

## معتبرسازی مدل اجزای محدود پل راه آهن به کمک شبکه عصبی مصنوعی

شروان عطایی<sup>۱</sup>، علی اکبر آقاچوک<sup>۲\*</sup>، محمدصادق معرفت<sup>۳</sup>، سعید محمدزاده<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکترای سازه، بخش مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشیار مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

۴- استادیار دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

\*تهران، صندوق پستی ۱۴۱۱۵-۱۴۳

A\_Agha@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: فروردین ۱۳۸۴، پذیرش مقاله: خرداد ۱۳۸۶)

**چکیده** - آزمایش میدانی پلها با استفاده از پاسخ ناشی از بهره برداری پلها، از نظر اقتصادی مقرون به صرفه و از منظر اجرایی عملی است. روشهای کلاسیک پردازش اطلاعات این گونه آزمایشها، بر شناسایی پارامتری و غیرپارامتری سیستم و بر نظریه آمار و احتمالات مبتنی است. نظریه یادگیری که در دو شاخه احتمالاتی و شبکه عصبی مصنوعی مطرح می شود، روش مناسب، قابل اعتماد و کاراتری برای پردازش اطلاعات حسگرهای این نوع آزمایش در اختیار قرار می دهد. در این تحقیق از شبکه عصبی مصنوعی تطبیقی خطی برای پردازش اطلاعات حسگرهای کرنش و تغییر مکان استفاده شده و کاربرد آن در جایگزینی مدل اجزای محدود و کمک در معتبرسازی مدل اجزای محدود در نقاط آموزش دیده، تبیین شده است.

**کلید واژگان:** یادگیری، شبکه عصبی مصنوعی، ترکیب اطلاعات حسگرها، پل راه آهن،

وضعیت سنجی، پاسخ ناشی از بهره برداری، معتبرسازی مدل اجزای محدود.

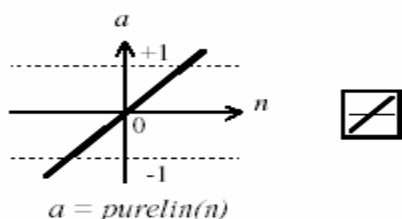
### ۱- مقدمه

فناوری تخمین و شناسایی سیستمهای سازه ای و مکانیکی به منظور وضعیت سنجی، عیب یابی و معتبرسازی مدل های عددی به کار می رود. این فناوری، تعمیر و نگهداری پیش بینانه<sup>۱</sup> سازه ها را امکان پذیر می سازد. فناوری مزبور در حوزه مهندسی هوا و فضا و مهندسی مکانیک به بلوغ رسیده و روشهای

اندازه گیری و تحلیل اطلاعات موجود، با رعایت نکات فنی و اقتصادی به خوبی شکاف بین مدلسازیهای نظری و رفتار مشاهده شده از سیستمهای مکانیکی را پر می کند. این فناوری در حوزه مهندسی عمران هنوز به بلوغ نرسیده و چالشها و مسائل حل نشده فراوانی دارد. دلیل آن، بزرگ و غیرقابل کنترل بودن و عدم قطعیت فراوان موجود در سازه های عمرانی است که ارایه روش قابل اطمینان، فنی و اقتصادی را دشوار

1. Predictive Maintenance

این شبکه ساختاری شبیه شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون دارد. تنها تفاوت در آن است که تابع تبدیل نرون خطی، خطی است (شکل ۲).

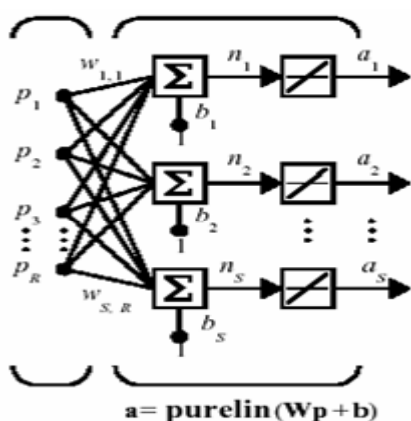


شکل ۲ تابع تبدیل خطی

تابع تبدیل خطی، پاسخ نرون را با بازگرداندن مقدار ورودی به آن محاسبه می کند رابطه (۱).

$$a = f(n) = f(W \times p + b) = W \times p + b \quad (1)$$

این نرون برای یادگیری رابطه خطی بین اطلاعات یا یافتن تقریبی خطی از رابطه بین اطلاعات به کار می رود. این نرون توانایی یافتن رابطه غیرخطی بین اطلاعات را ندارد. معماری شبکه خطی به گونه ای است که خروجی با  $S$  نرون به ورودی با  $R$  نرون توسط ماتریس وزن  $W$  ارتباط می یابد (شکل ۳).



شکل ۳ معماری شبکه خطی

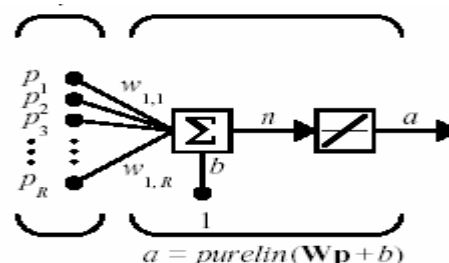
کرده است. افزایش اهمیت تعمیر و نگهداری سازه ها در مقابل ساخت سازه های جدید، به ویژه در کشورهای توسعه یافته، اهمیت این مقوله را افزایش داده است.

در میان روشهای وضعیت سنجی، وضعیت سنجی از روی ارتعاشات ناشی از بهره برداری پلها، از نظر اقتصادی مقرون به صرفه و از منظر اجرایی عملی است [۱]. روشهای کلاسیک پردازش اطلاعات این گونه آزمایشها، بر شناسایی پارامتری و غیرپارامتری سیستم و بر نظریه آمار و احتمالات مبتنی است و در قالب این آزمایشها، مدل اجزای محدود معتبرسازی می شود [۲]. نظریه یادگیری که در دو شاخه احتمالاتی و شبکه عصبی مصنوعی مطرح می شود، روش مناسب، قابل اعتماد و کارآمدتری را برای پردازش اطلاعات حسگرهای این نوع آزمایش فراهم می سازد [۳]. استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در پردازش اطلاعات حسگرها، روشی جدید در تحلیل اطلاعات حسگرها است [۴، ۵، ۶].

