

# پیش‌بینی نشست سطح زمین و نیروهای داخلی پوشش تونل در اثر حفاری تونل‌های نعل اسبی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی

محمدرضا علمدار (کارشناس ارشد)

محمد آزادی\* (دانشیار)

دانشکده‌ی عمران و نقشه‌برداری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد قزوین

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۸ (۱۳۹۸)  
دوری ۲ - ۳۵، شماره ۱/۱، ص. ۱۳۹-۱۴۸، یادداشت‌نوی

محیط زمین تحت فشار ناشی از تنش‌های طبیعی است و هرگونه دست‌خوردگی، مانند حفر تونل، وضعیت تنش ذکرشده را مختل می‌کند و سبب پدید آمدن تغییرمکان‌هایی در سطح زمین می‌شود. اگر تغییرمکان‌های مذکور در محدوده‌ی استاندارد نباشند، موجب بروز مشکلاتی در ساختارهای سطحی و زیرسطحی می‌شوند. حین حفر تونل، پارامترها و کمیت‌های مختلفی در مقادیر نشست سطح زمین تأثیرگذار هستند. در پژوهش حاضر، میزان تأثیر هر یک از پارامترهای مذکور بررسی شده است. نتایج حاصل از نرم‌افزار، با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی مدل‌سازی و با گسترش شبکه به ارزیابی حساسیت پارامترهای مذکور پرداخته شده است. در روش استفاده‌شده با در نظر گرفتن اثر هم‌زمان پارامترهای مختلف، حساسیت تحلیلی‌ها نسبت به تغییرات نشست و نیروهای داخلی پوشش تونل بررسی شده است. نتایج حاکی از اثر قابل توجه پارامترهای مورد بررسی، در نشست سطحی است که به تفصیل ارائه شده‌اند.

واژگان کلیدی: تونل، نشست سطح زمین، نیروهای داخلی، شبکه‌های عصبی مصنوعی.

mr.alamdar@yahoo.com  
azadi.mhmm@gmail.com

## ۱. مقدمه

میزان نشست در اثر ساخت تونل‌های با قطر بزرگ پرداخته شده است،<sup>[۴]</sup> و همچنین در چین بر روی تونل‌های مترو در عمق ۹ تا ۱۲ متر مطالعاتی انجام و میزان نشست در زمین‌های رسی نرم با سطح آب زیرزمینی بالا در طولانی‌مدت بررسی شده است که حاکی از نشست قابل توجه پس از ۱۰ سال بود.<sup>[۵]</sup> در سال ۲۰۱۳،<sup>[۶]</sup> نیز اثر پارامترهای مهم، مانند: عمق تونل، فشار، و قطر تونل در نشست با استفاده از روش‌های تجربی، تئوری و عددی و با هدف کنترل نشست سطحی بررسی و نتایج حاصل‌شده با اطلاعات به‌دست آمده از مشاهده‌های عینی مقایسه شد. و پژوهش دیگری در خصوص پیش‌بینی نشست بالای تونل در بزرگراه شهر ساتوآلو با کمک شبکه‌ی عصبی مصنوعی (۲۰۰۸) انجام شد که در آن از شبکه‌های عصبی به‌عنوان ابزاری مناسب برای پیش‌بینی نشست در اثر حفاری استفاده و پس از ساخت چند شبکه با معماری‌های متفاوت، بهترین شبکه که خطای کمتری داشتند، انتخاب شده است.<sup>[۷]</sup>

از جمله مطالعات دیگر در خصوص استفاده از شبکه‌های عصبی، پژوهشی در سال ۲۰۰۶ است که جهت پیش‌بینی بیشینه نشست سطح زمین در اثر حفاری تونل انجام و در آن با توجه به شرایط ژئوتکنیکی منطقه، یک مدل بهینه از شبکه‌ی عصبی ساخته و با کمک مدل مذکور، نشست سطح زمین پیش‌بینی شده است.<sup>[۸]</sup> همچنین در سال ۲۰۰۱، در ارزیابی بهترین مدل برای شبکه‌ی

مطالعات زیادی جهت تعیین میزان نشست سطح زمین در اثر حفاری تونل صورت گرفته است. از آن جمله می‌توان به مطالعاتی در سال ۲۰۱۴ اشاره کرد که در آن اثر حفاری تونل دایره‌ی در نشست سطح زمین در تونل‌های تکی و دوقلو بررسی شده و در نهایت، فرمولی جهت محاسبه‌ی نشست برای تونل‌های تکی و دوقلو ارائه شده است.<sup>[۱]</sup> با توجه به نتایج به‌دست آمده، بیشترین مقدار نشست در بالای تاج تونل رخ می‌دهد و هر چه از تاج و محور تونل فاصله گرفته شود، میزان نشست کم می‌شود تا به صفر برسد. در برخی مطالعات دیگر، با توجه به مقادیر به‌دست آمده برای نشست و نیروهای داخلی و همچنین تغییرات سطح آب زیرزمینی و نحوه‌ی قرارگیری موقعیت دو تونل نسبت به هم، ملاحظات اجرایی جهت پوشش تونل‌ها در کیلومترهای مختلف ارائه شده است.<sup>[۲]</sup> در مطالعه‌ی دیگری، نشست سطح زمین در اثر ساخت تونل‌های کم‌عمق در زمین‌های نرم بررسی و در آن براساس میزان نشست بیشینه‌ی سطح زمین، تونل‌ها در ۴ گروه طبقه‌بندی و بیشینه‌ی نشست در بالای تاج تونل مشاهده شده است.<sup>[۳]</sup>

در سال ۲۰۱۶، نیز با هدف کاهش آثار زیست‌محیطی ساخت تونل، به ارزیابی

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۱۱/۱۸، اصلاحیه ۱۳۹۶/۱/۲۶، پذیرش ۱۳۹۶/۲/۴.

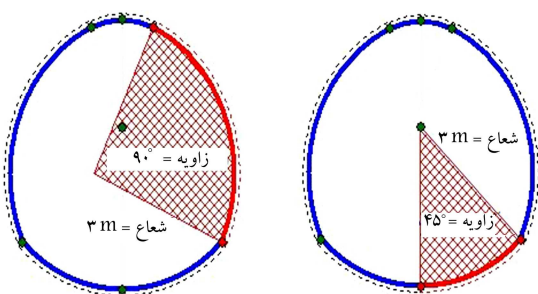
DOI: 10.24200/J30.2019.4575

جدول ۱. مشخصات مکانیکی لایه‌های خاک در مدل مینا.

نام لایه	$\gamma$ ( $kN/m^3$ )	$E$ ( $MPa$ )	$\phi$ ( $^\circ$ )	$C$ ( $kN/m^2$ )
خاک دستی	۱۸	۱۵	۲۳	۱۵
خاک رس	۱۹	۲۶	۲۵	۳۰
ماسه	۲۰	۶۰	۳۵	۵

جدول ۲. مشخصات تونل‌ها در مدل مینا.

نوع تونل	$h$ : عمق قرارگیری تاج تونل از سطح زمین (متر)	$d$ : فاصله مرکز تونل‌ها از هم (متر)
تونل نعل اسبی تکی	۲۰	-
تونل نعل اسبی دوقلو	۲۰	۱۲
تونل نعل اسبی سه قلو	۲۰	۱۲



شکل ۱. نمای از مقطع نعل اسبی تونل در مدل مینا.

### ۳. بررسی اثر تغییرات پارامترهای مختلف در نشست

#### سطح زمین و نیروهای داخلی پوشش تونل

از جمله پارامترهای تأثیرگذار در نشست سطح زمین و نیروهای داخلی پوشش تونل می‌توان به پارامترهای خاک، مانند: چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مدول کشسانی و پارامترهای هندسی تونل، مانند: قطر تونل و عمق قرارگیری تونل اشاره کرد. در ادامه، تحلیل‌های انجام‌شده برای هر یک از پارامترها و نتایج به‌دست آمده تشریح شده است. نتایج به‌دست آمده برای مدل‌های مینا در تونل‌های تکی، دوقلو، و سه قلو به‌صورت خلاصه در جدول ۳ ارائه شده است.

#### ۱.۳. صحت‌سنجی نتایج

مطالعه‌ی موردی پژوهش حاضر، خط مترو اصفهان بوده و نتایج به‌دست‌آمده با نتایج خط مترو اصفهان مقایسه شده است. این تذکر لازم است که مقطع تونل در مترو اصفهان، دایره‌ی بوده و به‌صورت دوقلو است و جهت بررسی اثر هندسی تونل در نشست، در پژوهش حاضر از مقطع نعل اسبی استفاده شده است. در پروژه‌ی مترو اصفهان برای تونل دوقلو، نشست ۵/۸۶ میلی‌متر، نیروی محوری ۱۱۳۰ و نیروی برشی ۲۵۵/۶۴ کیلو نیوتن بر متر و لنگر خمشی ۲۰۳/۸۹ کیلو نیوتن در متر بوده است. بنابراین نتایج پژوهش حاضر قابل قبول است.

