

یک روش جدید برای پیش‌بینی رفتار لرزه‌ای سد بتنی با در نظر گرفتن لایه‌های بتن‌ریزی

رضوان سعید*^۱ امیرجواد مرادلو^۲

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان

Email: *rezvan.saeed@znu.ac.ir

پذیرش: [۱۴۰۲/۱۲/۰۹]

دریافت: [۱۴۰۲/۰۹/۱۱]

چکیده

از آنجا که معمولاً لایه‌های بتن‌ریزی در آنالیزهای عددی سدهای بتنی نادیده گرفته می‌شود در این مقاله با در نظر گرفتن رفتار ارتوتروپیک بتن، درزهای بتن‌ریزی که سبب ضعف در موقعیت‌ها و امتداد مشخصی در بدنه سد می‌شوند به شکل مطلوبی اعمال شده است. در ابتدا با استفاده از نرم‌افزار المان محدود FEAP تحلیل‌های لرزه‌ای غیرخطی انجام شد سپس یک برنامه به زبان فرترن برای پیش‌بینی تاریخچه زمانی جابه‌جایی نگاشته شد. هدف از این برنامه کاهش زمان مورد نیاز برای آنالیزها می‌باشد به طوری که با انجام آنالیز ثانیه‌های ابتدایی بارگذاری لرزه‌ای، با دادن ورودی‌های آموزشی به برنامه، پیش‌بینی مناسبی از روند پاسخ برای مابقی زمان بارگذاری حاصل شود. همچنین می‌توان با آموزش دادن برنامه با حالت ایزوتروپیک و ارتوتروپیک، برای سایر حالات ارتوتروپیک در نسبت‌های ناهمسانگردی مختلف، نمودارهای تاریخچه زمانی را استخراج کرد. با توجه به نتایج به دست آمده این برنامه به خوبی قادر به پیش‌بینی نمودارها در زمان بسیار کم می‌باشد. علاوه بر این رابطه‌ای برای پیش‌بینی جابه‌جایی‌ها در حالت ارتوتروپیک ارائه شده است.

واژگان کلیدی: لایه‌های بتن‌ریزی، رفتار ارتوتروپیک بتن، رفتار لرزه‌ای، سد بتنی.

۱- مقدمه

بوجود آمدن صفحات ضعیف در بدنه سد می‌شود و این فرض که در آنالیزها جسم سد همگن و ایزوتروپ در نظر گرفته می‌شود و در تمام جهات ویژگی‌های یکسانی دارد را خدشه دار می‌نماید [1]. در آنالیزهای عددی جسم سد به صورت همگن و ایزوتروپ فرض می‌شود و لایه‌های بتن‌ریزی در نظر گرفته

وجود درز در بیشتر سازه‌های بتنی امری گریز ناپذیر می‌باشد. در بتن‌ریزی بدنه سدها، اگرچه تمام تمهیدات لازم برای اجرای درزهای بتن‌ریزی در بهترین حالت در نظر گرفته می‌شود لیکن قطع بتن‌ریزی در موقعیت‌هایی از ارتفاع، سبب

نمی‌شود که این امر منجر به برآورد نادرست می‌شود. در این مقاله به بررسی و پیش‌بینی رفتار ارتوتروپیک ناشی از لایه‌های بتن‌ریزی پرداخته شده است. در نظر گرفتن رفتار ارتوتروپیک برای بدنه سد سبب تغییر در نتایج نسبت به حالت ایزوتروپیک و مدل بدنه سد همگن می‌شود. از جمله تحقیقاتی که در این زمینه انجام شده است می‌توان به پژوهش‌های زیر اشاره کرد. در سال ۲۰۰۸، توسط Alliard و Leger آنالیز لرزه‌ای سدهای بتنی با در نظر گرفتن لایه‌های محدود بتن‌ریزی انجام شد. مدل‌ها با در نظر گرفتن یک و هفت لایه بتن‌ریزی در ارتفاع سد بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد تعداد لایه‌های بتن‌ریزی در نظر گرفته شده تاثیر گذار می‌باشد و سبب پاسخ‌های واقع گرایانه می‌شود [2]. عالم باقری و قائمیان در سال ۲۰۱۳ به تحلیل دینامیکی سد با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی بتن و صفحات لغزش در داخل بدنه سد و در سطح اتصال سد به تکیه گاه پرداختند. تاثیر شیب لایه بتن‌ریزی بر پاسخ سد مورد بررسی قرار گرفت و حالت‌های حدی مختلف سد تعیین شده است. مشاهده شده که با در نظر گرفتن لایه‌های بتن‌ریزی، آسیب کششی می‌تواند برای ساختار سد اجتناب ناپذیر شود [3]. در سال ۲۰۱۴، Hesari و همکاران تاثیر رفتار درزه‌های انقباض و لایه‌های بتن‌ریزی بر رفتار لرزه‌ای سد قوسی کارون ۱ را مورد بررسی قرار دادند. با توجه به نتایج تحلیل‌های دینامیکی در نظر گرفتن این درزه‌ها به طور قابل توجهی بر پاسخ‌ها تاثیرگذار می‌باشد [4]. در سال ۲۰۱۴ توسط Al-Suhaili و همکاران یک شبکه عصبی مصنوعی برای تحلیل لرزه‌ای سد بتنی وزنی بررسی شد. بیشترین مقادیر تنش و فشار هیدرودینامیکی برآورد شد. از این مدل می‌توان برای برآورد دقیق پارامترها استفاده کرد [5]. در سال ۲۰۱۷ توسط Yazdani و Alembagheri سد پلین فلت مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی سد در حالت یکپارچه و در حالت با در نظر گرفتن دو لایه بتن‌ریزی در ارتفاع سد مقایسه شد [6]. در سال ۲۰۱۸، Dizaji و همکاران با استفاده از شبکه عصبی پراندتل تعمیم یافته به تحلیل دینامیکی غیرخطی سدهای بتنی وزنی پرداختند. سد کوینا مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج، این مدل روش مناسبی برای تحلیل-

های غیرخطی می‌باشد و از نظر اندازه شبکه عصبی بهبود قابل توجهی به دست آمد [7]. در سال ۲۰۱۸ توسط Chen و همکاران از یک مدل یادگیری ماشین چند متغیره برای تعیین خواص دینامیکی مواد سد بتنی وزنی پیشنهاد شد [8]. Taghavi Ganji و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی ارزیابی لرزه‌ای سیستم سد وزنی-مخزن-فونداسیون و با در نظر گرفتن سیستم فونداسیون ناهمگن پرداختند. با توجه به نتایج در نظر گرفتن فونداسیون به صورت همگن سبب میانگین پایین‌تر در پاسخ تحلیل‌های لرزه‌ای شده است [9]. در سال ۲۰۲۰ ناهمگنی بتن با تمرکز روی سد بتنی توسط Hariri Ardebili مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهده شد که ناهمگنی بتن روی آنالیز شکست پیش رونده تاثیر می‌گذارد و باید در ارزیابی ریسک گنجانده شود. همچنین نشان داده شد که انتشار ترک در متریال با ناهمگنی ماکرو ممکن است متفاوت از حالت همگن باشد. بنابراین در سدهای بتنی وزنی که به دلیل چگونگی اجرا آن‌ها پتانسیل ناهمگنی بیشتر است این موضوع اهمیت ویژه‌ای می‌یابد [10]. در سال ۲۰۲۱، توسط Pan تاثیر ناهمگنی بتن بر رفتار لرزه‌ای بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که ناهمگنی بتن تاثیر قابل توجهی بر رفتار آسیب لرزه‌ای سدهای بتنی وزنی دارد [11]. Liu و همکاران در سال ۲۰۲۱ آثار ناهمگنی بتن بر پاسخ لرزه‌ای غیرخطی سدهای بتنی وزنی تحت زمین لرزه‌های مختلف بررسی شد. مشخص شد که پاسخ لرزه‌ای مدل‌های همگن و ناهمگن دارای تفاوت‌های آشکار می‌باشند و در نظر نگرفتن ناهمگنی می‌تواند منجر به برآورد نادرست الگوی آسیب سدهای بتنی وزنی شود [12]. در سال ۲۰۲۱، تحلیل شکنندگی لرزه‌ای فازی سدهای وزنی توسط Li و همکاران انجام شده است. از آنجا که به دلیل فرایند بتن‌ریزی و ناهمگنی بتن، مقاومت بتن در سدهای وزنی در مکان‌های مختلف متفاوت است در این مقاله روشی برای تحلیل لرزه‌ای فازی سدها با در نظر گرفتن تغییرپذیری مکانی پارامترهای متریال پیشنهاد شده است. با در نظر گرفتن این حالت آسیب بدنه سد تشدید می‌شود که با افزایش ترک و عمق ترک‌ها همراه است. بنابراین در فرایند ساخت سدهای وزنی باید کیفیت ریختن بتن به خوبی کنترل شود تا

