفاع سد مدل شده است و تمامی گره‌های واقع در مرزهای طرفین سد و پی به‌صورت کامل مقید شده است. از تحلیل مدل اجزاء محدود ساخته‌شده، فرکانس ارتعاش طبیعی سد شفارود برای حالت‌های مخزن خالی و مخزن پر به ترتیب ۲/۱۱ و ۱/۷۷ هرتز به دست آمده است. مشخصات منظور شده برای بتن بدنه شامل جرم حجمی Kg/m^3 ۲۴۰۰، ضریب پواسون ۰/۱۷ و مدول الاستیسته استاتیک و دینامیکی به ترتیب ۲۱ و ۳۱/۵ گیگاپاسکال بوده است. سنگ پی در مدل اجزاء محدود بدون جرم فرض شده و ضریب پواسون، مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی آن به ترتیب برابر ۰/۲۷ و ۷/۵ گیگا پاسکال و ۱۰ گیگا پاسکال در نظر گرفته شده است.

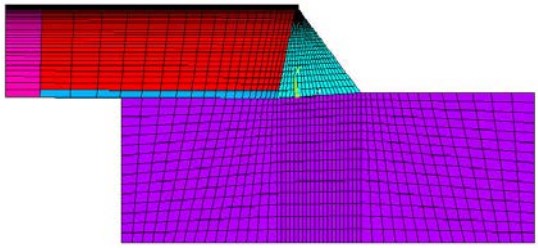
بدنه اصلی از ۸۰۰ المان نوع PLANE42 که در یک لایه قرار دارند، تشکیل شده است. المان PLANE42 چهار گرهی بـوده و در هر گره سه درجه آزادی دارد. برای مدل‌سازی پی همانند بدنه بتنی از ۷۵۰ عدد المان‌های نوع PLANE42 استفاده شده است و در سطح مشترک بین بدنه اصلی و پی گره‌ها به هم بسته شده و هیچ‌گونه لغزشی بین بدنه و پی مجاز نبوده است.

در ایـن مطالعه مخزن به طول بیش از ۴۵۰ متر (حدود ۳ برابر ارتفاع سد) به کمک ۸۰۰ المان از نـوع FLUID29 مدل‌سازی شده است. مدل اجزاء محدود ساخته‌شده برای مخزن از چهار قسمت شامل ۱) مجموعه المان‌های در تماس با بدنه اصلی سد، ۲) مجموعه المان‌های پیرامونی مخزن در تماس با پی، ۳) مجموعه المان‌های انتهای مخزن و ۴) مجموعه المان‌های میانی تشکیل شده است. نوع المان‌های در نظر گرفته شده برای هر یک از این قسمت‌ها با هم مشابه بوده ولی ویژگی‌های این المان‌ها نظیر میزان جذب، عبور و انعکاس امواج با هم متفاوت هستند به‌طوری‌که در المان‌های مجاور سازه سد اندرکنش بین سازه و سیال فعال شده و میزان انعکاس امواج ۱۰۰ درصد (صفر درصد جذب) منظور شده است. همچنین گره‌های المان‌های سازه و سیال بر هم منطبق شده و نفوذ جریان از بین رفته است ولی از اندرکنش بین مخزن و پی صرف‌نظر شده است. بنابراین در این المان‌های پیرامونی برخلاف المان‌های در تماس با سازه، اندرکنش بین سیال و سازه منظور نشده است. در این المان‌ها میزان انعکاس امواج در مرز ۸۰ درصد فرض شده است. با توجه به اینکه در واقعیت طول مخزن تا دوردست ادامه دارد، بنابراین لازم است مرز انتهای دور مخزن در مدل به‌گونه‌ای مانع از برگشت امواج به داخل سیستم شود، لذا درصد انعکاس امواج در المان‌های واقع در لایه انتهای مخزن صفر (میزان جذب ۱۰۰ درصد) منظور شده است (مهمت[1] و همکاران، ۲۰۱۰). در این مطالعه برای فراهم نمودن داده‌های موردنیاز جهت آموزش مدل SVM تحلیل‌های مختلفی صورت گرفته که لیست و جزئیات آن در جدول (۱) ارائه شده است.



