



مدل سازی و ساده سازی ریاضی نیروهای دینامیکی وارد بر سدهای بتنی ناشی از زلزله (مطالعه موردی سد بتنی وزنی شفارود)

ندا مهین خاکی*، سید محمود حسینی**، محمدرضا فدائی تهرانی***

* کارشناسی ارشد مهندسی عمران، سازه های هیدرولیکی، تهران

Neda.mahinkhaki@yahoo.com

** استاد و عضو هیئت علمی پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران

hosseini@iiees.ac.ir

*** دکتری مهندسی عمران-آب، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

fadaei@civil-sharif.edu

چکیده

استفاده از ماشین های بردارهای پشتیبان در مسائل دسته بندی و رگرسیون، رویکرد جدیدی است که در چند سال اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفته و از آن در طیف وسیعی از کاربردها استفاده شده است. در این تحقیق نیز سعی شده تا از این روش برای ساده سازی ریاضی نیروهای دینامیکی وارد بر سدهای بتنی ناشی از زلزله استفاده گردد. در واقع ماشین های بردار پشتیبان نوع تکامل یافته شبکه های عصبی بوده که تحت شرایطی که پاسخ سد از قبل توسط تحلیل با اندازه گیری تجربی معلوم است، مورد آموزش قرار خواهد گرفت و پس از تکمیل فرایند یادگیری از آن برای برآورد رفتار سد تحت بارگذاری زلزله ای متفاوت استفاده خواهد گردید .

برای آموزش شبکه در این تحقیق از مدل اجزاء محدود سد بتنی وزنی شفارود در نرم افزار ANSYS، استفاده شده است. پس از فراهم آوری پاسخ سد شفارود تحت تاثیر چندین زمین لرزه مختلف به کمک برنامه اجزاء محدود ANSYS و آماده شدن زوج های اطلاعاتی ورودی و خروجی، ماشین بردارهای پشتیبان WinSVM مورد آموزش قرار گرفت. امتیاز اصلی این روش در آن است که می تواند مستقیماً با داده های آزمایشگاهی یا رکورد واقعی در محل کار کند و حتی برای سدهای بتنی قوسی یا پشت بنددار نیز قابل توسعه خواهد بود و محدودیتی ندارد.

نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان دهنده پتانسیل بالای ماشین های بردار پشتیبان در تعیین رفتار سدهای بتنی وزنی می باشد و این روش بطور بالقوه امکان بکار گرفته شدن در سدهای قوسی و پشت بنددار و حتی سازه های دیگری نظیر پل و ... را نیز خواهد داشت. از نتایج این تحقیق مشاهده می شود مدل تعلیم یافته با دقت قابل قبولی تغییر مکان تاج سد شفارود را برای بارگذاری دینامیکی که قبلاً تجربه نکرده، تخمین می زند.

واژه های کلیدی: بارگذاری دینامیکی، سدهای بتنی، شبکه های عصبی، ماشین بردارهای پشتیبان SVM



1- مقدمه:

مقوله تامین ایمنی سدها در برابر زلزله، با وجود اثرات عوامل مختلف، یکی از زمینه های تخصصی و پیچیده ای است که سالهای متمادی ذهن محققین را به خود مشغول کرده است. در دو دهه اخیر با توجه به بالا رفتن توانایی کامپیوترها و ابداع و اصلاح روش های مکانیک محاسباتی، پیشرفت های قابل ملاحظه ای در حل چنین سیستم های پیچیده ای حاصل شده است. با توجه به واقع شدن کشور ایران در مناطق با پتانسیل زلزله خیزی بالا توجه به این موضوع اهمیت بیشتری می یابد. لذا بررسی مجدد رفتار این سازه ها با استفاده از دانش روز بشری لازم به نظر می رسد، چرا که مطالعات انجام شده نشان داده که روش های قبلی طراحی بر خلاف انتظار محافظه کارانه نبوده و علاوه بر این، تعداد زیادی از سدها در مناطق با زلزله خیزی بالا، بعلت دوره بازگشت طولانی زلزله های بزرگ، هنوز زمین لرزه های پیش بینی شده توسط مطالعات لرزه خیزی را تجربه نکرده اند.

مطالعات صورت گرفته نشان می دهد از شبکه های آموزش دیده می توان برای درون یابی روی الگوهای ورودی جدید استفاده کرد. در واقع شبکه های عصبی قادر به یادگیری روابط از داده های ورودی و خروجی مسأله هستند. در آنالیز دینامیکی سد با استفاده از شبکه های عصبی اگر بردارهای ورودی و خروجی با استفاده از آزمایش بدست آمده باشند، طبیعت مسأله و خصوصیات فیزیکی آن در این بردارها نهفته است که در نتیجه شبکه عصبی قادر به درک آن ها بصورت ضمنی می باشد. اما در این تحقیق به عنوان نخستین تحقیق در این زمینه برای بدست آوردن نمونه هایی از رفتار سد بتنی وزنی تحت تحریک زلزله، و سایر متغیرهای موثر در بارگذاری سد استفاده شده است.

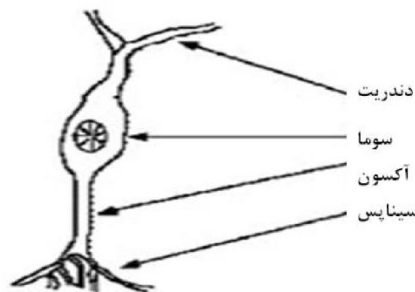
در این تحقیق از شبکه های عصبی در شبیه سازی (یادگیری) رفتار دینامیکی تاج سد بتنی وزنی سفارود استفاده شده است و سپس از آن در تخمین و تحلیل پاسخ سد تحت هر زلزله ای استفاده بعمل آمده است. جهت نشان دادن توانایی این روش بجای نتایج آزمایشگاهی از نتایج تحلیل با استفاده از یکی از برنامه های مناسب موجود، جهت تربیت شبکه عصبی استفاده می شود. اما امتیاز اصلی این روش در آن است که می تواند مستقیماً با داده های آزمایشگاهی یا رکورد واقعی در محل کار کند. برای این منظور سد سفارود به عنوان سد نمونه انتخاب شده است. همچنین در این پژوهش از شبکه عصبی SVM یا به عبارت دیگر از ماشین های بردار پشتیبان استفاده شده است. البته همین متد برای سدهای بتنی قوسی یا پشت بنددار نیز قابل توسعه خواهد بود.