بررسی رفتار ارتوتروپیک ناشی از لایه‌های بتن‌ریزی این نسبت در محدوده ۱ تا ۲ در نظر گرفته شده است. در این محدوده، $\frac{E_h}{E_v} = 1$ همان حالت ایزوتروپیک می‌باشد که رفتار مکانیکی در تمام جهت‌ها یکسان اعمال شده و $\frac{E_h}{E_v} = 2$ نیز متناسب با رفرنس [19] می‌باشد که مدول یانگ در جهت قائم کاهش ۵۰ درصدی یافته است. این نسبت بیشترین کاهش در بین رفرنس‌های مطالعه شده می‌باشد. در بسیاری از تحقیقات چند لایه به صورت محدود در ارتفاع سد برای در نظر گرفتن لایه‌های بتن‌ریزی مدلسازی شده است. هر چند که موقعیت این لایه‌ها در مدلسازی‌های عددی در محل‌های حساس و بر اساس پروفیل ترک آنالیزهای المان محدود لرزه‌ای غیرخطی می‌باشد اما از آنجایی که لایه‌های بتن‌ریزی در کل ارتفاع سد به صورت متناوب وجود دارد و این لایه‌ها دارای خواص متفاوت از بتن می‌باشند، پس مدلسازی به صورت چند لایه محدود با خطاهایی روبرو است و با وجود این که لایه‌ها به صورت کامل و دقیق مدلسازی شده‌اند به دلیل آنکه با مصالح ناهمسانگرد ناشی از این لایه‌ها روبرو هستیم بنابراین با تقریب‌هایی همراه است. پس از آن جایی که لایه‌های بتن ریزی نقش موثری در پاسخ سیستم و هدایت آن به سمت جواب واقعی دارند، در این پژوهش برای مدلسازی دقیق‌تر این لایه‌ها از متریال ارتوتروپیک برای بتن بدنه سد استفاده شده است و رفتار مکانیکی بتن در جهت عمود بر لایه‌های بتن‌ریزی متفاوت از صفحات افقی در نظر گرفته شده است تا این صفحات ضعیف به شکل مطلوبی اعمال شوند. در این پژوهش با اضافه کردن المان‌ها و سابروتین‌های مورد نیاز به برنامه المان محدود FEAppv برنامه جدیدی به نام GFEAP (Generalized Finite Element Analysis Program) تهیه شد است و سپس رفتار دینامیکی سد وزنی پایین فلت با استفاده از این برنامه المان محدود بررسی شده است. از مدل‌های ورودی هندسه، سر هم کردن ماتریس‌ها و بردارهای حلگر برنامه اصلی استفاده شده و سایر سابروتین‌ها به برنامه اضافه شده است. المان ۲۰ گرهی سه بعدی سرندی پیتی و المان ۲۰ گرهی سیال سه بعدی با درجات آزادی فشار، به این برنامه اضافه شده و در مدلسازی نیز از آن‌ها استفاده شده

تغییرپذیری مکانی مقاومت بتن کاهش یابد [13]. در سال ۲۰۲۱ مطالعه گسترده‌ای توسط Mata و همکاران در زمینه مدل‌های ماشین لرزینگ برای آنالیز سد انجام شد. چندین مدل یادگیری ماشین برای تفسیر جابه‌جایی سد قوسی ارائه شد [14]. در سال ۲۰۲۲ Hariri Ardebili و Pourkamali Anaraki از ماشین لرزینگ برای پیش‌بینی پاسخ سد وزنی دو بعدی با شکل، خواص مواد، سطح آب و بار لرزه‌ای متفاوت استفاده کردند. همچنین با داشتن سناریوی خطر لرزه‌ای، داده‌های بررسی زمین‌شناسی و همچنین اختلاط بتن، شکل سد تخمین زده شده و با شبیه سازی المان محدود مستقیم مقایسه شد. نتایج دقت امیدوارکننده‌ای را نشان می‌دهد [15]. در سال ۲۰۲۲ Salazar و Hariri-Ardebili از ترکیب روش جنگل تصادفی و المان محدود تصادفی به ارزیابی سدهای بتنی پرداختند. ناهمگنی بتن در نظر گرفته شد و پیش‌بینی بیشترین جابه‌جایی در تاج و بیشترین تنش در پایه با دقت مطلوبی انجام شد [16]. با توجه به ادبیات فنی مشاهده می‌شود که فرض همگنی و همسانگردی بتن منجر به نتایج نادرست در آنالیزهای لرزه‌ای می‌شود. بنابراین اخیراً این مساله در ارزیابی‌ها مورد توجه قرار گرفته است. لایه‌های بتن‌ریزی صفحات ضعیفی در بدنه سد ایجاد می‌کند این صفحات سبب ویژگی‌های متفاوت در جهات افقی و قائم می‌شود. به طوری که خواص بتن در جهت عمود بر درزها مشابه با صفحات افقی نیست. در واقع، این، نوع خاصی از ناهمسانگردی است که از تقارن محوری نسبت به هر محور قائمی پیروی می‌کند و بدان معنی است که، رفتار مکانیکی در تمام صفحات افقی یکسان است. رفتار مکانیکی در تمام صفحات قائم، گذرنده از میان محور تقارن، نیز یکسان است ولی با رفتار صفحات افقی متفاوت است [17]. کیفیت اتصال بین لایه‌های متوالی بتن‌ریزی در مقاومت کلی سد عامل کلیدی می‌باشد. این صفحات ضعیف افقی در طول عمر سازه تاثیرگذار هستند و در نظر گرفتن آن‌ها و برآورد مناسب از خواص این لایه‌ها در ارزیابی ایمنی سدها ضروری می‌باشد [18]. نسبت E_h/E_v مدول یانگ در راستای افقی به مدول یانگ در راستای قائم می‌باشد و به عنوان نسبت ناهمسانگردی تعریف می‌شود. با توجه به رفرنس‌های مختلف به منظور

محدود GFEAP با خروجی‌های برنامه مقایسه شد که نشان می‌دهد برنامه قادر به پیش‌بینی نتایج با دقت بالا و در زمان اندک می‌باشد.