در تحقیق حاضر از شبکه عصبی مصنوعی خطی برای پردازش اطلاعات حسگرهای کرنش و تغییر مکان استفاده شده است و کاربرد آن در جایگزینی مدل اجزای محدود یا کمک به معتبرسازی مدل اجزای محدود تبیین شده است.

## ۲- شبکه عصبی مصنوعی تطبیقی خطی

شبکه عصبی مصنوعی تطبیقی خطی یا شبکه آدلاین، اولین بار توسط ویدرو و هاف ارائه شد [۷]. این شبکه، توانایی حل مسائل به صورت خطی جداپذیر را دارد. نرون خطی با  $R$  ورودی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ نرون خطی با  $R$  ورودی

به کمک چهار نبشی  $8 \times 65 \times 80$  و دو ورق  $10 \times 160$  تقویت شده و مهارهای قائم خریا، پروفیل  $IPBL220$  است. پل شامل ۱۳ تیر عرضی  $5/5$  متری با فواصل ۳ متر بوده و از پروفیل  $IPBL400$  تشکیل شده است. دو تیر طولی فرعی از پروفیل  $IPBL240$  با فاصله  $1/5$  متر تشکیل شده که به صورت ساده بر روی تیرهای عرضی هر چشمه نشسته است. ریلهای  $UIC60$  به طور مستقیم بر روی تیرهای طولی فرعی قرار گرفته است. در ۶، ۱۸ و ۳۰ متری، درز ریل وجود دارد. چشمه‌های اول، پنجم، هشتم و دوازدهم در صفحه افق با نبشی  $12 \times 12 \times 120$  به صورت ضربدری مهاربندی شده است.



شکل ۴ پل خریایی نکا

#### ۴- مشخصات و آرایش تجهیزات اندازه‌گیری

در آزمایش پل نکا [۸]، که شامل داده‌برداری استاتیک و دینامیک است، ۸۹ سنسور به کار برده شد. در این آزمایشها، شتاب به وجود آمده در ۲۷ نقطه، تغییر مکانها در ۲۰ نقطه و کرنشها در ۴۲ نقطه ثبت شد. این اندازه‌گیریها با دقت بالا و با استفاده از وسایل الکترونیکی انجام شد.

کرنش‌سنجها، ساخت شرکت TML کشور ژاپن و از نوع ۱۱-۵-FLA بود. کرنش‌سنجهای مذکور دارای طول گیج ۵ میلیمتر و مخصوص استفاده بر روی فولاد است. در مجموع ۴۲ کرنش‌سنج بر روی اعضای پل نصب شد. ۱۲ کرنش‌سنج بر روی تیرهای طولی فرعی، ۷ کرنش‌سنج بر روی تیرهای عرضی، ۶ کرنش‌سنج بر روی بادبندیهای قائم

از قانون یادگیری حداقل میانگین مجذور خطا یا قانون یادگیری ویدرو-هاف برای تعیین وزنه‌های شبکه استفاده می‌شود. مقادیر وزنها و بایاس شبکه به گونه‌ای تعیین می‌شود که مجموع مجذورهای تفاوت بین خروجی شبکه و مقادیر مورد انتظار رابطه (۲) حداقل یا از حد مشخصی کمتر شود. این مسئله قابل حل است، زیرا سیستمهای خطی خطای حداقل یکسانی دارند:

$$\begin{aligned} \text{mse} &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (e(k))^2 \\ &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (t(k) - a(k))^2 \end{aligned} \quad (2)$$

این قانون یادگیری فقط می‌تواند شبکه عصبی مصنوعی خطی تک‌لایه را آموزش دهد. این محدودیت، اشکالی برای این قانون یادگیری به شمار نمی‌رود، زیرا هر شبکه خطی چندلایه، دارای یک شبکه خطی تک‌لایه معادل است. در ادامه شرح آزمایش میدانی انجام شده و سپس کاربرد شبکه عصبی مصنوعی خطی تبیین می‌شود.

#### ۳- شرح سازه‌های پل

پل خریایی فلزی نکا که بر روی رودخانه نکا قرار دارد در سال ۱۳۷۸ جایگزین پل تخریب شده قبلی شده است (شکل ۴). پل در ناحیه راه‌آهن شمال و در ۳۰۰ متری ایستگاه نکا واقع است. در حال حاضر ترافیک روزانه پل، عبور ۶ تا ۷ قطار باری با حدود ۱۸۰۰ تن بار، ۴ قطار مسافری (رفت و برگشت) و ۴ قطار محلی (رفت و برگشت) است. خریای مزبور دارای دهانه ۳۶ متری است که قسمتی از پل ۷۲ متری موقت راه در منطقه پل قطور بوده است. جنس پل به گفته کارشناسان راه‌آهن  $ST52$  است. خریا شامل ۱۲ چشمه ۳ متری به ارتفاع  $3/3$  متر و عرض  $5/5$  متر است که عبور یک خط راه‌آهن را از روی خط تأمین می‌کند. خریای مزبور از نوع عبور از میان است. تیرهای اصلی طولی خریا، پروفیل  $IPBL220$  است که

سرعت قرائت ۲۰ هرتز انجام شد. در تمامی بارگذاریها، قطار با سرعت معلوم به صورت رفت و برگشت از روی پل عبور کرد. ۴۳ کانال اندازه گیری پاسخ سازه در ثبت کننده دینامیکی، مشتمل بود بر: شتاب در ۲۷ نقطه، جابه جایی در ۹ نقطه، کرنش در ۷ نقطه و ۸۹ کانال اندازه گیری پاسخ سازه در ثبت کننده استاتیکی به صورت شتاب در ۲۷ نقطه، جابه جایی در ۲۰ نقطه و کرنش در ۴۳ نقطه.

