

## پیش بینی پاسخ دینامیکی سیال در مخازن هوایی آب با استفاده از شبکه عصبی

حمید پورباقری<sup>۱</sup>، افشین پورتقی<sup>۲</sup>، پیام اشتری<sup>۳\*</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۴/۰۹	
پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۰۹	
<b>واژگان کلیدی:</b>	
مخازن آب هوایی، شبکه عصبی مصنوعی، فشار هیدرو دینامیکی، تلاطم سطح آب، تحلیل دینامیکی.	در این مقاله، توانایی روش شبکه عصبی مصنوعی در پیش بینی رفتار دینامیکی سیال در مخازن هوایی آب مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، یک مدل شبکه عصبی برای تخمین دو پارامتر فشار هیدرو دینامیک کف مخزن و نوسان سطح سیال ارائه شده است. مدل مورد نظر با استفاده از الگوریتم پس انتشار خطا در برنامه MATLAB نگارش و مورد آموزش و آزمون قرار گرفته است. داده های مورد نیاز برای آموزش شبکه از نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی یک نمونه مخزن هوایی بتنی با پایه مرکزی به کمک برنامه توانمند ANSYS استخراج شده است. تاریخچه زمانی شتاب افقی زلزله به همراه تغییر مکان سقف مخزن و نیروی برش پایه به عنوان پارامترهای ورودی استفاده شده اند. سپس عملکرد مدل ارائه شده با مقایسه نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود و خروجی مدل مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که روش ارائه شده مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی توانایی بسیار مناسبی در تخمین پاسخ دینامیکی سیال درون مخزن بویژه برای پارامتر فشار دارد.

### ۱- مقدمه

مخازن هوایی آب از جمله سازه های خاص مهندسی هستند که باید کاربری خود را پس از زلزله های بزرگ از دست ندهند و برای فراهم ساختن نیازهای آبرسانی و آتش نشانی آماده بهره برداری باشند و نسبت به دیگر سازه ها آسیب کمتری ببینند. از سویی دیگر وجود مصالح سیال نظیر آب در کنار مصالح سازه ای فولاد و بتن، بررسی و پیش بینی رفتار چنین سازه هایی را پیچیده تر می کند. در آیین نامه های مهندسی و طراحی، برای ساده تر شدن مطالعات، رفتار سیال درون مخزن به صورت روش های معادل مکانیکی جرم- فنر با دو درجه آزادی و یا روش های توسعه یافته تری

با درجات آزادی بیشتر تقریب زده می شود. در واقع این چنین روش هایی تلاش می کنند تا رفتار سیال را بدون در نظر گرفتن حضور آن تقریب بزنند. در سال های اخیر، با توسعه نرم افزارهای مهندسی و مدل سازی که عموماً بر پایه روش اجزای محدود بوده است، امکان مدل سازی رفتار سیال با وجود پیچیدگی هایی میسر شده است. ویژگی منحصر به فرد روش اجزای محدود توانایی بالا در استفاده از المان های سیال برای مدل سازی واقعی تر نقش سیال در سازه های مرکب نظیر مخازن است. اما آنچه که استفاده از چنین روش هایی را دشوار می کند پیچیدگی فرآیند مدل سازی و بالابودن زمان و حجم

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ashtari@znu.ac.ir

۱. کارشناس ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان

۲. کارشناس ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

۳. استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان

کرده‌اند که مقادیر نشست پیش‌بینی شده با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی بهینه شده تقریب بسیار خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده از سدهای سنگریزه‌ای با رویه بتنی دارند.

منصور و همکاران [۴] عملکرد شبکه عصبی مصنوعی را در پیش‌بینی مقاومت برشی نهایی تیرهای بتن مسلح بررسی کرده‌اند. در شبکه ارائه شده از ۹ مشخصه مهندسی تیرهای بتن مسلح نظیر مقاومت فشاری بتن، مقاومت گسیختگی آرماتورهای طولی و عرضی، ابعاد سطح مقطع بتن و نسبت تسلیح آرماتورها به عنوان ورودی شبکه به منظور تخمین مقاومت برشی نهایی تیرها استفاده شده است. نتایج نشان داده است که شبکه‌های عصبی مصنوعی قابلیت بسیار خوبی در پیش‌بینی مقاومت برشی نهایی تیرهای بتن مسلح دارند. آنها همچنین مطالعاتی را برای بررسی تاثیر پارامترهای مختلف ورودی در نتیجه پارامتر خروجی شبکه انجام داده‌اند.

چوبی و همکاران [۸] پیش‌بینی وقوع ترک در فرکانس طبیعی مخازن به کمک شبکه عصبی را مورد بررسی قرار داده‌اند. برای این منظور آنها ابتدا دو نوع مخزن ذخیره و مخزن بخار را تحت ترک‌های کنترل شده در اندازه‌ها و موقعیت‌های متفاوت قرار داده و تحلیل‌های مودال و دینامیکی را برای بدست آوردن پارامترهای مخزن در حالت سالم و ترک نخورده روی آنها انجام داده‌اند. اندازه ترک به ازای یک موقعیت مشخص ترک به عنوان خروجی شبکه مد نظر قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با تغییر در اندازه ترک، فرکانس‌های طبیعی مخزن نیز به طور متناسبی تغییر می‌کند که این امر به کمک مدل شبکه عصبی طراحی شده نیز قابل پیش‌بینی بوده است.

چنانچه ذکر شد، نتایج حاصل از تحقیقات نشان داده است که استفاده از روش شبکه‌های عصبی عملکرد مناسبی در پیش‌بینی و تقریب پاسخ دینامیکی سازه‌ها داشته است. از این رو در این تحقیق تلاش شده است تا روشی برای تقریب رفتار سیال درون مخازن هوایی به کمک شبکه عصبی مصنوعی ارائه شود. اهمیت چنین روشی در آن است که

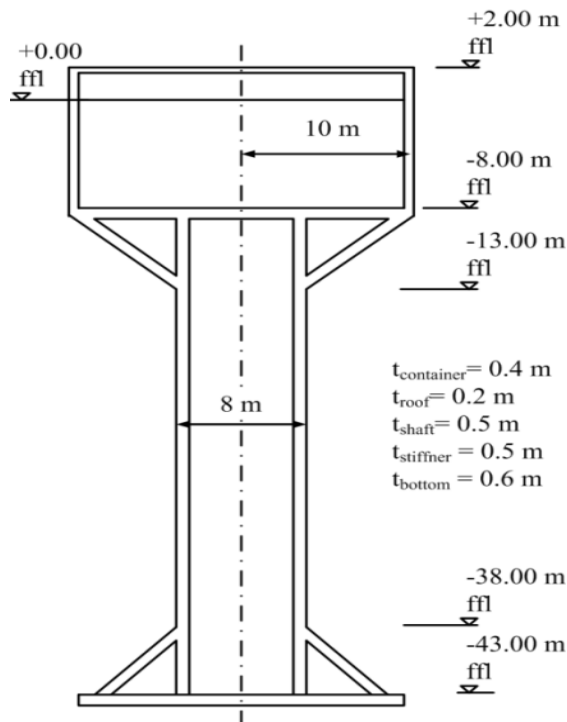
محاسبات است به گونه‌ای که استفاده از مدل‌سازی‌های دقیق را محدود به مطالعات پژوهشی و تحقیقاتی نموده است.