۲- رابطه ساختاری بتن حجیم و لایه‌های بتن‌ریزی

رابطه کلی تنش و کرنش به صورت زیر ارائه می‌شود [21, 20].

$$d\sigma = D_0 d\varepsilon \quad (۱)$$

$d\sigma$ و $d\varepsilon$ به ترتیب نمو‌های تنش و کرنش می‌باشند. در حالت غیرایزوتروپیک ماتریس مدول $[D]_0^{orth}$ به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$[D]_0^{orth} = \frac{1}{\Omega} \begin{bmatrix} E_1(1 - \nu_{23}\nu_{32}) & E_1(\nu_{21} + \nu_{23}\nu_{31}) & E_1(\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32}) & 0 & 0 & 0 \\ E_2(\nu_{12} + \nu_{13}\nu_{32}) & E_2(1 - \nu_{13}\nu_{31}) & E_2(\nu_{32} + \nu_{12}\nu_{31}) & 0 & 0 & 0 \\ E_3(\nu_{13} + \nu_{12}\nu_{23}) & E_3(\nu_{23} + \nu_{13}\nu_{21}) & E_3(1 - \nu_{12}\nu_{21}) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{12}\Omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{23}\Omega & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{31}\Omega \end{bmatrix} \quad (۲)$$

که در آن:

$$\Omega = 1 - \nu_{21}\nu_{12} - \nu_{31}\nu_{13} - \nu_{32}\nu_{23} - \nu_{12}\nu_{23}\nu_{31} - \nu_{21}\nu_{32}\nu_{13} \quad (۳)$$

در ماتریس فوق، ν_{ij} نسبت پواسون E_i ، $(i, j = 1, 2, 3)$ مدول یانگ در جهت i ($i = 1, 2, 3$) و G_{ij} مدول برشی در صفحه $i - j$ می‌باشند ($i, j = 1, 2, 3$) و به صورت زیر تعیین می‌شود.

$$G_{ij} = \frac{E_i E_j}{E_i(1 + \nu_{ij}) + E_j(1 + \nu_{ji})} \quad (۴)$$

برای در نظر گرفتن اثر درزهای بتن‌ریزی تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی می‌توان خواص مصالح را در دو جهت افقی ایزوتروپیک فرض کرد و خواص جدید برای بتن در جهت عمود بر سطوح بتن‌ریزی تعریف کرد. بنابراین داریم [17].

$$\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2}, \frac{\nu_{13}}{E_1} = \frac{\nu_{31}}{E_3}, \frac{\nu_{23}}{E_2} = \frac{\nu_{32}}{E_3} \quad (۵)$$

برای متریال ایزوتروپیک داریم [23, 22]:

$$E_1 = E_2 = E_3 = E, \nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23} = \nu, G_{12} = G_{13} = G_{23} = G \quad (۶)$$

ماتریس مدول ایزوتروپیک $[D]_0^{iso}$ به صورت زیر می‌باشد [22]:

است. همچنین سابروتین‌های اندرکنش دینامیکی سد و مخزن به روش نوسانی، مدل پلاستیسته ویلیام وانکه ۵ پارامتری و سابروتین محاسبه و اعمال ضریب افزایش دینامیکی نیز به برنامه اضافه گردید. در مدل‌سازی‌ها مخزن سد نیز در نظر گرفته شده و اندرکنش دینامیکی کامل سد و مخزن با احتساب تراکم پذیری سیال و شرایط مرزی مناسب با روش المان محدود به نحو مناسبی مدل شده است. علاوه بر مدل‌سازی رفتار ارتوتروپیک بتن در ترکیب با مدل غیر خطی پلاستیک، در این مقاله از الگوریتم یادگیری ماشین برای پیش‌بینی رفتار غیر خطی سدهای بتنی استفاده شده است و برنامه دیگری به زبان فترن برای پیش‌بینی جابه‌جایی‌ها نگاشته شده است. علاوه بر این رابطه‌ای ارائه شده که جابه‌جایی در حالت ارتوتروپیک را بر حسب نسبت ناهمسانگردی و جابه‌جایی در حالت ایزوتروپیک، به دست می‌آورد. از نتایج حاصل شده از GFEAP برای آموزش به کد نگاشته شده استفاده شد و به برنامه مورد نظر آموزش داده شد تا این برنامه توانایی پیش‌بینی تاریخچه زمانی جابه‌جایی را به دست آورد. در این برنامه نیازی به تعریف پارامترهای غیرخطی یا ورودی‌های مدل هندسی و مدل سازی اندرکنش سد-مخزن نیست، زیرا برنامه روند رفتار غیرخطی دینامیکی سد را فرا می‌گیرد. هدف از نگاشتن این برنامه کاهش زمان مورد نیاز برای آنالیزها می‌باشد به طوری که با انجام آنالیز ثانیه‌های ابتدایی بارگذاری لرزه‌ای، با دادن ورودی‌های آموزشی به برنامه، پیش‌بینی مناسبی از روند پاسخ برای مابقی زمان بارگذاری به دست آید و یا در حالت ارتوتروپیک جدید کل نمودار تاریخچه زمانی را به دست آورد. برای این منظور با آموزش برنامه توسط حالت ایزوتروپیک و یک حالت ارتوتروپیک که اصطلاحاً به آن حالت مبنا می‌گوییم و همچنین با وارد کردن نسبت ناهمسانگردی حالت خواسته شده یا مد نظر، می‌توان نمودار تاریخچه زمانی را در زمان بسیار سریع به دست آورد. همچنین می‌توان با آموزش برنامه و با داشتن خروجی قسمت ابتدایی نمودار، برای بازه زمانی بزرگ‌تر، نمودار را گسترش داد و نمودار تاریخچه زمانی را برای کل زمان بارگذاری استخراج کرد. نتایج حاصل شده از تحلیل‌های دینامیکی برنامه المان

خطای فرمول حاصل از ضرایب جدید کمتر از خطای فرمول حاصل از جهش قبل باشد، این ضرایب جدید را در حافظه موقت، جایگزین ضرایب قبلی می‌کند. این روند به تعداد جهش‌های تعیین شده در ورودی برنامه ادامه می‌یابد. سپس با استفاده از آخرین ضرایب موجود در حافظه موقت رایانه، فرمول نهایی ساخته می‌شود. RMSE از رابطه (۹) محاسبه می‌شود [24].

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{1,i} - x_{2,i})^2}{n}} \quad (9)$$

با توجه به عملکرد برنامه، فرمول در نظر گرفته شده با ضرایب مجهول از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای توابع تقریب‌های عددی، روش فوریه یکی از تکنیک‌های قدرتمند می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی‌ها و تحلیل‌های آماری نشان می‌دهد توابع تناوبی برای تقریب مناسب می‌باشد و استفاده از تابع الهام گرفته از روش فوریه به صورت رابطه (۱۰) توصیه شده است [25].

$$f(x) = a_0 + a_1 \cos(wx) + b_1 \sin(wx) \quad (10)$$

با ترکیب تابع تناوبی و تابع خطی می‌توان بهترین نوع تابع را برای سیمبلیک رگرسیون و شبکه عصبی مصنوعی به دست آورد. بنابراین تابعی به صورت زیر حاصل می‌شود [26].

$$f(x) = a_1 + a_2x + a_3 \cos(a_4x) + a_5 \sin(a_4x) \quad (11)$$

در این مقاله از رابطه (۱۱) در برنامه استفاده شده است. بدیهی است که با توجه به شرایط و با صفر شدن ضرایب می‌توان به رابطه خطی یا رابطه تناوبی دست یافت.

همان‌طور که بیان شد یادگیری با وارد کردن داده‌های آموزشی آغاز می‌شود. برای آموزش از داده‌های به دست آمده از آنالیز المان محدود برنامه GFEAP استفاده شده است. سد بتنی دو قوسی ماروپونت در بازه زمانی ۲۰ ثانیه و با گام‌های زمانی 0.02 ثانیه تحت زلزله تفت مدلسازی و تحلیل شد. پس از پایان آموزش و یادگیری موفقیت آمیز آن، مدل برای سایر نسبت‌های ارتوتروپیک آزمایش و مقایسه شده است. همچنین آنالیز سد پلین فلت تحت همین زمین لرزه صورت پذیرفت و مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر حاصل از آنالیزها مقایسه شد.

$$[D]_0^{Iso} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (V)$$

در تنظیمات المان محدود، رابطه تنش کرنش نموی با در نظر گرفتن محورهای ارتوتروپیک باید به سیستم مختصات کلی تبدیل شود که این با استفاده از ماتریس چرخش T حاصل می‌شود و داریم [20]:

$$D = T^T D_0 T \quad (8)$$

در رابطه فوق D ماتریس متریال سیستم مختصات کلی است.