(الف)

[1] Mehmet



(ب)

شکل (۱): الف) شکل هندسی و بارگذاری مقطع سد شفارود و ب) مدل اجزاء محدود بدنه، پی و مخزن

جدول(۱): لیست و مشخصات تحلیل‌های انجام شده در این پژوهش

	توضیح	شماره تحلیل
سری اول	کنترل رفتار مدل و عملکرد آن تحت تأثیر بارهای استاتیکی وزن و فشار آب مخزن و تحلیل مودال	تحلیل‌های شماره۱ تا۳
سری دوم	تحلیل سد شفارود تحت رکورد زلزله Whittier Narrows 1987 در PGA متغیر از ۰/۰۵g تا ۰/۶g	تحلیل شماره ۴ تا ۱۳
سری سوم	تحلیل سد شفارود تحت تأثیر زلزله‌های مختلف	تحلیل شماره ۱۴ تا ۲۲
سری چهارم	تحلیل سد شفارود تحت زلزله Whittier Narrows 1987 جهت بررسی تغییرات تراز آب مخزن	تحلیل شماره ۲۳ تا ۳۲

نتایج

راستی آزمایی مدل اجزاء محدود

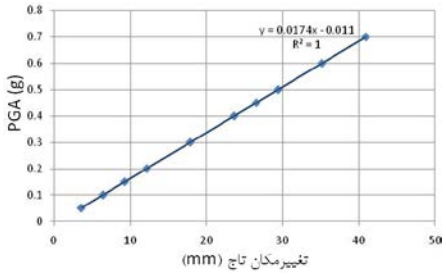
جهت اطمینان از روند ساخت مدل اجزا محدود در نرم‌افزار ANSYS و کنترل نتایج از مقایسه نتایج تحلیل در بارگذاری مشخص با برنامه اجزاء محدود PADAP استفاده شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل‌های سری ۱ تا ۳ صحت مدل‌سازی مورد تایید قرار گرفت. به‌طوری‌که سطح تنش‌های فشاری و کششی و جابه‌جایی تاج سد در تحلیل‌های خطی توسط ANSYS و PADAP اختلاف معناداری نداشتند.

بررسی تغییرات شتاب بیشینه زمین‌لرزه[1] (PGA)

برای این مرحله از تحلیل‌ها (شماره ۴ تا ۱۳)، سد شفارود تحت تأثیر رکورد زلزله Whittier Narrows 1987 در شرایط PGA متغیر از ۰/۰۵g تا ۰/۷g در ده حالت مورد بررسی قرار گرفته است. به‌عبارت‌دیگر، رکورد مورد نظر برای PGAهای مختلف نرمالیزه شده است. بر مبنای تحلیل‌های صورت گرفته حداکثر تغییر مکان تاج سد در راستای رودخانه (به‌عنوان معیار انتخابی جهت بررسی رفتار سد) در جدول (۲) ارائه و در شکل (۲) ترسیم شده است. همچنین در کنار این نمودار، رگرسیون و ضریب همگرایی داده‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود تغییر مکان حداکثر تاج سد به شتاب بیشینه رکورد PGA بستگی کامل خواهد داشت؛ بنابراین می‌توان با اطمینان از این اطلاعات جهت آموزش مدل WinSVM استفاده نمود.

