

## ارتعاش عمودی سقف‌های کامپوزیت با استفاده از روش شبکه عصبی

امیر حسین قربانپور<sup>۱</sup> و مهدی قاسمیه<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی عمران- پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۴/۹/۷، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۶/۴/۲۴، تاریخ تصویب ۸۸/۲/۲۹)

### چکیده

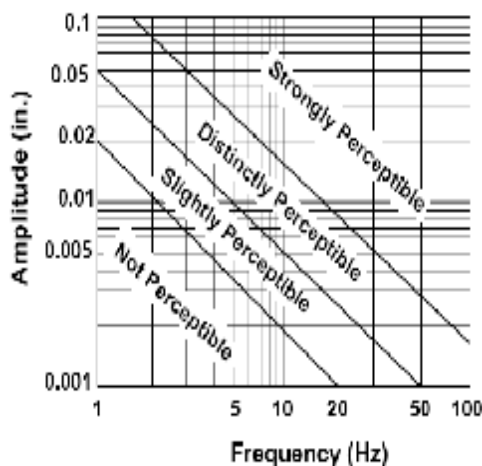
سقف‌های کامپوزیت از جمله سیستم‌های سقف هستند که به علت وزن سبک و میرایی کم سیستم سازه ای و همچنین زیاد بودن فاصله تیرچه ها نسبت به بارهای دینامیکی بسیار حساس هستند. در این سقف‌ها ممکن است به علت حرکت افراد، ارتعاشاتی حاصل شود که برای ساکنان احساس نامنی به وجود آورد. در این مقاله سعی می شود تا حداکثر تغییر مکان دینامیکی دال کامپوزیت بر اثر بار قدم زدن ساکنان و همچنین بسامد اصلی ارتعاش آزاد دال در راستای قائم به وسیله شبکه عصبی پیشبینی شود. با توجه به سوابق مطالعاتی انجام شده و نتایج شبکه، وضعیت دال از نظر احساس ساکنین از ارتعاش بررسی شده است. در نهایت با توجه به نتایج ذکر شده، امکان اصلاح طراحی دال کامپوزیت وجود خواهد داشت. در نتیجه با توجه به مطالب فوق، در طراحی سقف‌ها علاوه بر کنترل های مرسوم طراحی، کنترل ارتعاش دال نیز امکان پذیر است.

**واژه‌های کلیدی:** ارتعاش عمودی، سقف کامپوزیت، شبکه عصبی، بسامد

### مقدمه

احساس کاربران از ارتعاش سقف بر اساس بسامد ارتعاش آزاد سقف و تغییر مکان دینامیکی ارائه شده است. این نمودار چهار قسمت دارد. در قسمت اول ارتعاش احساس نمی شود. در قسمت دوم احساس ارتعاش بسیار کم بوده و فقط توسط افراد بسیار دقیق احساس می شود. در حالت سوم ارتعاش به وضوح احساس می شود. این حالت آستانه خطر در سقف است و اگر سقفی در این بازه قرار گیرد، احساس نامنی به ساکنان منتقل می شود. در حالت چهارم نیز ارتعاش به شدت احساس می شود و بهره برداری مختل می‌شود.

هر سیستم سازه ای هنگامی که تحت بار ضربه ای قرار می گیرد دچار نوسان می شود. نحوه پاسخ این سیستم به بار دینامیکی تابع فیزیک مسئله و نیز مشخصات بارگذاری است. سقف‌های کامپوزیت نیز در اثر بارگذاری دینامیکی مثل قدم زدن دچار ارتعاش می شوند. این ارتعاش به ساکنان منتقل شده و ممکن است باعث ایجاد احساس نامطلوب در آنها شود. مطابق تحقیقات گسترده ای که انجام گرفته است، می‌توان میزان احساس ساکنان از ارتعاش سقف را با توجه به مشخصات ارتعاش دسته بندی کرد. اولین ضوابط کنترلی برای ارتعاش دینامیکی تنها به بسامد دال محدود می‌شد. مطابق این روابط بسامد دال می باید از حدود 6-7 Hz بزرگ تر باشد تا احتمال تشدید ارتعاش در سقف منتفی شود. از آنجا که بسامد بار گذاری قدم زدن حدود 1.6 Hz است، بنابراین با دور شدن از این عدد احتمال تشدید نیز منتفی می‌شود. روش‌های جدید تر که بر پایه نتایج آزمایشگاهی استوار است، بر اساس اثر متقابل بسامد دال و یکی از پارامترهای ارتعاش دینامیکی گذرا مثل شتاب یا تغییر مکان است. در این رابطه می‌توان به نموداری که لِنزن [۱] ارائه کرده است اشاره کرد. مطالعات لِنزن [۱] در ادامه کار رایهر و مایستر [۲] انجام شد که منجر به اصلاح و بهبود بررسی های آنها شد. در شکل (۱) سطوح



شکل ۱: نمودار آستانه احساس ارتعاش [۲].

دال کامپوزیت و میزان ارتعاش دال به دست آورد. علاوه بر این، با توجه به نتایج آنالیز حساسیت شبکه عصبی، می‌توان بهترین راهکار را برای کاهش ارتعاش نامطلوب با تغییر در مشخصات هندسی و استاتیکی دال ارائه کرد. با توجه به اینکه مدل‌سازی دال کامپوزیت همراه با بارگذاری که از نظر مقدار و موقعیت با زمان تغییر می‌کند، موضوعی پیچیده است، با انجام تعداد زیادی مدل‌سازی، تحلیل و نتیجه‌گیری از مدل‌های کامپیوتری با استفاده از روش شبکه عصبی، امکان انجام کنترل‌های مورد نیاز برای جلوگیری از تغییر مکان بیش از حد دال با روش بسیار ساده امکان پذیر است. در نهایت با ارائه نتایج مربوط به آنالیز حساسیت، بهینه کردن طراحی امکان پذیر است.