۳- روش پیش‌بینی جابه‌جایی سد

روش کار بر مبنای الگوریتم‌های فرا ابتکاری الهام گرفته‌شده از بیولوژیک بر اساس نظریه تکامل داروینی می‌باشد که به طور فزاینده‌ای به عنوان مدل‌های جایگزین برای تحلیل‌ها استفاده می‌شوند. این روش مبتنی بر یادگیری داده‌ها است به طوری که الگوریتم‌های بر اساس داده‌های آموزش یا نمونه، یک مدل ریاضی را برای پیش‌بینی‌ها ارائه می‌کند. از آنجایی که تحلیل دینامیکی سازه‌های بزرگ از جمله سدهای بتنی به زمان قابل توجهی نیاز دارد امروزه این روش‌های جایگزین در زمینه‌های زیادی از جمله مهندسی وارد شده و تحولات عظیمی ایجاد کرده و منجر به ارائه نتایج دقیق در زمان کوتاه می‌شود. در این مقاله برای پیش‌بینی تحلیل‌های غیرخطی برنامه‌ای به زبان فترن نوشته شده است. برنامه نوشته شده بدین صورت است که در ابتدا یک فرمول با ضرایب مجهول برای پیش‌بینی‌ها در نظر گرفته می‌شود. و در جهش‌های بسیار زیاد مقادیر تصادفی برای ضرایب مجهول در نظر می‌گیرد. در ابتدا در اولین جهش برنامه به طور تصادفی ضرایبی را برای فرمول فرض می‌کند و با قرار دادن این ضرایب در فرمول مقادیر پیش‌بینی می‌شود و با مقادیر آموزشی مقایسه می‌کند و خطا را به کمک معیار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) محاسبه می‌کند. در جهش بعدی برنامه به طور تصادفی ضرایب دیگری را برای فرمول فرض می‌کند و مطابق قبل بعد از پیش‌بینی و مقایسه خطا را محاسبه می‌کند. چنانچه

۴- مدل‌سازی المان محدود

با استفاده از برنامه المان محدود GFEAP، آنالیزهای دینامیکی سدهای بتنی در حالت ایزوتروپیک و ارتوتروپیک انجام شده است که از این نتایج برای آموزش و درستی‌آزمایی پیش‌بینی نتایج استفاده می‌شود. مدل پلاستیک اعمال شده مدل ویلیام وارنکه ۵ پارامتری می‌باشد و از روش حل نموی برای حل معادلات غیرخطی حاصل استفاده شده است. روش نیوتن رافسون تام و به هنگام شده هر دو در برنامه نگاشته شده قابلیت استفاده دارند. همچنین از روش نوسانی نیز برای حل و همگرا شدن معادلات اندرکنش آب و سازه استفاده شد. برای معیار همگرایی معادلات سازه از پاسخ‌های تغییرمکان و معادلات سیال از فشارهای هیدرو دینامیکی در تکرارهای متوالی استفاده شده است. مخزن سد به طول دو برابر ارتفاع سد، مدل شده و پی سد صلب فرض شده است. مدل پلاستیسیتیه ویلیام وارنکه ۵ پارامتری استفاده شده است. بارهای استاتیکی شامل وزن سد و فشار هیدرواستاتیک به عنوان پاسخ اولیه در تحلیل‌های دینامیکی لحاظ شده است و از دیگر بارگذاری‌ها مانند حرارت و خزش صرف‌نظر شده است. اندرکنش دینامیکی کامل سد و مخزن با احتساب تراکم پذیری سیال و شرایط مرزی مناسب با روش المان محدود به شکل مناسبی مدل شده است. برای حل معادلات تعادل غیرخطی از روش نیوتن رافسون و برای تحلیل‌های دینامیکی نیز از الگوی انتگرال‌گیری نیومارک استفاده شده است [27].

شکل ۱. شبکه المان محدود بدنه سد پایین فلت

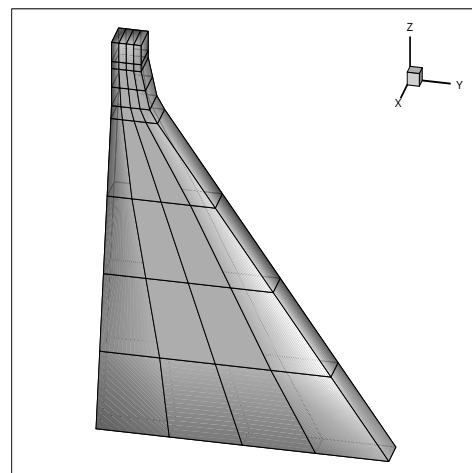


Fig. 1. Finite element mesh of the Pine Flat dam body

برای مطالعه موردی سد بتنی وزنی پایین فلت انتخاب شده است و برای تحلیل‌های دینامیکی از مولفه‌های افقی و قائم زلزله تفت استفاده شده است. سد پایین فلت سد بتنی وزنی می‌باشد و با ارتفاع ۱۲۲ متر و عرض پایه ۹۶٫۸ متر و طول تاج ۵۵۰ متر روی رودخانه گینگز در کشور آمریکا بنا شده است. از مدل‌سازی فونداسیون صرف‌نظر شده است و اندرکنش پی و سازه در نظر گرفته نشده است. بارهای استاتیکی در نظر گرفته شده بارهای وزن و فشار هیدرواستاتیک می‌باشد و به عنوان پاسخ اولیه در تحلیل‌های دینامیکی اعمال شده است. مدل‌سازی بدنه سد با ۳۶ المان آجری سه بعدی و ۳۲۰ گره انجام شده است. در شکل (۱) شبکه المان محدود سد نشان داده شده است. رکوردهای زمین لرزه نیز در شکل‌های (۲) و (۳) ارائه شده است. مقاومت فشاری بتن سد ۲۸ مگا پاسکال و مقاومت کششی آن ۲ مگا پاسکال می‌باشد. جرم واحد حجم بتن 2483 kg/m^3 و نسبت امپدانس تکیه‌گاه‌ها ۳٫۴۴ در نظر گرفته شده است. در حالت ایزوتروپیک مدول یانگ و ضریب پواسون به ترتیب برابر با ۲۲٫۴۱ گیگاپاسکال و ۰٫۲ استفاده شده است [28].

شکل ۲. مولفه طولی زلزله تفت

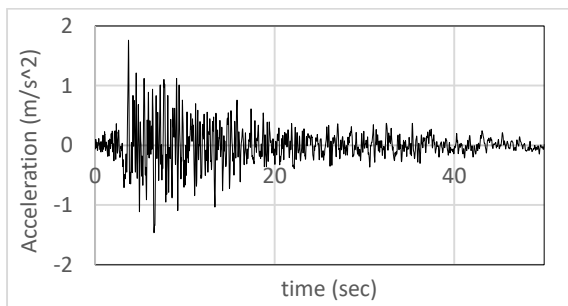


Fig. 2. Longitudinal component of the Taft Earthquake

شکل ۳. مولفه قائم زلزله تفت

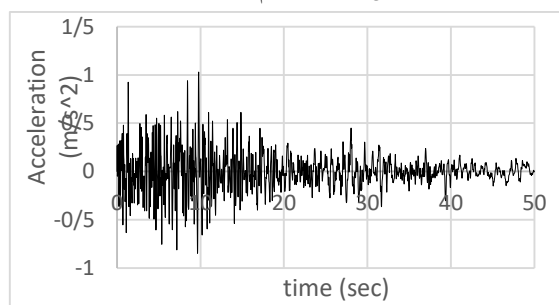


Fig.3. Vertical component of the Taft Earthquake

شکل ۴. مقایسه تاریخچه زمانی جابه‌جایی نقطه میانی تاج سد در جهت طولی برای تحلیل‌های ایزوتروپیک و ارتوتروپیک با نسبت ناهمسانگردی ۱,۲