با توجه به اینکه در این مقاله پیش‌بینی پاسخ‌های دینامیکی سیال در مخازن هوایی به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی مد نظر بوده است، از این رو در ادامه به برخی مطالعات صورت گرفته در زمینه استفاده از شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی پاسخ سازه‌ها اشاره می‌شود.

ساگلار و همکاران [۱] پاسخ دینامیکی یک ساختمان سه-بعدی بتنی را به کمک شبکه عصبی مصنوعی بررسی کرده‌اند. در این مدل، تناوب اصلی سازه، نیروی برش پایه، لنگر خمشی پای ساختمان و تغییرمکان سقف در دو جهت متعامد به عنوان پارامترهای ورودی شبکه در نظر گرفته شده است. آنها برای ارزیابی صحت داده‌های دینامیکی مدل‌شان از برنامه اجزای محدود SAP2000 بهره گرفته‌اند. نتایج این تحقیق نشان داده است که روش مبتنی بر شبکه عصبی رویکرد بسیار مفیدی برای بررسی پاسخ دینامیکی سازه تحت اثر زلزله می‌باشد.

کولاهچی و همکاران [۵] روشی را برای پیش‌بینی بزرگای زلزله بر اساس تغییرات غیرخطی هشت پارامتر مختلف در هنگام وقوع زلزله بر پایه شبکه عصبی مصنوعی ارائه کرده‌اند. آنها بیان کرده‌اند که خطای نسبی متوسط برای بزرگای زلزله بین داده‌های اندازه‌گیری شده و خروجی شبکه عصبی مصنوعی در حدود ۲/۳ درصد اختلاف داشته است و خطای نسبی بین داده‌های آزمون و زلزله واقعی در محدوده صفر تا ۱۲ درصد متغیر بوده است. این محققین نتیجه گرفته‌اند که روش شبکه عصبی مصنوعی گزینه بسیار مناسبی برای تخمین مشخصات زلزله، در مقایسه با سایر روش‌های ریاضیاتی پیچیده، خواهد بود.

کیم و همکارش [۳] مدل شبکه عصبی را برای پیش‌بینی نشست نسبی تاج در سدهای سنگریزه‌ای گسترش داده‌اند. شبکه مورد نظر بر اساس سه داده اصلی یک سد شامل نسبت تخلخل، ارتفاع و ضریب تغییرشکل قائم به عنوان داده‌های ورودی تنظیم شده است. این محققین مشاهده



شکل ۱- مشخصات هندسی مخزن مورد مطالعه

برای مدل‌سازی رفتار غیرخطی بتن، بنابر توصیه آیین‌نامه ACI، روش تقریب چندخطی قابل استفاده است. برای این منظور ابتدا منحنی تنش-کرنش بتن به کمک رابطه هاگنستاد<sup>۳</sup> تعریف شده است:

$$f_c = f_c'' \left[ \frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad (1)$$

که در آن  $f_c$  تنش فشاری تک محوری بتن،  $f_c''$  حداکثر تنش رخ داده در بتن که به طور تقریبی برابر با  $f_c'' = 0.92 f_c'$  در نظر گرفته می‌شود،  $f_c'$  مقاومت فشاری تک محوری ۲۸ روزه بتن برای نمونه استوانه‌ای،  $\varepsilon$  کرنش ایجاد شده در بتن که مؤلفه افقی نمودار است و  $\varepsilon_0$  کرنش متناظر با تنش حداکثر که از رابطه  $\varepsilon_0 = 1.8 \left( \frac{f_c'}{E_c} \right)$  محاسبه می‌شود. سپس یک منحنی چندخطی بر روی منحنی پوش داده می‌شود. شکل (۲) نحوه تقریب رفتار غیرخطی بتن را نشان می‌دهد.

می‌تواند زمان و حجم محاسبات را در تحلیل‌های دقیق به مقدار قابل توجهی کاهش دهد. از طرفی در این مقاله استفاده از پارامترهای پاسخ سازه‌ای برای تخمین پاسخ دینامیکی سیال بهره گرفته شده است که می‌تواند جایگزین مناسبی برای تحلیل‌های عددی معادلات حاکم بر رفتار سازه و سیال و مدل‌سازی‌های پیچیده المان‌های سیال باشد.

## ۲- مدل مورد مطالعه

به منظور بررسی رفتار سیال، یک مخزن هوایی بتنی آب با ظرفیت ۲۵۰۰ مترمکعب مطابق مشخصات شکل (۱) و متناسب با مشخصات هندسی مخزن هوایی معرفی شده در مرجع [۶] انتخاب شده است. مشخصات مصالح مورد استفاده در جدول (۱) آمده است.

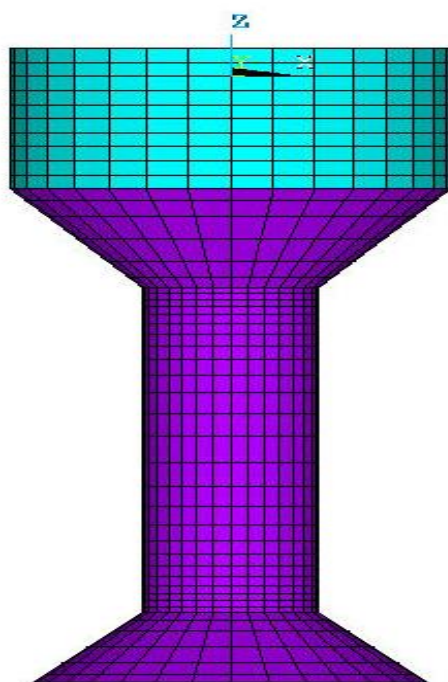
جدول ۱- مشخصات مصالح مورد استفاده در مدل مخزن

واحد	بتن	فولاد	آب
جرم واحد حجم $\frac{KN}{m^3}$	25	78.5	10
مدول الاستیسیته GPa	32	210	2.1
ویسکوزیته Pa.s	-	-	1.15e-04
ضریب پواسون	0.27	-	-

جهت مدل‌سازی مخزن هوایی مورد نظر از برنامه اجزای محدود توانمند ANSYS بهره گرفته شده است. علت استفاده از این محصول دارا بودن المان‌های مختلف سیال با قابلیت‌های مورد نیاز و همچنین هماهنگ بودن عملکرد المان‌های سیال و سازه در یک سازه مرکب از نظر مصالح همانند مخازن آب است. برای مدل‌سازی جداره بتنی مخزن از المان‌های shell181 و برای مدل‌سازی سیال داخل مخزن از المان سیال سه بعدی Fluid80 استفاده شده است. المان shell181 قابلیت تحلیل مسائل عمومی پوسته‌ها با قابلیت مدل‌سازی رفتار غیرخطی مصالح را دارا می‌باشد. المان Fluid80 یک المان سیال قدرتمند برای مدل‌سازی رفتار سیال ساکن (غیرجاری) است و بر اساس تئوری لاگرانژی قادر به ارائه تغییر مکان‌های سیال است.

