

بررسی عددی نشست سطح زمین در تونل‌زنی دایره‌ای تحت اثر هم‌زمان تغییرات مشخصات هندسی تونل و مکانیکی خاک در محیط اشباع و پیش‌بینی آن در شبکه عصبی مصنوعی

واحد قیاسی^{۱*} و مهدی کوشکی^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۲۷ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۸۰/۱۴	
واژگان کلیدی: پیش‌بینی نشست سطح زمین، تحلیل المان محدود تونل، شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون.	<p>رشد روزافزون جمعیت در شهرهای بزرگ و وجود معضل ترافیک، مهندسان را هرچه بیشتر به ساخت تونل‌های زیرزمینی، برای سهولت در رفت‌وآمد سوق داده است. از این رو، با ساخت تونل‌های زیرزمینی، مشکلات ایجادشده به‌دلیل این ساخت‌وساز در اطراف تونل یا نزدیک سطح زمین همواره مورد توجه بوده است. تغییرشکل و نشست سطح زمین به‌سبب عملیات تونل‌زنی و همچنین جابه‌جایی تاج، دیواره‌ها و کف تونل، ازجمله عوامل ناپایدارکننده تونل به حساب می‌آیند. با توجه به اهمیت موضوع، محققان زیادی روی شکل و نوع جابه‌جایی سطح زمین و مقدار آن با توجه به عوامل مختلف بحث کرده‌اند. با این حال هنوز رابطه‌ای دقیق برای پیش‌بینی نشست سطح زمین با در نظر گرفتن تمامی پارامترهای مؤثر از جمله پارامترهای هندسی تونل و مکانیکی خاک ارائه نشده است. در این پژوهش به بررسی عددی و پارامتریک نشست سطح زمین در محیط خاک اصطکاکی-چسبنده و در حالتی که حفاری در محیط اشباع صورت می‌گیرد، با بهره‌گیری از روش تحلیل المان محدود در نرم‌افزار ABAQUS پرداخته شده است. با در نظر گرفتن مقادیر مختلف عمق به قطر تونل در شرایط مختلف برای چسبندگی خاک، زوایای اصطکاک داخلی و ضرایب نفوذپذیری و تغییرات هم‌زمان آن‌ها، تأثیر این متغیرها بر نشست سطح زمین مورد بررسی قرار گرفته است. سپس با استفاده از ایجاد شبکه عصبی مصنوعی از نوع پرسپترون چندلایه در نرم‌افزار MATLAB و با استفاده از نتایج تحلیل نرم‌افزار آباکوس به‌عنوان ورودی شبکه، به پیش‌بینی مقادیر نشست سطح زمین در سایر حالات پرداخته شده است. درنهایت، پتانسیل قابل توجه شبکه عصبی با مقدار ضریب همبستگی ۰/۹۸ در پیش‌بینی مقادیر نشست نشان داده شده است.</p>

۱-مقدمه^۱

با افزایش جمعیت و نیاز به توسعه حمل‌ونقل، ایجاد فضاهای زیرزمینی و گذرگاه‌های مختلف نظیر خطوط مترو و نیز توجه به تراکم ساختمان‌ها در سطح زمین و مشکلات خاص مربوط به آن، مورد توجه دست‌اندرکاران این حوزه قرار گرفته است. جابه‌جایی و نشست سطح زمین ناشی از

تونل‌زنی، یکی از مشکلات و مسائل اجتناب‌ناپذیر در حوزه مهندسی تونل به حساب می‌آید. اولین بار مارتوس در سال ۱۹۵۸ و بعد از آن، پک در سال ۱۹۶۹ مطالعاتی را برای مدل‌سازی، محاسبه و پیش‌بینی نشست سطح زمین در هنگام تونل‌زنی انجام دادند. پک مدل خود را با توجه به مدل توزیع نرمال معکوس مطرح کرد. مطابق این نظریه،

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: v.ghiasi@malayeru.ac.ir

۱. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه ملایر

۲. کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه ملایر

تأثیرگذار روی پارامتر مدّ نظر، باعث استفاده هرچه بیشتر از شبکه‌های عصبی در پژوهش‌های مختلف شده است. در این پژوهش، با ترکیب دو روش عددی و استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، به پیش‌بینی نشست سطح زمین و تاج تونل، ناشی از تونل‌زنی پرداخته می‌شود [۲۴-۲۷].