جدول(۲): تغییر مکان تاج سد تحت زلزله Whittier Narrows

شماره تحلیل	شتاب بیشینه زمین‌لرزه (g)	تغییر مکان حداکثر (mm)
۴	۰/۰۵	۳/۵۴
۵	۰/۱	۶/۳۸
۶	۰/۱۵	۹/۲۵
۷	۰/۲	۱۲/۱۲
۸	۰/۳	۱۷/۸۸
۹	۰/۴	۲۳/۶۲
۱۰	۰/۴۵	۲۶/۵۰
۱۱	۰/۵	۲۹/۳۸
۱۲	۰/۶	۳۵/۱۲
۱۳	۰/۷	۴۰/۸۹



شکل(۲): بررسی اعتبار داده‌های بررسی تأثیر شتاب بیشینه زمین‌لرزه

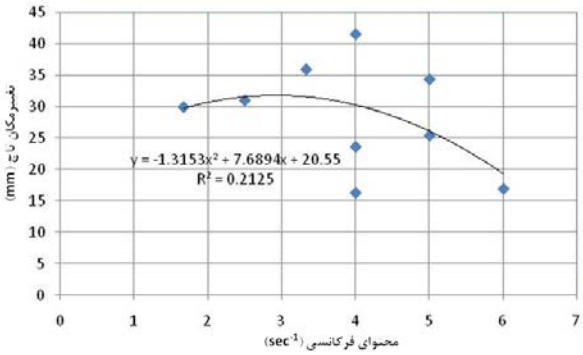
بررسی تأثیر محتوای فرکانسی زمین‌لرزه[2]

برای این مرحله از تحلیل‌ها (شماره ۱۴ تا ۲۲)، سد شفارود تحت اثر ده رکورد زلزله که در ایستگاه‌های مستقر در زمین‌های سنگی ثبت شده، قرار گرفته و تغییر مکان تاج سد به‌عنوان نتیجه تحلیل در جدول شماره (۳) ارائه گردیده است. به‌منظور فراهم نمودن امکان مقایسه، تمامی رکوردهای موردنظر با حداکثر شتاب (PGA) معادل ۰/۴g نرمالیزه شده است. مشابه قسمت قبل نتایج جدول شماره (۳) در نمودار شکل (۳) ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییر مکان حداکثر تاج سد به محتوای فرکانسی رکورد زلزله بستگی چندانی ندارد؛ بنابراین

[1] Peak Ground Acceleration

[2] Earthquake Frequency Content

استفاده از این اطلاعات جهت آموزش مدل WinSVM مجاز نیست. چنانچه این داده‌ها وارد داده‌های آموزشی شوند، منجر به افزایش خطای مدل در پیش‌بینی رفتار سد خواهد شد.



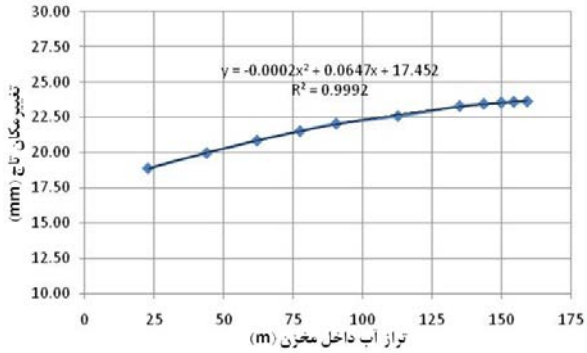
شکل(۳): بررسی اعتبار داده‌های بررسی تأثیر فرکانس

جدول(۳): تغییر مکان تاج سد تحت تأثیر زلزله‌های مختلف

شماره تحلیل	زمین‌لرزه	فرکانس غالب S^{-1}	تغییر مکان حداکثر (mm)
۱۴	Coalinga 1983	۴	۱۶/۲۸
۱۵	Imperial Valley 1979	۴	۴۱/۵۹
۱۶	Loma Prieta 1989	۱/۶۷	۲۹/۹۶
۱۷	Mammoth Lakes 1980	۵	۲۵/۴۴
۱۸	Northridge 1994	۲/۵	۳۱/۰۴
۱۹	Parkfield 1966	۳/۳۳	۳۵/۹۸
۲۰	San Fernando 1971	۶	۱۶/۹۱
۲۱	Victoria, Mexico 1980	۵	۳۴/۳۸
۲۲	Whittier Narrows 1987	۴	۲۳/۶۲