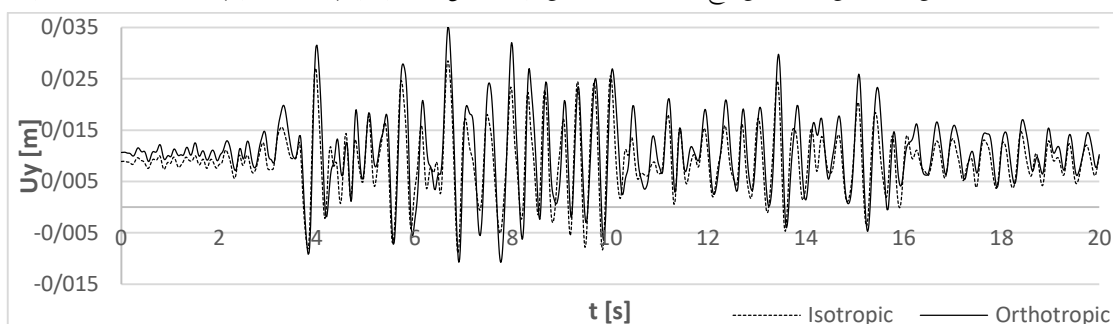


Fig. 4. Displacement time history of the dam crest middle point in the longitudinal direction for isotropic and orthotropic analysis with an anisotropy ratio of 1.2

۵- نتایج تحلیل‌های المان محدود

تاریخچه زمانی نقطه واقع روی تاج سد در جهت طولی برای حالت‌های ایزوتروپیک و ارتوتروپیک با نسبت ناهمسانگردی ۱,۲ در شکل (۴) نشان داده شده است. ماکزیمم جابه‌جایی در این جهت برای حالت‌های ایزوتروپیک و ارتوتروپیک به ترتیب ۲,۸۴۸ و ۳,۵۳۱ سانتی‌متر می‌باشد که افزایش ۲۳,۹۷ درصدی را نشان می‌دهد.

در جهت ارتفاع سد نیز شاهد ماکزیمم مقادیر ۷,۷۲ و ۹,۲۴ میلی‌متر و افزایش ۱۹,۶۸ درصدی می‌باشیم. پوش غیر همزمان تغییر مکان در حالت‌های ایزوتروپیک و ارتوتروپیک با نسبت ناهمسانگردی ۱,۲ در شکل‌های (۵ و ۶) نشان داده شده است. الگوی یکسان در شکل‌ها مشاهده می‌شود. در سایر نسبت‌های ناهمسانگردی، مقادیر ماکزیمم جابه‌جایی حاصل از آنالیزهای المان محدود مطابق با جدول (۱) به دست آمده است.

جدول ۱. جابه‌جایی‌های طولی حاصل از رابطه و آنالیزها در سد

Difference between displacements (m)	Displacement from equations (m)	Displacement from analysis (m)	Eh/Ev
0.000	0.031	0.031	1.1
0.000	0.035	0.035	1.2
0.001	0.039	0.040	1.3
0.001	0.042	0.043	1.4
0.001	0.046	0.047	1.5
0.002	0.049	0.051	1.6
0.001	0.053	0.054	1.7
0.000	0.057	0.057	1.8
0.000	0.060	0.060	1.9
-0.001	0.064	0.063	2

Table 1. Longitudinal displacements obtained from Equation and analysis

شکل ۵. پوش غیرهمزمان جابه‌جایی سد در جهت طولی در حالت ایزوتروپیک

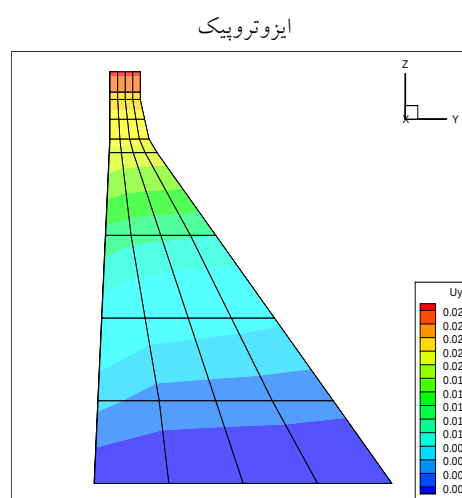


Fig. 5. Displacement envelope in the longitudinal direction for isotropic state

شکل ۶. پوش غیرهمزمان جابه‌جایی سد در جهت طولی در حالت ارتوتروپیک با نسبت ناهمسانگردی 1.2

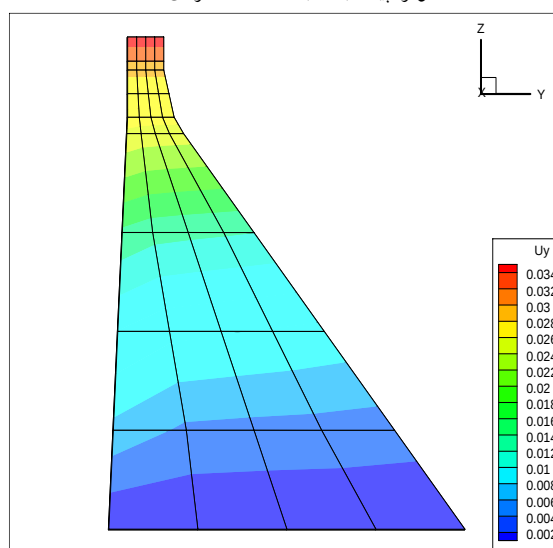


Fig. 6. Displacement envelope of dam in the longitudinal direction for orthotropic state with an anisotropy ratio of 1.2

۶- پیش‌بینی جابه‌جایی

۶-۱- رابطه پیش‌بینی جابه‌جایی طولی حالت‌های مختلف ارتوتروپیک

با در نظر گرفتن رابطه (۱۱) و با وارد کردن داده‌های حاصل از آنالیز (مطابق جدول ۱) به برنامه، برای پیش‌بینی جابه‌جایی‌های ارتوتروپیک سد، رابطه (۱۲) حاصل شده است. از آن جایی که ضرایب به دست آمده برای a_3 و a_5 بسیار کوچک می‌باشند رابطه به صورت خطی می‌باشد و داریم.

$$disp_{orth} = \left(1.2785 \left(\frac{E_h}{E_v}\right) - 0.31\right) \times disp_{iso} \quad (12)$$

که $disp_{iso}$ جابه‌جایی طولی حالت ایزوتروپیک و $disp_{orth}$ جابه‌جایی طولی حالت ارتوتروپیک و $\frac{E_h}{E_v}$ نسبت ناهمسانگردی حالت ارتوتروپیک متناظر می‌باشد. از آن جایی که برای در نظر گرفتن اثر درزهای بتن‌ریزی تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی خواص مصالح در جهت‌های افقی یکسان است و خواص جدید در جهت عمود بر سطح بتن‌ریزی داریم و با توجه به رابطه (۵) که در قسمت (۳) ارائه شد، می‌توان رابطه (۱۲) را به صورت رابطه (۱۳) بیان کرد:

$$disp_{orth} = \left(1.2785 \left(\frac{\nu_{hv}}{\nu_{vh}}\right) - 0.31\right) \times disp_{iso} \quad (13)$$

بنابراین با توجه به رابطه‌های (۱۲) یا (۱۳) و با داشتن جابه‌جایی طولی حالت ایزوتروپیک می‌توان جابه‌جایی طولی حالت ارتوتروپیک ناشی از لایه‌های بتن‌ریزی را محاسبه کرد. نتایج حاصل از آنالیزها و نتایج حاصل از روابط برای سد بتنی پایین فلت به صورت جدول (۱) می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نسبت ناهمسانگردی مختلف، نتایج بسیار به هم نزدیک می‌باشد و اختلاف‌ها کمتر از ۲ میلی‌متر می‌باشد.