عوامل متعددی در نشست سطح زمین ناشی از تونل‌زنی دخیل هستند که به نظر می‌رسد بخشی از مهم‌ترین عوامل عبارت‌اند از: هندسه تونل، عمق تونل، وضعیت زمین و مشخصات مکانیک خاک تونل. در این پژوهش، نشست سطح زمین متأثر از تغییرات نسبت عمق به قطر تونل، زاویه اصطکاک داخلی خاک، چسبندگی و ضریب نفوذپذیری خاک، مورد بررسی قرار گرفته است. سپس با انتقال داده‌های به‌دست‌آمده در نرم‌افزار MATLAB و با ایجاد یک شبکه پرسپترون چندلایه، مدل پیش‌بینی نشست سطح زمین طراحی شده است.

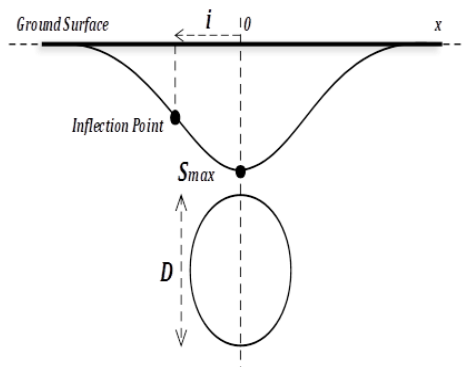
۲- تعریف مسئله

مدل ایجادشده با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS و به‌صورت دوبعدی که توان تحلیل بالایی در محیط‌های خاکی دارد، در ابعاد ۸۰*۴۰ ساخته شد. نوع تحلیل استفاده‌شده در این مدل، به‌صورت تحلیل استاندارد است. شکل کلی مدل در نظر گرفته‌شده در این پژوهش، در شکل (۲) نشان داده شده است. این مدل شامل یک خاک همگن از نوع اصطکاک‌کی-چسبنده است. پارامترهای بررسی شده در این پژوهش در جدول ۱ آورده شده است. سایر پارامترهای هندسی تونل و مکانیکی خاک، نظیر قطر تونل و مدول الاستیسیته ثابت فرض شده‌اند. در این پژوهش در هر کدام از سه حالت نشان داده شده در شکل (۱)، با توجه به اطلاعات جدول ۱، تحلیل‌های جداگانه صورت گرفته است. مدل رفتاری در نظر گرفته شده برای خاک مدل موهر-کلمب انتخاب گردیده است. مش ایجادشده برای مقدار $H/D=1$ در شکل (۳) آمده است. مدل ایجادشده به ۵۷۰۰ المان چهار گوشه مربعی تقسیم شده است. البته در نقاط نزدیک به محیط تونل، المان‌ها از نوع مستطیلی انتخاب شده‌اند تا تحلیل دقیق‌تری از این ناحیه به دست آید. در دو حالت $H/D=1$ و $H/D=2$ سعی شده علاوه بر هندسه المان، تعداد المان‌ها نیز با تعداد المان‌ها در حالت اول برابر یا نزدیک به آن باشد. در محیط اطراف تونل، از المان‌های ریزتر استفاده شده تا دقت تحلیل بالاتر

نشست زمین با توجه به شکل (۱) و از رابطه ۱ به دست می‌آید [۱ و ۲].

$$S_v = S_{max} e^{\frac{-x^2}{2l^2}} \quad (1)$$

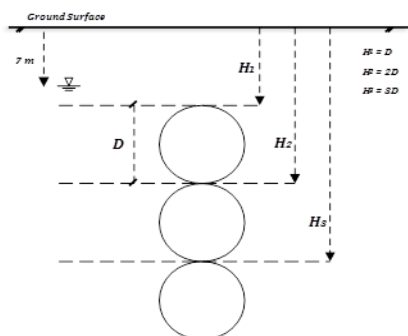
که در این رابطه، S_v نشست عمودی سطح زمین در هر نقطه، S_{max} بیشینه نشست سطح زمین روی محور تونل، i فاصله افقی محور تونل از نقطه عطف منحنی حفره نشست و x فاصله افقی از محور تونل است.