<sup>3</sup> Eivind Hognestad, 1951

مدل‌ها رفتار واقع‌بینانه‌تری در مقایسه با نمونه‌های اجرایی داشته باشند، دو پوسته مخروطی در بالا و پایین مخزن تعبیه شده که برای جلوگیری از تمرکز تنش‌ها در قسمت کف مخزن و تکیه‌گاه به کار می‌روند. این مخروط‌ها به عنوان ماهیچه عمل نموده و از افزایش بیش از حد ضخامت کف مخزن ممانعت می‌کنند.



شکل ۳- جزئیات شبکه‌بندی اجزای محدود

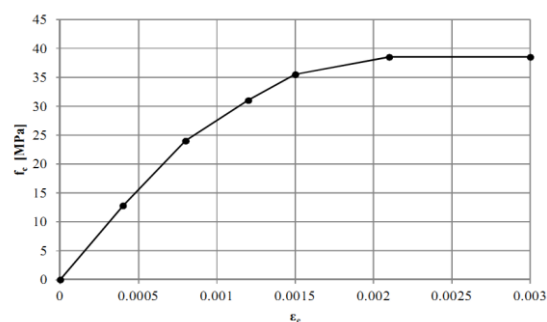
### ۳- تأیید صحت مدل‌سازی

در پژوهش‌هایی که مبتنی بر مدل‌سازی‌های عددی است، می‌باید صحت مدل‌سازی را با استناد به منابع و مراجع معتبر تأیید نمود. این امر نکته شروع فرایند مدل‌سازی و یکی از اساسی‌ترین مراحل محسوب می‌شود. در این تحقیق برای تأیید صحت مدل‌سازی، مدل‌های مورد استفاده در دو مرجع [۷] و [۸] بازسازی شد و مورد تحلیل مودال قرار گرفت.

در مرجع [۷] نتایج تحلیل طیفی یک مخزن زمینی فولادی ارائه شده است. بر اساس مشخصات ذکر شده در این مرجع مدل مشابهی ساخته و مورد تحلیل طیفی قرار گرفته است. مقدار فرکانس مود نوسانی ۰/۱۲۹ هرتز و فرکانس مود ضربانی ۵/۳۶ هرتز در مرجع ذکر شده است. این مقادیر در

در آیین‌نامه بتن ایران (آبا) رابطه بین مدول الاستیسیته بتن و مقاومت فشاری تک محوری بتن به صورت رابطه  $E_c = 5000\sqrt{f'_c}$  تعریف می‌شود. در این تحقیق چنانچه پیش‌تر اشاره شد مدول الاستیسیته بتن  $E_c = 3.2 \times 10^{10} \text{ Pa}$  فرض شده است. بنابراین،

$$f'_c = \left( \frac{E_c}{5000} \right)^2 = 41 \text{ MPa}$$



شکل ۲- تقریب رفتار غیرخطی بتن با منحنی چندخطی

در این تحقیق برای مدل‌سازی رفتار بتن در کشش، اثر آرماتورهای مسلح‌کننده بتن نیز منظور شده است. برای این منظور فرض بر این است که تا محدوده‌ای از کرنش که بتن بتواند رفتار خطی خود را حفظ کند، نیروی کشش مقطع توسط بتن تامین می‌شود. این مقدار کرنش برای بتن در کشش  $\epsilon_t = 0.0002$  ارائه شده است. سپس فرض می‌شود که تمام نیروی کشش در مقطع توسط آرماتورهای مسلح‌کننده در بتن تامین شود. در این محاسبات مقدار ضریب پواسون فولاد در کشش برابر  $\nu_{st} = 0.3$  منظور شده است. تعداد المانهای مورد استفاده در مدل‌سازی به اندازه‌ای اختیار شده است که دقت کافی را برای محاسبات فراهم نماید. برای این منظور تعداد المانهای سازه و سیال مورد استفاده در شبکه‌بندی هندسه بیش از تعداد المانهای سازه و سیال به کار رفته در مطالعات مشابه است. چنانچه در شکل (۳) قابل مشاهده است، برای افزایش بیشتر دقت، نوع شبکه‌بندی صورت گرفته در مدل به گونه‌ای است که محل اتصال عناصر سازه‌ای به یکدیگر دارای تراکم بیشتر المان باشد. با توجه با اینکه در این تحقیق اثر اندرکنش خاک و سازه مورد بررسی قرار نمی‌گیرد، تمام گره‌های تراز تکیه‌گاه به صورت گیردار کامل در نظر گرفته شده است. برای آنکه

حرکت غالب سازه را در آن جهات انتظار داریم به عنوان درجات آزادی اصلی<sup>۵</sup> تعریف می‌شوند. علاوه بر آن تاکید شده است که گره‌های موجود در سطح سیال در جهات عمود بر سطح سیال بایدی به صورت درجه آزادی اصلی تعریف شوند.

با انجام تحلیل مودال، تناوب اصلی سازه برای حرکت نوسانی برابر ۵/۰۵ ثانیه و برای حرکت ضربه‌ای (سازه) برابر ۰/۸۴ ثانیه استخراج شده است. همچنین مقادیر ضرایب میرایی رایلی برابر  $\alpha = 0.0042$  و  $\beta = 0.0053$  و با استفاده از روابط زیر محاسبه شده‌اند.

$$\beta = \frac{2(\omega_i \cdot \xi_i - \omega_j \cdot \xi_j)}{(\omega_i^2 - \omega_j^2)} \quad (2)$$

$$\alpha = 2 \cdot \omega_i \cdot \xi_i - \beta \cdot \omega_h^2 \quad (3)$$

در روابط فوق  $\omega_i$  و  $\omega_j$  فرکانس‌های زاویه‌ای دو مود اصلی مخزن شامل مود نوسانی سیال و مود ضربانی سازه هستند و  $\xi_i$  و  $\xi_j$  نسبت‌های میرایی نظیر آنها می‌باشند.

#### ۴- شبیه‌سازی عصبی

شبکه عصبی نگاشته شده برای تحقیق نیازمند آن است که برای داده‌های ورودی مورد نظر آماده شود که به اصطلاح آموزش شبکه انتشار برگشتی<sup>۶</sup> گفته می‌شود.

طی آموزش شبکه، وزن‌ها و بایاس‌ها بتدریج به مقداری همگرا می‌شوند که به ازای آن‌ها با اعمال بردار ورودی، بردار خروجی دلخواه و متناظر با آن تولید می‌شود. نحوه آموزش را می‌توان طبق گام‌های زیر بیان نمود.