### محاسبه بسامد طبیعی دال کامپوزیت به کمک شبکه عصبی

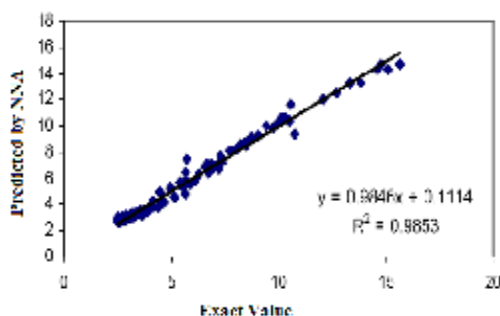
شبکه عصبی مصنوعی مدلی ریاضی برای حل مسائل پیچیده است. بر اساس این روش، شبکه‌ای به هم پیوسته از توابع ریاضی تعریف می‌شود که خروجی هر تابع ورودی، مجموعه‌ای از توابع دیگر است، و با اعمال ضرب مناسبی که در اصطلاح وزن گفته می‌شود، بر سایر توابع اثر می‌کند. در مدل‌های ارائه شده از شبکه MLP و تابع تانژانت هایپربولیک استفاده شده است. به هر یک از این توابع "نرون" گفته می‌شود. هر شبکه عصبی با توجه به نتایج قبلی که به عنوان داده‌های آموزشی به آن داده می‌شود، آموزش می‌بیند. به عبارتی وزن‌های توابع مشخص می‌شود. در مرحله بعد برای ورودی‌های جدید، شبکه آموزش دیده قابلیت پیش‌بینی جواب‌ها را دارد (هایکین [۸]). امروزه استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در علوم و مهندسی به دلیل توانایی تخمین فوق‌العاده آنها رو به گسترش است. در این راستا می‌توان به مراجع [۹] الی [۱۳] اشاره کرد.

برای تهیه اطلاعات لازم برای آموزش شبکه عصبی، در نرم افزار Ansys (ver 5.4) مدل سه بعدی دال کامپوزیت ساخته شده است. پس از انجام تحلیل مودال مقادیر سه بسامد اول ارتعاش آزاد دال به دست آمده است. برای آموزش شبکه عصبی لازم است تعداد زیادی مدل ساخته شود. در هر مدل، پارامترهای مؤثر در بسامد تغییر داده شده و پس از انجام تحلیل مودال بسامد دال جدید

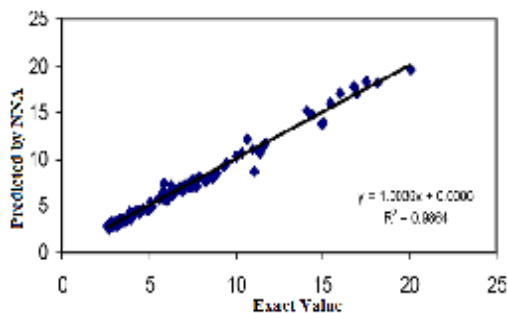
مطابق این نمودار در صورتی که بسامد ارتعاش آزاد دال در راستای قائم موجود باشد، با محاسبه تغییر مکان دینامیکی دال می‌توان به سطح احساس کاربران از ارتعاش دست یافت. آیین‌نامه استرالیا [۳] به روشی تقریبی اشاره کرده است که بسامد دال را محاسبه می‌کند و در مرحله بعد با توجه به طول دهانه تیرچه دو نوع کنترل روی تغییر مکان و سرعت ارتعاش انجام می‌دهد. مطابق بررسی‌هایی که هیکس [۴] روی نتایج کمیته مشترک AISC/CISC انجام داده است، بسامد دال با توجه به ارتعاش آزاد سیستم یک درجه آزادی محاسبه می‌شود. در مرحله بعد شتاب ماکزیمم در دال با توجه به روابط ساده محاسبه می‌شوند و سطح ایمنی دال با توجه به بیشینه مقدار شتاب و بسامد محاسبه می‌شود. موری [۵، ۶ و ۷] به روشی اشاره کرده است که بر اساس آن با توجه به مشخصات ارتعاشی سقف، حداقل میرایی لازم برای کنترل ارتعاش محاسبه می‌شود. در صورتی که میرایی موجود از میرایی محاسبه شده بیشتر باشد، ارتعاش سقف، آزار دهنده نخواهد بود و به سرعت از بین می‌رود.

هدف از این تحقیق دستیابی به ارزیابی کلی از رفتار دال کامپوزیت در بارگذاری قدم زدن با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی است. در این راستا مدل اجزا محدود دال کامپوزیت بتنی در نرم افزار Ansys ver5.4 تحت بارگذاری قدم زدن، آنالیز شده است. شرایط مرزی دال، مشخصات ابعادی، مشخصات تیرچه‌ها و تیرهای اصلی و فاصله تیرها و... در مدل‌های مختلف تغییر کرده و نتایج آنالیز در هر مدل بررسی می‌شود. با در دست داشتن طیف وسیعی از نتایج آنالیز اجزا محدود، شبکه مصنوعی عصبی بر پایه این آنالیزها آموزش خواهد دید. شبکه عصبی آموزش دیده، قابلیت پیشگویی پاسخ دینامیکی دال که مهم‌ترین آن بسامد ارتعاش دال و تغییر مکان دینامیکی کامپوزیت در شرایط بارگذاری و ژئومتری جدید است را خواهد داشت. مهم‌ترین نتیجه آموزش شبکه عصبی مصنوعی، بررسی حساسیت پارامترهای دینامیکی دال (تغییر مکان دینامیکی و بسامد) نسبت به شرایط مرزی دال و هندسه آن و همچنین مشخصات استاتیکی مدل خواهد بود. با توجه به نتایج این شبکه می‌توان پس از تحلیل استاتیکی دال کامپوزیت تحت اثر بارهای ثقیل، ارزیابی به نسبت دقیقی از پاسخ دینامیکی

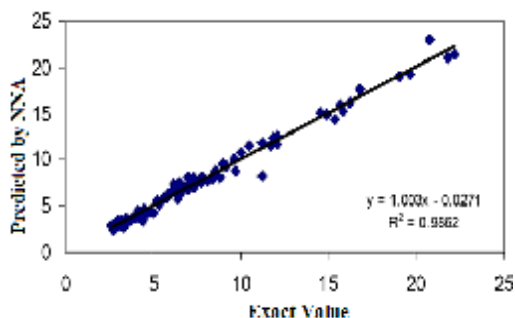
میزان دقت شبکه قابل بررسی خواهد بود. در شکل‌های (۲)، (۳) و (۴) همبستگی نتایج اجزا محدود و نتایج شبکه عصبی ارائه شده است. محور افقی مقدار بسامد دال محاسبه شده به روش اجزا محدود و محور قائم مقدار بسامد دال محاسبه شده به وسیله شبکه عصبی را نشان می‌دهد. با توجه به شیب خطوط در شکل‌های (۲)، (۳) و (۴) و میزان ضریب همبستگی نتایج مشاهده شده و محاسبه شده، می‌توان به این نتیجه رسید که عملکرد شبکه بسیار دقیق بوده و این شبکه برای بر آورد سه بسامد اول دال به خوبی آموزش دیده است. در جدول (۱) نیز خطای شبکه بررسی شده است.