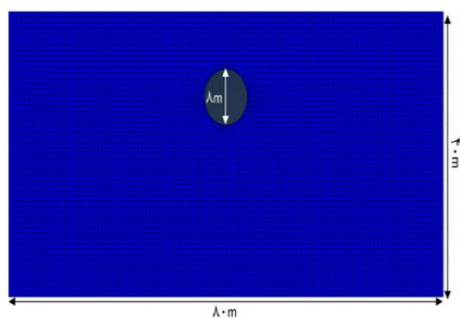
شکل ۱- مقطع نشست عرضی در رابطه پک ۱۹۶۹

بعد از آن، محققان زیادی به بررسی و پیش‌بینی نشست ناشی از تونل‌زنی، با تغییر و بررسی پارامترهای معرفی‌شده توسط پک و همکارانش پرداختند. پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه را می‌توان به چهار دسته تقسیم کرد: دسته اول، پژوهش‌های تحلیلی هستند که با بهره‌گیری از روابط موجود در مکانیک خاک و سنگ و ترکیب آن با مبانی و روابط ریاضی به پیش‌بینی مقدار نشست در تونل‌های دایره‌ای تک و دوقلو پرداخته‌اند [۳-۱۰]. پژوهش‌های تجربی و آزمایشگاهی در دسته دوم جای می‌گیرند. بیشتر مطالعات در این حوزه با ایجاد المان تونل و محیط اطراف آن در مقیاس بسیار کوچک در محیط آزمایشگاهی نسبت به المان واقعی و بهره‌گیری از سیستم سانتریفیوژ انجام گرفته است [۱۱-۱۳]. بخش بعدی پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه، مطالعات عددی هستند. بیشتر مطالعات عددی با استفاده از تکنیک‌ها و روش‌های المان محدود و تفاضل محدود، نشست‌ها و جابه‌جایی‌های ناشی از تونل‌زنی را مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۴-۲۳]. در نهایت، پژوهش‌های توسعه‌یافته با هوش مصنوعی و شبکه‌های عصبی است که امروزه در بیشتر مطالعات مورد استفاده قرار می‌گیرند. دقت و سرعت بالای محاسبات در پیش‌بینی پارامترهای مختلف با در نظر گرفتن حداکثر متغیرهای مستقل و

در حالی که هیچ شرایط مرزی به مدل اختصاص نیابد (مرز آزاد)، شرایط طبیعی اعمال می‌شود؛ یعنی نیروهای از پیش تعیین شده برابر با صفر در نظر گرفته می‌شوند و مرز آزادانه جابه‌جا می‌گردد. برای اجتناب از وضعیتی که در آن جابه‌جایی‌های نامعین ایجاد شود، نرم‌افزار به صورت اتوماتیک مرز استاندارد تعیین می‌کند، به صورتی که با تعیین نقاط مرجع، نرم‌افزار مرز افقی را کاملاً صلب کرده، با ایجاد مرزهای غلتکی در جهت قائم، امکان جابه‌جایی و نشست را به خاک می‌دهد.



شکل ۲- شمای کلی مدل تونل ساخته‌شده در سه حالت عمقی



شکل ۳- مش‌بندی مدل ساخته‌شده در نرم‌افزار آباکوس

برود. همچنین ابعاد کلی مدل طوری انتخاب شده که تأثیر مرزهای جانبی و پایینی به حداقل مقدار ممکن برسد. سطح آب زیرزمینی در تمامی حالات، ۷ متری سطح زمین انتخاب شده است؛ یعنی در همه تحلیل‌های صورت گرفته، جبهه حفاری تونل در حالت اشباع قرار دارد. خواص مکانیکی خاک نظیر ϕ و C و تنش‌های درجا، با توجه به اشباع بودن محیط در حالت مؤثر فرض شده‌اند. همچنین برای محاسبه ضریب جانبی در خاک، از رابطه ۲ استفاده شده است.