۱. انتخاب یک زوج آموزشی از دسته داده‌های آموزشی جهت استفاده به عنوان ورودی برای شبکه
۲. محاسبه خروجی شبکه
۳. محاسبه خطای بین خروجی شبکه و خروجی دلخواه (بردار هدف از زوج آموزشی)
۴. تنظیم وزن‌های شبکه به ازای حداقل خطا

مدل مقاله حاضر به ترتیب برابر ۰/۱۲۷ و ۵/۳۳ بدست آمده است که انطباق بسیار خوبی با مقاله مذکور دارد.

همچنین در مرجع [۸] یک مخزن بتنی هوایی آب مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از تحلیل مودال برای این مخزن برای اولین مود ارتعاش برابر ۳/۱۷۵ ثانیه ذکر شده است. در مدل‌سازی صورت گرفته بر اساس مشخصات ذکر شده در این مرجع، مقدار تناوب اولین مود سازه برابر ۳/۱۷۳ ثانیه استخراج شده است که انطباق بسیار خوبی بین مدل ساخته شده و مدل ارائه شده در مرجع را نشان می‌دهد.

مقایسه نتایج حاصل از تحلیل و نتایج مندرج در مراجع مذکور نشان‌دهنده صحت بسیار قابل قبولی در مقدار فرکانس مودهای اصلی و نحوه مدل‌سازی مخازن با استفاده از نرم‌افزار ANSYS است. در جدول (۲) خلاصه نتایج صحت سنجی مدل‌سازی آورده شده است.

جدول ۲- مقایسه نتایج تحلیل‌های صحت سنجی

مرجع	زمان تناوب	مرجع	مدلسازی	اختلاف
مرجع [۷]	ضربانی	5.36	5.33	0.56 %
	نوسانی	0.129	0.127	1.57 %
مرجع [۸]	ضربانی	3.175	3.173	0.06 %

در ادامه از تحلیل مودال برای تعیین فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای ارتعاش سازه استفاده می‌شود. مقدار فرکانس طبیعی هر سازه بستگی به شکل سازه، جنس، سختی و تکیه‌گاه‌های سازه دارد. نرم‌افزار ANSYS دارای قابلیت‌های متنوع در انجام تحلیل مودال سازه‌ها می‌باشد. البته باید توجه داشت که این محصول فقط به صورت خطی قادر به انجام تحلیل مودال بوده و هر گونه اعمال خواص غیرخطی، حتی در صورت تعریف، نادیده گرفته خواهد شد. در نرم‌افزار ANSYS برای انجام تحلیل مودال سازه‌هایی که از المان سیال Fluid80 به همراه اندرکنش سیال و سازه استفاده می‌کنند باید از روش تحلیل مودال موسوم به کاهش‌یافته<sup>۴</sup> استفاده کرد. در این روش درجات آزادی که

<sup>6</sup> Back propagation

<sup>4</sup> Reduced method

<sup>5</sup> Master DOFs

عملکرد شبکه‌های عصبی طراحی شده بر پایه محاسبات مفاهیمی چون میانگین مربعات خطا<sup>۸</sup> (MAE) و ریشه دوم میانگین کمترین مربعات خطا<sup>۹</sup> (RMSE) مورد ارزیابی قرار گرفته است. بعلاوه ضریب تعیین<sup>۱۰</sup> ( $\phi^2$ ) به همراه ضریب همبستگی<sup>۱۱</sup> (R) مابین مقادیر پیش‌بینی شده از شبکه عصبی و داده‌های خروجی حاصل از مدل‌سازی عددی نیز به عنوان معیار مناسبی جهت ارزیابی توانایی شبکه مد نظر بوده است. پارامترهای آماری یادشده به صورت روابط زیر تعریف می‌شوند [۱۰]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (t_k - y_k)^2}{N}} \quad (۴)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |t_k - y_k| \quad (۵)$$

$$\phi^2 = 1 - \frac{\sum_{k=1}^N (t_k - y_k)^2}{\sum_{k=1}^N (t_k - \bar{t}_k)^2} \quad (۶)$$

$$R = \frac{\sum_{k=1}^N (t_k - \bar{t}_k)(y_k - \bar{y}_k)}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (t_k - \bar{t}_k)^2 \sum_{k=1}^N (y_k - \bar{y}_k)^2}} \quad (۷)$$

که در آن  $t_i$  و  $y_i$  به ترتیب خروجی مدل و خروجی شبکه به ازای  $i$ امین داده هستند و  $\bar{t}_k$  میانگین داده‌های عددی خروجی و  $N$  تعداد کل داده‌های برداری است. شبکه‌ای که دارای کمترین مقادیر دو خطای مذکور و نزدیک‌ترین مقدار  $R$  را به یک دارا باشد به عنوان بهترین شبکه تلقی می‌گردد. محدوده داده‌های مورد استفاده برای طراحی و آموزش شبکه عصبی مورد نظر مطابق جدول (۳) است. مطابق این جدول، ۱۲۹۹ داده از داده‌های تاریخچه زمانی حاصل از تحلیل اجزای محدود به صورت تصادفی انتخاب و در آموزش شبکه استفاده شده است. برای صحت‌سنجی و اعتبارسنجی شبکه عصبی در هر دو پارامتر فشار هیدرودینامیکی و تلاطم سطح آب، برنامه نگاشته شده به گونه‌ای عمل می‌کند که تعداد مورد نیازی از داده‌های

۵. تکرار گام‌های یک تا چهار برای هر بردار در دسته آموزشی به منظور کاهش خطا برای کل دسته تا حد قابل قبول.

با ارائه هر مجموعه اطلاعات به شبکه، وزن‌ها اصلاح می‌گردند. وقتی تمام مجموعه اطلاعات به شبکه داده شد، یک Epoch تکمیل شده و مجدداً اطلاعات از اول به شبکه داده می‌شود [۹].

برای انجام تحلیل دینامیکی، تاریخچه زمانی شتابنگاشت زلزله نورتریج<sup>۷</sup> مطابق شکل (۴) مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل‌های (۵) و (۶) گزیده‌ای از تاریخچه زمانی پاسخ‌های تحلیل دینامیکی غیرخطی به ترتیب برای تغییرمکان افقی سقف مخزن و برش پایه به ازای شتابنگاشت مذکور ترسیم شده است. تاریخچه زمانی این سه پارامتر به عنوان ورودی شبکه و پارامترهای تلاطم سطح سیال و فشار هیدرودینامیک در گوشه سمت راست کف مخزن به عنوان خروجی شبکه مد نظر قرار گرفته شده است. در شکل (۷) الگوی معماری شبکه مورد استفاده در شبکه عصبی نشان داده شده است. تاریخچه زمانی فشار به ازای نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی به کمک نرم‌افزار اجزای محدود ANSYS و نتایج حاصل از پیش‌بینی شبکه عصبی نگارش شده به صورت شکل (۸) مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان‌دهنده انطباق بسیار قابل قبول از خروجی این دو روش است. در شکل (۹) مقادیر خطای حاصل از تقریب شبکه عصبی به ازای هر داده ترسیم شده است.