جدول ۱ مشخصات لکوموتیو و واگنهای سوخت

واگن مخزن دار	لکوموتیو GT۲۶	
۴	۶	تعداد محور
۷۶	۱۱۰/۹۷	وزن پر (تن)
۹/۸۶	۱۲/۵	فاصله مرکز دو بوژی (متر)
۱/۸۰	۲/۰۲-۱/۶۹	فاصله محورهای بوژی (متر)
۱۵/۰۶	۲۱/۱	فاصله تامپون تا تامپون (متر)



شکل ۵ حرکت لکوموتیو با دو واگن به سمت ساری (حالت رفت)

## ۶- تخمین بارگذاری عبوری

طراحی آزمایش به گونه ای انجام شد که بارگذاری عبوری از روی پاسخ برخی سنسورها قابل تخمین باشد. در شکل ۶ کرنش تکیه گاهی تیرچه طولی فرعی وسط دهانه، در عبور لکوموتیو و در شکل ۷ کرنش تکیه گاهی تیر عرضی وسط دهانه، در عبور لکوموتیو با دو واگن مشاهده می شود. همانطور که ملاحظه می شود، موقعیت محورها به خوبی از روی پیشینه پاسخ قابل تشخیص است. موقعیت محورها در طول

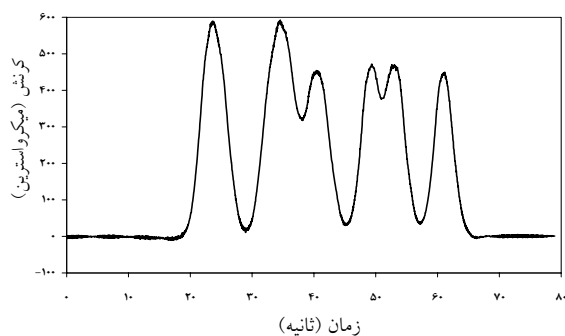
خرپا، ۱۶ کرنش سنج بر روی تیرهای اصلی طولی خرپا و یک کرنش سنج بر روی بادبندی افقی عرشه نصب شد. تغییر شکل سنجها<sup>۱</sup> ساخت شرکت RDP Electronics کشور انگلستان و دارای محدوده تغییر شکل ۵ تا ۱۰۰ میلی متر است. سنسورهای مذکور در فرکانس ۰ تا ۵۰ هرتز کار کرده و از دقت ۰/۱ در صد برخوردارند. این سنسورها به کمک کابلهای ۵۰ متری به دستگاه ثبت کننده الکتریکی اتصال داشتند. نصب تغییر شکل سنجها بر روی تکیه گاههای فلزی و به کمک پایه های آهنربایی انجام شد. در مجموع ۲۰ تغییر مکان سنج به کار رفت. هفت تغییر مکان سنج ۵ میلی متری، پنج تغییر مکان سنج ۲۵ میلی متری، چهار تغییر مکان سنج ۵۰ میلی متری و چهار تغییر مکان سنج ۱۰۰ میلی متری استفاده شد. از پایه های داربست برای اندازه گیری تغییر شکل قائم و جانبی عرشه ی پل استفاده شد.

جمع آوری و ثبت اطلاعات به کمک دستگاههای ثبت کننده ی الکتریکی اطلاعات انجام گرفت. برای داده برداری دینامیک، از ثبت کننده ی ۴۸ کاناله با سرعت ۲۰۰۰ داده بر ثانیه بر کانال و برای داده برداری استاتیک، از ثبت کننده ی ۹۸ کاناله با سرعت داده برداری ۲۰ داده بر ثانیه بر کانال بهره گرفته شد.

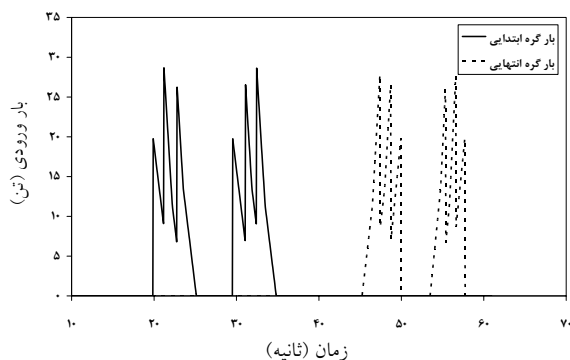
## ۵- مشخصات و آرایش بارگذاری

دو نوع بار شامل لکوموتیو و لکوموتیو با دو واگن باری پر (شکل ۵) بر سازه اعمال شد. آزمایشها به صورت رفت و برگشت انجام شد. دیزل مورد استفاده در آزمایش، از نوع GT۲۶ (۹۰۸-۶۰) و واگنها از نوع مخزن دار سوخت رسان بود. مشخصات دیزل و واگنها در جدول ۱ آورده شده است. حداکثر میزان بار در بارگذاری با لکوموتیو برابر ۱۱۱ تن و در بارگذاری با لکوموتیو همراه با دو واگن برابر ۲۰۷/۵ تن است. ۲۱ آزمایش با ثبت کننده دینامیکی با ۴۳ کانال و سرعت قرائت ۲ کیلوهرتز و ۲۷ آزمایش با ثبت کننده استاتیکی با ۸۹ کانال و

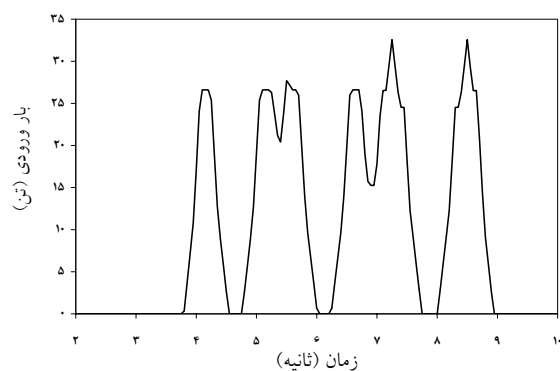
1. LVDT



شکل ۷ کرنش وسط تیر عرضی وسط دهانه بر اثر عبور لکوموتیو با دو واگن



شکل ۸ الف) تخمین بارگذاری ورودی در گره ابتدایی و انتهایی پل (عبور لکوموتیو با سرعت ۵ کیلومتر در ساعت، حرکت به سمت ایستگاه)