$$k = 1 - \sin \phi \quad (2)$$

شایان ذکر است مقدار نشست سطح زمین به صورت آبی و بلافاصله پس از حفاری برداشت شده است. تحلیل و اندازه‌گیری این نشست‌ها بدون در نظر گرفتن ابزار و وسایل برای پایداری تونل مورد بررسی قرار گرفته است. کلیه مقادیر نشست بلافاصله بعد از حفاری به دست آمده است.

یاماموتو در سال ۲۰۱۱ به منظور تحلیل پایداری تونل با استفاده از روش مرز بالا و پایین که از روش‌های تحلیل خمیری به حساب می‌آید، با همین شیوه به اعدادی با عنوان عدد پایداری رسید [۲۸]. بعد از آن، شیو در سال ۲۰۱۴ به روشی مشابه به تحلیل نشست ناشی از تونل‌زنی پرداخت و از روش یاماموتو در بهره‌گیری از روش مرز بالا و پایین استفاده کرد [۲۹]. تفاوت پژوهش حاضر با روش‌های ذکرشده، در نظر گرفتن فشار آب حفره‌ای و اشباع بودن خاک در زمان انجام تحلیل است. به‌طور کلی، تمام مرزها در هر جهت باید شرایط مرزی بر آن‌ها اعمال شده باشد.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی خاک و پارامترهای استفاده‌شده

پارامترها	مقادیر استفاده‌شده	نماد و واحد اندازه‌گیری
وزن مخصوص خشک	۱۷	$\gamma_d (KN/m^3)$
وزن مخصوص اشباع	۲۰/۷	$\gamma_{sat} (KN/m^3)$
مدول الاستیسیته	۵۰۰۰	$E (kPa)$
ضریب نفوذپذیری	1×10^{-2} - 1×10^{-5} - 1×10^{-8}	$k (m/s)$
زاویه اصطکاک داخلی	۴۵، ۴۰، ۳۵، ۳۰، ۲۰	$\phi (-)$
چسبندگی	۸۰، ۶۰، ۴۰، ۲۰	$C (kPa)$
ضریب پواسون	۰/۳	$\nu (-)$