در این روش نخست باید یک شبکه عصبی برای یادگیری رفتار دینامیکی سد، آموزش داده شود. بدین منظور به نمونه های اولیه جهت تربیت شبکه عصبی احتیاج است. نمونه های اولیه از رفتار سد مورد نظر تحت تحریک زلزله مشخصی بصورت زوج داده های ورودی- خروجی تهیه می گردد. در این پژوهش، برای تهیه نمونه های اولیه از برنامه ANSYS استفاده شده است. پس از تربیت، شبکه عصبی قادر به تحلیل رفتار دینامیکی سد، تحت تحریکی که تاکنون با آن مواجه نبوده، می باشد. برای اثبات کارایی این روش، برای چند زلزله این آزمون انجام گرفته است.

2- شبکه های عصبی و مدل SVM:

الهام گرفتن از طبیعت، همواره یکی از راه های حل مسائل مورد مطالعه بشر بوده است. با توجه به تلاش طبیعت برای انجام کار با حداقل انرژی، می توان نحوه حل مسایل از سوی طبیعت را به یک روش قدرتمند برای حل دانست. از همین روست که انسان برای حل مسایل مربوط به خود، همواره به فکر مدل سازی ریاضی مسائل طبیعی بوده است. روش شبکه عصبی مصنوعی یکی از روش های قدرتمند در حل بسیاری از مسائل و مشکلات بشر می باشد. شبکه عصبی بدن انسان که شاید بتوان آن را پیچیده ترین سیستم موجود در طبیعت دانست، دارای این قابلیت تجزیه و تحلیل، اظهار نظر، جمع بندی و تصمیم گیری در مورد مسائل را دارد و از همین روست که دانشمندان همواره به فکر استفاده از این سیستم در حل مسائل خود بوده اند.

شبکه های عصبی، مدل های محاسبه ای پردازش موازی هستند که از ساختمان و نحوه عمل مغز انسان اقتباس شده اند. این شبکه ها از تعداد زیادی واحدهای پردازشگر ساده به نام گره (شکل 1)، که با یکدیگر ارتباط دارند، تشکیل شده اند. هر گره قادر است از طریق راه های ورودی و وزنی، سیگنالهایی را دریافت کرده و پس از بدست آوردن حاصل جمعی از اوزان ورودی و ارزیابی تابع انگیزش خود، سیگنالهای خروجی را از طریق راه هایی خروجی به واحدهای دیگر بفرستد. سپس خروجی کل شبکه محاسبه و با خروجی واقعی مقایسه می شود و وزن های شبکه با استفاده از الگوریتمهای موجود تصحیح می شود. حاصل این محاسبات تابعی از اوزان اتصالات شبکه است. در واقع شبکه، اطلاعاتی که یاد گرفته است را در این اوزان ذخیره می نماید. شبکه های عصبی مصنوعی، به عنوان سیستم های یادگیر در طی مراحل یادگیری رفتار خود را تدریجاً بهبود می بخشند.



شکل (1): ساختمان ساده یک نرون در مغز انسان

نخستین کاربرد شبکه های عصبی در کنترل سیستم ها توسط ویدرو در سال 1963 ارائه شده است. در خلال سال 1970 تا 1980 شبکه های عصبی به نام CMAC توسط آلبوس برای کنترل بلادرنگ بازوهای ربات معرفی و مورد استفاده قرار گرفت. در خلال 1980 تا 1990، بسیاری دیگر از شبکه های عصبی استاتیکی و دینامیکی و معماری IC آنها پیشنهاد و پیاده سازی شدند.

در سالهای بعدی از شبکه های عصبی در مدل سازی و شبیه سازی سیستمها علی الخصوص سیستم های غیرخطی به کرات استفاده شده است. مثلاً در صنایع شیمیایی و مسائل کنترل پروازی که علی القاعده سیستم ها چند متغیره با تعداد متغیرهای حالت زیاد می باشند، شبکه های عصبی به خوبی مورد استفاده قرار گرفته است.

تجربه ثابت کرده در شبکه های عصبی مصنوعی داده های بدست آمده محدود و نمونه وار بوده و به طور کلی داده های بدست آمده دارای الگویی غیریکنواخت و تعداد ابعاد بالا می باشد و فقط درون فضای ورودی و با توزیع پراکنده شکل می گیرند. لذا دست یابی شبکه عصبی سنتی به تولید مدل هایی که بتواند روی این داده ها منطبق شود غالباً دشوار بوده و به نتایج چندان مطلوبی منتهی نمی شود.

ماشین های بردار پشتیبان¹ (SVM) روش موثری برای مدلسازی این داده ها می باشند. 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 را به وجود می آورد [13].

در واقع SVMs یک شیوه جدید برای توابع جداساز هوشمند در اهداف تشخیص الگو (کلاس بندی) یا برای انجام تخمین توابع در مسائل رگرسیون، فراهم نموده است.

ایده اولیه ماشین های بردار پشتیبان توسط Vapnik در سال ۱۹۹۵ مطرح گردید و در سال های بعدی کاربردهای مهمی در شاخه های مختلف علوم مهندسی داشته است.

الگوریتم های شبیه سازی هوشمند کلاسیک مانند شبکه های عصبی مصنوعی² (ANNs) قدرمطلق خطا یا مجموع مربعات خطای داده های آموزش را حداقل می کنند ولی ماشین های بردار پشتیبان اصل حداقل سازی خطای ساختاری را به کار می گیرند. بدین ترتیب مدلی که بعد³ VC آن حداقل شده است، ایجاد می شود. تئوری توسعه داده شده توسط Vapnik نشان میدهد وقتی بعد VC مدل کم باشد، خطای مدل به طور مناسبی کم است، که این مسأله به معنای اجرای خوب مدل روی اطلاعات آزمایشی است.

این ویژگی یک خاصیت جالب در محاسبات هوشمند است، زیرا مدلی که فقط روی زوج های اطلاعات آموزشی خوب اجرا شود، مدل خوبی نیست. بلکه مدلی که خوب تعمیم یابد یک مدل مناسب است. اجرای خوب روی اطلاعات آموزشی شرط لازم و ضروری است ولی شرط کافی برای یک مدل قابل قبول نیست. در مدل های کلاسیک مانند شبکه های عصبی مصنوعی، ساختار شبکه قبل از آموزش مشخص است و عملاً بهینه نمی شود ولی در مدل های SVM ساختار شبکه نیز به همراه وزن ها بهینه سازی می شود. علاوه بر آن SVM میتواند خروجی های احتمالاتی نیز داشته باشد.