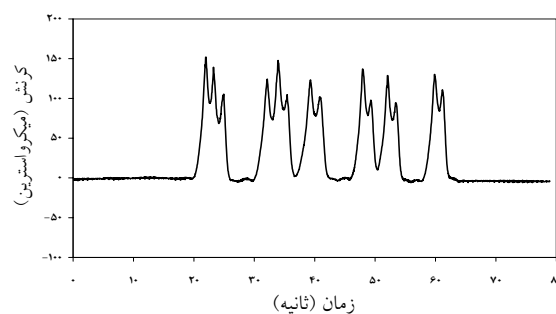


شکل ۸ ب) تخمین بارگذاری ورودی در گره میانی (عبور لکوموتیو با دو واگن با سرعت ۴۳ کیلومتر در ساعت، حرکت به سمت ایستگاه)

عبور قطار از روی کرنشهای اندازه‌گیری شده در وسط تیرهای عرضی ابتدایی، میانی و انتهایی پل، تخمین زده و بارگذاری در ۱۳ گره به فاصله ۳ متر در طول پل تعیین شد. شکل ۸-الف بارگذاری ورودی تخمین زده شده را در گره اول و سیزدهم، در زمان عبور لکوموتیو و شکل ۸-ب تخمین بارگذاری ورودی را در گره هفتم در عبور لکوموتیو همراه با دو واگن نشان می‌دهد.

## ۷- بازنمایش مدل اجزای محدود به کمک شبکه عصبی مصنوعی

در صورتی که تمامی درجات آزادی که در بارگذاری مدل اجزای محدود نقش ایفا می‌کنند، به عنوان ورودی و پاسخهای خروجی دلخواه مدل، به عنوان خروجی برگزیده شود، می‌توان به کمک شبکه عصبی مصنوعی، بازنمایشی از ورودی و خروجی مدل اجزای محدود را ارائه کرد. شبکه به صورت دو لایه ورودی و خروجی و با معماری شبکه تطبیقی خطی انتخاب شد تا رفتار خطی تضمین شود. در این حالت ماتریس وزن شبکه عصبی، معادل خط تأثیر متناظر درجات آزادی منتخب خواهد بود. اگر خروجی انتخاب شده تغییر مکان باشد، ماتریس وزن متناظر با آن، درایه‌های متناظر با ماتریس نرمی مدل اجزای محدود خواهد بود. بازنمایش مدل اجزای محدود در قالب شبکه عصبی این مزیت را دارد که از توانایی یادگیری شبکه عصبی می‌توان در شناسایی پارامترهای سازه‌ای در آزمایش پلها بهره‌مند شد.



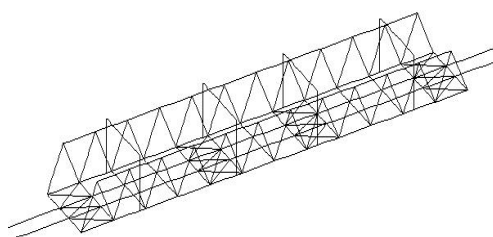
شکل ۹ کرنش تکیه‌گاه تیرچه طولی وسط دهانه بر اثر عبور لکوموتیو با دو واگن

تغییر مکان اختصاص داده شده بود. از این رو برای ترکیب اطلاعات حسگرهای کرنش و تغییر مکان، اطلاعات ۲۲ گروه آزمایش استاتیکی استفاده شد. هشت گروه از آزمایشها با لکوموتیو و ۱۲ گروه با لکوموتیو با دو واگن و با سرعتهای ۲ تا ۵۰ کیلومتر بر ساعت انجام شده بود. در انتخاب نتایج آزمایش برای آموزش و اعتبارسنجی شبکه، به اثر افزایش پاسخ ناشی از افزایش سرعت (ضریب افزایش دینامیکی، ضریب ضربه) باید توجه شود. لذا در مجموع هشت گروه آزمایش با سرعت کمتر از ۲۰ کیلومتر بر ساعت برای آموزش و اعتبارسنجی استفاده شد. دو گروه از آزمایشهای انجام شده با لکوموتیو با واگن به منظور آموزش و شش گروه از آزمایشها برای اعتبارسنجی مدل به کار رفت.

در پردازش استاتیک اطلاعات حسگرهای کرنشی و تغییر مکانی، بارگذاری ورودی در ۱۳ گره با فاصله مساوی (به فاصله سه متر) در طول پل به عنوان ورودی و ۲۲ کرنش یال فوقانی و تحتانی و بادبندی خرپا (مجهول نیرویی) و ۲۰ تغییر مکان عرشه (مجهول تغییر مکانی) به عنوان خروجی برگزیده شد.

در شکل ۱۰ مقایسه کرنش اندازه گیری شده یال تحتانی در محل چشمه هفتم (وسط دهانه) با پاسخ شبکه عصبی در عبور لکوموتیو با دو واگن با سرعت ۵ کیلومتر در ساعت به طرف ساری مشاهده می شود. آزمایش مزبور جزو داده های آموزش داده شده به شبکه است. در شکل ۱۱ مقایسه کرنش اندازه گیری شده یال تحتانی در محل چشمه هفتم با پاسخ شبکه عصبی و در شکل ۱۲ مقایسه کرنش اندازه گیری شده بادبندی قائم خرپا در محل چشمه هفتم با پاسخ شبکه عصبی تحت اثر دو گروه آزمایش مشاهده می شود. گروه اول عبور لکوموتیو با سرعت ۱۵ کیلومتر بر ساعت به سمت ساری و گروه دوم عبور لکوموتیو با دو واگن با سرعت ۱۰ کیلومتر در ساعت به طرف ایستگاه است. آزمایشهای مزبور جزو داده های آموزش داده نشده به شبکه است. همانطور که

در این آزمایش، مدل سازی اجزای محدود پل خرابی نکا با توجه به نقشه چون ساخت<sup>۱</sup> تهیه شده از پل انجام شد (شکل ۹). مدل سازی خرپا، تیرهای طولی فرعی، تیرهای عرضی، مهاربندیهای قائم، افقی و ریل با المان تیر، نوپرن با المان فنر انجام شد. سایر خصوصیات مدل در بند ۹ ارائه شده است.