به همین ترتیب در شکل (۱۰) تاریخچه زمانی تلاطم سطح آب مخزن در گوشه سمت راست، به ازای نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی اجزای محدود و نتایج حاصل از پیش‌بینی شبکه عصبی نگارش شده دوم مورد مقایسه قرار گرفته است. هر چند نتایج این مقایسه قابل قبول است اما خطای آن بیشتر از پارامتر فشار ارزیابی شده است. نمودار تاریخچه زمانی این خطا در شکل (۱۱) ترسیم شده است.

<sup>10</sup> coefficients of determination

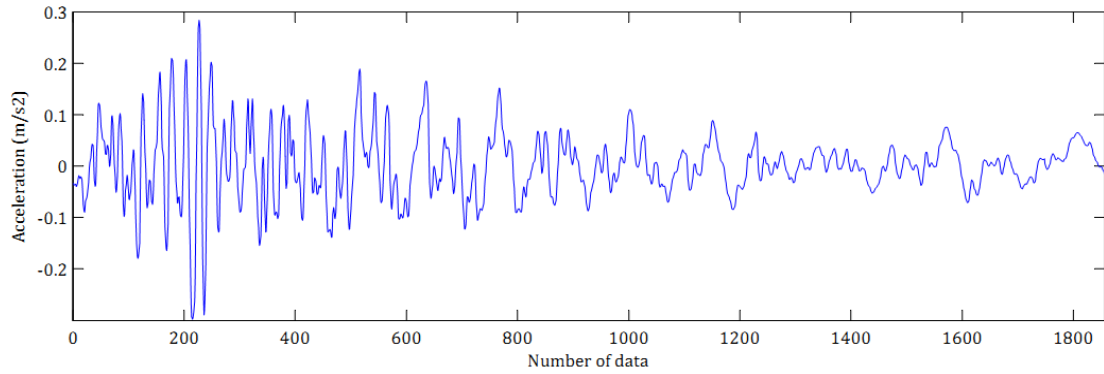
<sup>11</sup> correlation coefficient

<sup>7</sup> Northridge

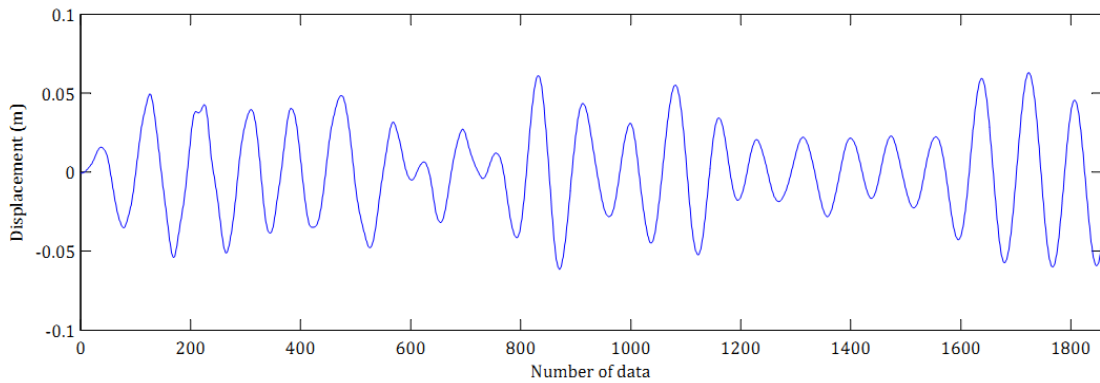
<sup>8</sup> Mean Absolute Error

<sup>9</sup> Root Mean Square Error

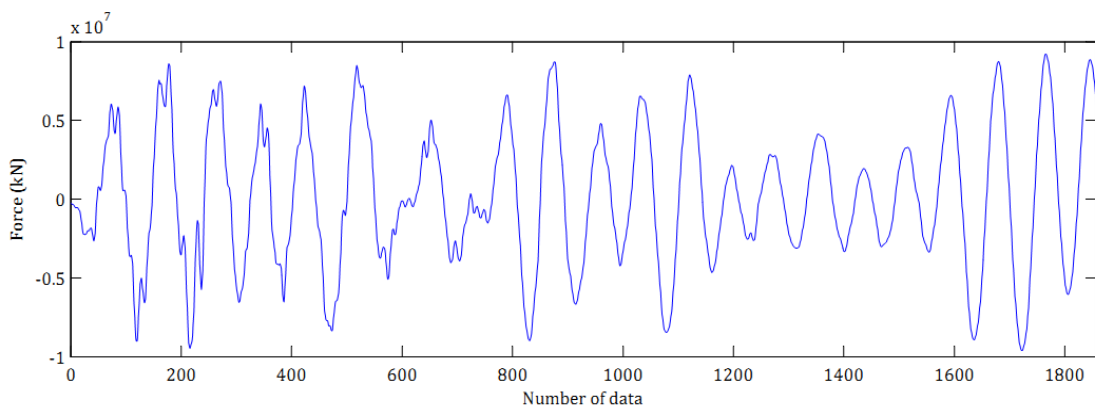
تاریخچه زمانی ورودی را به صورت تصادفی انتخاب و خروجی‌های متناظر را محاسبه می‌نماید.



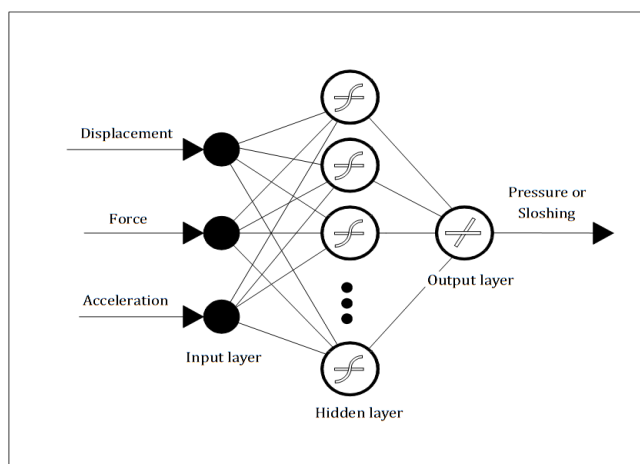
شکل ۴- تاریخچه زمانی شتاب زلزله اعمال شده به سازه