شکل ۲: همبستگی نتایج واقعی و نتایج پیشگویی شده توسط شبکه برای بسامد اول.



شکل ۳: همبستگی نتایج واقعی و نتایج پیشگویی شده توسط شبکه برای بسامد دوم.



شکل ۴: همبستگی نتایج واقعی و نتایج پیشگویی شده توسط شبکه برای بسامد سوم.

به دست می‌آید. پارامترهایی که به عنوان عوامل تأثیر گذار بر بسامد مد نظر قرار می‌گیرد، به این شرح است:

- ۱- ضخامت دال بتنی با بازه ۵ الی ۱۵ سانتی‌متر؛
- ۲- اینرسی مقطع تیرچه فرعی با بازه ۸۶۹ الی ۵۷۹۰ (cm<sup>4</sup>) با مقاطع از نوع IPE160 الی IPE270؛
- ۳- اینرسی مقطع تیر اصلی با بازه ۱۳۲۰ الی ۸۳۶۰ (cm<sup>4</sup>) با مقاطع از نوع IPE180 الی IPE300؛
- ۴- مساحت مقطع ستون با بازه ۱۹ الی ۷۹ (cm<sup>2</sup>)؛
- ۵- ممان اینرسی ستون با بازه ۲۸۶ الی ۲۰۵۴۶ (cm<sup>4</sup>)؛
- ۶- مدول الاستیسیته بتن با بازه ۱۹۳۶۴۹۲ الی ۲۸۲۸۴۲۷ (ton/m<sup>2</sup>)؛
- ۷- شرایط مرزی دال مجاور به صورت نسبت سختی خمشی دال مجاور با بازه صفر الی ۳۸۶۷ (ton.m)؛
- ۸- طول تیرچه با بازه ۴ الی ۶/۵ متر؛
- ۹- طول تیر اصلی با بازه ۴ الی ۸ متر؛
- ۱۰- فاصله بین تیرچه‌ها با بازه ۰/۴ الی ۲ متر؛
- ۱۱- وزن موثر دال با بازه ۳۱۵ الی ۷۶۵ (kg/m<sup>2</sup>).

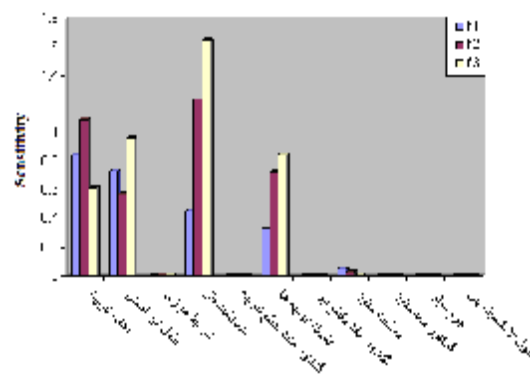
در نهایت با تغییر پارامترهای ذکر شده در فاصله ارائه شده، ۵۶۵ نمونه عددی از دال کامپوزیت ساخته شد. در هر مدل سه بسامد اول ارتعاش آزاد در راستای قائم به روش اجزا محدود محاسبه شده است. در مرحله بعد لازم است شبکه به وسیله اطلاعات موجود آموزش ببیند. با توجه به اهمیت استفاده از مدل ساده تر برای جلوگیری از بیش از اندازه آموزشی مدل (هایکین [۸]) مدل شبکه عصبی با یک لایه پنهان و یک لایه خروجی در نظر گرفته شده است. تعداد نرون‌ها در لایه پنهان ۱۲ عدد است. این تعداد نرون در لایه پنهان به صورت سعی و خطا با هدف افزایش سطح عملکرد مدل سازی انتخاب شده است.

پس از تفکیک اطلاعات به طور اتفاقی به دو دسته اطلاعات آموزش و آزمایش و پس از آموزش، برای بررسی دقت شبکه آزمایش روی ۱۱۳ نمونه دال انجام گرفته است. برای جلوگیری از فرایند بیش آموزشی از ۸۴ نمونه به عنوان اعتبار سنجی به هنگام (Cross-Validation) استفاده شده است. ابتدا مقدار بسامد دال کامپوزیت به روش اجزا محدود محاسبه می‌شود و سپس بسامد طبیعی دال به کمک شبکه آموزش دیده محاسبه می‌شود. با مقایسه نتایج تحلیل اجزاء محدود و نتایج شبکه عصبی،

جدول ۱: محاسبه خطا روی نتایج آزمایش برای بسامد.

نوع خطا	خطا f3	خطا f2	خطا f1
متوسط مجذور خطاها $(1/s)^2$	0.3101	0.2395	0.15074
متوسط مجذور خطاهای نرمال شده $(1/s)$	0.0142	0.0140	0.01469
کمینه قدر مطلق خطاها $(1/s)$	0.0039	0.0002	0.00714
بیشینه قدر مطلق خطاها $(1/s)$	2.9246	2.3591	1.74775

با توجه به نتایج جدول (۱) و نتایج شکل‌های (۲)، (۳) و (۴) می‌توان به این نتیجه رسید که شبکه در پیش بینی بسامد دال بسیار دقیق عمل می‌کند. بنابراین در حالات جدید می‌توان به نتایج این شبکه اعتماد کرد. برای این منظور کافی است کمیت‌های فیزیکی مؤثر بر بسامد دال را که در ابتدای همین بخش ذکر شده اند را به شبکه وارد کرد تا شبکه بسامد طبیعی دال را پیش بینی کند. در مرحله بعد تحلیل حساسیت روی شبکه انجام شده و شاخص حساسیت برای کمیت‌های مختلف در شبکه محاسبه شده است. بر اساس این تحلیل تاثیر هر پارامتر ورودی بر بسامد دال محاسبه می‌شود و حساسیت بسامد دال نسبت به تغییر پارامترهای مختلف در شاخص حساسیت بیان می‌شود. در شکل (۵) حساسیت سه بسامد اول ارتعاش آزاد دال نسبت به کمیات ورودی نشان داده شده است. در جدول (۲) نیز میزان شاخص حساسیت بسامد دال نسبت به پارامترهای مختلف ارائه شده است. در این مقاله شاخص حساسیت کمیت A نسبت به پارامتر B عبارتست از تغییرات کمیت A نسبت به تغییرات پارامتر B در صورتی که پارامتر B در بازه مشخصی از میانگین دامنه خود تغییر کند.