عصبی، از بین مدل‌های مختلف انتخاب‌شده، تغییرات نشست سطح زمین بررسی شد.<sup>[۹]</sup>

همچنین در سال ۲۰۱۳، درخصوص تعیین نشست بهینه‌ی ساختمان نزدیک تونل شهری توسط شبکه‌ی عصبی با محاسبه‌ی میزان نشست در حالت‌های مختلف حفاری تونل، فرمولی برای محاسبه‌ی نشست بهینه با وجود ساختمان‌های موجود در منطقه ارائه شد.<sup>[۱۰]</sup> در خصوص کاربرد شبکه‌های عصبی در مهندسی عمران نیز به دامنه‌ی وسیع کاربرد شبکه‌های عصبی در شاخه‌های مختلف مهندسی عمران، مانند: سازه، مدیریت ساخت، محیط‌زیست، آب، مهندسی ترافیک، راه و ژئوتکنیک اشاره و درخصوص نحوه‌ی عملکرد شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی و حل مسائل و طبقه‌بندی، توضیحاتی ارائه شده است.<sup>[۱۱]</sup>

نتایج بررسی‌های انجام‌شده‌ی دیگری در سال ۲۰۱۰، نیز حاکی از اثر پارامترهای مختلف از جمله: ضریب پواسون، مدول کشسانی و چگالی خاک در نشست سطح زمین و تاج تونل بوده و نتایج به‌دست آمده نشان داده است که با افزایش ضریب پواسون و چگالی خاک، نشست افزایش و با افزایش مدول کشسانی، نشست کاهش یافته است.<sup>[۱۲]</sup> همچنین درخصوص مدل‌سازی‌های سه بعدی نیز مطالعاتی صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به پژوهشی در سال ۲۰۱۱ اشاره کرد<sup>[۱۳]</sup> که در آن با مدل سه بعدی سازه و تونل با نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس، اثر هندسه‌ی سازه در نشست سطحی زمین در اثر حفر تونل به روش اتریشی بررسی شده و بررسی نتایج آن‌ها، لزوم استفاده از مدل‌های سه بعدی در اندرکنش سازه - تونل را برجسته‌تر ساخته است. در تمامی مطالعات اشاره‌شده، عموماً اثر پارامترهای مختلف بررسی شده است، ولی تأثیر حساسیت آن‌ها چندان مورد توجه نبوده است. لذا در پژوهش حاضر سعی شده است با مطالعه و بررسی‌های متعدد و با کمک نرم‌افزار المان محدود و روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی به ارزیابی نشست سطح زمین در اثر حفر تونل نعل اسبی پرداخته شود و ارتباطی بین تغییرشکل و جابه‌جایی زمین و نیروهای داخلی با مشخصه‌هایی نظیر: چسبندگی، زاویه اصطکاک، مدول کشسانی، قطر و عمق تونل ارائه شود. در تحلیل‌های مذکور، برخلاف روش‌های متداول، تأثیر هم‌زمان پارامترهای مختلف بررسی شده است.

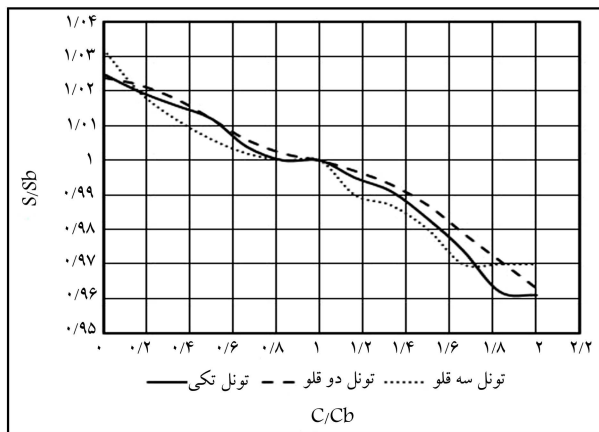
### ۲. نحوه‌ی مدل‌سازی و معرفی مدل مینا

محدوده‌ی در نظر گرفته‌شده برای مدل، محدوده‌ی با ابعاد  $۱۴۰ \times ۷۰$  بوده است که سه لایه خاک در آنجا تعریف شده است. لایه‌ی اول، شامل خاک دستی به ضخامت ۳ متر، لایه‌ی دوم شامل خاک رس به ضخامت ۲۲ متر و لایه‌ی سوم شامل ماسه به ضخامت ۴۵ متر بوده است. تراز آب زیرزمینی در زیر لایه‌ی ماسه قرار گرفته است.

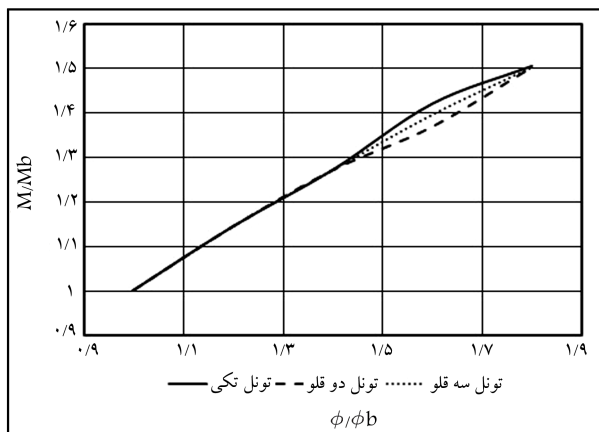
در ابتدا سه مدل مینا که مشخصات مکانیکی لایه‌های خاک و هندسه‌ی تونل آن در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است، برای تونل‌های تکی، دوقلو و سه‌قلو ساخته شده‌اند. از مدل مینای مذکور در تفسیر و نرمالیزه کردن نتایج استفاده شده است. شکل ۱، مقطع نعل اسبی تونل را در مدل مینا نمایش می‌دهد. مدل‌های ساخته‌شده با استفاده از المان‌های ۱۵ گره‌ی مثلثی المان‌بندی شده است. با توجه به اینکه ابعاد مقطع تونل در مدل مینا کوچک است، حفاری به‌صورت تمام مقطع و در یک مرحله انجام شده است. همچنین در پژوهش حاضر از مدل رفتاری موهر-کولمب استفاده شده است. پس از مدل‌سازی مدل‌های مینا، مطالعات پارامتریک روی آن‌ها انجام و نتایج بررسی شده است.

جدول ۳. نتایج به دست آمده برای مدل مینا و مقایسه‌ی نتایج با پروژه‌ی خط مترو اصفهان.

نوع تونل	چسبندگی (KPa)	زاویه‌ی اصطکاک (°)	مدول کشسانی (MPa)	قطر تونل (m)	عمق قرارگیری (m)	خروجی‌ها		
						ضریب پواسون	نشست (mm)	نیروی
						برشی (kN/m)	محوری (kN/m)	لنگر خمشی (kN.m/m)
تونل تکی	۳۰	۲۵	۲۶	۶	۲۰	۳۱۹,۶۴	۹۸۲,۶۲	۲۴۰
تونل دوقلو	۳۰	۲۵	۲۶	۶	۲۰	۳۱۰,۲۴	۹۶۱,۳۱	۲۳۱,۷۸
تونل سه‌قلو	۳۰	۲۵	۲۶	۶	۲۰	۳۰۸,۹۲	۹۵۹,۹۶	۲۳۰,۳۱



شکل ۲. نمودار اثر تغییرات چسبندگی در نشست در تونل‌های تکی، دوقلو، و سه‌قلو.



شکل ۳. اثر تغییرات زاویه‌ی اصطکاک در لنگر خمشی در تونل‌های تکی، دوقلو و سه‌قلو.

جدول ۴. اثر تغییرات مدول کشسانی در نشست سطح زمین و نیروهای داخلی در تونل تکی.

خروجی‌ها			ورودی	
لنگر خمشی (kN.m/m)	برشی (kN/m)	نیروی محوری (kN/m)	نشست (mm)	مدول کشسانی (MPa)
۲۶۸,۲۹	۳۳۹,۷۱	۹۹۰,۱۹	۳,۲	۱۰
۲۵۷,۵۶	۳۳۲,۳	۹۸۷,۱	۲,۷	۱۵
۲۴۸,۷۵	۳۲۶,۰۵	۹۸۴,۷۶	۲,۵	۲۰
۲۴۰	۳۱۹,۶۴	۹۸۲,۶۲	۲,۳	۲۶
۲۳۴,۹۹	۳۱۵,۸۸	۹۸۱,۵	۲,۳	۳۰

### ۲.۳. بررسی تغییرات چسبندگی خاک اطراف تونل

مقدار چسبندگی از صفر تا ۶۰ کیلو پاسکال برای هر ۵ کیلو پاسکال تغییر داده شده و در هر بار تغییر، میزان نشست سطح زمین و نیروهای داخلی پوشش تونل محاسبه شده است. شکل ۲، نمودار اثر تغییرات چسبندگی در نشست سطح زمین در تونل‌های تکی، دوقلو، و سه‌قلو را نشان می‌دهد. در نمودار مذکور، محور افقی نسبت چسبندگی به چسبندگی مدل مینا و محور قائم نسبت میزان نشست به نشست مدل میناست و براساس آن، با افزایش چسبندگی از صفر تا ۶۰ کیلو پاسکال، نشست سطح زمین به صورت نسبی ۶/۵٪ کاهش یافته است. این روند برای تونل‌های دوقلو و سه‌قلو نیز وجود دارد. در این حالات میزان این کاهش به ترتیب ۶٪ و ۵٪ است. با توجه به معادله‌ی موهر - کولمب، افزایش چسبندگی باعث افزایش مقاومت برشی خاک و پایداری بیشتر خاک می‌شود، که این موضوع در کاهش نشست مؤثر است.