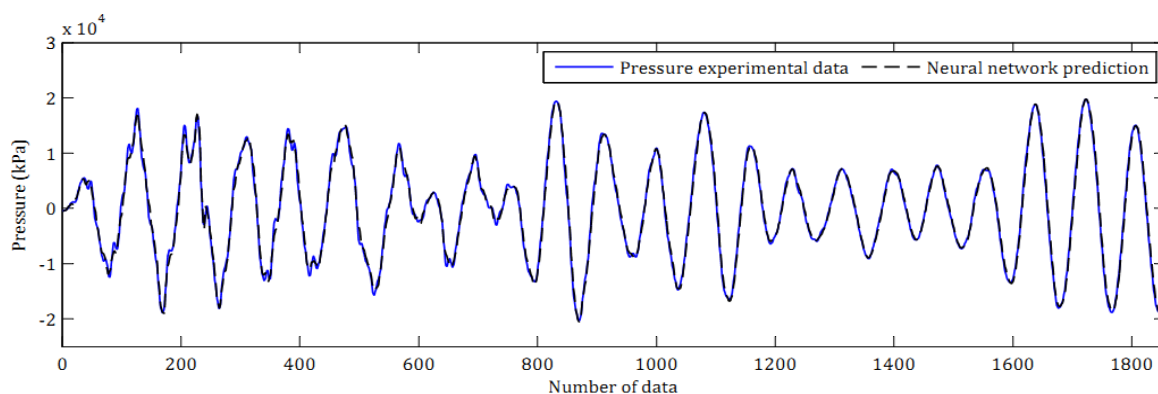
شکل ۵- تاریخچه زمانی پاسخ تغییرمکان سقف مخزن در اثر تحریک زلزله



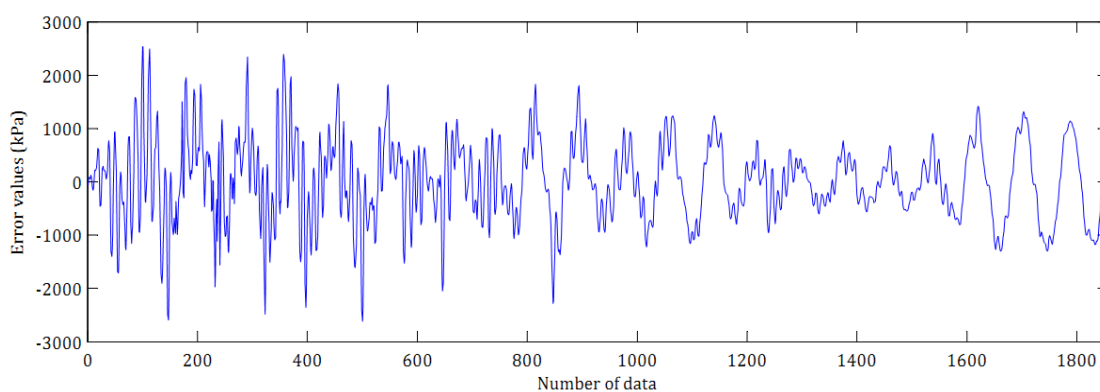
شکل ۶- تاریخچه زمانی نیروی برش پایه مخزن به ازای تحریک مورد نظر



شکل ۷- ساختار شبکه عصبی طراحی شده برای پیش‌بینی فشار هیدرودینامیکی و تلاطم سیال

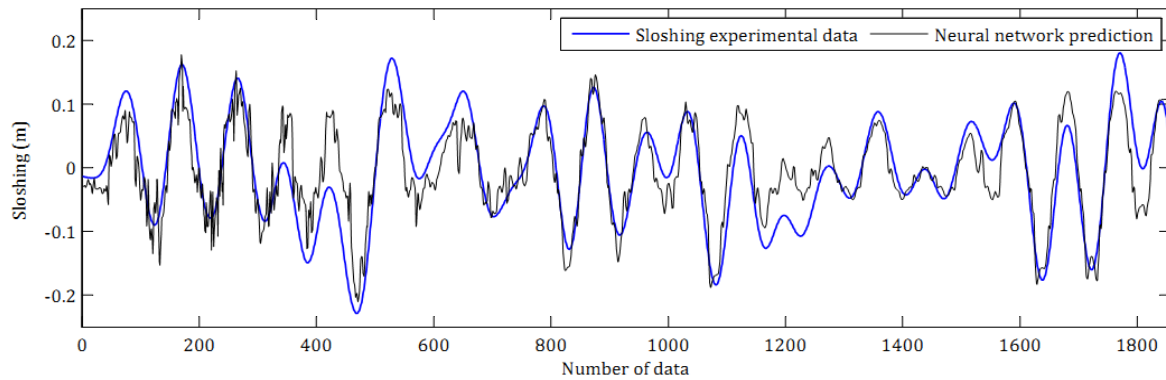


شکل ۸- مقایسه پاسخ تاریخیچه زمانی فشار در کف مخزن به روش اجزای محدود و شبکه عصبی

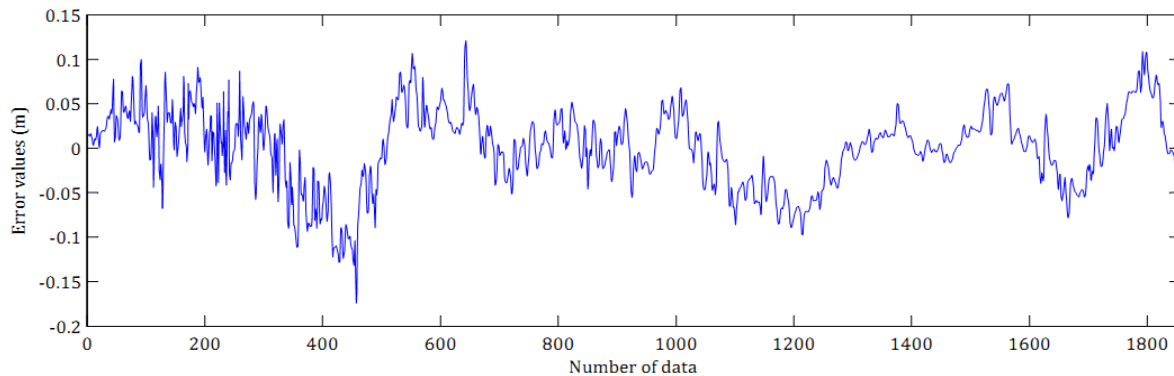


شکل ۹- تاریخیچه زمانی خطا در تقریب شبکه عصبی برای فشار هیدرودینامیکی





شکل ۱۰- مقایسه پاسخ تاریخیچه زمانی تلاطم سطح آب به روش اجزای محدود و شبکه عصبی



شکل ۱۱- تاریخیچه زمانی خطا در تقریب شبکه عصبی برای تلاطم

جدول ۳- محدوده داده‌های مورد استفاده: نمونه‌های آموزشی، اعتبارسنجی و صحت‌سنجی

داده‌های صحت‌سنجی (نمونه ۲۷۹)			داده‌های اعتبارسنجی (نمونه ۲۷۹)			داده‌های آموزشی (نمونه ۱۲۹۹)			پارامترهای مؤثر
Min.	Ave.	Max.	Min.	Ave.	Max.	Min.	Ave.	Max.	
-0.15	0	0.27	-0.18	0	0.21	-0.3	0	0.28	شتاب (g)
-0.06	0	0.06	-0.06	0	0.06	-0.06	0	0.06	جابه‌جایی (cm)
-9574	-36	9125	-9013	29	9146	-9618	69	9205	نیرو (KN)
-20.2	0.4	19.5	19.8	-0.6	19.4	-20.3	-0.2	19.7	فشار (MPa)
-23	0	17	-23	0	18	-23	0	18	تلاطم (cm)