شکل ۹ مدل اجزای محدود پل نکا

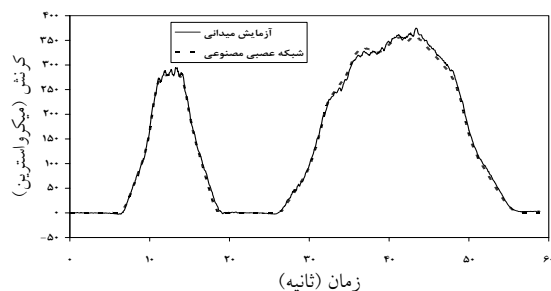
## ۸- پردازش اطلاعات حسگرها به کمک شبکه

### عصبی مصنوعی

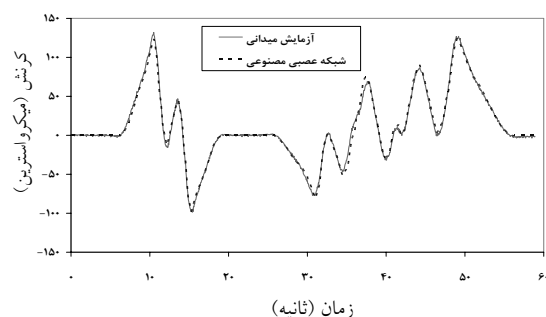
به منظور پردازش اطلاعات حسگرها از شبکه عصبی خطی با یادگیری حداقل میانگین مجذور خطا استفاده شد. از آنجاکه رفتار مشاهده شده کرنشی و تغییر مکانی سازه خطی است، شبکه خطی می تواند رابطه ورودی و خروجی سازه را به خوبی بازنمایی کند. اطلاعات حسگرهای کرنش و تغییر مکان به طور همزمان پردازش شد و برای اطلاعات حسگرها، معماری استاتیک (۱۳ نرون ورودی و ۴۲ نرون خروجی) در نظر گرفته شد.

در مجموع ۲۲ گروه آزمایش با ثبت کننده ۹۶ کاناله استاتیکی و ۲۰ گروه آزمایش با ثبت کننده ۴۸ کاناله دینامیکی انجام شد. اطلاعات ثبت شده در آزمایش با ثبت کننده دینامیکی با سرعت قرائت ۲۰۰۰ هرتز، بیشتر به حسگرهای شتاب و اطلاعات ثبت شده در آزمایش با ثبت کننده استاتیکی با سرعت قرائت ۲۰ هرتز، بیشتر به حسگرهای کرنش و

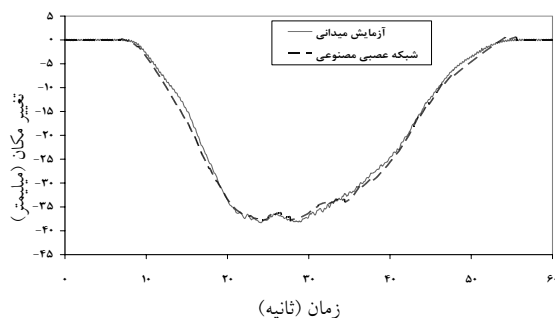
1. As Built



**شکل ۱۱** مقایسه کرنش اندازه‌گیری شده پال تحتانی در محل چشمه هفتم با پاسخ شبکه عصبی (عبور لکوموتیو با سرعت ۱۵ کیلومتر در ساعت به سمت ساری و عبور لکوموتیو و دو واگن با سرعت ۱۰ کیلومتر در ساعت به طرف ایستگاه - داده آموزش داده نشده)



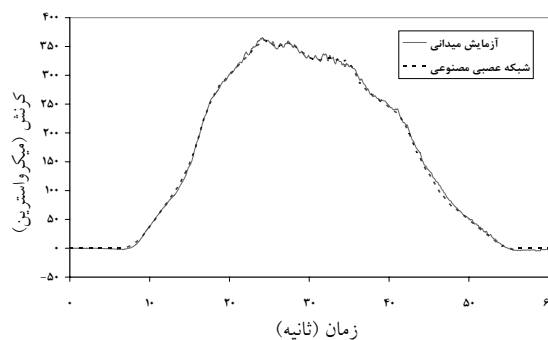
**شکل ۱۲** مقایسه کرنش اندازه‌گیری شده بادنبدی قائم خرابا در محل چشمه هفتم با پاسخ شبکه عصبی (عبور لکوموتیو با سرعت ۱۵ کیلومتر در ساعت به سمت ساری و عبور لکوموتیو با دو واگن با سرعت ۱۰ کیلومتر در ساعت به طرف ایستگاه - داده آموزش داده نشده)



**شکل ۱۳** مقایسه تغییر مکان اندازه‌گیری شده در ۱۹ متری پل با پاسخ شبکه عصبی (عبور لکوموتیو با دو واگن با سرعت ۵ کیلومتر در ساعت به طرف ساری - داده آموزش داده شده)

ملاحظه می‌شود، تطابق قابل قبولی بین خروجی شبکه و آزمایش وجود دارد.