در حقیقت SVM توسعه ای از مفهوم شبکه عصبی است که صرفاً به کم بودن خطای کل مدل در پیش بینی نتایج توجه دارد نه به این که سعی کند در هر مرحله خطای مربوط به همان مرحله را کمینه کند.

¹ Support Vectors Machine

² Artificial Neural Networks

³ Vapnik-Chervonenkis (VC) Dimension

SVM در ابتدا برای حل مسائل دسته بندی کاربرد داشت ولی امروزه برای حل مسائل رگرسیون کاربرد پیدا کرده

است.

3- روش انجام مطالعه:

همان طور که گفتیم تاکنون روش ها و مدل‌های مختلفی برای تعیین رفتار سدهای بتنی توسعه داده شده است. لیکن از آنجائی که امکان بررسی جامع صحت و اعتبار آن‌ها به دلیل کمبود نتایج تجربی وجود ندارد و همچنین اختلافات موجود در نتایج حاصل از مدل‌های مختلف، انتخاب یک مدل مناسب برای تحلیل لرزه‌ای سدهای بتنی وزنی، می‌تواند بسیار مشکل باشد. بنابراین ما در این تحقیق با ایجاد یک شبکه عصبی جدید و تربیت آن، دیگر نیاز به تعریف پارامترهای مختلف موثر و تعریف انواع مدل‌های رفتاری را نخواهیم داشت. به طوری که یک شبکه عصبی با یادگیری رفتار دینامیکی سد، بتواند بمثابة یک تحلیل گر عمل کند و با پس خور کردن اطلاعات بدست آمده از تحلیل در یک مقطع زمانی، همانند روش‌های عددی، رفتار سد را در گام زمانی بعدی تخمین بزند. بدین منظور ایده فوق نیازمند به پژوهش گسترده و طولانی مدتی دارد تا به نتیجه نهایی برسد و این تحقیق نخستین گام در رسیدن به این هدف است.

از آنجا که انجام آزمایش و کسب داده‌های واقعی در این مرحله به دلایل مختلف میسر نیست بنابراین بجای نتایج آزمایشگاهی، از نتایج تحلیل با استفاده از یکی از برنامه‌های مناسب موجود استفاده می‌شود. سپس از نتایج بدست آمده جهت تربیت و آموزش شبکه عصبی استفاده می‌شود. اما امتیاز اصلی روش تحلیل مبتنی بر استفاده از شبکه‌های عصبی در آن است که می‌تواند با داده‌های آزمایشگاهی یا رکورد واقعی در محل کار کند و انتظار می‌رود که نتایج دقیقتری از تحلیل با روش‌های عددی بدست دهد. همچنین انتظار می‌رود که زمان تحلیل با استفاده از روش پیشنهادی به مراتب کمتر از زمان تحلیل با روش‌های عددی باشد.

این ایده امکان توسعه مدل‌های توانا جهت تعیین رفتار غیرخطی با در نظرگیری تمام پارامترهای موثر را فراهم می‌آورد. با استفاده از شبکه عصبی احتیاجی به مجموعه قوانین خاصی جهت حل مسأله وجود ندارد و تکیه اساسی بر تربیت تدریجی سیستم می‌باشد. برای حل یک مسأله با استفاده از شبکه عصبی ابتدا لازم است که پارامترهای مؤثر در حل مسأله تعیین شوند، که با توجه به نوع مسأله می‌توان این پارامترها را تعیین نمود. این پارامترها بصورت بردارهای ورودی و خروجی با روش‌های موجود برای آموزش شبکه‌های عصبی، به شبکه آموزش داده می‌شوند. پس از آموزش، شبکه مورد آزمون قرار می‌گیرد.

در روش‌های موجود برای آنالیز دینامیکی سدها فرض‌های ساده کننده‌ای- مثلاً در تعیین مشخصات فیزیکی (جرم، میرایی، و رفتار ماده)- برای فرمول بندی مسأله وجود داد که خود باعث ورود تقریب به مسأله می‌شود. اما در مواجهه شبکه‌های عصبی با پدیده‌های فیزیکی، برای یادگیری پدیده فیزیکی توسط شبکه عصبی نیازی به ساده‌سازی اولیه برای فرمول بندی مسأله نمی‌باشد. چرا که خود شبکه عصبی، با استفاده از نمونه‌های بدست آمده

از طبیعت که می تواند بصورت زوج بردارهای ورودی- خروجی باشند قادر به درک روابط حاکم بر مسأله بطور ضمنی می باشد و مشخصات فیزیکی مسأله نیز بصورت ضمنی درون شبکه قرار می گیرد.

در این پژوهش همان طور که اشاره شد هدف سازه سازی ریاضی تحلیل دینامیکی سد مورد نظر، با استفاده از نوع توسعه یافته شبکه های عصبی تحت عنوان ماشین های بردار پشتیبان، به عنوان یک روش جدید، می باشد. نمونه های اولیه از رفتار دینامیکی سد مورد نظر تحت تحریک زلزله های مشخصی بصورت زوج داده های ورودی- خروجی تهیه گردید. در تهیه نمونه های اولیه از برنامه اجزاء محدود ANSYS استفاده 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، می باشد. برای اثبات کارایی این روش برای چند زلزله این آزمون انجام گرفته است. در این پژوهش مراحل کلی زیر انجام شده است:

مرحله اول: بررسی شبکه های عصبی و ماشین های بردار پشتیبان SVM و انتخاب مدل مناسب
مرحله دوم: بررسی نحوه مدلسازی، بارگذاری، نحوه تحلیل و رفتار سدهای بتنی وزنی تحت بارهای دینامیکی زلزله و انتخاب سد و رکوردهای زمین لرزه مناسب

مرحله سوم: ساخت مدل اجزاء محدود سد بتنی شفاورد، تحلیل تحت بارگذاری دینامیکی زلزله، آموزش مدل WinSVM و راستی آزمائی مدل آموزش دیده و تفسیر نتایج.

4- تاریخچه تحقیقات قبلی:

تاریخچه مطالعه رفتار سدهای بتنی طولانی و از زمان های دور بوده است. در ابتدا تحلیل ها ساده تر و مبتنی بر فرضهای ساده کننده متعدد بوده که با توسعه دانش این فرضیات به تدریج به شرایط واقعی نزدیک تر شده است. Chopra و همکاران در سال 1972 به عنوان اولین قدم با استفاده از تحلیل الاستیک خطی، رفتار لرزه ای و پیش بینی ترک در سدهای بتنی را مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق سدهای بتنی وزنی Koyna در هندوستان و Pine Flat در ایالات متحده آمریکا بدون در نظر گرفتن اندرکنش دریاچه و پی تحت زلزله Koyna، تحلیل گردید [1].