### ۳.۳. بررسی تغییرات زاویه‌ی اصطکاک خاک اطراف تونل

زاویه‌ی اصطکاک از ۲۵ تا ۴۵ درجه و در بازه‌های ۵ درجه تغییر داده شده است. با افزایش زاویه‌ی اصطکاک به میزان ۸٪، نشست در تونل تکی از ۲/۳ به ۲/۹ میلی‌متر، در تونل دوقلو از ۳/۵۶ به ۴/۸۸ میلی‌متر، و در تونل سه‌قلو از ۶/۹ به ۷/۹ میلی‌متر رسیده است. همچنین در تونل‌های تکی، دوقلو، و سه‌قلو، نیروی محوری به صورت نسبی ۳٪ کاهش یافته است، که این تغییرات قابل ملاحظه نبوده است. این در حالی است که نیروی برشی به صورت نسبی ۲۹٪ و لنگر خمشی ۵٪ افزایش را نشان می‌دهد. دلیل این افزایش در نیروها می‌تواند به دلیل کاهش ضریب فشار جانبی با افزایش زاویه‌ی اصطکاک و در نتیجه افزایش اعوجاج پوشش تونل باشد. شکل ۳، نمودار نرمالیزه‌شده‌ی اثر تغییرات زاویه‌ی اصطکاک در لنگر خمشی در تونل‌های تکی، دوقلو، و سه‌قلو را به عنوان نمونه نمایش می‌دهد.

### ۴.۳. بررسی تغییرات مدول کشسانی خاک اطراف تونل

در پژوهش حاضر، تحلیل‌هایی برای مدول‌های کشسانی ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، و ۳۰ مگاپاسکال انجام شده است. تحلیل‌های مذکور برای هر سه حالت تونل‌های تک، دوقلو، و سه‌قلو تکرار شده است، تا اثر پارامتر مدول کشسانی در تغییرات نیروهای داخلی پوشش تونل و نشست سطحی ارزیابی شود. نتایج برای تونل تکی به عنوان نمونه در جدول ۴ ارائه شده است، که بر اساس آن در تونل‌های تکی، نشست به صورت نسبی ۲۸٪، نیروی برشی ۷٪ و لنگر خمشی ۱۴٪ کاهش یافته‌اند، ولی نیروی محوری تغییرات چندانی نداشته است. تغییرات مذکور برای تونل‌های دوقلو و سه‌قلو نیز مشاهده می‌شود. افزایش مدول کشسانی باعث سخت شدن خاک شده است و این امر باعث کاهش نشست و نیروهای داخلی پوشش تونل می‌شود.

جدول ۵. اثر تغییرات عمق قرارگیری تونل در نشست سطح زمین و نیروهای داخلی در تونل تکی.

ورودی‌ها		خروجی‌ها		
عمق قرارگیری	نشست	نیروی محوری	نیروی برشی	لنگر خمشی
(m)	(mm)	(kN/m)	(kN/m)	(kN.m/m)
۵	۸٫۲	۳۴۸٫۳۴	۱۱۱٫۳۵	۸۸٫۲۹
۱۰	۵٫۴	۵۵۷٫۶	۱۸۲٫۲	۱۴۲٫۸۱
۱۵	۳٫۴	۷۹۴٫۹۹	۲۶۰٫۷۷	۲۰۲٫۷۵
۲۰	۲٫۳	۱۰۰۰	۳۲۴٫۶۲	۲۵۰٫۴۵
۲۵	۱٫۱	۱۱۸۰	۴۴۲٫۳۹	۳۶۴٫۷۶
۳۰	۰٫۷	۱۳۷۰	۵۱۱٫۹۶	۴۲۰٫۱۸
۳۵	۰٫۲	۱۶۳۰	۶۰۸٫۱۵	۴۹۷٫۹۳
۴۰	۰	۱۸۳۰	۶۸۰٫۶	۵۵۶٫۶۲
۴۵	۰	۲۰۶۰	۷۶۸٫۷۸	۶۲۷٫۹۱

### ۶.۳. عمق قرارگیری تونل

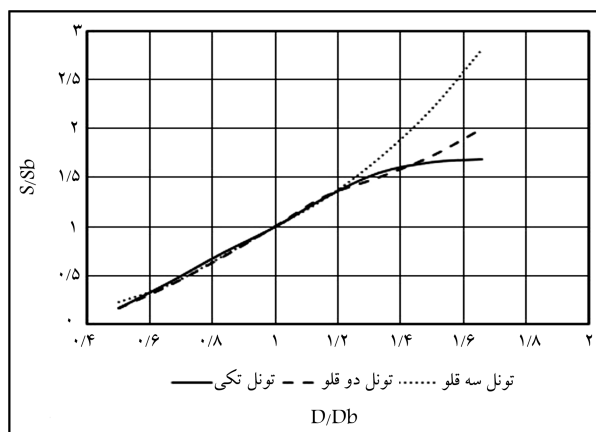
عمق قرارگیری تونل از ۵ تا ۴۵ متر و در بازه‌ی پنج‌تایی تغییر داده شده است. با افزایش عمق در تونل تکی، نشست سطح زمین از ۸٫۲ میلی‌متر به صفر کاهش، و نیروی محوری از ۳۴۸ به ۲۰۶۰ کیلونیوتن، نیروی برشی از ۱۱۱ به ۷۶۸ کیلونیوتن، و لنگر خمشی از ۸۸ به ۶۲۷ کیلونیوتن در متر افزایش یافته است؛ همچنین در تونل‌های دوقلو و سه‌قلو نیز به صورت تقریبی، نشست از ۱۴ به ۰٫۴ میلی‌متر کاهش، و نیروی محوری از ۳۴۰ به ۲۰۸۰ کیلونیوتن، نیروی برشی از ۱۱۰ به ۷۴۰ کیلونیوتن، و لنگر خمشی از ۸۵ به ۵۹۵ کیلونیوتن در متر افزایش یافته است، که افزایش ذکرشده‌ی نیروهای داخلی به دلیل افزایش سربراست. با افزایش عمق، فاصله‌ی محل حفاری تونل و سطح زمین افزایش می‌یابد و در نتیجه تأثیر آن در نشست سطح زمین کاهش می‌یابد. در جدول ۵، نتایج به دست آمده از تغییرات عمق قرارگیری تونل در نشست سطح زمین و نیروهای داخلی در تونل تکی ارائه شده است.

### ۴. پیش‌بینی نشست سطح زمین و نیروهای داخلی در اثر

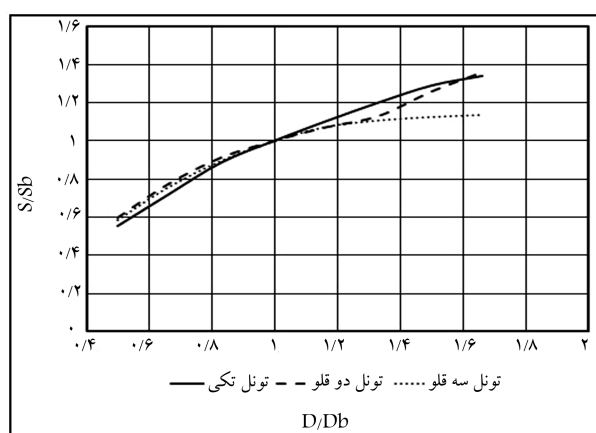
#### حفاری تونل با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی

پس از انجام تحلیل‌ها در نرم‌افزار، با استفاده از داده‌های موجود باید یک مدل از شبکه‌ی عصبی در نرم‌افزار متلب ساخته شود. در ساخت شبکه از الگوریتم‌های آموزشی مختلف جهت آموزش شبکه می‌توان استفاده کرد. همچنین تعداد لایه‌ها و تعداد نرون‌ها در بهینه‌سازی شبکه مؤثر هستند. در پژوهش حاضر از شبکه‌های پس انتشار استفاده شده است که جهت به دست آوردن بهترین مدل از شبکه‌ی عصبی، که خطای کمی دارد، شبکه‌های مختلف با الگوریتم‌های آموزش متفاوت و تعداد لایه‌ها و نرون‌های مختلف ساخته شده‌اند که در نهایت یک شبکه‌ی نهایی که خطای کمی داشت، انتخاب شد، که مشخصات آن در جدول ۶ ارائه شده است. در ساخت شبکه‌ی نهایی از ۶۰٪ تحلیل‌های به دست آمده از نرم‌افزار استفاده شده و ۴۰٪ مابقی تحلیل‌ها در آزمون شبکه به کار رفته‌اند.

شکل ۶، نمودار کارایی شبکه را نشان می‌دهد، که مطابق آن مقدار خطای میانگین مربعات نهایی کوچک است. همچنین خطای مجموعه‌ی آموزشی با خطای



شکل ۴. اثر تغییرات قطر تونل در نشست سطح زمین در تونل‌های تکی، دوقلو و سه‌قلو.



شکل ۵. اثر تغییرات قطر تونل در نیروی برشی در تونل‌های تکی، دوقلو و سه‌قلو.

### ۵.۳. بررسی تغییرات قطر تونل

قطر تونل از ۳ تا ۱۰ متر تغییر داده شده و در هر بار تغییر، میزان نشست و نیروهای داخلی پوشش تونل محاسبه شده است. با افزایش قطر در تونل تکی، نشست از ۰٫۴ به ۳٫۹ میلی‌متر، نیروی محوری از ۴۸۰ به ۱۶۰۰ کیلونیوتن، نیروی برشی از ۱۷۶ به ۴۲۹ کیلونیوتن و لنگر خمشی از ۷۲ به ۴۱۳ کیلونیوتن در متر رسیده است. این تغییرات در تونل‌های دوقلو و سه‌قلو نیز مشاهده می‌شود.