به منظور درستی‌آزمایی رابطه پیشنهاد شده از مقادیر [22] استفاده شده است. در این رفرنس نسبت ناهمسانگردی برابر با ۱٫۲ در نظر گرفته شده است. ماکزیمم جابه‌جایی‌های به دست آمده در تحلیل‌های غیر خطی مربوط به آنالیزهای ایزوتروپیک و ارتوتروپیک در رفرنس [22] در نقطه میانی تاج سد در حالت فونداسیون بدون جرم به ترتیب برابر با ۱۱۷٫۴ میلی‌متر و ۱۲۸٫۷ میلی‌متر و در حالت فونداسیون صلب به ترتیب برابر با ۱۰۷٫۳ میلی‌متر و ۱۱۷ میلی‌متر است. در حالت استفاده از

رابطه (۱۲) جابه‌جایی‌های ارتوتروپیک حاصل در نقطه میانی سد برای حالت فونداسیون بدون جرم و فونداسیون صلب به ترتیب برابر با ۱۲۶٫۲ میلی‌متر و ۱۱۵٫۴ میلی‌متر حاصل شده است. همان‌طور که از جدول‌های (۲ و ۳) مشاهده می‌شود نتایج حاصل از آنالیزهای رفرنس [22] و نتایج حاصل از رابطه (۱۲) بسیار به هم نزدیک می‌باشد و اختلاف آن‌ها کمتر از ۲ میلی‌متر است. سایر جابه‌جایی‌ها در نقاط $\frac{1}{4}$ میانی سمت راست و سمت چپ سد نیز در جدول‌ها ارائه شده است که در این نقاط نیز هماهنگی نتایج مناسب می‌باشد و دقت قابل قبولی مشاهده شده است.

۶-۲- پیش‌بینی تاریخچه زمانی جابه‌جایی حالت‌های مختلف ارتوتروپیک

با در نظر گرفتن رابطه (۱۱) برای پیش‌بینی روند تاریخچه زمانی جابه‌جایی‌ها و با استفاده از خروجی جابه‌جایی در حالت ایزوتروپیک و یک حالت ارتوتروپیک مبنا به منظور آموزش برنامه، تاریخچه زمانی جابه‌جایی سایر حالت‌های ارتوتروپیک در دیگر نسبت‌های ناهمسانگردی قابل استخراج می‌باشد. پاسخ غیرخطی جابه‌جایی تاج سد تحت رکوردهای زلزله تفت حاصل از برنامه المان محدود و همچنین نتایج حاصل از پیش-بینی برنامه در شکل‌های (۷ و ۸) نشان داده شده است. در تاریخچه زمانی‌های ارائه شده حالت خط ممتد و خط چین به ترتیب خروجی حاصل از آنالیزها و کد نگاشته شده می‌باشد. در این قسمت ورودی‌هایی که برای آموزش برنامه به آن داده می‌شود کل بازه ۰ تا ۲۰ ثانیه می‌باشد و تاریخچه زمانی در همین بازه زمانی ولی برای یک نسبت ناهمساگردی جدید استخراج می‌شود. علاوه بر این، می‌توان در حالتی که خروجی آنالیز برای بازه زمانی ابتدایی نمودار در دسترس است و با آموزش به برنامه، نمودار تاریخچه زمانی را برای بازه زمانی بزرگ‌تر گسترش داد و کل بازه زمانی را از آن استخراج کرد. به عنوان نمونه بازه زمانی ۰ تا ۱۰ ثانیه از آنالیز المان محدود استخراج شده و سپس توسط برنامه برای بازه زمانی ۱۰ تا ۲۰ نمودار پیش‌بینی شود. نتایج این حالت نیز در شکل‌های (۹ و ۱۰) ارائه شده است. در نمودارها خط چین، خروجی حاصل

از برنامه می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌شود هماهنگی نتایج مناسب می‌باشد.

جدول ۲. جابه‌جایی‌های رفرنس [22] و جابه‌جایی‌های حاصل از روابط در حالت فونداسیون بدون جرم

Left-quarter	Right-quarter	Mid-point	
0.0736	0.0725	0.1174	isotropic displacement from analysis (m)
0.0800	0.0804	0.1287	Orthotropic displacement from analysis (m)
0.0791	0.0779	0.1262	Orthotropic displacement from Equation (m)
0.001	0.002	0.002	Difference between displacements from analysis and equations (m)
1.10	3.06	1.93	Percentage changes(%)

Table 2. Longitudinal displacements obtained from Equation and in Reference [22]

جدول ۳. جابه‌جایی‌های رفرنس [22] و جابه‌جایی‌های حاصل از روابط در حالت فونداسیون صلب

Left-quarter	Right-quarter	Mid-point	
0.0612	0.0612	0.1073	isotropic displacement from analysis (m)
0.0659	0.0658	0.1170	Orthotropic displacement from analysis (m)
0.0658	0.0658	0.1154	Orthotropic displacement from Equation (m)
0.001	0.000	0.002	Difference between displacements from analysis and equations (m)
0.16	0.01	1.41	Percentage changes(%)

Table 3. Longitudinal displacements obtained from Equation and in Reference [22]

شکل ۷. مقایسه نتایج تاریخچه زمانی حاصل از روش المان محدود (FE) و مدل پیش‌بینی (PM) در سد پلین فلت با نسبت ناهمسانگردی ۱,۴

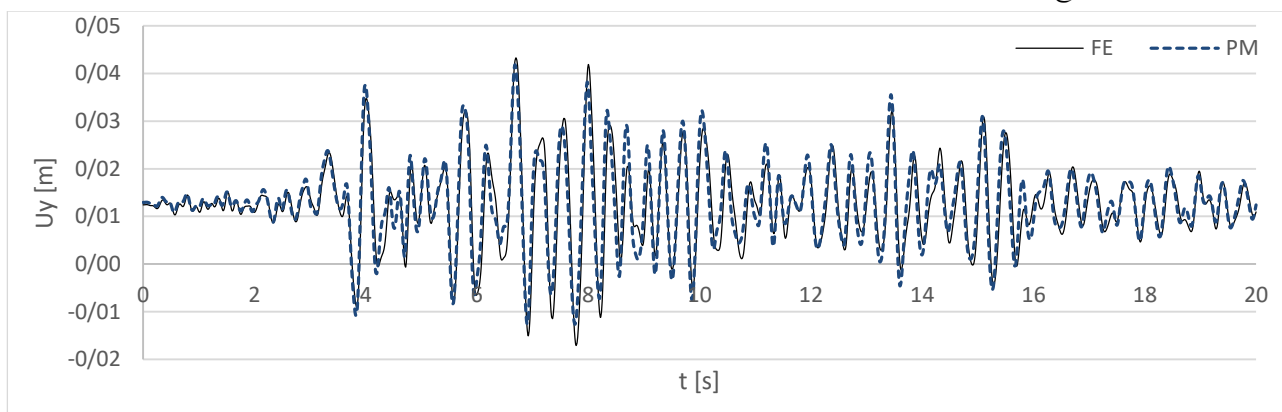


Fig. 7. Comparison of time history analysis results obtained from finite element analysis (FE) and predicted model (PM) in Pine Flat dam with an anisotropy ratio of 1.4

شکل ۸. مقایسه نتایج تاریخچه زمانی حاصل از روش المان محدود (FE) و مدل پیش‌بینی (PM) در سد پلین فلت با نسبت ناهمسانگردی ۱,۸