اولین تحلیل غیرخطی المان محدود سدهای بتنی وزنی توسط Pal در سال 1974 انجام شد. سد Koyna با فرض صلب بودن پی و بدون در نظر گرفتن دریاچه با به کارگیری مدل ترک پخش شده با معیار مقاومت شکست مصالح مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل بستگی زیادی به خصوصیات مصالح و اندازه المان ها داشت [2].

Vargas و Fenves در سال 1989 پاسخ لرزه ای سدهای بتنی وزنی را بررسی نمودند. در این تحقیق اندرکنش بین سد و سیال تراکم پذیر در نظر گرفته شد. با استفاده از یک روش عددی براساس تئوری باند ترک با معیار ترک خوردگی کششی بتن، رفتار دینامیکی غیرخطی سیستم سد و دریاچه بررسی شده است و ترک خوردگی بتن به عنوان مهمترین پدیده غیرخطی مطرح گردید. بزرگترین بلوک سد بتنی وزنی Pine Flat تحت مولفه S69E زلزله Taft با افزایش شدت 1/5، 2 و 2/5 در حالت مخزن خالی و پر تحلیل شد. [3].

Battacharjee و Lager در سالهای 1993 و 1994، مطالعه وسیعی در تحلیل غیرخطی سدهای بتنی وزنی انجام دادند. جهت بررسی پاسخ شکست سد از مدل ترک پخش شده و برای اثر دریاچه از جرم افزوده استفاده کردند. در این مطالعه برای تاثیر بارگذاری دو محوره در مراحل شروع و گسترش ترک از معیارهای مناسبی استفاده شد. نتایج حاصل از تحلیل های استاتیکی و دینامیکی با نتایج آزمایشگاهی و ترک های ایجاد شده در سد وزنی Koyna مقایسه و مورد تایید واقع شد. پدیده نفوذ آب به داخل ترکها و فشار بالا برنده و نیز اثر افزایش ارتفاع آب دریاچه بر سد مورد مطالعه قرار گرفت [4].

Ghobarah و Ghaemian در سال 1999، تحلیل لرزه ای غیرخطی دو بعدی سد بتنی را با در نظر گرفتن اندرکنش سد و دریاچه ارائه نمودند. در این تحقیق از مدل ترک پخش شده برای نشان دادن پاسخ سد و ترک خوردگی بدنه آن استفاده شده است. 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 گرفته است. تفاوت های مشاهده شده اهمیت مدل کردن دریاچه جهت بررسی پاسخ واقعی سد را نشان می دهد [5].

Guanglum و Pekau در سال 2000، برای بررسی رفتار دینامیکی سدهای بتنی وزنی روشی عددی براساس تئوری باند ترک غیرخطی ارائه نمودند [6].

Calayir و Karaton در سال 2005، پاسخ شکست لرزه ای دو بعدی سد بتنی وزنی با اثر اندرکنش سد و دریاچه را بررسی کردند. فرمول بندی لاگرانژ برای سیستم دینامیکی سازه و سیال در حوزه زمان را ارائه دادند. از مدل ترک چرخشی هم محور شامل رفتار نرم شدگی بتن استفاده نمودند. سد بتنی وزنی Koyna تحت زلزله Koyna مورد تحلیل دینامیکی خطی قرار گرفت. کانتور دوبرعدهی حداکثر تنش های کششی اصلی بزرگترین بلوک سد، نشان داد که در پنجه و گلوگاه سد نسبت به نقاط دیگر مقطع، بیشترین تنش های کششی اصلی به وجود می آید [7].

در سال 1384 رحیم زاده و فدایی مطالعات خود را در خصوص بررسی تاثیر جرم پی در رفتار لرزه ای سدهای بتنی قوسی صورت دادند. آنها برای انجام مطالعات خود مدل سد کارون 4 را در نرم افزار اجزاء محدود ANSYS بکار بردند و در ادامه تحقیقات خود به بررسی تاثیر نوع رکوردهای زلزله نزدیک به گسل و دور از گسل بر رفتار سدهای بتنی پرداختند. براساس نتایج بدست آمده از این مطالعات حذف جرم پی باعث کاهش سطح تنش و تغییر مکان تاج سد در سدهای بتنی می گردد. همچنین در شرایط یکسان رکورهای نزدیک به گسل پاسخ شدیدتری نسبت به رکوردهای مربوط به زمین لرزه های دور از گسل ایجاد خواهند کرد [8].

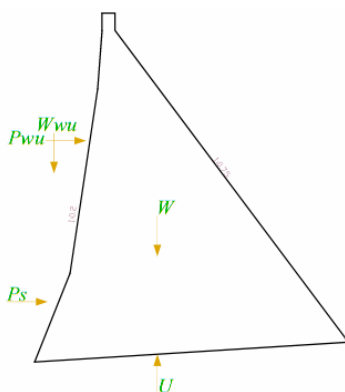
5- مدل سازی و تحلیل:

برای تهیه مدلی که رفتار آن با واقعیت تطابق داشته باشد بایستی از فرضیات مناسبی در رابطه با هندسه سد، توده سنگ پی و مشخصات مصالح استفاده نمود. هندسه بدنه سد مشخص است و می توان با المان های مناسب در روش اجزاء محدود آن را مدل کرد. تهیه مدل دقیقی از پی و مخزن خصوصاً برای بررسی اثر زلزله پیچیده تر می باشد. در شکل شماره (2) مقطع حداکثر بدنه سد شفارود نشان داده شده است. همچنین مشخصات اصلی سد شفارود عبارتند از [14]:

حداکثر ارتفاع از پی: 159 متر

عرض تاج: 6 متر

حداکثر عرض: 147 متر



شکل (2): شکل هندسی و بارگذاری مقطع سد شفارود [14]

با توجه به اینکه سد بتنی وزنی می باشد و بصورت بلوک های مجزا ساخته می شود رفتار آن را می توان با تقریب مناسب بصورت مسطح در نظر گرفت.