شکل (۱۲) رگرسیون خطی مابین مقادیر فشار حاصل از شبکه عصبی مصنوعی و داده‌های فشار حاصل از تحلیل مدل مخزن هوایی در نرم‌افزار ANSYS به روش اجزای محدود را نشان می‌دهد. مقادیر نزدیک به یک در ضریب همبستگی (R) که برای هر دسته از داده‌ها آورده شده است نشانگر تطابق بالای دو روش بیان شده با هم می‌باشد. چنانچه از شکل مشاهده می‌شود این تطابق به ازای هر

جدول (۴) و (۵) به ترتیب مقادیر آماری مورد نظر را برای پیش‌بینی فشار هیدرودینامیک در کف مخزن و تلاطم سطح آب را نشان می‌دهند. چنانچه مشاهده می‌شود مقادیر کم مربوط به RMSE و MAE از یک سو و مقادیر نزدیک به یک ضرایب همبستگی و تعیین حاکی از توانایی بالای شبکه عصبی طراحی شده برای پیش‌بینی فشار سیال در مخزن دارد.

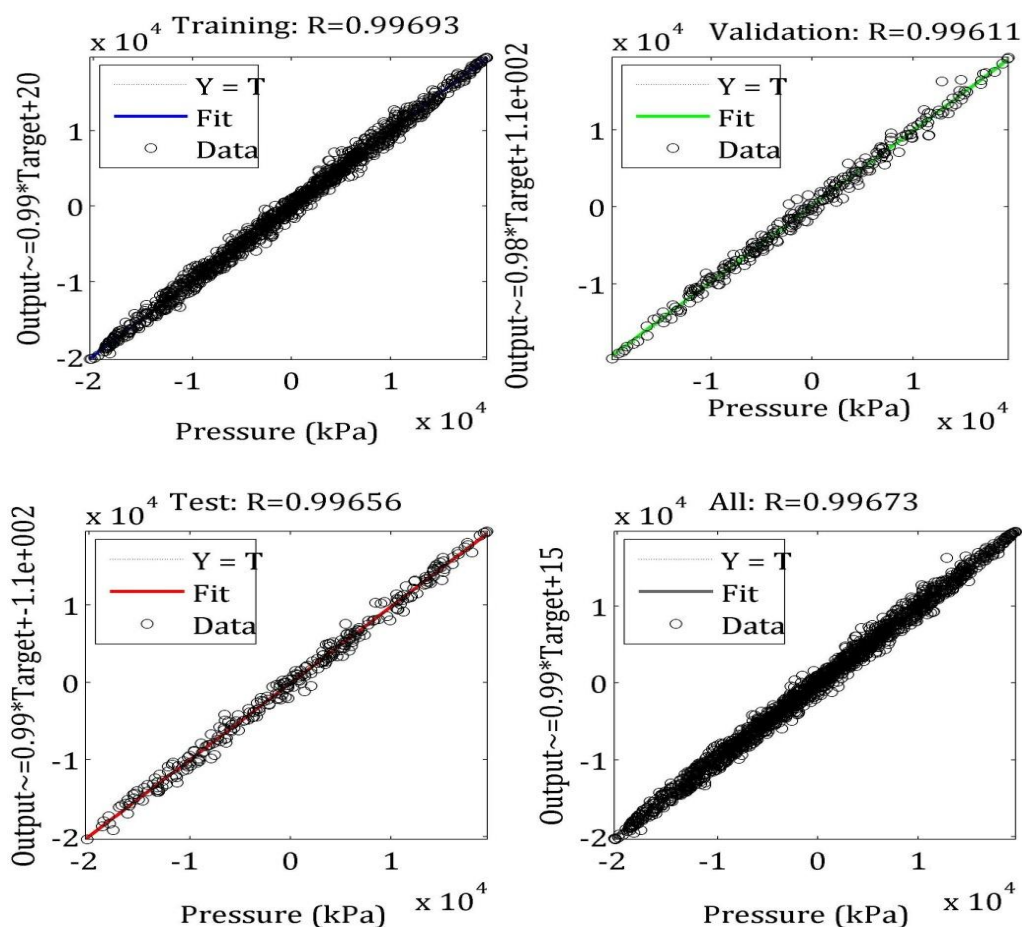
در تخمین پارامتر تلاطم هستند. این مسئله را می‌توان با توجه به اینکه معادلات حاکم بر حرکت سیال درون مخزن متفاوت از معادلات حاکم بر رفتار لرزه ای مصالح سازه‌ای است، توجیه نمود. چرا که در شبکه طراحی شده از نتایج حاصل از تحلیل سازه‌ای برای تخمین پارامتر تلاطم سیال بهره گرفته شده است. با این وجود دقت روش پیشنهاد شده می‌تواند در مقایسه با سایر معادلات تقریبی موجود قابل قبول باشد.

چهار مجموعه داده‌های معرفی شده در جدول (۴) به مقدار قابل قبولی وجود داشته است.

شکل (۱۳) رگرسیون خطی مابین مقادیر تلاطم حاصل از شبکه عصبی مصنوعی و داده‌های خروجی حاصل از تحلیل اجزای محدود را نشان می‌دهد. مطابق تجزیه و تحلیل‌های آماری، مقادیر نزدیک به یک در ضریب همبستگی (R) نشان‌دهنده رفتار مناسب شبکه به ازای داده‌های ورودی خواهد بود. با وجود این در شکل (۸) مشاهده می‌شود که داده‌های خروجی شبکه عصبی دارای مقداری عدم تمرکز

جدول ۴- RMSE، MAE، ضریب همبستگی و ضریب تعیین در داده‌های مربوط به پیش‌بینی فشار هیدرودینامیکی