با افزایش قطر تونل از ۳ تا ۱۰ متر در تونل دوقلو، نشست از ۰٫۸ به ۳٫۹ میلی‌متر، نیروی محوری از ۵۰۴ به ۱۶۱۰ کیلونیوتن، نیروی برشی از ۱۸۴ به ۴۲۲ کیلونیوتن، و لنگر خمشی از ۷۵ به ۴۱۵ کیلونیوتن در متر رسیده است. همچنین در تونل سه‌قلو، نشست از ۱٫۶ به ۱۹٫۴ میلی‌متر، نیروی محوری از ۴۹۳ به ۱۴۱۰ کیلونیوتن، نیروی برشی از ۱۸۰ به ۳۵۱ کیلونیوتن، و لنگر خمشی از ۷۴ به ۳۴۵ کیلونیوتن در متر رسیده است. تغییرات مذکور، نمایانگر تأثیر قابل توجه تغییرات قطر تونل در نشست زمین و نیروهای داخلی است. با افزایش قطر تونل، تغییرات توزیع تنش در منطقه بیشتر و در نتیجه باعث افزایش نشست سطح زمین و نیروهای داخلی شده است. شکل ۴، نمودار اثر تغییرات قطر تونل در نشست سطح زمین و شکل ۵، نمودار اثر تغییرات قطر تونل در نیروی برشی در تونل‌های تکی، دوقلو و سه‌قلو را به عنوان نمونه نشان می‌دهد.

جدول ۶. مشخصات شبکه‌ی انتخاب‌شده.

نام شبکه	الگوریتم آموزش	تعداد نورون‌های لایه مخفی			توابع انتقال لایه‌ها	
		لایه‌ی اول	لایه‌ی دوم	لایه‌ی اول	لایه‌ی دوم	
Tunnel	Trainlm	۱۰	۱۰	Tansig	Purelin	

جدول ۷. میانگین درصد خطاهای شبکه‌ی انتخاب‌شده.

نام پارامتر	درصد خطای		
	لنگر خمشی	نیروی برشی	نیروی محوری
چسبندگی	۲٫۴	۱٫۸	۰٫۸۹
زاویه‌ی اصطکاک	۲٫۱	۲٫۳	۱
مدول کشسانی	۲	۲	۲٫۱
قطر تونل	۲٫۵	۱٫۵	۲٫۵
عمق تونل	۲٫۵	۲٫۵	۲٫۵

جدول ۸. میانگین درصد خطاهای شبکه‌های دیگر.

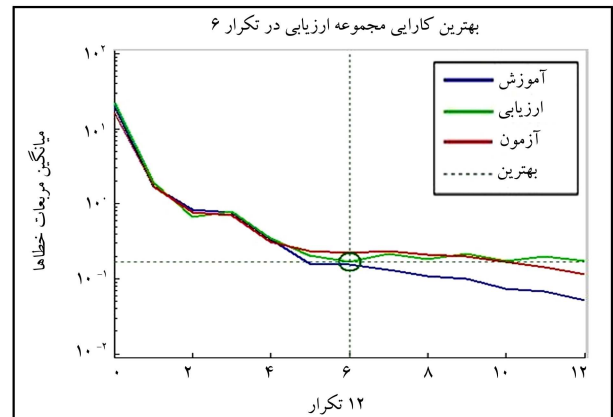
نام پارامتر	درصد خطای		
	لنگر خمشی	نیروی برشی	نیروی محوری
چسبندگی	۳٫۵	۲٫۶	۲٫۱
زاویه‌ی اصطکاک	۲٫۲	۲٫۵	۱٫۸
مدول کشسانی	۲٫۸	۲٫۶	۲٫۵
قطر تونل	۲٫۵	۱٫۶	۲٫۳
عمق تونل	۲٫۵	۲٫۶	۲٫۵

افزایش چسبندگی و مدول کشسانی، نشست کاهش و با افزایش قطر تونل، نشست و نیروهای داخلی افزایش یافته‌اند. همچنین با افزایش زاویه‌ی اصطکاک، نیروی برشی و لنگر خمشی افزایش و نیروی محوری کاهش یافته است. ضمن آنکه در تمامی تحلیل‌های ذکرشده، میزان خطا کمتر از ۴٪ بوده است که نشان از دقت بالای شبکه‌ی برازش شده دارد.

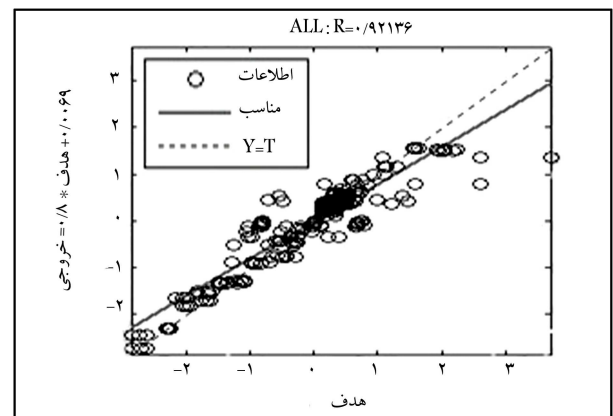
#### ۲.۴. ارزیابی نتایج آزمون شبکه

در مرحله‌ی بعد جهت سنجش کارایی شبکه، با استفاده از ۴۰٪ مابقی تحلیل‌های انجام‌شده با نرم‌افزار و خروجی‌های به‌دست آمده، شبکه آزمون شده است. نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار و آزمون شبکه در کنار هم قرار داده شده‌اند و با مقایسه‌ی آن‌ها، درصد خطا به‌دست آمده است. درخصوص پارامتر چسبندگی می‌توان گفت خروجی به‌دست‌آمده از آزمون شبکه برای نیروی برشی و لنگر خمشی بسیار خوب و میانگین درصد خطاها کمتر از ۴٪ بوده است. همچنین میانگین درصد خطای نیروی محوری ۱۴٪ بوده است، که درصد خطای مناسبی است. درخصوص نشست نیز می‌توان دریافت درصد خطای نشست برای تونل دوقلو زیر ۲۰٪ بوده و مناسب است، و برای تونل‌های تکی و سه‌قلو خطا به میزان ۲۰٪ بوده و نسبتاً شبکه خوب عمل کرده است.

درخصوص پارامتر زاویه‌ی اصطکاک نیز میانگین درصد خطا برای نیروی برشی، نیروی محوری و لنگر خمشی کمتر از ۸٪ بوده است و می‌توان نتایج آن را بسیار خوب دانست. برای نشست در تونل تکی، نتیجه‌ی خوبی به‌دست آمده و اختلاف مقادیر نشست بسیار ناچیز است. و برای تونل‌های دوقلو و سه‌قلو اختلاف مقادیر نشست قابل قبول است. برای پارامتر مدول کشسانی، مقادیر خروجی آزمون شبکه



شکل ۶. نمودار کارایی شبکه.



شکل ۷. نمودار رگرسیون شبکه.

ارزیابی، رفتار و خصوصیات مشابهی دارد و تا تکرار ششم (که بهترین کارایی در مورد مجموعه‌ی ارزیابی به وقوع می‌پیوندد)، هیچ بیش برآزشی رخ نداده است. شکل ۷، نیز نمودار رگرسیون شبکه را نشان می‌دهد، که مطابق آن خروجی مجموعه‌های آموزشی ارزیابی و آزمون شبکه به خوبی بر روی بردارهای هدف منطبق شده‌اند و عدد قابل قبولی را نمایش می‌دهد. بنابراین شبکه‌ی ساخته‌شده، کاملاً مناسب است و می‌تواند در ارزیابی حساسیت پارامترهای مختلف در پژوهش حاضر کمک شایانی کند.

#### ۱.۴. نتایج شبکه‌ی عصبی

نتایج به‌دست‌آمده از شبکه‌ی عصبی برای پارامترهای مختلف با نتایج نرم‌افزار مقایسه و درصد خطا محاسبه شده است. میانگین درصد خطای شبکه‌ی انتخاب‌شده در جدول ۷ و شبکه‌های ساخته‌شده‌ی دیگر در جدول ۸ ارائه شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، درصد خطای شبکه ناچیز است که این امر گویای عملکرد خوب شبکه است. نتایج حاصل از شبکه‌ی عصبی برای تغییرات هر پارامتر ورودی به تفکیک در جدول‌های ۹ الی ۱۲ ارائه شده‌اند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، با

جدول ۹. مقایسه‌ی خروجی نرم‌افزار و خروجی شبکه‌ی عصبی برای پارامتر زاویه اصطکاک.