در این مطالعه تحلیل تنش سد شفارود بوسیله نرم افزار اجزاء محدود ANSYS صورت گرفته است لیکن در زمان طراحی برای طراحی و تحلیل این سد از نرم افزار PADAP استفاده شده است. پس از ساخت مدل در نرم افزار ANSYS نتایج بدست آمده نشان دهنده همخوانی نتایج مدل ساخته شده در این تحقیق با مدل طراحی بوده است. علت انتخاب برنامه ANSYS بعنوان یک برنامه عمومی آنالیز سازه ها و نه یک برنامه تخصصی سد های بتنی در این مطالعه، استفاده از قابلیت در نظر گیری همزمان عوامل مختلف از جمله اثرات تراکم پذیری آب، رفتار غیر خطی بدنه سد (اعم از رفتار غیر خطی درزها و بتن حجیم) و همچنین پس پردازش مطلوب نتایج می باشد.

به منظور بررسی تاثیر متقابل سد و پی قسمتی از پی نیز مدل شده است. پی سد در هر طرف تا حدود 1/5 برابر ارتفاع سد مدل شده است و تمامی گره های واقع در مرزهای طرفین سد و پی کاملاً مقید شده است. در سد شفارود فرکاس

طبیعی برای حالت های مخزن خالی و مخزن پر به ترتیب 2/11 و 1/77 هر تر بدست آمده است. مشخصات بتن بدنه سد بصورت زیر به استناد گزارشات طراحی سد در نظر گرفته شده است [14]:

جرم حجمی بتن :	2400 کیلوگرم بر متر مکعب
ضریب پواسون :	0/17
مدول الاستیسیته استاتیکی :	21 گیگاپاسکال
مدول الاستیسیته دینامیکی :	31/5 گیگاپاسکال

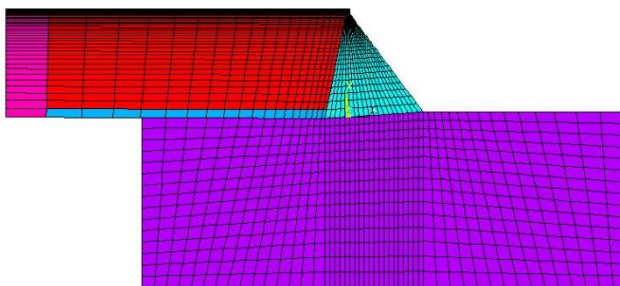
سنگ پی در مدل اجزاء محدود بدون جرم فرض شده و به استناد گزارش فنی و طراحی سد ضریب پواسون، مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی به ترتیب برابر 0/27 و 7/5 گیگاپاسکال و 10 گیگاپاسکال در نظر گرفته شده است. سایر مفروضات مدلسازی به شرح زیر می باشد:

- ✓ پی بدون جرم و اندرکنش پی و سد منظور نشده است.
- ✓ از اندرکنش بین مخزن و پی صرف نظر شده است.
- ✓ رفتار مصالح خطی فرض شده است.

مدل ساخته شده برای سد وزنی شفاوود در این مطالعه شامل بخش های (الف) بدنه اصلی، (ب) پی و (ج) مخزن می باشد (شکل 3).

بدنه اصلی از نوع PLANE42 که در یک لایه قرار دارند، تشکیل شده است. المان PLANE42 چهار گرهی بوده و در هر گره سه درجه آزادی دارد.

برای مدلسازی پی همانند بدنه بتنی از المان های نوع PLANE42 بکار رفته است. شکل هندسی پی بصورت مستطیلی است. در سطح مشترک بین بدنه اصلی و پی گره ها به هم بسته شده و هیچ گونه لغزشی بین بدنه و پی وجود ندارد. تعداد المان های تشکیل دهنده پی 750 است و المان بندی به نحوی انجام شده که در مجاورت سد، المان ها ابعاد کوچکتری (در حدود ابعاد بدنه) داشته باشند و با فاصله گرفتن از بدنه اصلی ابعاد المان ها بزرگتر می شود.



شکل (3): مدل اجزاء در محیط نرم افزار ANSYS

مدل مخزن در این مطالعه از چهار قسمت شامل (1) مجموعه المان های در تماس با بدنه اصلی سد، (2) مجموعه المان های پیرامونی مخزن در تماس با پی، (3) مجموعه المان های انتهای مخزن و (4) مجموعه المان های میانی تشکیل

شده است. نوع المان های در نظر گرفته شده برای هر یک از این قسمت ها با هم مشابه بوده ولی ویژگی های این المان ها نظیر میزان جذب، عبور و انعکاس امواج با هم متفاوت است. در المانهای مجاور سازه سد اندرکنش بین سازه و سیال فعال شده است. در ضمن میزان انعکاس امواج 100 درصد (صفر درصد جذب) در نظر گرفته شده است. همچنین گره های المان ها بر هم منطبق شده اند و نفوذ جریان نیز نداریم. مجموعه المان های پیرامونی در تماس با پی قرار دارند. در این مطالعه از اندرکنش بین مخزن و پی صرف نظر شده است. بنابراین در این المان های پیرامونی بر خلاف المان های در تماس با سازه، اندرکنش بین سیال و سازه منظور نشده است. در این المان ها میزان انعکاس امواج در مرز 80 درصد فرض شده است. با توجه به اینکه در واقعیت طول مخزن تا بی نهایت ادامه دارد و لازم است مرز انتهای دور مخزن در مدل به گونه ای مانع از برگشت امواج به داخل سیستم گردد، بنابراین درصد انعکاس امواج در این المان ها صفر (میزان جذب 100 درصد) منظور شده است. المان های قسمت میانی المان هائی هستند که در هیچ یک از گروه های قبلی قرار ندارند.

المان های تشکیل دهنده مدل مخزن در این مطالعه از نوع FLUID29 است. طول مدل مخزن بیش از 450 متر است که حدود 3 برابر ارتفاع سد می باشد. تعداد کل المان های بکار رفته برای مدلسازی مخزن 800 عدد می باشد. چون هدف اصلی از تحلیل های اجزاء محدود در این مطالعه فراهم نمودن اطلاعات مورد نیاز جهت آموزش مدل SVM می باشد لذا رکوردهای متنوعی برای پوشش دادن محدوده محتوای فرکانسی مختلف مورد استفاده قرار گرفت که در فصل قبل این زمین لرزه ها مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه نتایج بدست آمده از تحلیل ها ارائه گردیده است. لازم به توضیح است با توجه به اینکه آموزش مدل SVM با تغییر مکان تاج سد صورت گرفته، لذا از نتایج تحلیل های صورت گرفته نیز تغییر مکان تاج سد در در این فصل ارائه گردیده است.