جدول ۲- نشست سطح زمین در تحلیل‌های صورت‌گرفته

	ϕ'	H/D = ۱					H/D = ۲					H/D = ۳				
		۲۰°	۳۰°	۳۵°	۴۰°	۴۵°	۲۰°	۳۰°	۳۵°	۴۰°	۴۵°	۲۰°	۳۰°	۳۵°	۴۰°	۴۵°
$k = 1 * 10^{-7}$ (m/s)	KPa۲۰	۳۴/۳۵	۳۲/۷۴	۲۸/۰۴	۲۶/۵۷	۲۶/۲۱	۳۹/۳۷	۳۲/۳۶	۲۲/۰۸	۲۱/۲۶	۲۱/۰۶	۳۳/۵۷	۲۲/۸۳	۲۱/۱۲	۲۰/۱۹	۱۹/۷۷
	KPa۴۰	۳۸/۲۱	۱۸/۰۷	۱۷/۶۵	۱۷/۶۱	۱۷/۸۱	۲۳/۳۷	۲۳/۹۷	۱۸/۳۷	۱۸/۰۷	۱۸/۰۴	۲۴/۷۴	۱۹/۸۴	۱۸/۸۷	۱۸/۳۳	۱۸/۰۸
	KPa۶۰	۷۴/۱۵	۱۵/۲۱	۱۵/۳۲	۱۵/۵۶	۱۵/۹۱	۱۸/۵۱	۱۹/۰۷	۱۶/۵۳	۱۶/۵۲	۱۶/۵۳	۲۰/۸۴	۱۸/۱۳	۱۷/۵۷	۱۷/۲۶	۱۷/۱۱
	KPa۸۰	۵۱/۱۵	۱۳/۸۱	۱۴/۱۰	۱۴/۴۵	۱۴/۸۵	۱۶/۰۴	۱۶/۷۶	۱۵/۴۵	۱۵/۴۵	۱۵/۷۸	۱۸/۶۳	۱۷/۰۳	۱۶/۷	۱۶/۵۱	۱۶/۴۴
$k = 1 * 10^{-8}$ (m/s)	KPa۲۰	۳۲/۲۹	۲۵/۶۴	۲۴/۳۸	۲۲/۳۸	۲۱/۸۸	۳۸/۹۲	۲۳/۷۹	۲۱/۹	۲۱/۰۷	۲۰/۸۶	۳۳/۳۶	۲۲/۷۱	۲۱	۲۰/۰۷	۱۹/۶۲
	KPa۴۰	۰۶/۲۱	۱۷/۸۸	۱۷/۵۲	۱۷/۳۸	۱۷/۵۵	۲۳/۲۴	۱۸/۹۶	۱۸/۲۵	۱۷/۹۶	۱۷/۷۶	۲۴/۶۲	۱۹/۷۴	۱۸/۷۷	۱۸/۲۴	۱۷/۹۵
	KPa۶۰	۱۵/۵۸	۱۵/۰۴	۱۵/۲۴	۱۵/۳۸	۱۵/۷	۱۸/۳۹	۱۶/۶۶	۱۶/۴۱	۱۶/۴	۱۶/۴	۲۰/۷۴	۱۸/۰۴	۱۷/۴۷	۱۷/۱۷	۱۷/۰۱
	KPa۸۰	۱۳/۴	۱۳/۶۷	۱۳/۹۳	۱۴/۳	۱۴/۶۸	۱۵/۹۴	۱۵/۳۵	۱۵/۳۵	۱۵/۴۷	۱۵/۴۸	۱۸/۵۷	۱۶/۹۵	۱۶/۶۱	۱۶/۸۳	۱۶/۳۵
$k = 1 * 10^{-4}$ (m/s)	KPa۲۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	KPa۴۰	۲۰/۱۵	۱۶/۲۸	۱۴/۷	۱۳/۶۰	۱۳/۲۶	۳۲/۷	۲۰/۵۴	۱۷/۶۹	۱۵/۳	۱۴/۴۲	۳۷/۵۷	۲۳/۶۲	۲۰/۱۵	۱۷/۵۲	۱۵/۸
	KPa۶۰	۱۳/۱۵	۱۱/۶	۱۱/۵	۱۱/۷	۱۱/۵	۱۹/۴۱	۱۴/۴۹	۱۳/۴۱	۱۲/۶۹	۱۱/۶۵	۲۵/۲۱	۱۷/۸۷	۱۵/۸۵	۱۴/۳۲	۱۳/۰۵
	KPa۸۰	۹/۶۴	۱۰	۱۰/۵	۱۰/۸	۱۱/۲۲	۱۳/۵۱	۱۱/۹۱	۱۱/۴	۱۰/۹۹	۱۰/۹۴	۱۸/۹۶	۱۴/۷	۱۳/۴۱	۱۲/۷۳	۱۲/۰۲

نفوذپذیری در خاک، نشست سطح زمین ناشی از تونل‌زنی کاهش داشته است. این روند در مقادیر به‌دست‌آمده برای $H/D = 1$ به‌وضوح مشاهده می‌شود.

نتایج به‌دست‌آمده برای $H/D = 2$ و $H/D = 3$ در بیشتر موارد نشان‌دهنده همین روند است. با افزایش عمق، هرچه زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی در خاک بیشتر شده، رابطه عکس بین ضریب نفوذپذیری در خاک و نشست سطح زمین، نمود بیشتری داشته است.