بررسی تأثیر ارتفاع آب مخزن

برای این مرحله از تحلیل‌ها (شماره ۲۳ تا ۳۲)، مدل سد شفارود تحت تأثیر رکورد زلزله Whittier Narrows 1987 (PGA=0.4g) در شرایط مختلف تراز آب مخزن قرار گرفته و تغییر مکان حداکثر تاج سد به‌عنوان نتیجه تحلیل در جدول شماره (۴) ارائه شده است. مشابه قسمت‌های قبل، نتایج جدول شماره (۴) در نمودار شکل (۴) ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده شود تغییر مکان تاج سد به‌صورت کامل (R^2 = ۱) به تراز آب داخل مخزن بستگی دارد؛ بنابراین می‌توان با اطمینان از این اطلاعات جهت آموزش مدل WinSVM استفاده نمود.



شکل(۴): بررسی اعتبار داده‌های بررسی تأثیر تراز آب مخزن

جدول(۴): تغییر مکان تاج سد تحت زلزله در ترازهای مختلف

شماره تحلیل	ارتفاع آب مخزن(m)	تغییر مکان حداکثر (mm)
۲۳	۲۲/۷۸	۱۸/۸۶
۲۴	۴۳/۸۷	۱۹/۹۵
۲۵	۶۱/۹۵	۲۰/۸۴
۲۶	۷۷/۴۲	۲۱/۵۱
۲۷	۹۰/۴	۲۲/۰۴
۲۸	۱۱۲/۵۸	۲۲/۵۸
۲۹	۱۳۴/۷۶	۲۳/۲۹
۳۰	۱۴۳/۴۱	۲۳/۴۴
۳۱	۱۴۹/۷۱	۲۳/۵۴
۳۲	۱۵۴/۲	۲۳/۵۹
۳۳	۱۵۹	۲۳/۶۲

پیش‌بینی رفتار سد با ماشین بردار پشتیبان

با درنظرگرفتن مواردی مانند سهولت کاربرد و استفاده از روش‌های جدید و به‌روز در پیاده‌سازی و با توجه به تجربه شخصی محقق در استفاده از چندین نرم‌افزار موجود، نرم‌افزاری ماشین بردار پشتیبان WinSVM مورد استفاده قرار گرفته است. این نرم‌افزار که برای اولین بار در سال ۲۰۰۵ توسط مارتین سول[1] توسعه داده شده، در حقیقت با هدف طراحی یک کتابخانه برای انجام عملیات یادگیری و استفاده از ماشین بردار پشتیبان طراحی شده است. آنالیزهای حساسیت صورت گرفته نشان می‌دهد با افزایش تعداد زوج‌های اطلاعات ورودی می‌توان میزان این خطا را کمتر نمود. به‌عبارت‌دیگر با افزایش اطلاعات ورودی شناخت مدل SVM از رفتار مدل کامل‌تر شده و فرآیند آموزش کامل‌تر خواهد شد.

[1] Martin Sewell

نتایج به‌دست‌آمده از پیش‌بینی رفتار سد شفارود در مقایسه با تحلیل نرم‌افزار ANSYS در جدول (۵) ارائه شده است. همان‌طور که از این نتایج مشخص است ماشین بردار پشتیبان توانایی پیش‌بینی نتایج را در شرایطی که قبلاً تجربه نکرده، دارد. در سه آنالیز صورت گرفته درصد خطای مدل به ترتیب ۵/۳، ۴/۷ و ۶/۱ درصد است که همگی در محدوده مجاز قرار دارند.