جدول (1): مراحل تحلیل های روی مدل

شماره تحلیل	هدف	
تحلیل های شماره 1 تا 3	کنترل رفتار مدل و عملکرد آن تحت تاثیر بارهای استاتیکی وزن و فشار آب مخزن و تحلیل مودال	مرحله اول
تحلیل شماره 4 تا 13	تحلیل سد شفارود تحت رکورد زلزله Whittier Narrow 1987 در PGA متغیر از 0/05g تا 0/6g	مرحله دوم
تحلیل شماره 14 تا 22	تحلیل سد شفارود تحت تاثیر زلزله های مختلف	مرحله سوم
تحلیل شماره 23 تا 32	تحلیل سد شفارود تحت زلزله Whittier Narrow 1987 جهت بررسی تغییرات تراز آب مخزن	مرحله چهارم

5-1- تحلیل های سد شفارود جهت بررسی تغییرات PGA

برای این مرحله از تحلیل ها (شماره 4 تا 13) سد شفارود تحت تاثیر رکورد زلزله Whittier Narrow 1987 در شرایط PGA متغیر از 0/05g تا 0/6g مجموعاً در ده حالت مورد بررسی قرار گرفته است. به عبارت دیگر رکورد

مورد نظر برای PGAهای مختلف نرمالیزه شده است. بر مبنای تحلیل های صورت گرفته حداکثر تغییر مکان تاج سد در راستای رودخانه (به عنوان معیار انتخابی جهت بررسی رفتار سد) در جدول شماره (2) ارائه شده است.

5-2- تحلیل های سد شفارود با بررسی تاثیر محتوای فرکانسی

برای این مرحله از تحلیل ها (شماره 14 تا 22) سد شفارود تحت اثر ده رکورد زلزله که در ایستگاه های مستقر در زمینهای سنگی ثبت شده قرار گرفته و تغییر مکان تاج سد به عنوان نتیجه تحلیل در جدول شماره (3) ارائه گردیده است. به منظور امکان مقایسه تمامی رکوردهای مورد نظر با حداکثر شتاب (PGA) معادل $0/4g$ نرمالیزه شده است.

جدول(2): تغییر مکان سد تحت زلزله Whittier Narrows

شماره تحلیل	پیک شتاب (g)	تغییر مکان حداکثر دینامیکی (mm)
4	0/05	3/54
5	0/1	6/38
6	0/15	9/25
7	0/2	12/12
8	0/3	17/88
9	0/4	23/62
10	0/45	26/50
11	0/5	29/38
12	0/6	35/12
13	0/7	40/89

جدول(3): تغییر مکان سد تحت تاثیر زلزله های مختلف

شماره تحلیل	زمین لرزه	فرکانس غالب S^{-1}	تغییر مکان دینامیکی حداکثر سد (mm)
14	Coalinga 1983	4	16/28
15	Imperial Valley 1979	4	41/59
16	Loma Prieta 1989	1/67	29/96
17	Mammoth Lakes 1980	5	25/44
18	Northridge 1994	2/5	31/04
19	Parkfield 1966	3/33	35/98
20	San Fernando 1971	6	16/91
21	Victoria, Mexico 1980	5	34/38
22	Whittier Narrows 1987	4	23/62

5-3- تحلیل های دینامیکی بررسی تاثیر ارتفاع آب مخزن

برای این مرحله از تحلیل ها (شماره 23 تا 32) مدل سد سفارود تحت تاثیر رکورد زلزله Whittier Narrows 1987 ($PGA=0.4g$) در شرایط مختلف تراز آب مخزن قرار گرفته و تغییر مکان حداکثر تاج سد به عنوان نتیجه تحلیل در جدول شماره (4) ارائه گردیده است.

برای آموزش شبکه عصبی و ماشین های بردار پشتیبان از نرم افزار WinSVM که در سال 2005 توسط Martin Sewell و Robert Nishikawa استفاده گردیده است. این نرم افزار از قابلیت های بسیار مناسبی جهت دسته بندی و رگرسیون داده های رفتاری سیستم های مختلف داشته و قابلیت بکارگیری انواع توابع کرنل در آن تدارک دیده شده است.

جدول(4): تغییر مکان سد تحت زلزله در ترازهای مختلف

تغییر مکان دینامیکی حداکثر تاج سد (mm)	ارتفاع آب داخل مخزن (m)	شماره تحلیل
18/86	22/78	23
19/95	43/87	24
20/84	61/95	25
21/51	77/42	26
22/04	90/4	27
22/58	112/58	28
23/29	134/76	29
23/44	143/41	30
23/54	149/71	31
23/59	154/2	32
23/62	159	-

همچنین در قسمت های مختلف جهت انجام محاسبات از سایر نرم افزارهای مهندسی زلزله نظیر Bispec یا کدهای موجود در محیط MATLAB استفاده گردیده است.

5-4- آموزش مدل WinSVM

در این پژوهش هدف اصلی بررسی کارایی استفاده از ماشین بردار پشتیبان (SVM) در پیش بینی تغییر مکان تاج سد تحت تاثیر انواع مختلف بارگذاری دینامیکی زلزله در شرایط مختلف تراز آب در داخل مخزن بوده است.

برای ماشین بردار پشتیبان پیاده سازی های گوناگونی در طول سالیان اخیر تهیه شده است. اغلب این نرم افزارها در محیط های دانشگاهی طراحی و توسعه داده شده اند، اما در این میان می توان محصولات تجاری را نیز پیدا کرد. نرم افزارهای گوناگون از لحاظ شرایط استفاده نیز با یکدیگر تفاوت دارند به گونه ای که برخی فقط برای استفاده های دانشگاهی و علمی قابل استفاده هستند و از برخی دیگر در کاربردهای تجاری نیز می توان استفاده کرد.

با در نظر گرفتن تمامی موارد فوق و همچنین مواردی مانند سهولت کاربرد و استفاده از روش های جدید و به روز در پیاده سازی و با توجه به تجربه شخصی محقق در استفاده از چندین نرم افزار موجود، نرم افزاری که برای استفاده در این مطالعه انتخاب شده است، نرم افزار WinSVM می باشد.