شایان ذکر است در زوایای اصطکاک داخلی کمتر، این رابطه صادق نیست، به‌طوری که برای مقادیر مختلف نشست با ضریب نفوذپذیری، نشست سطح زمین نسبت به مقادیری که زوایای اصطکاک داخلی بیشتری دارند، مقدار بیشتری نسبت به نشست برای سایر مقادیر با ضریب نفوذپذیری کمتر داشته است. همچنین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده برای ، با نفوذ در عمق زمین، هرچه ضریب نفوذپذیری در خاک بیشتر بوده، مقدار نشست سطح زمین نیز افزایش داشته است که البته با افزایش هرچه بیشتر

در این پژوهش، تونل شهری با سرباری برابر صفر در سطح زمین و مقدار نسبت تخلخل برای کل مدل با توجه به وزن مخصوص آن و مقدار چگالی وزن دانه‌های جامد، برابر با ۰/۵۸ در نظر گرفته شده است. تحلیل صورت‌گرفته در دو مرحله انجام شده است. مرحله اول شامل وارد کردن اطلاعات لازم به نرم‌افزار و ایجاد شرایط مرزی مناسب و اعمال فشار آب حفره‌ای و تنش‌های مؤثر و درجا در مدل خاک و مرحله بعد شامل انجام عملیات حفاری است که بلافاصله بعد از حفاری مقادیر نشست در سطح زمین اندازه‌گیری شده است.

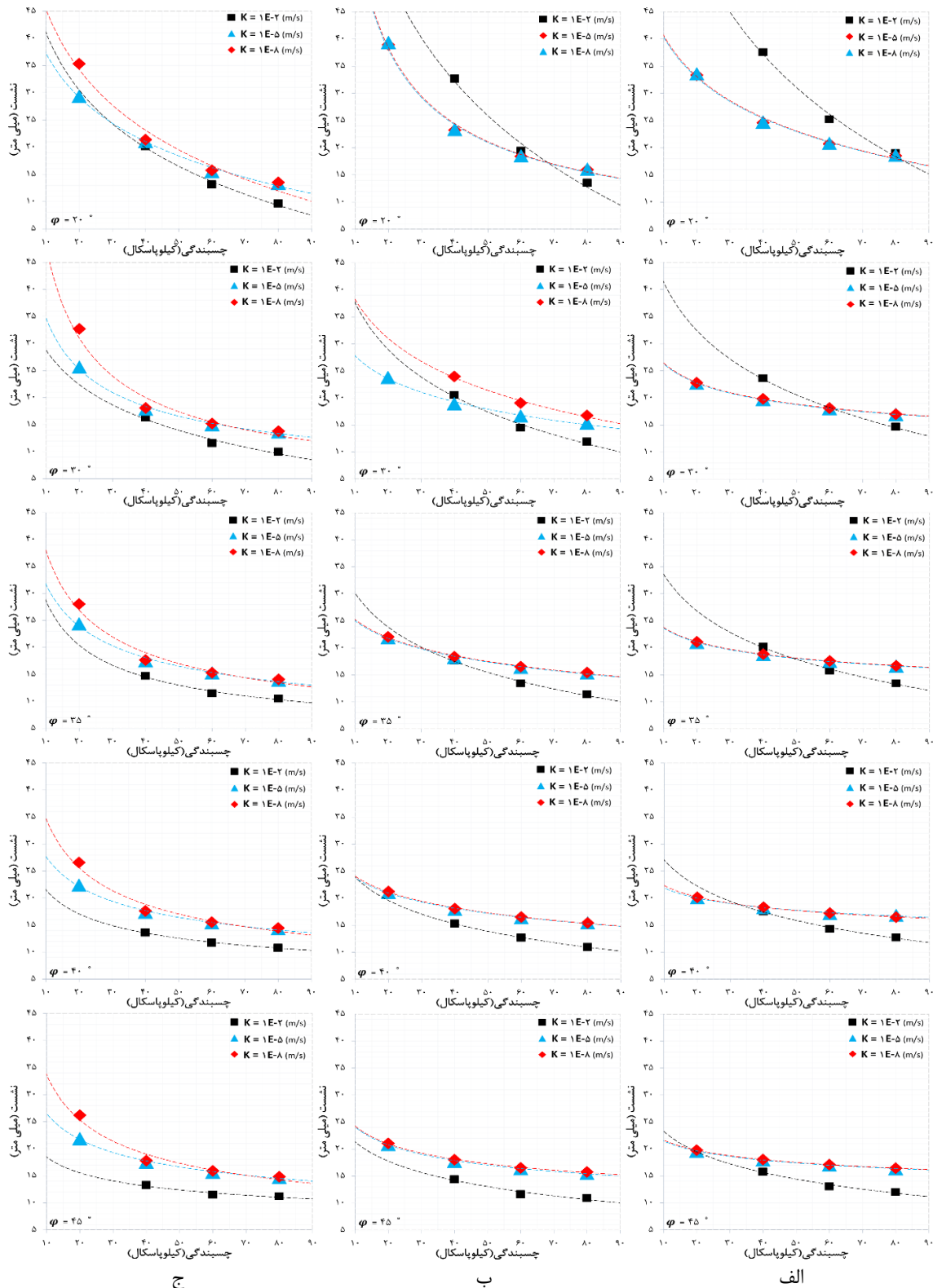
۳- آنالیز المان محدود و نتایج به‌دست‌آمده