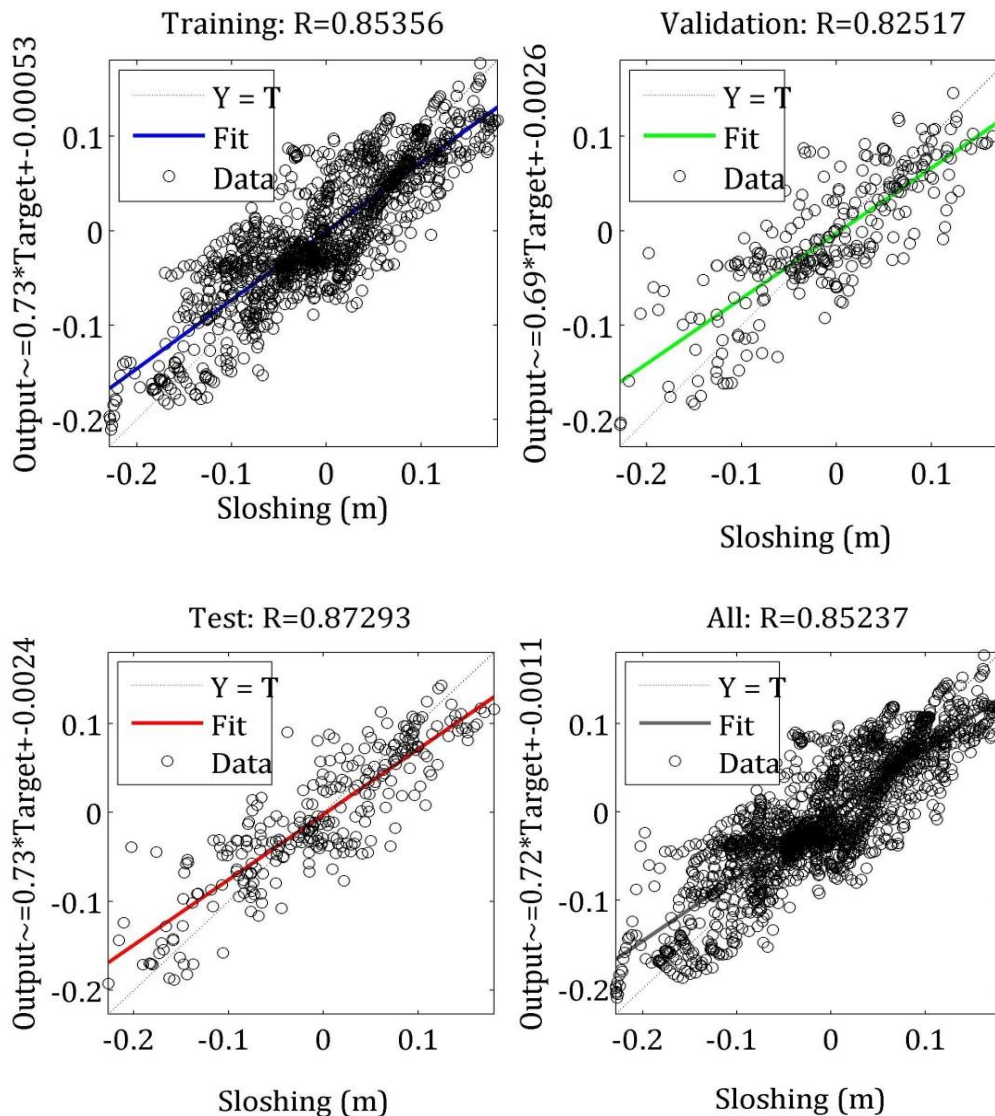
مجموعه داده‌ها	MAE	RMSE	ضریب همبستگی (R)	ضریب تعیین ( $\varphi^2$ )
آموزش	576.60	733.40	0.9967	0.9935
اعتبارسنجی	603.34	773.51	0.9962	0.9921
صحت‌سنجی	651.38	807.47	0.9966	0.9930
تمام نمونه‌ها	591.85	751.07	0.9966	0.9932



شکل ۱۳- رگرسیون خطی نتایج حاصل از شبکه عصبی و تحلیل اجزای محدود مربوط به فشار هیدرودینامیکی

جدول ۵- RMSE, MAE, ضريب همبستگي و ضريب تعيين در داده‌هاي مربوط به تخمين تلاطم آب

مجموعه داده‌ها	MAE	RMSE	ضريب همبستگي (R)	ضريب تعيين ( $\phi^2$ )
آموزش	0.034	0.043	0.8536	0.7285
اعتبارسنجي	0.038	0.048	0.8252	0.6807
صحت‌سنجي	0.033	0.043	0.8729	0.7607
تمام نمونه‌ها	0.034	0.044	0.8524	0.7265



شکل ۱۳- رگرسيون خطی نتايج حاصل از پيش‌بيني شبکه عصبی مصنوعي و تحليل اجزای محدود مربوط به تلاطم آب

اجزای محدود با نتايج حاصل از شبکه عصبی نگارش یافته نشان می‌دهد که پيش‌بيني فشار هیدرودینامیکی به روش شبکه عصبی انطباق بسیار مناسبی با نتايج حاصل از خروجی برنامه ANSYS دارد.

## ۵- نتیجه‌گیری

مقایسه نتايج پارامتر فشار در یک نقطه مشخص از کف مخزن حاصل از تحليل دینامیکی تاریخچه زمانی غیر خطی

سازه‌های مرکب از سازه و سیال داشت. اهمیت چنین روشی در آن است که از رویکرد جدید، با در دست داشتن اطلاعات مربوط به پارامترهای سازه‌ای می‌توان برای پیش‌بینی و مدل‌سازی رفتار پیچیده سیال بدون استفاده مستقیم از المان‌های اجزای محدود سیال بهره گرفت.

همچنین نتایج مدل‌سازی شبکه عصبی برای پارامتر تلاطم سطح آب توانایی این روش در تقریب پاسخ دینامیکی پارامترهای سیال در مخازن هوایی آب را نشان می‌دهد به عبارت دیگر می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از خروجی‌های حاصل از تحلیل‌های لرزه‌ای برای پارامترهای سازه‌ای، می‌توان پیش‌بینی مناسبی از رفتار سیال در

## ۶- مراجع

- [1] Caglar, N., Elmas, M., Dere Yaman, Z., & Saribiyik, M. (2008). Neural networks in 3-dimensional dynamic analysis of reinforced concrete buildings. *Construction and Building Materials*, 22, 788-800.
- [2] Kulahci, F., Inceoz, M., Dogru, M., Aksoy, E., & Baykara, O. (2009). Artificial neural network model for earthquake prediction with radon monitoring. *Applied Radiation and Isotopes*, 67, 212-219.
- [3] Kim, Y. S., & Kim, B. T. (2008). Prediction of relative crest settlement of concrete-faced rockfill dams analyzed using an artificial neural network model. *Computers and Geotechnics*, 35, 313-322.
- [4] Mansour, M., Dicleli, M., Lee, J., & Zhang, J. (2004). Predicting the shear strength of reinforced concrete beams using artificial neural networks. *Engineering Structures*, 26, 781-799.
- [5] Choubey, A., Segal, D., & Tandon, N. (2006). Finite element analysis of vessels to study changes in natural frequencies due to cracks. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 83, 181-187.
- [6] Memari, A. M., Ahmadi, M. M., & Rezaee, B. (1992). "Behavior of reinforced concrete water towers during Manjil-Roudbar earthquake of June 1990". 10th World Conference on Earthquake Engineering, (pp. Vol. 9, , pages 4953). Balkema, Rotterdam.
- [7] Liu, He & Schubert, Daniel H. (2010) "Effects of Nonlinear Geometric and Material Properties on the Seismic Response of Fluid/Tank Systems". ANSYS international conference.
- [8] Kalani Sarokolayi, L., Navayineya, B., Hosainalibegi, M., & Vaseghi Amiri, J. (2008). "Dynamic Analysis of Water Tanks with Interaction between Fluid and Structure". Beijing, China: The 14th World Conference on Earthquake Engineering.
- [9] Adeli, H. (2001), "Neural network in civil engineering", *Comp-Aided Civil and Infrastructures Eng*, J, 6, pp 126-142
- [10] Fausett, L.V. (1994), "Fundamentals neural networks: Architecture, algorithms, and applications", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.