این نرم افزار در حقیقت با هدف طراحی یک کتابخانه برای انجام عملیات یادگیری و استفاده از ماشین بردار پشتیبان طراحی شده است. این نرم افزار و به عبارتی کتابخانه در اصل با استفاده از زبان C^{++} طراحی شده است، اگرچه در حال حاضر با استفاده از زبان Java نیز پیاده سازی شده است و همچنین رابط های گوناگونی برای استفاده در محیط ها و زبان های مختلف از جمله MATLAB وجود دارد. آدرس صفحه اصلی این نرم افزار عبارتست از:

<http://www.cs.ucl.ac.uk/staff/M.Sewell/winsvm>

این مدل در سال 2005 توسط Martin Sewell توسعه داده شده است. در شکل شماره (4) رابط گرافیکی این نرم افزار نشان داده شده است. همانطور که در این پنجره نشان داده شده است در قسمت بالائی آیم Input file قرار دارد. در ابتدای مدلسازی لازم است اطلاعات بدست آمده از تحلیل ها را در غالب فایل ورودی مطابق فرمت مشخص در این قسمت وارد نمود. فایل ورودی ساخته شده در این پژوهش که در بردارنده زوج های اطلاعاتی شامل

- ✓ قسمت اول: پارامترهای زلزله (PGA و حداکثر فرکانس رکورد): $X1, X2$
- ✓ قسمت دوم: تغییر مکان تاج سد بدست آمده از تحلیل مدل اجزاء محدود در ANSYS: Y

در در قسمت های بعدی ارائه خواهد گردید.

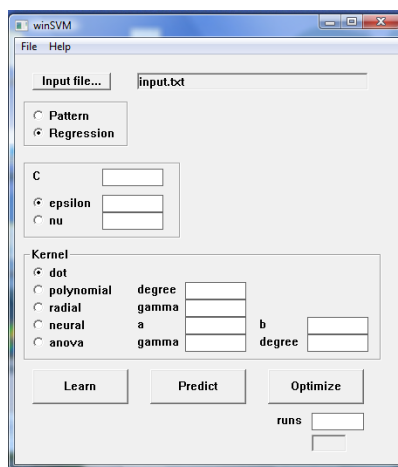
در مرحله دوم لازم است نوع مدلسازی شامل دسته بندی¹ و یا رگرسیون² تعیین گردد. گزینه اول جهت دسته بندی و گزینه دوم به منظور رگرسیون و میان یابی مورد استفاده قرار میگیرد. در این مطالعه گزینه Regression مورد استفاده قرار گرفته است. در قسمت بعدی با انتخاب تابع کرنل مناسب در گام نخست به آموزش و در ادامه به پیش بینی نتایج پرداخته می شود.

بر اساس تحلیل های صورت گرفته و نتایج ارائه گردیده آموزش مدل WinSVM نیز در حالت های مختلفی صورت پذیرفته تا تمامی جنبه های مورد نظر مورد واشکافی قرار گیرد. این مراحل در جدول شماره (5) آمده است.

آنالیزهای حساسیت صورت گرفته نشان می دهد با افزایش تعداد زوج های اطلاعات ورودی می توان میزان این خطا را کمتر نمود. به عبارت دیگر با افزایش اطلاعات ورودی شناخت

¹ Pattern

² Regression



شکل (4): رابط گرافیکی مدل WinSVM

جدول (5): مراحل آموزش مدل WinSVM

هدف	
آموزش مدل WinSVM جهت پیش بینی حرکت تاج سد تحت تاثیر تغییرات PGA (آموزش تک بعدی)	مرحله اول
آموزش مدل WinSVM جهت پیش بینی حرکت تاج سد تحت تاثیر تغییرات نوع رکورد، محتوای فرکانسی	مرحله دوم
آموزش مدل WinSVM جهت پیش بینی حرکت تاج سد تحت تاثیر تغییرات سطح آب داخل مخزن	مرحله سوم
مرحله اول، دوم و سوم بطور همزمان (آموزش سه بعدی)	مرحله چهارم
مرحله اول و سوم بطور همزمان (آموزش دو بعدی)	مرحله پنجم

مدل SVM از رفتار مدل کاملتر شده و فرآیند آموزش کاملتر خواهد شد. لذا کفایت مدل WinSVM جهت پیش بینی رفتار سد مورد تأیید خواهد بود. لازم به توجه است در قسمت بعدی حالت های مختلف آموزش توضیح داده شده است. برای بدست آمدن نتایج جدول (6) از مدل دوبعدی که کاملترین و بهترین نتایج را داشته استفاده شده است.

جدول (6): پیش بینی رفتار سد توسط مدل WinSVM

خطا (%)	تغییر مکان دینامیکی (mm)		زلزله	تراز آب	PGA
	WinSVM	ANSYS			
5/3	20/17	19/158	Whittier Narrows	84	0/35
4/7	31/24	29/84		126/2	0/52
6/1	38/67	36/45		139/5	0/63

6- نتیجه گیری:

قبل از بیان نتایج نهائی لازم به ذکر است موارد ذکر شده در این فصل فقط از آنالیز سد بتنی وزنی شفاورد نتیجه گیری شده، لذا هر یک از موارد می تواند توسط سایرین با مدلسازی سدی دیگر، مورد نقد قرار گیرد. البته به نظر محقق با توجه به دقتی که در مراحل مختلف پژوهش صورت گرفته و همچنین تعداد زیاد تحلیلها، این نتایج کلی بوده و در سایر موارد صادق خواهد بود.

1- بر اساس مطالعات و مشاهدات انجام شده، مدل WinSVM مورد آموزش قرار گرفته در این تحقیق جهت پیش بینی رفتار سد بتنی وزنی شفاورد از دقت کافی برخوردار است. لیکن نحوه استفاده از این مدل در نتایج بدست آمده تاثیر بسزائی دارد.

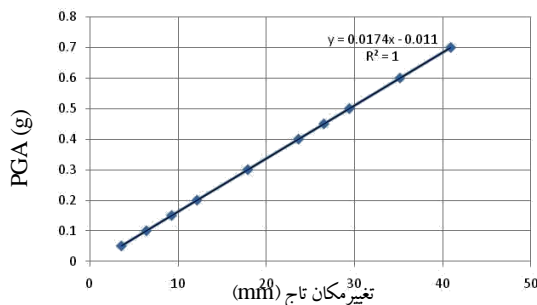
2- با افزایش تعداد زوج های اطلاعاتی مورد استفاده در آموزش میزان انطباق رفتار پیش بینی شده توسط مدل با رفتار واقعی بیشتر می شود. لیکن این همگرائی نتایج تا حدی بوده و پس از آن میزان همگرائی کاهش می یابد.