درصد خطای			خروجی شبکه عصبی				خروجی نرم‌افزار				نوع تونل
لنگر خمشی	نیروی برشی	نیروی محوری	لنگر خمشی	نیروی برشی	نیروی محوری	لنگر خمشی	نیروی برشی	نیروی محوری	لنگر خمشی	نیروی برشی	
(mm)	(kN/m)	(kN/m)	(mm)	(kN/m)	(kN/m)	(mm)	(kN/m)	(kN/m)	(kN.m/m)	(°)	(°)
۱	۱	۲	۲/۵	۹۶۸/۲۸	۳۲۳/۲۵	۲۴۵/۱۰	۲/۳	۹۸۲/۶۲	۳۱۹/۶۴	۲۴۰	۲۵
۰/۱	۱	۱	۲/۸	۹۷۳/۱۱	۳۵۲/۹۳	۲۶۹/۵۰	۲/۵	۹۷۲/۵۷	۳۴۵/۸۴	۲۷۴/۷۷	تونل تکی
۰/۹	۱	۳	۲/۸	۹۵۴/۵۴	۳۶۱/۳۸	۲۹۵/۲۳	۲/۷	۹۶۳/۴۵	۳۶۸/۸۱	۳۰۵/۰۹	۳۵
۰/۷	۴	۵	۳/۵	۹۶۸/۲۸	۳۲۳/۲۵	۲۴۵/۱۰	۳/۵۶	۹۶۱/۳۱	۳۱۰/۲۴	۲۳۱/۷۸	۲۵
۲	۴	۱	۳/۸	۹۷۳/۱۱	۳۵۲/۹۳	۲۶۹/۵۰	۳/۷۵	۹۵۲/۱۴	۳۳۵/۹۹	۲۶۵/۳۵	تونل
۱	۰/۸	۰/۳	۳/۸۸	۹۵۴/۵۴	۳۶۱/۳۸	۲۹۵/۲۳	۴/۱۴	۹۴۳/۸۷	۳۵۸/۳۸	۲۹۴/۵۸	دوقلو
۰/۹	۴	۴	۴/۵۵	۹۶۸/۲۸	۳۲۳/۲۵	۲۴۰/۱۰	۵/۲	۹۵۹/۹۶	۳۰۸/۹۲	۲۳۰/۳۱	۲۵
۲	۴	۲	۴/۸۸	۹۷۳/۱۱	۳۵۰/۹۳	۲۶۹/۵۰	۵/۶	۹۵۰/۸۱	۳۳۴/۵۷	۲۶۳/۶۶	تونل
۱	۱	۱	۵/۸۸	۹۵۴/۵۴	۳۶۱/۳۸	۲۹۵/۲۳	۶/۱	۹۴۲/۹۳	۳۵۶/۸۵	۲۹۲/۷	سه‌قلو

جدول ۱۰. مقایسه‌ی خروجی نرم‌افزار و خروجی شبکه‌ی عصبی برای پارامتر مدول کشسانی.

درصد خطای			خروجی شبکه عصبی				خروجی نرم‌افزار				نوع تونل
لنگر خمشی	نیروی برشی	نیروی محوری	لنگر خمشی	نیروی برشی	نیروی محوری	لنگر خمشی	نیروی برشی	نیروی محوری	لنگر خمشی	نیروی برشی	
(mm)	(kN/m)	(kN/m)	(mm)	(kN/m)	(kN/m)	(mm)	(kN/m)	(kN/m)	(kN.m/m)	(MPa)	(MPa)
۴	۲	۲	۳/۵۵	۹۵۰/۷۴	۳۲۹/۹۶	۲۶۰/۶۳	۳/۲	۹۹۰/۱۹	۳۲۹/۷۱	۲۶۸/۲۹	۱۰
۰/۵	۰/۶	۰/۷	۲/۲۶	۹۸۲/۴۵	۳۳۰/۳۸	۲۵۵/۴۶	۲/۷	۹۸۷/۱	۳۳۲/۳	۲۵۷/۵۶	تونل
۲	۲	۴	۲/۱۵	۱۰۱۰/۷۶	۳۳۳/۵۹	۲۵۹/۷۶	۲/۵	۹۸۴/۷۶	۳۲۶/۰۵	۲۴۸/۷۵	تکی
۱	۰/۹	۱	۶/۵۵	۹۵۰/۷۴	۳۲۹/۹۶	۲۶۰/۶۳	۶/۶	۹۶۹/۷۸	۳۳۲	۲۶۳/۲۴	۱۰
۱	۲	۱	۶/۲۶	۹۸۲/۴۵	۳۳۰/۳۸	۲۵۵/۴۶	۵/۷	۹۶۶/۴۴	۳۲۳/۹۸	۲۵۱/۶۲	تونل
۴	۴	۴	۵/۶۶	۱۰۱۰/۷۶	۳۳۳/۵۹	۲۵۲/۷۶	۵/۲	۹۶۳/۸۱	۳۱۷/۲	۲۴۱/۸	دوقلو
۱	۰/۶	۰/۷	۸/۵۵	۹۵۰/۷۴	۳۲۹/۹۶	۲۶۰/۶۳	۹/۱	۹۶۸/۸۹	۳۳۱/۵	۲۶۲/۴	۱۰
۱	۲	۱	۷/۲۶	۹۸۲/۴۵	۳۳۰/۳۸	۲۵۵/۴۶	۷/۹	۹۶۵/۳۸	۳۲۳/۲۲	۲۵۰/۵۴	تونل
۴	۴	۴	۶/۹۶	۱۰۱۰/۷۶	۳۳۰/۵۹	۲۵۱/۷۶	۷/۳	۹۶۲/۵۸	۳۱۶/۱۶	۲۴۰/۵۲	سه‌قلو

### ۳.۴. گسترش شبکه

پس از ساخت و آزمون شبکه و بررسی کارایی آن، می‌توان با استفاده از شبکه‌ی موجود و عمومیت دادن آن و با کمک داده‌ها و ورودی‌های جدید، تحلیل‌های بیشتری برای پارامترهای مختلف انجام داد، که نتایج آن‌ها در جدول‌های ۱۳ الی ۱۷ ارائه شده است.

با افزایش چسبندگی از ۱ تا ۴۱ کیلوپاسکال، نشست به صورت نسبی ۱۳٪ کاهش یافته است. همچنین نیروی محوری، ۳٪ و نیروی برشی و لنگر خمشی، ۶٪ افزایش یافته‌اند. به عبارت دیگر، پارامتر چسبندگی تأثیر زیادی در نیروهای داخلی

برای نیروی محوری، نیروی برشی، و لنگر خمشی بسیار خوب و میانگین خطا کمتر از ۴٪ بوده است. اختلاف مقادیر نشست خروجی نرم‌افزار و شبکه برای تونل دوقلو بسیار خوب، ولی برای تونل‌های تکی و سه‌قلو خوب بوده است. با توجه به نتایج به دست آمده برای پارامتر قطر تونل، میانگین خطای نیروی برشی، ۵٪ و بسیار خوب بوده است و میانگین خطا برای نیروی محوری و لنگر خمشی ۱۴٪ بوده است، که برای تحلیل‌های مذکور، مناسب به نظر می‌رسد. درخصوص نشست می‌توان گفت که اختلاف مقادیر نرم‌افزار و شبکه در تونل تکی کم و در تونل‌های دوقلو و سه‌قلو قابل قبول بوده است. لذا می‌توان دریافت که نتایج نشست در تونل تکی، دقت بیشتری دارد.

جدول ۱۱. مقایسه خروجی نرم افزار و خروجی شبکه‌ی عصبی برای پارامتر چسبندگی.