در شکل ۱۳ مقایسه تغییر مکان اندازه‌گیری شده در ۱۹ متری پل (وسط پل) با پاسخ شبکه عصبی در عبور لکوموتیو با دو واگن با سرعت ۵ کیلومتر در ساعت به طرف ساری مشاهده می‌شود. آزمایش مزبور جزو داده‌های آموزش داده شده به شبکه است. در شکل ۱۴ مقایسه تغییر مکان اندازه‌گیری شده در ۱۹ متری پل با پاسخ شبکه عصبی برای دو گروه آزمایش فوق مشاهده می‌شود. آزمایشهای مزبور جزو داده‌های آموزش داده نشده به شبکه است. همانطور که ملاحظه می‌شود، تطابق خوبی بین خروجی شبکه و آزمایش وجود دارد. در شکل ۱۵ حداکثر خطای تخمین یادگیری و اعتبارسنجی شبکه عصبی برای کرنش‌سنجها و تغییر مکان‌سنجهای خرابای جنوبی ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، حداکثر خطای کرنش‌سنجها در بدترین حالت به ۴۰ میکرواسترین و حداکثر خطای تغییر مکان‌سنجها در بدترین حالت به ۴/۵ میلی‌متر می‌رسد که بیانگر حداکثر خطایی در حدود ۱۰٪ است. خطای مذکور ناشی از عدم قطعیت موجود در تخمین بار ورودی است.

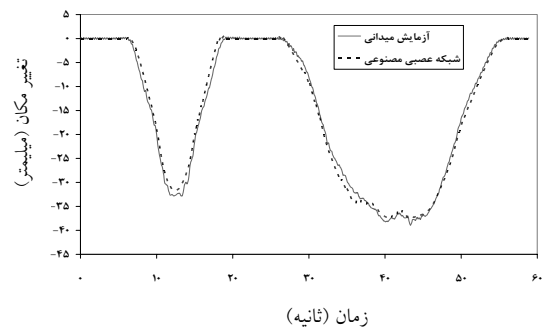


**شکل ۱۴** مقایسه کرنش اندازه‌گیری شده پال تحتانی در محل چشمه هفتم با پاسخ شبکه عصبی (عبور لکوموتیو با دو واگن با سرعت ۵ کیلومتر در ساعت به طرف ساری - داده آموزش داده شده)

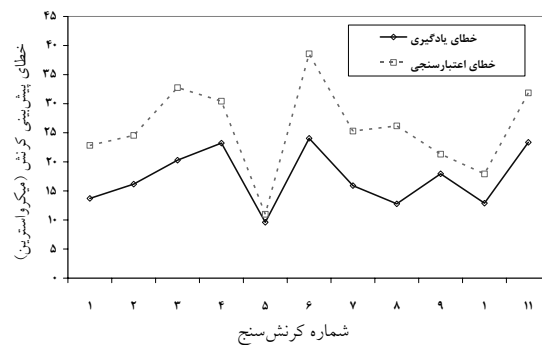
## ۹- کاربرد شبکه عصبی آموزش داده شده

در صورتی که از شبکه عصبی با ساختار خطی استفاده شود و تمامی درجات آزادی بارگذاری شده در مدل اجزای محدود در ورودی شبکه عصبی در نظر گرفته شود و تابع شکل پخش بار بین گره‌ها در شبکه عصبی و مدل اجزای محدود یکسان منظور شود، ماتریس وزن نرونیهای متناظر با خط تأثیر کمیت‌های به‌کار گرفته شده به‌ازای اعمال بار در نقاط بارگذاری شده خواهد بود. تغییر دیگر این ضرایب برای کمیت‌های تغییر مکانی، ضرایب نرمی به‌ازای اعمال بار در نقاط بارگذاری شده است. بدین ترتیب مدل شبکه عصبی در نقاط آموزش داده شده، معادل مدل اجزای محدود است، با این تفاوت که مدل شبکه عصبی مصنوعی علاوه بر قابلیت تحلیل سازه، قابلیت آموزش از روی اطلاعات آزمایش میدانی را نیز دارد. بنابراین از شبکه عصبی مصنوعی آموزش داده شده می‌توان در معتبرسازی مدل اجزای محدود و تعیین خط تأثیر کمیت‌های اندازه‌گیری شده در نقاط آموزش داده شده استفاده کرد. در صورتی که کمیت به‌کار رفته کرنش باشد، می‌توان از اصل تعادل و اصل تقابل استفاده کرد و مقدار خط تأثیر را در تعداد دیگری از اعضای سازه - که اندازه‌گیری میدانی در آن نقاط انجام نشده - به‌دست آورد و در صورتی که کمیت به‌کار رفته تغییر مکان باشد، می‌توان از اصل سازگاری و اصل تقابل استفاده کرد و ضرایب نرمی را در تعداد دیگری از نقاط سازه - که اندازه‌گیری میدانی در آن نقاط انجام نشده - به‌دست آورد.

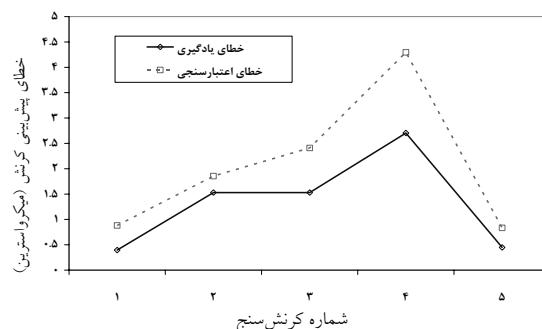
از طرف دیگر، شبکه به‌دست آمده در حقیقت نوعی تحلیلگر سازه است که می‌توان به‌راحتی در تحلیل سازه و تعیین پاسخ سازه در نقاط آموزش داده شده از آن استفاده کرد. همچنین به‌کمک شبکه عصبی می‌توان مدلی از برخی رفتارهای پل (مانند تغییرشکل‌های جانبی به‌ازای



شکل ۱۴ مقایسه تغییر مکان اندازه‌گیری شده در ۱۹ متری پل با پاسخ شبکه عصبی (عبور لکوموتیو با سرعت ۱۵ کیلومتر در ساعت به‌سمت ساری و عبور لکوموتیو با دو واگن با سرعت ۱۰ کیلومتر در ساعت به‌طرف ایستگاه - داده آموزش داده نشده)