4- قبل از استفاده از نتایج تحلیل سازه در آموزش مدل لازمست نسبت به کفایت این اطلاعات اطمینان حاصل گردد. منظور از کفایت این است که پاسخ سازه تحت تاثیر بار زلزله باید به اندازه کافی به پارامتر مورد نظر وابستگی داشته باشد. به عبارت دیگر چنانچه آموزش مدل WinSVM برای بررسی تاثیر متغیری مانند محتوای فرکانسی رکورد که بر اساس تحلیل های صورت گرفته عملاً تاثیر در حداکثر تغییر مکان داشت، صورت پذیرد نتایج بدست آمده از دقت کافی برخوردار نخواهد بود. به همین دلیل در مرحله چهارم جدول (5) مدل آموزش دیده با خطای زیادی (بالای 15 درصد) رفتار سد را پیش بینی می نماید. لذا در این تحقیق قبل از آموزش مدل اقدام به آزمون داده ها با رگرسیون خط گردید که در ادامه نتایج آن آمده است:

الف) اعتبار سنجی نتایج تحلیل سازه جهت بررسی PGA

نتایج بدست آمده که قبلاً در جدول شماره (2) ارائه گردید در نمودار شکل (5) ترسیم شده است. همچنین در کنار این نمودار، رگرسیون و ضریب همگرائی داده ها نشان داده شده است. همانطوری که مشاهده می گردد تغییر مکان حداکثر تاج سد به شتاب بیشینه رکورد PGA بستگی کامل خواهد داشت.

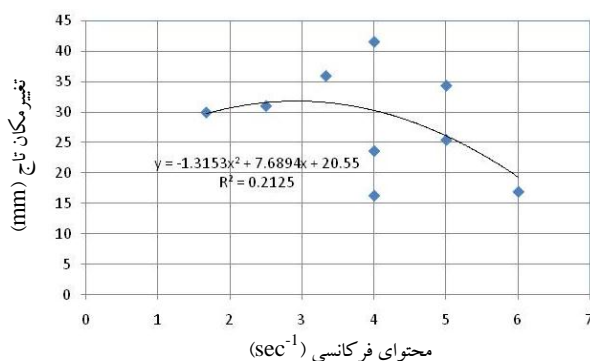
بنابراین می توان با اطمینان از این اطلاعات جهت آموزش مدل WinSVM استفاده نمود.



شکل (5): بررسی اعتبار داده های بررسی تاثیر PGA

(ب) اعتبارسنجی نتایج تحلیل جهت بررسی تاثیر فرکانس

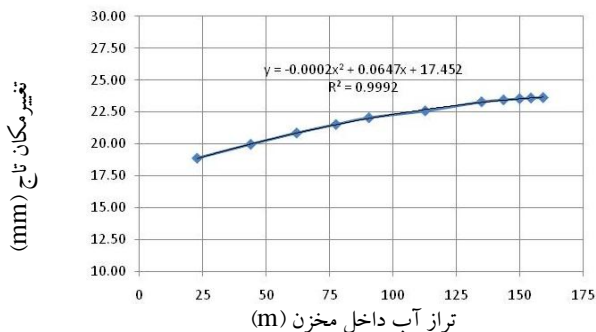
مشابه قسمت قبل نتایج بدست آمده که قبلاً در جدول شماره (3) ارائه گردید در نمودار شکل (6) ترسیم شده است. همچنین در کنار این نمودار، رگرسیون و ضریب همگرایی داده ها نشان داده شده است. همانطوری که مشاهده می گردد تغییر مکان حداکثر تاج سد به محتوای فرکانسی رکورد زلزله بستگی چندانی ندارد. بنابراین استفاده از این اطلاعات جهت آموزش مدل WinSVM مجاز نیست. چنانچه این داده ها وارد داده های آموزشی گردند، منجر به افزایش خطای مدل در پیش بینی رفتار سد می گردد (مرحله چهارم آموزش).



شکل (6): بررسی اعتبار داده های بررسی تاثیر فرکانس

(ج) اعتبارسنجی نتایج تحلیل ترازهای مختلف آب مخزن

مشابه قسمت های قبل از نتایج بدست آمده، که در جدول شماره (4) ارائه گردید، در نمودار شکل (7) استفاده شده است. همچنین در کنار این نمودار، رگرسیون و ضریب همگرایی داده ها نشان داده شده است. همانطوری که مشاهده می گردد تغییر مکان حداکثر تاج سد بصورت کامل ($R^2=1$) به تراز آب داخل مخزن بستگی دارد. بنابراین می توان با اطمینان از این اطلاعات جهت آموزش مدل WinSVM استفاده نمود.



شکل (7): بررسی اعتبار داده های بررسی تاثیر ترازآب مخزن

7- منابع و مراجع:

- [1] A. K. Chopra and P. Chakrabarti, "The Koyna earthquake and the damage to Koyna Dam", Bull. Seis. SOC. Am. 63, No. 2 (1973).
- [2] N. Pal, "Nonlinear earthquake response of concrete gravity dams", University of California, Berkeley, (1974).
- [3] Vargas-Loli and Fenves, "Considered the seismic response of Pine Flat dam", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 18, 837-851(1989).
- [4] Bhattacharjee S.S., "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, (1994).
- [5] Ghaemian M., Ghobarah A., "Staggered solution scheme for dam-reservoir interaction", Journal of Fluid and Structure, No.12, PP 933-948, (2000).
- [6] Guanglun W.; Pekau O.A.1; Chuhan Z.; Shaomin W., Engineering Fracture Mechanics, Volume 65, Number 1, pp. 67-87(21), (2000)
- [7] CALAYIR Yusuf ; KARATON Muhammet ; " Two-dimensional seismic analyses of Koyna gravity dam are performed by using the 1967 Koyna", vol. 83, no19-20, pp. 1595-1606 , (2005).
- [8] فدایی و رحیم زاده، " بررسی تاثیر جرم پی در رفتار لرزه ای سدهای بتنی قوسی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، (1384).
- [9] کاوه، ع، " شبکه های عصبی مصنوعی در تحلیل و طراحی سازه ها"، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، (1379).
- [10] منهاج، م.ب. " مبانی شبکه های عصبی، انتشارات دانشگاه امیر کبیر"، (1381).
- [11] Zeinkiewicz, O.C. & Gallagher, R.H. Optimum Structural, Design John Wiley & Sons, NewYork (1977).
- [12] Dayhoff, J.E , "Neural Network Architectures, Van Nostrand Reinhold", New York ,(1990).
- [13] V. Vapnik, S. Golowich, and A. Smola. Support vector method for function approximation, regression estimation, and signal processing . In M. Mozer, M. Jordan, and T. Petsche , editors , Advances in Neural Information Processing Systems 9 , pages 281– 287, Cambridge, MA, (1997)
- [14] گزارش فنی و طراحی سد سفارود، شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، (1374).
- [15] ANSYS User's Manual, for Revision 10.0, (2006).