نوع تونل	خروجی نرم افزار				خروجی شبکه عصبی				درصد خطای
	لنگر خمشی (kN.m/m)	نیروی برشی (kN/m)	نیروی محوری (kN/m)	نشست (mm)	لنگر خمشی (kN.m/m)	نیروی برشی (kN/m)	نیروی محوری (kN/m)	نشست (mm)	
تونل تکی	۲۳۸/۶	۳۱۷/۱	۹۷۵/۳۸	۲/۴۵	۲۳۰/۸۲	۳۰۲	۹۵۰/۸۳	۲/۸۵	۳
	۲۳۸/۹۳	۳۱۸/۰۸	۹۷۷/۱۵	۲/۴۴	۲۳۴/۷۶	۳۰۷/۰۹	۹۶۰/۸۲	۲/۸۸	۱
	۲۳۹/۲۴	۳۱۸/۵۳	۹۷۸/۷۷	۲/۴۳	۲۳۸/۲۲	۳۱۱/۳۲	۹۶۸/۷۸	۲/۸۷	۰/۴
	۲۳۹/۴۸	۳۱۸/۸۹	۹۸۰/۱	۲/۴۲	۲۴۱/۳۲	۳۱۵/۱۲	۹۷۵/۳۰	۲/۸۳	۰/۲
	۲۳۹/۷	۳۱۹/۲	۹۸۱/۱۸	۲/۴	۲۴۳/۹۰	۳۱۸/۶۰	۹۷۹/۵۳	۲/۷۷	۰/۶
	۲۳۹/۸۷	۳۱۹/۴۵	۹۸۲/۰۵	۲/۳۹	۲۴۵/۵۱	۳۲۱/۵۶	۹۷۸/۹۶	۲/۶۸	۱
	۲۴۰	۳۱۹/۶۴	۹۸۲/۶۲	۲/۳۹	۲۴۵/۱۰	۳۲۳/۲۵	۹۶۸/۲۸	۲/۵۵	۱
تونل دوقلو	۲۳۰/۳۳	۳۰۸/۳۷	۹۵۴/۸۶	۵	۲۳۰/۸۲	۳۰۱/۸۰	۹۵۰/۸۳	۴/۸۵	۰/۴
	۲۳۰/۶۶	۳۰۸/۷۹	۹۵۶/۵۵	۴/۹۹	۲۳۴/۷۶	۳۰۷/۰۹	۹۶۰/۸۲	۴/۸۸	۰/۴
	۲۳۰/۹۷	۳۰۹/۱۷	۹۵۷/۹۶	۴/۹۷	۲۳۸/۲۲	۳۱۱/۳۲	۹۶۸/۷۸	۴/۸۷	۰/۶
	۲۳۱/۲۵	۳۰۹/۵۵	۹۵۹/۱۸	۴/۹۴	۲۴۱/۳۲	۳۱۵/۱۲	۹۷۵/۳۰	۴/۸۳	۱
	۲۳۱/۴۸	۳۰۹/۸۵	۹۶۰/۱۳	۴/۹۱	۲۴۳/۹۰	۳۱۸/۶۰	۹۷۹/۵۳	۴/۷۷	۱
	۲۳۱/۶۷	۳۱۰/۱	۹۶۰/۸۹	۴/۸۹	۲۴۳/۹۸	۳۲۱/۵۶	۹۷۸/۹۶	۴/۶۸	۱
	۲۳۱/۷۸	۳۱۰/۲۴	۹۶۱/۳۱	۴/۸۸	۲۴۴/۱۰	۳۲۳/۲۵	۹۶۸/۲۸	۴/۵۵	۰/۷
تونل سه قلو	۲۲۸/۷۸	۳۰۶/۹۴	۹۵۳/۶۴	۷/۲	۲۳۰/۸۲	۳۰۱/۸۰	۹۵۰/۸۳	۷/۸۵	۰/۳
	۲۲۹/۱۴	۳۰۷/۴	۹۵۵/۳۲	۷/۱۵	۲۳۴/۷۶	۳۰۷/۰۹	۹۶۰/۸۲	۷/۸۸	۰/۵
	۲۲۹/۴۶	۳۰۷/۸۱	۹۵۶/۷	۷/۱	۲۳۸/۲۲	۳۱۱/۳۲	۹۶۸/۷۸	۷/۸۷	۱
	۲۲۹/۷۵	۳۰۸/۲۱	۹۵۷/۹	۷	۲۴۱/۳۲	۳۱۵/۱۲	۹۷۵/۳۰	۷/۸۳	۱
	۲۲۹/۹۹	۳۰۸/۵۳	۹۵۸/۸۱	۶/۹۹	۲۴۱/۹۰	۳۱۸/۶۰	۹۷۹/۵۳	۷/۷۷	۲
	۲۳۰/۱۹	۳۰۸/۷۸	۹۵۹/۵۵	۶/۹۷	۲۴۲/۵۱	۳۲۱/۵۶	۹۷۸/۹۶	۶/۹۸	۱
	۲۳۰/۳۱	۳۰۸/۹۲	۹۵۹/۹۶	۶/۹۷	۲۴۲/۶۰	۳۲۳/۲۵	۹۶۸/۲۸	۶/۵۵	۰/۹

جدول ۱۲. مقایسه خروجی نرم افزار و خروجی شبکه عصبی برای پارامتر قطر تونل.

نوع تونل	خروجی نرم افزار				خروجی شبکه عصبی				درصد خطای
	لنگر خمشی (kN.m/m)	نیروی برشی (kN/m)	نیروی محوری (kN/m)	نشست (mm)	لنگر خمشی (kN.m/m)	نیروی برشی (kN/m)	نیروی محوری (kN/m)	نشست (mm)	
تونل تکی	۷۲/۴۴	۱۷۶/۳	۴۸۰/۹۵	۰/۴	۷۲/۴۲	۱۷۹/۰۷	۵۰۰/۰۹	۰/۹۲	۴
	۱۲۴/۷۶	۲۲۸/۵۸	۶۳۹/۲۹	۱	۱۳۰/۴۷	۲۳۳/۹۲	۶۲۷/۰۰	۱/۲۳	۱
	۱۸۷/۰۱	۲۸۳/۰۸	۸۲۵/۴۹	۱/۷	۱۹۲/۹۸	۲۸۲/۷۲	۷۹۱/۹۴	۲/۲۰	۴
	۲۴۰	۳۱۹/۶۴	۹۸۲/۶۲	۲/۳	۲۴۵/۱۰	۳۲۳/۲۵	۹۶۸/۲۸	۲/۵۵	۱
تونل دوقلو	۷۵/۸۳	۱۸۴/۹	۵۰۴/۹	۰/۸	۷۳/۴۲	۱۷۹/۰۷	۵۲۴/۰۹	۰/۹۲	۳
	۱۲۷/۳۷	۲۳۹/۳	۶۶۶/۶۷	۱/۹	۱۳۳/۴۷	۲۳۳/۹۲	۶۳۵/۰۰	۲/۲۳	۴
	۱۸۵/۱۱	۲۸۳/۰۸	۸۲۹/۰۸	۳/۳	۱۹۲/۹۸	۲۸۲/۷۲	۷۹۱/۹۴	۴/۲۰	۴
	۲۳۱/۷۸	۳۱۰/۲۴	۹۶۱/۳۱	۴/۸	۲۴۱/۱۰	۳۲۳/۲۵	۹۶۸/۲۸	۴/۵۵	۰/۷
تونل سه قلو	۷۴/۲۴	۱۸۰/۸۵	۴۹۳/۶۴	۱/۶	۷۲/۴۲	۱۷۹/۰۷	۵۲۴/۰۹	۰/۹۲	۵
	۱۲۷/۰۷	۲۳۳/۶۵	۶۵۵/۲۲	۲/۸	۱۳۰/۴۷	۲۳۳/۹۲	۶۲۷/۰۰	۲/۲۳	۴
	۱۸۲/۶۶	۲۷۶/۸۲	۸۱۱/۲۶	۴/۸	۱۸۸/۹۸	۲۸۲/۷۲	۷۹۱/۹۴	۴/۲۰	۲
	۲۳۰/۳۱	۳۰۸/۹۲	۹۵۹/۹۶	۶/۹	۲۳۸/۱۰	۳۲۳/۲۵	۹۶۸/۲۸	۶/۵۵	۰/۹

جدول ۱۳. تحلیل های جدید برای پارامتر زاویه اصطکاک با استفاده از شبکه عصبی.

خروجی ها			ورودی جدید
نشست	نیروی برشی	لنگر خمشی	زاویه اصطکاک
(mm)	(kN/m)	(kN.m/m)	(°)
۲,۵۲	۳۳۵,۹۳	۲۵۵,۲۹	۲۶
۳,۸۴	۳۴۵,۵۳	۲۶۲,۸۶	۲۷
۳,۸۸	۳۵۱,۵۱	۲۶۷,۵۹	۲۸
۳,۹۲	۳۵۳,۷۳	۲۶۹,۵۳	۲۹
۳,۹۵	۳۵۳,۹۱	۲۶۹,۲۷	۳۱
۳,۹۹	۳۵۴,۹۹	۲۷۱,۱۲	۳۲
۴,۰۷	۳۵۵,۷۰	۲۷۶,۴۶	۳۳
۴,۱۰	۳۵۵,۹۲	۲۸۴,۹۹	۳۴
۴,۱۴	۳۶۱,۳۸	۲۹۵,۲۳	۳۵
۴,۱۶	۳۶۶,۷۳	۳۰۵,۹۳	۳۶
۴,۱۸	۳۷۰,۹۲	۳۱۶,۴۱	۳۷
۴,۲۰	۳۷۲,۳۴	۳۲۵,۶۴	۳۸
۴,۲۴	۳۷۲,۳۴	۳۳۰,۷۵	۳۹
۴,۲۸	۳۷۲,۳۴	۳۳۰,۷۵	۴۱

جدول ۱۴. تحلیل های جدید برای پارامتر چسبندگی با استفاده از شبکه‌ی عصبی.

خروجی ها			ورودی
نشست	نیروی برشی	لنگر خمشی	چسبندگی
(mm)	(kN/m)	(kN.m/m)	(KPa)
۴,۸۷	۹۵۳,۱۰	۲۳۱,۶۶	۱
۴,۸۷	۹۵۵,۲۱	۲۳۲,۴۷	۲
۴,۸۸	۹۵۷,۱۸	۲۳۳,۲۶	۳
۴,۸۸	۹۵۹,۰۵	۲۳۴,۰۲	۴
۴,۸۸	۹۶۲,۵۳	۲۳۵,۴۸	۶
۴,۸۸	۹۶۴,۱۸	۲۳۶,۱۹	۷
۴,۸۷	۹۶۷,۳۰	۲۳۶,۸۸	۸
۴,۸۸	۹۶۵,۷۶	۲۳۶,۵۶	۹
۴,۸۶	۹۷۰,۲۱	۲۳۷,۵۶	۱۱
۴,۸۶	۹۷۱,۵۸	۲۳۹,۵۱	۱۲
۴,۸۵	۹۷۲,۸۹	۲۴۰,۱۳	۱۳
۴,۸۴	۹۷۴,۱۳	۲۴۰,۷۳	۱۴
۴,۸۲	۹۷۶,۳۸	۲۴۱,۸۸	۱۶
۴,۸۱	۹۷۷,۳۶	۲۴۲,۴۳	۱۷
۴,۸۰	۹۷۸,۲۳	۲۴۲,۹۵	۱۸
۴,۷۹	۹۷۸,۹۶	۲۴۳,۴۴	۱۹
۴,۷۶	۹۷۹,۹۲	۲۴۴,۳۲	۲۱
۴,۷۴	۹۸۰,۱۰	۲۴۴,۷۰	۲۲
۴,۷۲	۹۸۰,۰۲	۲۴۵,۰۳	۲۳
۴,۷۱	۹۸۰,۰۲	۲۴۵,۳۰	۲۴
۴,۶۶	۹۸۰,۰۲	۲۴۵,۶۴	۲۶
۴,۶۴	۹۸۰,۰۲	۲۴۵,۶۸	۲۷
۴,۶۱	۹۸۰,۰۲	۲۴۵,۶۸	۲۸
۴,۵۸	۹۸۰,۰۲	۲۴۵,۶۸	۲۹
۴,۵۲	۹۸۰,۰۲	۲۴۵,۶۸	۳۱
۴,۹۴	۹۸۰,۰۲	۲۴۵,۶۸	۳۲
۴,۴۵	۹۸۰,۰۲	۲۴۵,۶۸	۳۳
۴,۴۲	۹۸۰,۰۲	۲۴۵,۶۸	۳۴
۴,۳۶	۹۸۰,۰۲	۲۴۵,۶۸	۳۶
۴,۳۳	۹۸۰,۰۲	۲۴۵,۶۸	۳۷
۴,۳۰	۹۸۰,۰۲	۲۴۵,۶۸	۳۸
۴,۲۸	۹۸۰,۰۲	۲۴۵,۶۸	۳۹
۴,۲۴	۹۸۰,۰۲	۲۴۵,۶۸	۴۱