شکل ۱۵ الف) حداکثر خطای تخمین یادگیری و اعتبارسنجی شبکه عصبی برای کرنش سنج‌های خریای جنوبی



شکل ۱۵ ب) حداکثر خطای تخمین یادگیری و اعتبارسنجی شبکه عصبی برای تغییر مکان سنج‌های خریای جنوبی



اعضای اصلی افقی و قطری خریا به یکدیگر در خمش افقی به صورت مفصل و در خمش جانبی به صورت گیردار مدلسازی شد. خواص مدل اجزای محدود به هنگام شده در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲ خواص مدل اجزای محدود به هنگام شده

واحد	مقدار	
kN/m <sup>2</sup>	۲/۱×۱۰ <sup>۸</sup>	مدول ارتجاعی
Ton/m <sup>3</sup>	۸/۴	جرم مخصوص
kN/m	۱×۱۰ <sup>۶</sup>	سختی فنر قائم تکیه‌گاه
kN/m	۲×۱۰ <sup>۵</sup>	سختی فنر جانبی تکیه‌گاه
kN/m	۲×۱۰ <sup>۴</sup>	سختی فنر طولی تکیه‌گاه
kN.m/rad	۵×۱۰ <sup>۴</sup>	سختی فنر پیچشی تکیه‌گاه

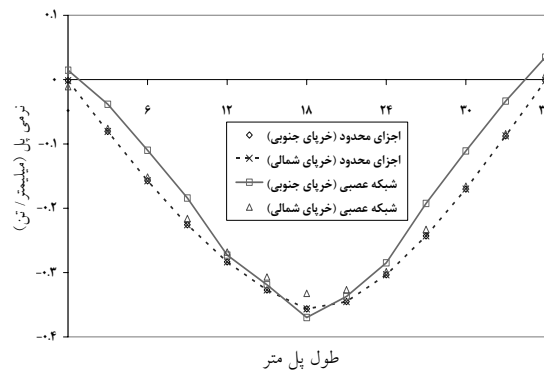
شکل ۱۶ مقایسه خط تأثیر مدل اجزای محدود سه‌بُعدی به هنگام شده و شبکه عصبی مصنوعی را نشان می‌دهد. در این شکل، خط تأثیر کرنش یال تحتانی خریای شمالی و جنوبی وسط پل مقایسه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، تطابق قابل قبولی بین مدل اجزای محدود به هنگام شده و مدل شبکه عصبی مصنوعی آموزش دیده از اطلاعات آزمایش میدانی وجود دارد. شکل ۱۷ مقایسه خط تأثیر کرنش یال تحتانی خریای شمالی و جنوبی را در محل چشمه دوازدهم نشان می‌دهد. دلیل تفاوت کرنش در خریای شمالی و جنوبی، عدم تقارن در بارگذاری یا وجود خرابی سازه‌ای و نرمی بیشتر اتصال خریای شمالی به تیر عرضی دوازدهم می‌تواند باشد. شکل ۱۸ مقایسه خط تأثیر کرنش عضو قطری خریای شمالی و جنوبی در وسط پل مدل اجزای محدود با شبکه عصبی را نشان می‌دهد که حاکی از تطابق مناسبی بین دو مدل است. شکل ۱۹ مقایسه خط تأثیر تغییر مکان در ۱۹ متری پل را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده تطابق مناسبی بین دو مدل است.

بار قائم) که در مدلسازی مرتبه اول سازه و با اطلاعات موجود قابل مشاهده نیست، به دست آورد.

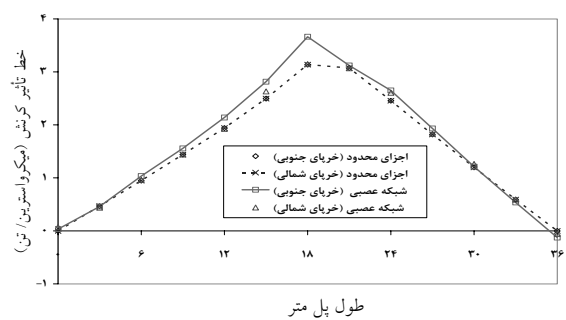
بدین ترتیب به کمک شبکه عصبی مصنوعی از تمامی اطلاعات حسگرها استفاده می‌شود و نتایج ترکیب اطلاعات حسگرها به طور قابل استفاده‌ای در دسترس قرار می‌گیرد. از این منظر، کاربرد حاضر برای شبکه عصبی مصنوعی، از خانواده ترکیب‌گر اطلاعات حسگرها است که عمل ترکیب اطلاعات حسگرها<sup>۱</sup> را انجام می‌دهد.

به کمک خط تأثیر به دست آمده از شبکه عصبی، مدل سه‌بُعدی اجزای محدود مدلسازی شده به وسیله نرم افزار ANSYS به هنگام می‌شود. در این مدل ابعاد المانها که به کمک المان تیر سه‌بُعدی مدلسازی شد، برابر ۵۰ سانتیمتر انتخاب شد. دلیل انتخاب شبکه‌بندی تیر با المانهای ۵۰ سانتیمتری، نیاز به تحلیل مدال و مقایسه خصوصیات فرکانسی مدل اجزای محدود با نتایج به دست آمده از شناسایی پارامترهای مدال است [۹]. تکیه‌گاههای قائم، طولی و جانبی واقع در کوله‌ها با فنر مدلسازی شد و یک فنر پیچشی برای در نظر گرفتن اثر بعد نشیمنگاه منظور شد (جدول ۲). ریل و روسازی خط تا پنج متر از دو طرف پل مدلسازی شد و درز ریل مطابق برداشت میدانی در شش، هیجده و سی متری در نظر گرفته شد. وزن پیاده‌روهای پل برابر ۴۰ کیلوگرم بر مترمربع تخمین زده شد. جرم مخصوص فولاد ۸ تن بر مترمکعب فرض شد و با افزایش ۵ درصدی به منظور در نظر گرفتن وزن اتصالات، برابر ۸/۴ تن بر مترمکعب منظور شد. ضریب ارتجاعی فولاد برابر ۲۱۰ گیگاپاسکال در نظر گرفته شد. اتصال تیرچه‌های فرعی طولی به تیرهای عرضی با آزاد کردن درجه آزادی انتقالی طولی و در نظر گرفتن مفصل انجام شد. اتصال ۱۳ تیر عرضی به دو خریای شمالی و جنوبی به صورت گیردار مدلسازی شد. لازم است ذکر شود که این اتصال در ابتدا با فنر مدلسازی شد و در نهایت با مقایسه با اندازه‌گیریهای میدانی، این اتصال گیردار در نظر گرفته شد. اتصال