شکل ۵: حساسیت پارامترهای ورودی بر بسامد طبیعی دال.

جدول ۲: حساسیت بسامد طبیعی دال نسبت به پارامترها.

حساسیت	f3 بسامد سوم	f2 بسامد دوم	f1 بسامد اول
دهانه تیرچه $(1/m.s)$	0.6162	1.0976	0.8502
طول تیر اصلی $(1/m.s)$	0.9678	0.5721	0.7355
شرایط مرزی $(1/cm^4 .s)$	0.0092	0.0066	0.0017
ضخامت دال $(1/cm.s)$	1.6499	1.2301	0.4578
اینرسی مقطع تیرچه $(1/cm^4 .s)$	0.00014	0.00015	0.0001
فاصله تیرچه ها $(1/m.s)$	0.8473	0.72761	0.3365
اینرسی مقطع تیر $(1/cm^4 .s)$	0.00014	0.00014	0.0001
مساحت ستون $(1/cm^2 .s)$	0.00781	0.02570	0.0551
اینرسی ستون $(1/cm^4 .s)$	2.35E-05	6.21E-05	6.69E-05
وزن مؤثر $(1/kg.s)$	0.00361	0.00311	0.0028
مدول الاستیسیته بتن $(m^2/ton.s)$	6.93E-07	1.00E-06	6.09E-08

## محاسبه تغییر مکان دینامیکی دال کامپوزیت در اثر بار قدم زدن به کمک شبکه عصبی

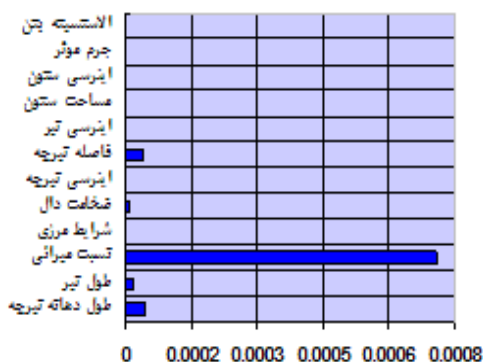
محاسبه تغییر مکان دینامیکی دال کامپوزیت در اثر بار قدم زدن طی یک فرایند پیچیده و زمان‌گیر انجام می‌گیرد. مطابق این روش ابتدا مدل سه بعدی دال کامپوزیت در نرم افزار اجزاء محدود ساخته شده و در نهایت بار قدم زدن به صورت یک بار هارمونیک به دال وارد می‌شود. این بارگذاری بر اساس نتایج آزمایشگاهی لین و همکاران [۱۴] به مدل اعمال می‌شود. در شکل (۶) بارگذاری بر حسب زمان به صورت اصلاح شده ارائه شده است. بارگذاری بر اساس حرکت استاندارد شخصی به وزن ۶۸ کیلوگرم است. (در این قسمت نیز برای آموزش شبکه عصبی پارامترهای مؤثر بر رفتار دینامیکی دال در مدل‌های عددی مختلف تغییر داده شده است و در هر حالت مقدار بیشینه تغییر مکان دینامیکی مرکز دال بر اساس روش تحلیل اجزا محدود محاسبه شده است). پارامترهایی که به عنوان عوامل مؤثر بر پاسخ دال در این قسمت در نظر گرفته شده اند، همان پارامترهایی هستند که برای بسامد در نظر گرفته شده اند و تنها نسبت میرایی موجود به میرایی بحرانی به این پارامترها اضافه شده است. برای آموزش شبکه عصبی حدود ۵۶۵ مدل عددی ساخته شده است. در این مدل‌ها ۱۲ پارامتر ذکر شده تغییر کرده و برای هر حالت تغییر مکان دینامیکی ماکزیمم در مرکز دال به روش اجزا محدود محاسبه شده و شبکه بر اساس این نتایج آموزش

عملکرد شبکه بسیار دقیق بوده و این شبکه برای برآورد تغییر مکان دینامیکی دال به خوبی آموزش دیده است. در جدول (۳) نیز خطای این شبکه ساخته شده بررسی شده است.

جدول ۳: بررسی خطای شبکه برای تغییر مکان دینامیکی.

میزان خطا	نوع خطا
3.16196E-09	متوسط مجذور خطاها (m <sup>2</sup> )
0.09868662	متوسط مجذور خطاهای نرمال شده (m)
2.33714E-07	کمینه قدر مطلق خطاها (m)
0.000202268	بیشینه قدر مطلق خطاها (m)

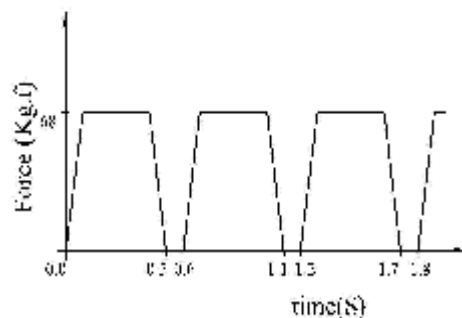
#### Average Sensitivity



شکل ۸: نمودار میله ای حساسیت تغییر مکان دینامیکی به پارامترهای ورودی.