نداشته است. این در حالی است که با افزایش زاویه‌ی اصطکاک از ۲۶ تا ۴۱ درجه، لنگر خمشی از ۲۵۵,۲۹ به ۳۳۰,۷۵ کیلونیوتن در متر رسیده است و ۲۹٪ افزایش را نشان می‌دهد. همچنین نیروی برشی از ۳۳۵,۹۳ به ۳۷۲,۳۴ کیلونیوتن رسیده و ۱۰٪ افزایش یافته است. با افزایش زاویه‌ی اصطکاک تا ۳۷ درجه، نیروی محوری از ۹۵۳,۷۳ به ۹۱۳,۶۱ کیلونیوتن بر متر رسیده و ۴٪ کاهش یافته و پس از آن تغییرات چندانی نداشته است. همچنین نشست نیز از ۳,۵۲ به ۴,۲۸ میلی‌متر رسیده و پس از آن تغییرات قابل ملاحظه‌ی نداشته است. با افزایش قطر تونل نیز از ۳ تا ۱۰ متر، نشست به صورت نسبی ۸۴٪، نیروی محوری ۵۶٪، نیروی برشی ۵۴٪ و لنگر خمشی ۷۶٪ افزایش یافته‌اند. ضمن آنکه با افزایش مدول کشسانی به میزان ۶۲٪، نشست از ۶,۵۷ به ۵,۱۲ میلی‌متر، نیروی برشی از ۳۳۰,۷۶ به ۲۲۹,۶۵ کیلونیوتن، و لنگر خمشی از ۲۵۹,۷۹ به ۲۲۴,۱۱ کیلونیوتن در متر رسیده است همچنین نیروی محوری از ۹۹۸,۵ به ۹۵۸,۹۴ کیلونیوتن بر متر رسیده و پس از آن تغییرات چندانی نداشته است. با افزایش عمق از ۲ تا ۳۰ متر نیز نشست به صورت نسبی ۷۲٪ کاهش یافته و نیروی محوری ۸۳٪، نیروی برشی ۹۷٪ و لنگر خمشی ۶۹٪ افزایش یافته‌اند. با توجه به تحلیل‌های انجام‌شده توسط شبکه‌ی عصبی، همان‌طور که در جدول‌های ۱۸ الی ۲۰ ارائه شده است، می‌توان نتیجه گرفت که پارامتر قطر تونل بیشترین حساسیت را به نشست در مقایسه با پارامترهای دیگر دارد. همچنین پارامتر عمق تونل بیشترین حساسیت را به نیروی محوری نسبت به سایر پارامترها دارد. پارامترهای عمق و قطر تونل به ترتیب بیشترین حساسیت‌ها را نسبت به نیروی برشی دارند و کمترین حساسیت را پارامتر چسبندگی دارد. در خصوص لنگر خمشی نیز می‌توان دریافت که زاویه‌ی اصطکاک و مدول کشسانی تأثیر فرآوانی دارند، اما بیشترین تأثیر مربوط به قطر و عمق تونل است. این در حالی است که چسبندگی حساسیت زیادی به تغییرات لنگر خمشی نشان نمی‌دهد.

## ۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تونل‌های تک، دوقلو، و سه‌قلو در یک محیط خاکی مدل و با استفاده از تحلیل‌هایی در نرم‌افزار، اثر پارامترهای مختلف در نشست سطح زمین، و نیروهای داخلی پوشش تونل ارزیابی شدند. پس از آن با استفاده از روش‌های شبکه‌ی عصبی سعی شد با در نظر گرفتن اثر توأم پارامترهای مذکور به بررسی حساسیت هر یک بر اساس نتایج خروجی پرداخته شود و این نتایج به‌دست آمده است:

۱. با استفاده از تحلیل‌های انجام‌شده در نرم‌افزار Plaxis و داده‌های موجود، یک پیش‌بینی از نشست سطح زمین و نیروهای داخلی با کمک شبکه‌ی عصبی انجام



جدول ۱۵. تحلیل‌های جدید برای پارامتر مدول کشسانی با استفاده از شبکه‌ی عصبی.

ورودی	خروجی‌ها			
	مدول کشسانی (MPa)	لنگر خمشی (kN.m/m)	نیروی برشی (kN/m)	نیروی محوری (kN/m)
۱۱	۲۵۹,۷۹	۲۳۰,۷۶	۹۹۸,۵	۶,۵۷
۱۲	۲۵۸,۶۰	۲۳۰,۹۹	۹۹۰,۴۸	۶,۵۷
۱۳	۲۵۷,۳۲	۲۳۰,۸۸	۹۸۶,۳۲	۶,۵۲
۱۴	۲۵۶,۱۹	۲۳۰,۶۲	۹۳۸,۴۱	۶,۴۲
۱۶	۲۵۵,۳۲	۲۳۰,۳۴	۹۷۹,۳۱	۶,۰۲
۱۷	۲۵۵,۸۶	۲۳۰,۶۴	۹۷۶,۹۱	۵,۷۲
۱۸	۲۵۶,۹۹	۲۳۱,۳۳	۹۷۸,۴۲	۵,۳۷
۱۹	۲۵۸,۴۵	۲۳۲,۳۸	۹۶۹,۳۰	۵,۰۰
۲۱	۲۶۰,۴۴	۲۳۴,۶۳	۹۶۴,۱۲	۴,۴۱
۲۲	۲۶۰,۰۳	۲۳۵,۰۶	۹۶۱,۵	۴,۲۶
۲۳	۲۵۸,۲۸	۲۳۴,۴۱	۹۵۸,۹۴	۴,۲۲
۲۴	۲۵۵,۱۳	۲۳۲,۳۱	۹۵۸,۹۲	۴,۲۷
۲۶	۲۴۵,۱۱	۲۳۲,۲۵	۹۵۸,۹۲	۴,۵۵
۲۷	۲۳۸,۶۷	۳۱۶,۴۷	۹۵۸,۸۵	۴,۷۳
۲۸	۲۳۱,۵۹	۳۰۸,۵۱	۹۵۸,۹۲	۴,۹۲
۲۹	۲۲۴,۱۱	۲۹۹,۶۵	۹۵۸,۳۱	۵,۱۲

جدول ۱۶. تحلیل‌های جدید برای پارامتر قطر تونل با استفاده از شبکه‌ی عصبی.

ورودی	خروجی‌ها			
	قطر تونل (m)	لنگر خمشی (kN.m/m)	نیروی برشی (kN/m)	نیروی محوری (kN/m)
۳	۷۲,۴۲	۱۳۴,۴۷	۱۷۹,۰۷	۵۲۴,۰۹
۴	۱۳۴,۴۷	۱۹۲,۹۸	۲۳۲,۹۲	۶۲۷
۵	۱۹۲,۹۸	۲۴۵,۱۰	۲۸۲,۷۲	۷۹۱,۹۴
۶	۲۴۵,۱۰	۲۷۵,۵۴	۳۲۳,۲۵	۹۶۸,۲۸
۷	۲۷۵,۵۴	۲۹۳,۵۱	۳۵۲,۵۱	۱۰۷۵,۱۹
۸	۲۹۳,۵۱	۳۰۱,۶۷	۳۷۲,۰۴	۱۱۳۸,۹۰
۹	۳۰۱,۶۷	۳۰۳,۸۷	۳۸۳,۹۰	۱۱۷۳,۱۸
۱۰	۳۰۳,۸۷	۳۹۱,۳۶	۳۹۱,۳۶	۱۱۹۰,۷۷

شد و با توجه به نتایج به دست آمده و مقایسه‌ی نتایج با نرم‌افزار مذکور می‌توان نتیجه گرفت که شبکه‌های عصبی، ابزاری مناسب برای پیش‌بینی پارامترها از جمله نشست سطح زمین و نیروهای داخلی پوشش تونل هستند. نتایج به دست آمده از شبکه‌ی عصبی و نرم‌افزار در کنار هم قرار داده شده و با مقایسه‌ی آن‌ها، درصد خطا به دست آمده است، که درصد خطای پایین، گویای عملکرد خوب شبکه است.