## 1. Sensor Fusion



شکل ۱۹ مقایسه خط تأثیر تغییر مکان در ۱۹ متری پل مدل اجزای محدود با مدل شبکه عصبی

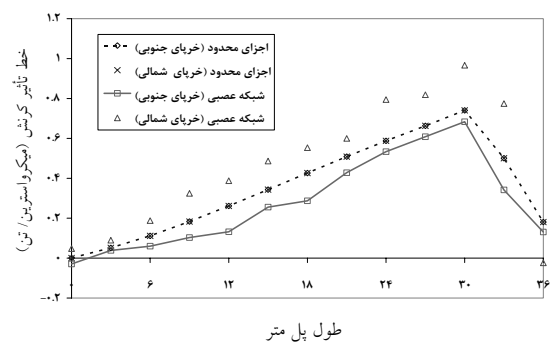


شکل ۱۶ مقایسه خط تأثیر کرنش یال تحتانی خرابی شمالی و جنوبی در محل چشمه هفتم (وسط پل) مدل اجزای محدود با مدل شبکه عصبی

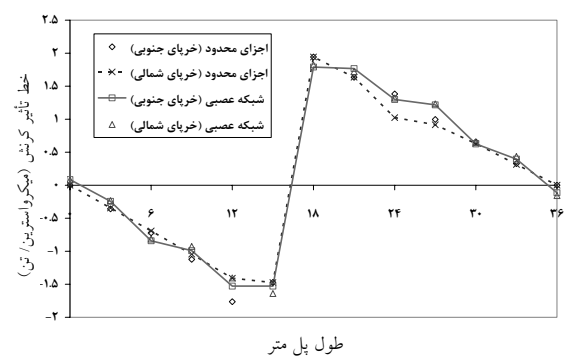
## ۱۰- نتیجه گیری

همانطور که ملاحظه شد می توان به نحو مؤثری از شبکه عصبی در پردازش اطلاعات حسگرهای پل بهره جست و ترکیب اطلاعات حسگرها را انجام داده و نوعی تحلیلگر سازه برای معتبرسازی مدل اجزای محدود و تعیین خط تأثیر کمیتهای آموزش داده شده ایجاد کرد. همچنین مشخص شد که اگر درجات آزادی بارگذاری شده اجزای محدود به عنوان ورودی شبکه عصبی منظور شود و از تابع شکلی یکسان برای تقسیم بار بین گرهها استفاده شود، ماتریس ضرایب وزنی شبکه عصبی، متناظر با خط تأثیر کمیتهای به کار گرفته شده به ازای اعمال بار در نقاط بارگذاری شده خواهد بود. بنابراین می توان شبکه عصبی مصنوعی را جایگزین مدل اجزای محدود در نقاط آموزش داده شده کرد یا از قدرت یادگیری آن در معتبرسازی مدل اجزای محدود بهره جست.

در این مقاله بارگذاری ورودی پل بر اثر عبور قطار از روی کرنشهای با پاسخ محلی، تخمین زده شد و به کمک شبکه عصبی مصنوعی تطبیقی خطی، خط تأثیر کمیتهای اندازه گیری شده کرنشی و تغییر مکانی شناسایی شد. سپس مدل اجزای محدود سه بُعدی پل، با الهام گیری از خطهای تأثیر شناسایی شده و به صورت سعی و خطا معتبرسازی



شکل ۱۷ مقایسه خط تأثیر کرنش یال تحتانی خرابی شمالی و جنوبی در محل چشمه ۱۲ مدل اجزای محدود با شبکه عصبی



شکل ۱۸ مقایسه خط تأثیر کرنش عضو قطری خرابی شمالی و جنوبی در وسط پل مدل اجزای محدود با شبکه عصبی

[4] Caoa, X. Sugiyamac, Y. Mitsui Y., "Application of artificial neural networks to load identification", Computers and Structures, Vol. (69), 1998, pp. 63-78.

[5] Kao, Ch-r "Application of neural networks in structural health monitoring", www.context-gmbh.de.

[6] Leonard, Z. Bartosz, M. Grzegorz, D. "Dynamic model updating by neural networks", Department of Structural Mechanics, Rzeszow University of Technology.

[7] Widrow B. and Sterns, S. D. Adaptive Signal Processing, New York:Prentice-Hall 1985

[۸] محمدزاده، سعید، «آزمایش بارگذاری پل نکا»، دانشکده‌ی راه‌آهن دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۸۳.

[۹] عطایی، شروان، «توسعه نظریه یادگیری جهت وضعیت‌سنجی ارتعاشی پل راه‌آهن از روی اندازه‌گیری پاسخ»، رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۵.

شد و خط تأثیر کمیت‌های اندازه‌گیری شده کرنشی و تغییر مکانی مدل اجزای محدود با شبکه عصبی مقایسه و تطابق مناسبی بین دو خط تأثیر مشاهده شد.

## ۱۱- منابع

[1] Peeters, B, "System identification and damage detection in civil engineering", Ph. D. thesis, Katholieke University of Leuven, Belgium., 2000.

[2] Sohn, H. Farrar, Ch. R. Hemez, F. M. Shunk, D. D. Stinemates, D. W. and Nadler, B. R. "A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996-2001", Los Alamos National Laboratory, LA-13976-MS, 2003.

[3] Bridge Diagnostics, Inc, Integrated Approach to Load Testing Instruction Manual, www.bridgetest.com., 2003.