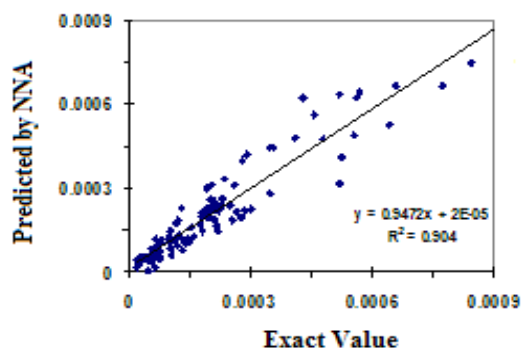
نتایج حاصل از جدول (۳) و شکل (۷) گویای این مطلب است که شبکه در پیش بینی تغییر مکان دینامیکی بسیار دقیق عمل می کند. بنابراین در حالات جدید می توان به نتایج این شبکه اعتماد کرد. برای این منظور کافی است کمیت های فیزیکی مؤثر را که در ابتدای همین بخش ذکر شده اند، به شبکه وارد کرد تا شبکه تغییر مکان دینامیکی را پیش بینی کند. در مرحله بعد تحلیل حساسیت روی شبکه انجام شده و شاخص حساسیت برای کمیات مختلف در شبکه محاسبه شده است. بر اساس این تحلیل، تأثیر هر پارامتر ورودی بر تغییر مکان دینامیکی محاسبه می شود و حساسیت تغییر مکان دینامیکی دال نسبت به تغییر پارامترهای مختلف در شاخص حساسیت بیان می شود. در شکل (۸) حساسیت تغییر مکان دینامیکی دال نسبت به کمیت های ورودی نشان داده شده است. در جدول (۴) نیز میزان شاخص حساسیت تغییر مکان دینامیکی دال نسبت به پارامترهای مختلف ارائه شده است.

خواهد دید. برای نیل به این منظور، مدل شبکه عصبی با یک لایه پنهان و یک لایه خروجی در نظر گرفته شده است. تعداد نرون ها در لایه پنهان ۱۳ عدد است.



شکل ۶: بارگذاری قدم زدن روی دال.

پس از آموزش برای بررسی دقت شبکه، آزمایش روی ۱۱۳ نمونه منتخب اتفاقی دال انجام گرفته است. به این ترتیب که ابتدا مقدار تغییر مکان دینامیکی حاصل از بارگذاری قدم زدن در مرکز دال کامپوزیت از روش اجزاء محدود محاسبه می شود. سپس مقدار تغییر مکان دینامیکی حاصل از بارگذاری قدم زدن در مرکز دال به کمک شبکه آموزش دیده محاسبه می شود. با مقایسه نتایج تحلیل اجزاء محدود و نتایج شبکه عصبی میزان دقت شبکه قابل بررسی خواهد بود. در شکل (۷) همبستگی نتایج اجزاء محدود و نتایج شبکه عصبی ارائه شده است. محور افقی مقدار تغییر مکان محاسبه شده به روش اجزاء محدود و محور قائم مقدار تغییر مکان محاسبه شده را به وسیله شبکه عصبی نشان می دهد.



شکل ۷: همبستگی نتایج واقعی و نتایج پیشگویی شده توسط شبکه برای تغییر مکان دینامیکی.

با توجه به شیب خط بین مقادیر محاسبه شده و مشاهده شده در شکل (۷)، (m=0.9472) و میزان ضریب همبستگی  $R^2 = 0.904$  می توان به این نتیجه رسید که

پس از مدل سازی و انجام تحلیل گذرا (Transient) نتایج از فایل خروجی استخراج و بررسی شده است. در شکل (۹) و جدول (۵) مقدار حداکثر تغییر مکان در حالات مختلف بارگذاری ارائه شده است. با توجه به نمودار (۹) اثر خطی بزرگی ضربه به طور کامل مشهود است. ضریب همبستگی  $R^2 = 1.00$  بیانگر رفتار کاملاً خطی این منحنی است و شیب ملایم ( $m=0.008$ ) تابع مشخصات هندسی و فیزیکی دال است. با توجه به این مطالب و نیز سابقه تحقیقاتی [۱۵] انجام شده روی این موضوع، اثر بزرگی بار در پاسخ دینامیکی به صورت خطی فرض می شود.

### بررسی اثر بارگذاری دوگانه هارمونیک در پاسخ دال

در این بخش اثر بارگذاری دوگانه در پاسخ دال بررسی می شود. بارگذاری دوگانه در این بخش به معنی بارگذاری است که در آن دو بار گذاری مختلف با تاریخچه و جهت حرکت متفاوت به دال اعمال می شود. اکثر تحقیقات انجام گرفته در مورد ارتعاش عمودی دال ها برای بار ضربه‌ای منفرد است، که ناشی از ضربه شخص به دال است. در این قسمت به طور اجمالی به اثر بار گذاری دو گانه ناشی از حرکت دو نفر روی دال پرداخته می شود و سعی می شود نتایج برای سایر حالات تعمیم داده شود.

#### مدل تحت بارگذاری هارمونیک واحد (a)

در حالت اول برای مقایسه نتایج با حالت استاندارد، یک دال با مشخصات زیر مدل شده است و بارگذاری تک نفری روی آن اعمال شده است. در حالات دیگر نحوه اعمال بار تغییر کرده و نتایج بررسی می شوند. مشخصات فیزیکی دال به این شرح است: ضخامت دال ۷ سانتی متر، تیرچه ها IPE180 با فاصله یک متر، تیر اصلی IPE270، ابعاد دال 500cmx500cm، بار مؤثر 665 kg/m2 و نسبت میرایی ۲ درصد است.

پس از انجام تحلیل گذرا، تاریخچه پاسخ دال قابل استخراج است. مقدار حداکثر این پاسخ مطابق نمودار (۱۰) زمانی اتفاق می افتد که بار ضربه‌ای در مرکز دال اعمال می شود.

جدول ۴: حساسیت تغییر مکان دینامیکی به پارامترها.