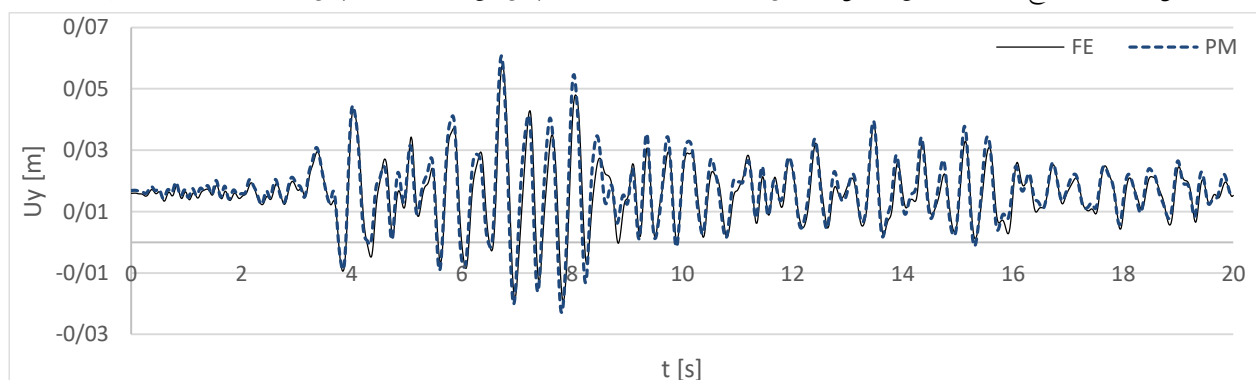


Fig. 8. Comparison of time history analysis results obtained from finite element analysis (FE) and predicted model (PM) in Pine Flat dam with an anisotropy ratio of 1.8

شکل ۹: مقایسه نتایج تاریخچه زمانی حاصل از روش المان محدود (FE) و مدل پیش‌بینی (PM) در سد پلین فلت با نسبت ناهمسانگردی ۱,۳

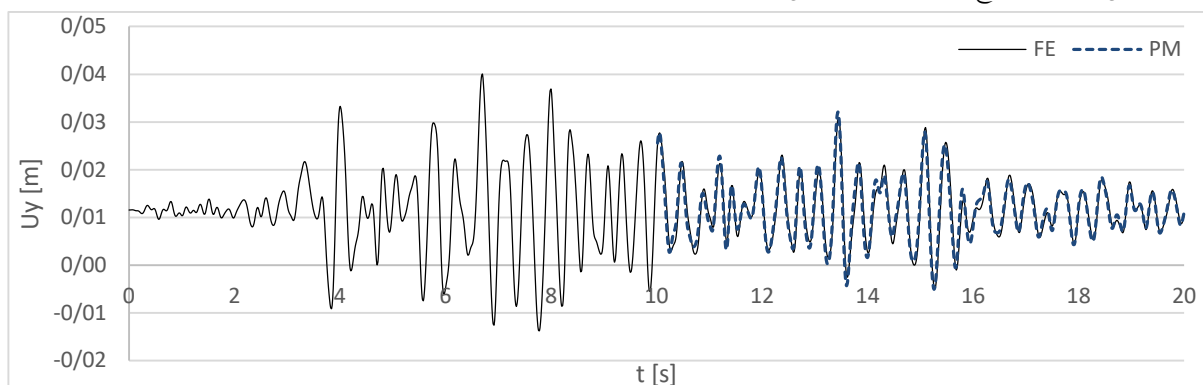


Fig. 9. Comparison of time history analysis results obtained from finite element analysis (FE) and predicted model (PM) in Pine Flat dam with an anisotropy ratio of 1.3

شکل ۱۰: مقایسه نتایج تاریخچه زمانی حاصل از روش المان محدود (FE) و مدل پیش‌بینی (PM) در سد پلین فلت با نسبت ناهمسانگردی ۱,۷

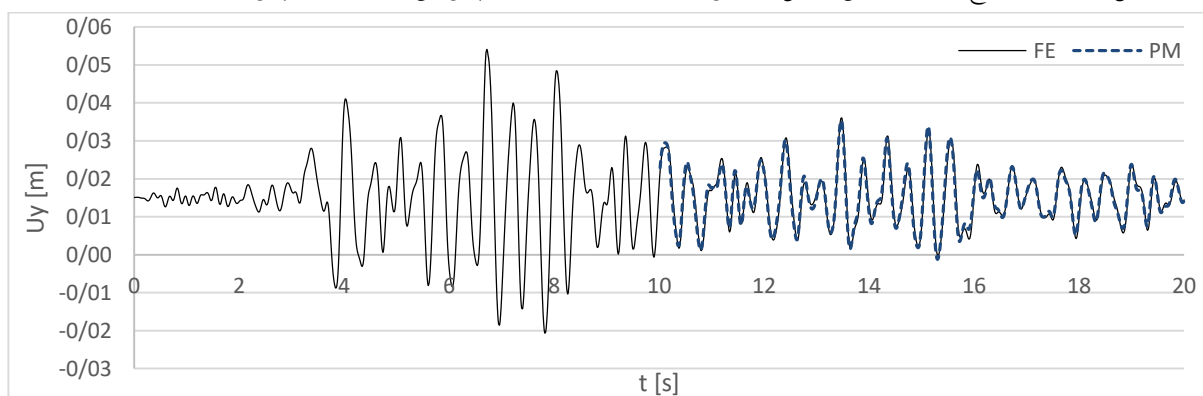


Fig. 10. Comparison of time history analysis results obtained from finite element analysis (FE) and predicted model (PM) in Pine Flat dam with an anisotropy ratio of 1.7

۷- نتیجه‌گیری

نمودارهای تاریخچه زمانی، برنامه‌ای به زبان فورتن برای پیش‌بینی نمودار تاریخچه زمانی برای حالت‌های مختلف نسبت‌های ارتوتروپیک نگاشته شده است. با آموزش برنامه با استفاده از نمودارهای تاریخچه زمانی حاصل از تحلیل‌های المان محدود در حالت ایزوتروپیک و یک حالت ارتوتروپیک، پیش‌بینی تاریخچه زمانی سایر حالات ارتوتروپیک با نسبت ناهمسانگردی مختلف قابل استخراج است. همچنین این برنامه برای گسترش نمودارهای تاریخچه زمانی قابل استفاده می‌باشد به طوری که با داشتن نمودار تاریخچه زمانی در بازه ابتدایی آن برنامه قادر به پیش‌بینی نمودار در بازه زمانی بزرگ‌تر می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد نمودارهای تاریخچه زمانی حاصل از برنامه نگاشته شده مشابه نمودارهای آنالیزهای المان محدود می‌باشد. با در نظر گرفتن زمان بسیار کوتاه‌تر برای پیش‌بینی‌های حاصل از برنامه نگاشته شده، خروجی نتایج آن قابل توجه می‌باشد.

در این تحقیق، تحلیل‌های غیرخطی المان محدود با استفاده از GFEAP انجام شد و لایه‌های بتن‌ریزی با در نظر گرفتن خواص ارتوتروپیک بتن در جهت عمود بر لایه‌های بتن‌ریزی اعمال شد. با در نظر گرفتن لایه‌های بتن‌ریزی در تحلیل‌های المان محدود مشاهده شد جابه‌جایی‌های حاصل شده در حالت‌های مختلف ارتوتروپیک نسبت به ایزوتروپیک افزایش یافته است. بنابراین در نظر گرفتن خواص ارتوتروپیک بتن نسبت به حالت ایزوتروپیک، سبب نتایج دقیق‌تر می‌شود. رابطه‌ای ارائه شده است که برحسب جابه‌جایی در حالت ایزوتروپیک و نسبت ناهمسانگردی، جابه‌جایی‌ها در حالت ارتوتروپیک قابل محاسبه می‌باشد. درصد اختلاف نتایج حاصل از رابطه و نتایج حاصل از آنالیزهای عددی قابل قبول است. همچنین به منظور کاهش زمان مورد نیاز برای استخراج

۸- مراجع

dam behaviour interpretation and prediction", Water, 2021, 13(19), 2717.