جدول(۵): پیش‌بینی رفتار سد توسط مدل WinSVM

PGA	تراز آب	زلزله	تغییر مکان تاج سد (mm)		خطا (٪)
			ANSYS	WinSVM	
۰/۳۵	۸۴	Whittier Narrows	۱۹/۱۵۸	۲۰/۱۷	٪۵/۳
۰/۵۲	۱۲۶/۲		۲۹/۸۴	۳۱/۲۴	٪۴/۷
۰/۶۳	۱۳۹/۵		۳۶/۴۵	۳۸/۶۷	٪۶/۱

نتیجه‌گیری

بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده، مدل WinSVM مورد آموزش قرار گرفته در این تحقیق جهت پیش‌بینی رفتار سد بتنی وزنی شفارود از کفایت لازم برخوردار است. ولی نحوه استفاده از این مدل در نتایج به‌دست‌آمده تأثیر زیادی دارد. به‌طوری‌که با افزایش تعداد زوج‌های اطلاعاتی مورد استفاده در آموزش میزان انطباق رفتار پیش‌بینی شده توسط مدل با رفتار واقعی بیشتر می‌شود. ولی این همگرایی نتایج تا حدی بوده و پس از آن میزان همگرایی کاهش می‌یابد. همچنین قبل از استفاده از نتایج تحلیل سازه در آموزش مدل لازم است نسبت به کفایت این اطلاعات اطمینان حاصل گردد. منظور از کفایت این است که پاسخ سازه تحت تأثیر بار زلزله باید به اندازه کافی به پارامتر موردنظر وابستگی داشته باشد؛ به عبارت دیگر چنانچه آموزش مدل WinSVM برای بررسی تأثیر متغیری مانند محتوای فرکانسی رکورد که بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته تأثیر اندکی در حداکثر تغییر مکان داشت، صورت پذیرد نتایج به‌دست‌آمده از دقت کافی برخوردار نخواهد بود.

مراجع

۱- شرکت مهندسین مشاور مهاب قدس. (۱۳۷۴). "گزارش فنی و طراحی سد شفارود."، تهران.

۲- عرب‌پور،ح.، نظری، ح. (۱۳۸۲). " تأثیر شبکه های عصبی مصنوعی در بهینه سازی سازه ها. " دهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی عمران.

۳- فدایی، م.ر. و رحیم زاده، ف. (۱۳۸۴). " بررسی تأثیر جرم پی در رفتار لرزه ای سدهای بتنی قوسی." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

۴- منهاج، م.ب. (۱۳۸۱). "مبانی شبکه های عصبی." انتشارات دانشگاه امیرکبیر، تهران.

5- ANSYS User's Manual, for Revision 12.0, (2012).

6- Bhattacharjee, S. S. (1994). "FRAC_DAM manual: a finite element analysis computer program to predict the fracture and damage response of concrete structures." Report No.EPM/GCS-1993-04, Department of civil engineering, Ecole Polytechnique, Montreal, Quebec, Canada.

7- Calayir, Y. and Karaton, M. (2005). "Two-dimensional seismic analyses of Koyna gravity dam are performed by using the 1967 Koyna." *Computers & structures*. 83(19-20), 1595-1606.

8- Chopra, A. K. and Chakrabarti, P. (1973). "The Koyna earthquake and the damage to Koyna Dam." *Bulletin of the Seismological Society of America*. 63(2), 381-397.

9- Ghaemian, M. and Ghobarah, A. (2000). "Staggered solution scheme for dam-reservoir interaction." *Journal of Fluid and Structure*. 12(7), 933-948.

10- Hastie, T., Rosset, S., Tibshirani, R. and Zhu, J. (2004). "The Entire Regularization Path for the Support Vector Machine." *Journal of Machine Learning Research*. 5(12), 1391–1415.

11- Mehmet, A. and Erman, S. (2010). "Non-linear seismic response of concrete gravity dams to near-fault ground motions including dam-water-sediment-foundation interaction." *Applied Mathematical Modelling*. 34(11), 3685–3700.

12- Sawant, M. B. and Dey, A. (2013). "Hydrodinamic behaviour of Pine Flat dam subjected to El-Centro strong motion." *Proceedings of Indian Geotechnical Conference, Roorkee*.

13- Singh, D. R. Y. and Chauhan, A. S. (2009). "Neural networks in data mining." *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*.15(1), 37-42.

14- Zeinkiewicz, O.C. and Gallagher, R. H. (1999). "Optimum Structural Design." John Wiley & Sons, NewYork.