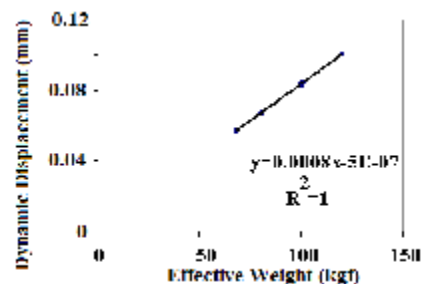
حساسیت	شاخص حساسیت
طول دهانه تیرچه (m/m)	4.46361E-05
طول تیر (m/m)	1.65791E-05
نسبت میرایی (m)	0.000706594
شرایط مرزی دال مجاور ( $m/cm^4$ )	3.48573E-08
ضخامت دال (m/cm)	8.12892E-06
گشتاور ماند تیرچه ها ( $m/cm^4$ )	1.55262E-08
فاصله تیرچه ها (m/m)	3.68871E-05
گشتاور ماند تیر های اصلی ( $m/cm^4$ )	1.28258E-09
مساحت مقطع ستون ( $m/cm^2$ )	2.1211E-06
گشتاور ماند مقطع ستون ( $m/cm^4$ )	3.84136E-09
جرم مؤثر (m/kg)	1.86139E-07
مدول الاستیسیته بتن ( $m^3/ton$ )	1.21437E-11

### بررسی اثر بزرگی ضربه در پاسخ دال تحت اثر بار ضربه‌ای هارمونیک

در این بخش اثر بزرگی ضربه روی دال بررسی می شود. این موضوع برای بررسی رفتار دال در پاسخ به بزرگی وزن شخص متحرک است. در این حالت، مدلی با مشخصات معین فیزیکی تحت بارگذاری هارمونیک ضربه‌ای قرار می گیرد و در ۴ حالت مختلف بزرگی بار ضربه تغییر می کند. مشخصات هندسی مدل به شرح زیر است: ضخامت دال ۷ سانتی متر، تیرچه ها IPE180 با فاصله یک متر، تیر اصلی IPE270، ابعاد دال 500cmx500cm، بار مؤثر 665 kg/m2 و نسبت میرایی ۵ درصد است.

جدول ۵: حداکثر تغییر مکان مرکز دال بر اثر حرکت عادی با بزرگی نیروی وزن متفاوت.

وزن مؤثر (Kg.f)	حداکثر تغییر مکان (mm)
68	5.71E-02
80	6.71E-02
100	8.39E-02
120	1.01E-01



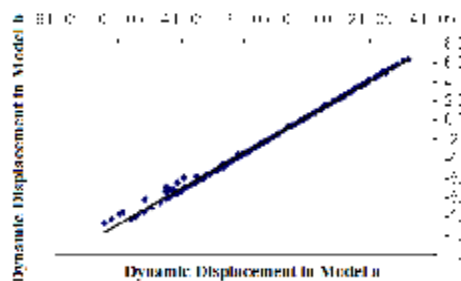
شکل ۹: حداکثر تغییر مکان مرکز دال بر اثر حرکت عادی با بزرگی نیروی وزن متفاوت.



پس از انجام تحلیل گذرا، تاریخچه پاسخ دال قابل محاسبه خواهد بود. مقدار تغییر مکان حداکثر دال نیز قابل محاسبه خواهد بود. تاریخچه این تغییر مکان در شکل (۱۲) ارائه شده است. در جدول (۶) نتایج مربوط به تغییر مکان حداکثر در دو حالت مذکور ارائه شده است. جدول ۶: مقایسه تغییر مکان ماکزیمم در مرکز دال در دو حالت بارگذاری تکی و دوگانه.

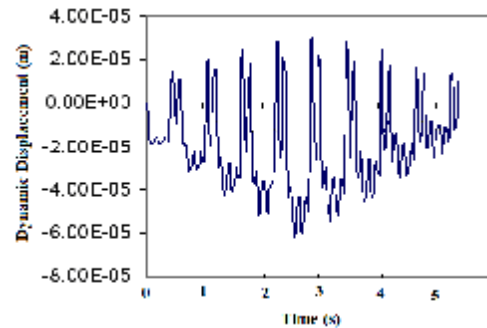
نام مدل	حد اکثر تغییر مکان دینامیکی (m)
a	-6.25E-05
b	-1.13E-04

مدل a مدل با بار گذاری واحد و مدل b مدل با بارگذاری دوگانه همگرا است. با توجه به نتایج ذکر شده می توان به این نتیجه رسید که تأثیر افزایش بار به طرز محسوسی در پاسخ حداکثر دال مؤثر بوده و تغییر مکان حداکثر در حالت دوم تقریباً دو برابر حالت اول شده است. برای مقایسه پاسخ دال در دو حالت ذکر شده در تمام بازه تاریخچه اعمال بار، تاریخچه پاسخ در دو حالت بار گذاری تکی و دوگانه استخراج شده و در شکل (۱۳) نشان داده شده است. محور افقی مقدار تغییر مکان در یک زمان خاص در مدل a و محور عمودی مقدار تغییر مکان در همان زمان در مدل b است. با توجه به خط رگرسیون بین این دو متغیر و شیب خط ( $m=1.95$ )، در این رابطه می توان به این نتیجه رسید که در حالت b نتایج در هر لحظه تقریباً دو برابر نتایج در حالت a است.



شکل ۱۳: مقایسه همبستگی نتایج تغییر مکان دینامیکی در دو مدل a و b.

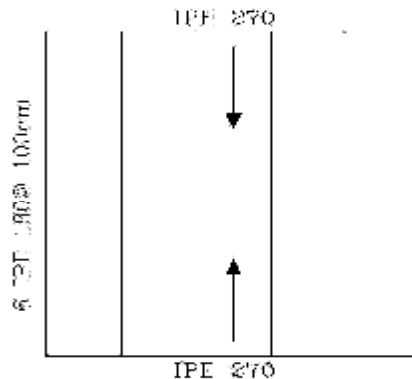
برای بررسی شرایط در حالت کلی تر، دو حالت دیگر در نظر گرفته شده است. در حالت c فرض شده است که شخصی با تأخر زمانی ۱/۸ ثانیه نسبت به شخص اول وارد سقف شده است و در حالت d فرض شده شخصی با فاصله زمانی ۱/۹ ثانیه نسبت به شخص اول وارد سقف شده است. در حالت c دو بارگذاری همگام بوده و در