[15] Hariri-Ardebili MA, Pourkamali-Anaraki F, "An automated machine learning engine with inverse analysis for seismic design of dams", Water, 2022, 14, 3898.

[16] Salazar F, Hariri-Ardebili MA, "Coupling machine learning and stochastic finite element to evaluate heterogeneous concrete infrastructure", Engineering Structures, 2022, 260, 114190.

[17] Puzrin A, "Constitutive modelling in geomechanics: introduction", Springer Science & Business Media, 2012.

[18] Fronteddu L, Léger P, Tinawi R, "Static and dynamic behavior of concrete lift joint interfaces", Journal of structural engineering, 1998, 124(12), 1418-30.

[19] Vaseghi Amiri J, "Nonlinear dynamic analysis of shear tensile failure of concrete gravity dams subjected to earthquake, considering reservoir interaction", PhD Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 1997. (In Persian).

[20] Balan TA, Spacone E, Kwon M, "A 3D hypoplastic model for cyclic analysis of concrete structures", Engineering Structures, 2001, 23(4), 333-42.

[21] Bono GF, Campos Filho A, Pacheco AR, "A 3D finite element model for reinforced concrete structures analysis" Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 2011, 4, 548-60.

[22] Hariri-Ardebili MA, Mirzabozorg H, "Orthotropic material and anisotropic damage mechanics approach for numerically seismic assessment of arch dam-reservoir-foundation system", Strength of Materials, 2013, 45, 648-65.

[23] Penado FE, "Fracture parameter determination for the orthotropic interface crack with friction", Engineering Fracture Mechanics, 2018, 204, 542-56.

[24] Santillán D, Fraile-Ardanuy J, Toledo MÁ, "Dam seepage analysis based on artificial neural networks: The hysteresis phenomenon", In The 2013 international joint conference on neural networks (IJCNN), IEEE, 4 Aug, 2013.

[25] Ganesh A, Balasubramanian G, Jena SK, Pradhan N, "Fourier Approach to Function Approximation", International Journal of Mathematical Archive, 2011, 2(4).

[26] Nicolau M, Agapitos A, "Choosing function sets with better generalisation performance for symbolic regression models", Genetic programming and evolvable machines, 2021, 22(1), 73-100.

[27] Willam KJ, Warnke EP, "Constitutive model for the triaxial behaviour of concrete", IABSE Seminar on concrete structures subjected to triaxial stress, 1975.

[28] Su W, Qiu YX, Xu YJ, Wang JT, "A scheme for switching boundary condition types in the integral static-dynamic analysis of soil-structures in Abaqus", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 141, 106458.

[1] Committee of Concrete dams (ICOLD), "The Physical Properties of Hardened Conventional Concrete in dams", 2008.

[2] Alliard PM, Léger P, "Earthquake safety evaluation of gravity dams considering aftershocks and reduced drainage efficiency", Journal of engineering mechanics, 2008, 134(1), 12-22.

[3] Alembagheri M, Ghaemian M, "Incremental dynamic analysis of concrete gravity dams including base and lift joints", Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 12, 119-34.

[4] Hesari MA, Ghaemian M, Shamsai A, "Advanced nonlinear dynamic analysis of arch dams considering joints effects", Advances in Mechanical Engineering, 2014, 6, 587263.

[5] Al-Suhaili RH, Ali AA, Behaya SA, "Artificial neural network modeling for dynamic analysis of a dam-reservoir-foundation system", International Journal of Engineering Research and Applications, 2014, 4(1), 121-43.

[6] Yazdani Y, Alembagheri M, "Effects of base and lift joints on the dynamic response of concrete gravity dams to pulse-like excitations", Journal of Earthquake Engineering, 2017, 21(5), 840-60.

[7] Dizaji MS, Dizaji FS, Taghizadeh E, "Nonlinear Adaptive Simulation of Concrete Gravity Dams using Generalized Prandtl Neural Networks", International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 2018, 5(6), 1990-4.

[8] Cheng L, Tong F, Li Y, Yang J, Zheng D, "Comparative study of the dynamic back-analysis methods of concrete gravity dams based on multivariate machine learning models", Journal of Earthquake Engineering, 2021, 25(1), 1-22.

[9] Ganji HT, Alembagheri M, Khaneghahi MH, "Evaluation of seismic reliability of gravity dam-reservoir-inhomogeneous foundation coupled system", Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2019, 13, 701-15.

[10] Hariri-Ardebili MA, "Uncertainty quantification of heterogeneous mass concrete in macro-scale", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 137, 106137.

[11] Pan J, "Seismic damage behavior of gravity dams under the effect of concrete inhomogeneity" Journal of Earthquake Engineering, 2021, 25(7), 1438-58.

[12] Liu P, Chen J, Fan S, Xu Q, "Uncertainty quantification of the effect of concrete heterogeneity on nonlinear seismic response of gravity dams including record-to-record variability", In Structures, 2021, 34, 1785-1797.

[13] Li Z, Wu Z, Chen J, Pei L, Lu X, "Fuzzy seismic fragility analysis of gravity dams considering spatial variability of material parameters", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 140, 106439.

[14] Mata J, Salazar F, Barateiro J, Antunes A, "Validation of machine learning models for structural

A New Method for Predicting the Seismic Behavior of Concrete Dams by Considering Lift Joints

R. Saeed* , A. J. Moradloo

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Email: *rezvan.saeed@znu.ac.ir

Abstract:

Dams are structures whose continuous evaluation is of great importance. Due to their large scale, experimental study of concrete dams is difficult and therefore, the numerical simulation is used in the dynamic analysis of such dams more effectively. Despite the widespread use of concrete, our knowledge on its exact properties and physical behavior under different conditions is still limited, and many assumptions and simplifications are made to study the concrete behavior in most studies. This is especially complicated in mass concrete structures such as concrete dams. The presence of joints in most concrete structures is common and inevitable. Lift joints in dams cause different characteristics in vertical and horizontal planes. In fact, this is a special type of anisotropy that follows axial symmetry with respect to any vertical axis, which means that the mechanical behavior is the same in all horizontal planes. The mechanical behavior in all vertical planes passing through the axis of symmetry is also the same, however, it is different from the behavior of horizontal planes. Since the lift joints are usually ignored in the numerical analyzes of concrete dams, in the present paper, taking into account the orthotropic behavior of concrete, the concreting joints that cause weakness in specific positions and directions of the dam body are included. First, non-linear seismic analyzes were performed using FEAP finite element software, then a Fortran program was coded to predict the time history of displacement. The proposed method draws upon evolutionary algorithms inspired by Darwinian biology, which are increasingly utilized as surrogate models for various analyses. This approach relies on data-driven learning, wherein algorithms, based on training or sample data, generate a mathematical model for making predictions. The Pine Flat dam was modeled and analyzed under the Taft earthquake loading over a 20 second time interval with 0.02 second time steps. After successful training and learning, the model was compared and tested for other anisotropy ratios. The purpose of developing the program was to reduce the time required for analyzes so that by analyzing the initial seconds of seismic loading, by importing training inputs to the program, a proper prediction of the response process for the rest of the loading time could be obtained. In addition, by training the program for the isotropic and orthotropic modes, time history diagrams could be extracted for other orthotropic modes in different anisotropy ratios. According to the obtained results, the program is acceptably able to predict the graphs in a very short time. In addition, an equation for predicting the displacements in the orthotropic mode is presented. The maximum displacement of the orthotropic analysis was more than the isotropic one, and the use of isotropic material and homogeneous modeling of the dam body caused errors in the results. Therefore, considering the orthotropic properties of concrete can lead to more realistic results. The results reveal that time history plots derived from the implemented program closely resemble those from finite element analyses. The output results are remarkable, given the significantly reduced time required for predictions generated by the implemented program.

Keywords: lift joints, orthotropic behavior of concrete, seismic behavior, concrete dam