۲. با افزایش چسبندگی، نشست سطح زمین کاهش و نیروی محوری افزایش یافته است، ولی تأثیر زیادی در نیروی برشی و لنگر خمشی نداشته است. براساس

جدول ۱۷. تحلیل‌های جدید برای پارامتر عمق تونل با استفاده از شبکه‌ی عصبی.

ورودی	خروجی			
	عمق قرارگیری لنگر خمشی (m)	نیروی خمشی (kN.m/m)	نیروی برشی (kN/m)	نیروی محوری (kN/m)
۲	۱۰۶,۳۱	۹,۶۴	۲۰۶,۸۶	۱۱,۴۲
۳	۱۰۷,۰۵	۴۱,۸۱	۲۶۶,۴۴	۱۰,۵۵
۴	۱۰۹,۷۳	۷۷,۷۰	۳۳۶,۷۵	۹,۷۳
۶	۱۱۷,۱۵	۱۳۵,۷۵	۴۵۷,۳۲	۸,۴۹
۷	۱۲۰,۹۶	۱۵۴,۷۵	۴۹۹,۶۴	۸,۰۷
۸	۱۲۴,۸۲	۱۶۸,۸۸	۵۳۲,۹۰	۷,۷۵
۹	۱۲۸,۹۵	۱۷۹,۹۵	۵۶۰,۵۶	۷,۵۰
۱۱	۱۳۸,۸۸	۱۹۸,۴۳	۶۱۰,۲۳	۷,۱۰
۱۲	۱۴۵,۱۷	۲۰۷,۷۳	۶۳۶,۲۷	۶,۹۰
۱۳	۱۵۲,۶۲	۲۱۷,۸۹	۶۶۴,۹۹	۶,۶۹
۱۴	۱۶۱,۴۵	۲۲۹,۲۷	۶۹۷,۳۰	۶,۴۶
۱۶	۱۸۳,۷۴	۲۵۶,۳۵	۷۷۴,۴۶	۵,۹۰
۱۷	۱۹۷,۲۷	۲۷۱,۹۴	۸۱۹,۱۷	۵,۵۷
۱۸	۲۱۲,۲۳	۲۸۸,۵۷	۸۶۷,۱۷	۵,۲۳
۱۹	۲۲۸,۳۳	۳۰۵,۸۳	۹۱۷,۳۴	۴,۸۹
۲۱	۲۶۲	۳۴۰,۳۰	۱۰۱۸,۴۲	۴,۲۳
۲۲	۲۷۸,۴۱	۳۵۶,۵۱	۱۰۶۶,۲۴	۳,۹۵
۲۳	۲۹۳,۷۷	۳۷۱,۴۵	۱۱۱۰,۴۱	۳,۷۰
۲۴	۳۰۷,۶۳	۳۸۴,۸۳	۱۱۴۹,۹۵	۳,۵۱
۲۶	۳۲۹,۸۷	۴۰۶,۲۴	۱۲۱۳,۱۶	۳,۲۵
۲۷	۳۳۸,۱۲	۴۱۴,۲۵	۱۲۳۶,۷۵	۳,۱۹
۲۸	۳۴۴,۵۶	۴۲۰,۶۲	۱۲۵۵,۴۰	۳,۱۸
۲۹	۳۴۹,۳۵	۴۲۵,۴۹	۱۲۶۹,۵۹	۳,۱۷
۳۰	۳۵۲,۶۷	۴۲۹,۰۶	۱۲۷۹,۸۹	۳,۱۵

جدول ۱۸. درصد حساسیت به پارامتر چسبندگی.

نشست	نیروی محوری	نیروی برشی	لنگر خمشی
۱۳	۳	۶	۶

جدول ۱۹. درصد حساسیت به پارامتر عمق تونل.

نشست	نیروی محوری	نیروی برشی	لنگر خمشی
۷۲	۸۳	۹۷	۶۹

جدول ۲۰. درصد حساسیت به پارامتر قطر تونل.

نشست	نیروی محوری	نیروی برشی	لنگر خمشی
۸۴	۵۶	۵۴	۷۶

۵. با افزایش قطر تونل نیز از ۳ تا ۱۰ متر، نشست از ۰/۹ به ۵/۸۷ میلی‌متر، نیروی محوری از ۵۲۴ به ۱۱۹۰ کیلونیوتن، نیروی برشی از ۱۷۹ به ۳۹۱ کیلونیوتن و لنگر خمشی از ۷۲ به ۳۰۳ کیلونیوتن در متر افزایش یافته‌اند که این امر حاکی از حساسیت تحلیل‌ها به پارامتر قطر تونل است.
۶. با افزایش عمق قرارگیری تونل تا ۳۰ متر، نشست نسبی سطح زمین به میزان ۷۲٪ کاهش یافته است، ولی نیروی محوری از ۲۰۶ به ۱۲۷۹ کیلونیوتن، نیروی برشی از ۹ به ۴۲۹ کیلونیوتن، و لنگر خمشی از ۱۰۶ به ۳۵۲ کیلونیوتن در متر به دلیل افزایش سربار افزایش یافته‌اند.
۷. براساس نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که پارامتر قطر تونل بیشترین حساسیت را به نشست در مقایسه با سایر پارامترها دارد. همچنین پارامتر عمق تونل، بیشترین حساسیت را به نیروی محوری نسبت به پارامترهای دیگر داشته است. پارامترهای عمق و قطر تونل به ترتیب بیشترین حساسیت‌ها را نسبت به نیروی برشی و کمترین حساسیت را پارامتر چسبندگی داشته‌اند. در خصوص لنگر خمشی نیز می‌توان دریافت زاویه‌ی اصطکاک و مدول کشسانی تأثیر فراوانی دارند، اما بیشترین تأثیر مربوط به قطر و عمق تونل است. این در حالی است که چسبندگی حساسیت زیادی به تغییرات لنگر خمشی نشان نمی‌دهد.
۳. براساس نتایج حاصل از محاسبات شبکه، با افزایش زاویه‌ی اصطکاک از ۲۶ تا ۴۱ درجه که دامنه‌ی بزرگی از خاک‌ها را شامل می‌شود، نشست ۲۱٪ افزایش را نشان می‌دهد. این در حالی است که نیروی برشی، ۱۱٪ و لنگر خمشی، ۳۰٪ افزایش یافته‌اند. به عبارت دیگر، پارامتر زاویه‌ی اصطکاک به جز در نیروی محوری، در بقیه‌ی پارامترها می‌تواند تأثیر قابل توجهی داشته باشد. لذا می‌توان دریافت که حساسیت تحلیل‌ها به پارامتر زاویه‌ی اصطکاک نسبت به چسبندگی خاک بیشتر بوده و افزایش پارامتر مذکور در مقایسه با پارامتر چسبندگی خاک، به مراتب تأثیر بیشتری در نیروهای داخلی تونل و نشست سطحی داشته است.
۴. در تحلیل‌های صورت‌گرفته در مطالعه‌ی حاضر، تغییرات مدول کشسانی از ۱۰ تا ۳۰ مگاپاسکال بررسی شد و براساس نتایج به دست آمده، نشست ۲۸٪، نیروی برشی ۱۰٪ و لنگر خمشی ۱۵٪ کاهش یافته‌اند، ولی تأثیر زیادی در نیروی محوری مشاهده نشده است.

## منابع (References)

- Ling, M., Lieyun, D. and Hanbin, L. "Non-Linear description of ground settlement over twin tunnels in soil", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **42**, pp. 144-151 (2014).
- Qian, F., Qimin, T., Dingli, Z. and et al. "Ground Closely - space twin tunnels with different geometric arrangements", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **51**, pp. 144-151 (2016).
- Dindarloo, S. and Siami-Irdemoosa, E. "Maximum Surface settlement based classification shallow tunnels in soft ground", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **49**, pp. 230-327 (2015).
- Xiongyao, X., Yubing, Y. and Mei, J. "Analysis of ground surface settlement induced by the construction of a large-diameter shield-driven tunnel in shanghai, China", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **51**, pp. 120-132 (2016).
- Shui-Long, S., Huai, N., Yu-Jun, C. and et al. "Long-Term in soft deposit of shanghai", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **40**, pp. 309-323 (2014).
- Chakeri, H., Yilmaz, O. and Bahtiyar, U. "Effects of important factors on surface settlement prediction for metro tunnel excavated", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **36**, pp. 14-23 (2013).
- Ovidio, J., Santos, Jr. and tarcisio, B. "Artificial neural networks analysis o Paulo subway tunnel settlement data", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **23**(5), pp.481-491 (2008).
- Suwansawat, S. and Herbert, H. "Artificial neural networks for predicting the maximum surface settlement caused by EPB shield tunneling", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **21**(2), pp. 133-150 (2006).
- Kim, C., Bae, G., Hong, S. and et al. "Neural network based prediction of ground surface settlements due to tunneling", *Computers and Geotechnics*, **28**(6-7), pp. 517-547 (2001).
- Azadi, M., Pourakbar, S. and Kashfi, A. "Assessment of optimum settlement of structure adjacent urban tunnel by using neural network methods", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **37**, pp. 1-9 (2013).
- Adeli, H. "Neural networks in civil engineering", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **16**, pp. 126-142 (2001).
- Katebi, H. and Sadain, M. "Analysis and prediction of surface settlement due tunneling", *Transportation Engineering*, **4**, pp. 67-85 (2010).
- Rezaee, M. and Nasehe, E. "The effect of structural geometry on surface settlement caused by the tunneling", 11th International Congress on Civil, Architecture and Urban Development, pp. 1-9 (2011)