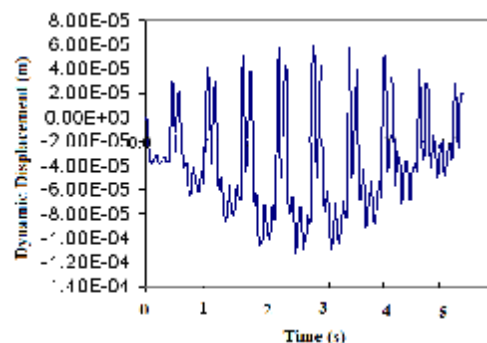
شکل ۱۰: تغییر مکان مرکز دال بر اثر حرکت یک نفر به وزن ۶۸ کیلوگرم در مدل a

### مدل تحت بارگذاری دوگانه هارمونیک (b)

برای مقایسه نتایج، حالت بارگذاری دیگری در نظر گرفته شده است. در این حالت دو بارگذاری یکسان با بزرگی ۶۸ کیلوگرم در دو جهت مخالف به سیستم اعمال شده است. این دو بارگذاری، همزمان بوده و هیچ گونه تقدم و تأخر زمانی نداشته و به صورت همگرا به هم نزدیک می شوند. در شکل (۱۱) جهت اعمال بار نشان داده شده است.



شکل ۱۱: نحوه حرکت دو شخص با وزن یکسان ۶۸ کیلوگرم به صورت همزمان مدل بارگذاری b.



شکل ۱۲: تغییر مکان مرکز دال بر اثر حرکت دو نفر به وزن ۶۸ کیلوگرم در مدل b.

صورت تأثیر بارگذاری‌های همزمان و همگام روی مدل، تقریباً خطی خواهد بود.

### بررسی ارتعاش سقف با یک مثال عددی

در این بخش یک نمونه عددی برای تعیین وضعیت ارتعاش سقف کامپوزیت بررسی می‌شود. دال کامپوزیت با ابعاد 6mx6m مفروض است. ضخامت دال 7cm تیرچه‌ها از نوع IPE220 و تیرهای اصلی از نوع IPE240 است. سر بار مرده  $250\text{kg/m}^2$  و سر بار زنده  $200\text{kg/m}^2$  است. میرایی نیز ۷/۵ درصد فرض شده است. برای بررسی وضعیت دال ابتدا به وسیله شبکه عصبی بسامد اول ارتعاش آزاد این دال تعیین می‌شود. بر اساس شبکه آموزش دیده، مقدار بسامد اول ارتعاش آزاد در راستای قائم این دال برابر ۵/۷۶ هرتز است. در مرحله بعد مقدار تغییر مکان دینامیکی برای بارگذاری استاندارد یک شخص به وزن ۶۸ کیلوگرم به وسیله شبکه آموزش دیده محاسبه می‌شود. مقدار این تغییر مکان برابر با  $6.57\text{E}-02$  میلی‌متر خواهد بود.

در صورتی که فرض شود در یک زمان معین حداکثر ۴ نفر به وزن ۷۵ کیلوگرم به طور همزمان روی این دال با هم حرکت کنند، در بحرانی‌ترین حالت مقدار حداکثر تغییر مکان دینامیکی از رابطه زیر قابل حصول است.

$$d = \frac{75}{68} \times \frac{4}{1} \times 6.57\text{E}-2 = 2.898\text{E}-1 \text{ (mm)} \quad (1)$$

در صورت تبدیل آحاد به سیستم امپریال مقدار این تغییر مکان برابر است با 0.071 اینچ. با توجه به نمودار (۱) و مقادیر تغییر مکان دینامیکی و بسامد دال، ارتعاش این دال در ناحیه چهارم قرار می‌گیرد که به شدت احساس می‌شود. بنابراین طراحی نیاز به باز بینی دارد. برای تعیین دقت شبکه در جدول (۸) مقایسه‌ای بین نتایج شبکه مصنوعی و نتایج حل دقیق به روش اجزاء محدود انجام شده است.

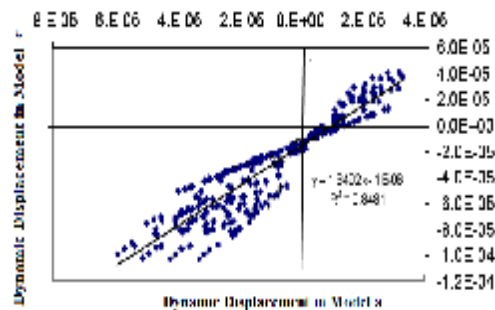
جدول ۸: مقایسه بین نتایج شبکه و نتایج حل دقیق.

کمیت	مقدار دقیق	پیش بینی شبکه
بسامد (Hz)	5.390	5.671
تغییر مکان دینامیکی (mm)	6.49E-02	6.57E-02

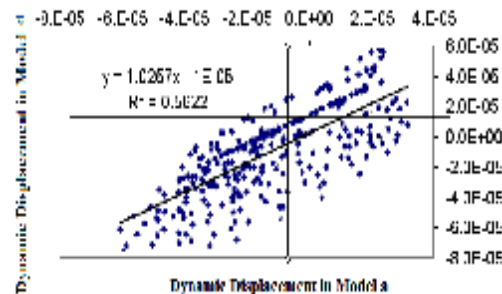
حالت d هیچ‌گونه همگامی ندارند. جدول (۷) حداکثر تغییر مکان دینامیکی حالت‌های a, b و c را نشان می‌دهد.

جدول ۷: مقایسه تغییر مکان ماکزیمم در مرکز دال در حالات بارگذاری a, c و d.

نام مدل	حد اکثر تغییر مکان دینامیکی (m)
a	6.25E-05
c	9.84E-05
d	9.20E-05



شکل ۱۴: مقایسه همبستگی نتایج تغییر مکان دینامیکی در دو مدل a و c



شکل ۱۵: مقایسه همبستگی نتایج تغییر مکان دینامیکی در دو مدل a و d

همانند شکل (۱۳) در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نیز همبستگی نتایج تغییر مکان حداکثر دینامیکی در مدل‌های a و c و همچنین همبستگی نتایج مدل‌های d و a نشان داده شده است. با توجه به نمودارهای ذکر شده مشاهده می‌شود که در صورت تأخر زمانی در بارگذاری، از میزان حداکثر تغییر مکان دینامیکی نسبت به حالتی که بارها همزمان هستند کاسته می‌شود. این موضوع در حالتی که بارها همگام نیستند، بیشتر مشخص است. بنابراین در صورتی که بارگذاری چند گانه روی مدل انجام شود، تغییر مکان دینامیکی مدل در حالتی بیشینه خواهد بود که بارگذاری به صورت همزمان و همگام باشد. در این



## نتیجه گیری

برای دال کامپوزیت در هر شرایط هندسی و فیزیکی می توان مقدار تغییر مکان دینامیکی بیشینه دال و بسامد ارتعاش آزاد دال را به کمک شبکه عصبی در بسته نرم افزاری که تهیه شده است، به دست آورد. در صورت نیاز می توان با اعمال ضرایب مناسب مقدار تغییر مکان دینامیکی را برای وزن افراد مختلف یا بارگذاری چندگانه اصلاح کرد. با توجه به مقادیر تغییر مکان دینامیکی و بسامد در نمودار آستانه احساس ارتعاش می توان وضعیت دال را از نظر میزان احساس ساکنان از ارتعاش بررسی کرد. در صورتی که وضعیت سیستم از نظر ارتعاش قابل قبول نباشد، می باید با تغییر پارامترهای مؤثر بر ارتعاش، بار دیگر طراحی انجام گیرد تا وضعیت دال از نظر ارتعاش عمودی و آستانه احساس این ارتعاش بهبود یابد. در تغییر پارامترهای طراحی، توصیه می شود از نتایج تحلیل حساسیت هر شبکه استفاده شود تا پارامتری انتخاب شود که بیشترین تأثیر را در بهبود وضعیت داشته باشد. با توجه به نتایج به دست آمده و نمودار میله ای حساسیت تغییر مکان دینامیکی به پارامترهای ورودی، سه پارامتر اصلی که بیشترین تأثیر را بر ارتعاش دال دارند به ترتیب مقدار نسبت میرایی، طول دهانه تیرچه و فاصله تیرچه ها است. نتایج به صورتی حاصل شد که مقدار شاخص حساسیت میرایی حدود ۱۶ برابر شاخص

حساسیت طول تیرچه و ۱۹ برابر شاخص حساسیت فاصله تیرچه است. پارامترهایی که کمترین تأثیر را بر ارتعاش دارند، به ترتیب سختی بتن، اینرسی تیرها و سختی ستون است.

با توجه به نتایج این تحقیق، الگوریتم گام به گام برای کنترل ارتعاش دینامیکی سقفها به صورت ذیل توصیه می شود که می تواند کاربرد زیادی در کنترل طراحی ها داشته باشد:

- ۱- فرضیات اولیه طراحی برای مقاطع تیرها، تیرچه ها و سایر پارامترهای مورد نیاز؛
- ۲- کنترل و طراحی استاتیکی المان های سازه ای؛
- ۳- برآورد میزان تغییر مکان دینامیکی دال در اثر بار گذاری قدم زدن با استفاده از روش شبکه عصبی؛
- ۴- برآورد بسامد طبیعی دال با استفاده از روش شبکه عصبی و بررسی وضعیت ارتعاش دال با استفاده از نمودار ۱ (آستانه ارتعاش)؛
- ۵- در صورتی که ارتعاش در محدوده مجاز نمودار نباشد، باید با استفاده از نتایج آنالیز حساسیت (جدول ۴) ابتدا فرضیات را اصلاح نموده و بار دیگر مراحل فوق را با شروع از مرحله ۲ تکرار کرد.
- ۶- در صورتی که ارتعاش در شرایط قابل قبول نباشد، طراحی پایان می یابد.

## مراجع

- 1 - Lenzen, K. H. (1966). "Vibration of Steel joist-concrete slab Floors." *Engineering Journal*, AISC, Vol. 3, No. 3, PP.133-136.
- 2 - Reiher, H. and Meister, F. J. (1949). *The Effect of Vibration on People*. Published in German in 1931, English Translation in Report No. F-TS-616-R.E.H.Q. Air Material Command, Wright Field, Ohio, USA.
- 3 - Australian Standard. (1993). *Domestic Metal Framing Code*, AS3623, Standards Association of Australia, Homebush, NSW.
- 4 - Hicks, S. (2004). "Vibration characteristics of steel-concrete composite floor systems." *Progress in Structural Engineering Materials*, Vol. 6, PP.21-38.
- 5 - Murray, T. M. (1975). "Design to prevent floor vibration." *Engineering Journal*, AISC, Vol. 12, No. 3, PP.82-87.
- 6 - Murray, T. M. (1981). "Acceptability criterion for occupant-induced floor vibration." *Engineering Journal*, AISC, Vol. 18, No. 2, PP.62-70.
- 7 - Murray, T. M. (1991). "Building floor vibration." *Engineering Journal*, AISC, Vol. 28, No. 3, PP 102-109.
- 8 - Hykin, S. (1999). *Neural networks: A comprehensive foundation*, Printice-Hall, New Jersey.

- 9 - Oreta, A. W. C., and Kawashima K. (2003). "Neural network modeling of confined compressive strength and strain of circular concrete columns." *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 4, PP.554-561.
- 10 - Barai, S. V., and Pandey, P. C. (1995). "Vibration signature analysis using artificial neural networks." *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 9, No. 4, PP.259-265.
- 11 - Pu, Y., and Mesbahi, E. (2006). "Application of artificial neural networks to evaluation of ultimate strength of steel panels", *Engineering Structures*, Vol. 28, PP.1190-1196.
- 12 - Mansour, M. Y., Dicleli, M., Lee, J. Y. and Zhang J. (2004). "Predicting the shear strength of reinforced concrete beams using artificial neural networks." *Engineering Structures*, Vol. 26, PP.781-799.
- 13 - Inel, M. (2007). "Modeling ultimate deformation capacity of RC columns using artificial neural networks." *Engineering Structures*, Vol. 29, PP.329-335.
- 14 - Lin, F. M., Chiang, C. M., and Chung S. C. (2003). *Prediction of floor vibration induced By footstep*. Dept. of Architecture, Cheng-Kung University, Taiwan.
- 15 - Price, T. E., Owen, A. N., and Smith, R.C. (2003). *Serviceability Vibration Evaluation Of Long Floor System*, Mississippi State University, USA.