۳-۱- بررسی تأثیر ضریب نفوذپذیری

یکی از اهداف اصلی این پژوهش، بررسی تأثیر میزان ضریب نفوذپذیری خاک و فشار آب حفره‌ای روی مقدار نشست سطح زمین و جابه‌جایی خاک در اطراف محیط تونل بوده است. با بررسی تغییرات ضریب نفوذپذیری در خاک، با توجه به جدول ۲ و نمودارهای شکل (۴)، با افزایش ضریب

به دست آمده در $H/D=2$ و $H/D=3$ تقریباً با هم برابر است و روند مشابهی را دنبال می کنند. به نظر می رسد کاهش میزان نفوذپذیری بیش از این مقادیر، تأثیر چندانی بر نشست سطح زمین نخواهد داشت.

زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی در خاک، شدت این روند، کمتر و به روند مشابه برای سایر اعماق نزدیک شده است. نکته دیگر اینکه با توجه به مقادیر جدول ۲ میزان نشست برای مقادیر و در همه حالات، به ویژه برای مقادیر



شکل ۴- نمودار نشست سطح زمین برای ضرایب مختلف نفوذپذیری در سه عمق (الف) $H/D=1$ ، (ب) $H/D=2$ ، (ج) $H/D=3$

۳-۲- بررسی تأثیر تغییرات چسبندگی در خاک

با بررسی مقادیر به‌دست‌آمده از جدول ۲ و نمودارهای شکل (۵)، افزایش میزان چسبندگی در تمامی حالات و تحلیل‌های صورت‌گرفته، باعث کاهش میزان نشست سطح زمین شده است. البته همان‌طور که در نمودارهای شکل (۵) مشخص شده است، هرچه زاویه اصطکاک داخلی خاک افزایش یافته، نقاط متناظر با آن‌ها به مرکز نمودار نزدیک‌تر شده که نشان‌دهنده کاهش نشست در سطح زمین، هم‌زمان با افزایش چسبندگی در خاک است. همچنین می‌توان گفت روند اختلاف نشست با تغییر هم‌زمان چسبندگی در خاک و زاویه اصطکاک داخلی در اعماق کمتر، یعنی برای مقادیر $H/D=1$ و $H/D=2$ نسبت به حالت دیگر نمود بیشتری دارد.

۳-۳- بررسی تأثیر تغییرات عمق

در این بخش، تأثیر هم‌زمان پارامترهای هندسی قطر عمق تونل، به‌طور هم‌زمان دیده شده و مورد بررسی قرار گرفته است. رفتار سطح زمین در اثر تونل‌زنی در اعماق مختلف یکسان نیست. همان‌طور که در جدول ۲ و نمودارهای شکل (۶) نشان داده شده است، نمی‌توان به‌طور قطع درباره تأثیر عمق تونل‌زنی روی نشست سطح زمین اظهار نظر کرد؛ یعنی نشست سطح زمین در اعماق مختلف کاملاً وابسته به پارامترهای مقاومت برشی خاک است. زمانی که ضریب نفوذپذیری در بیشترین مقدار و زاویه اصطکاک داخلی خاک در کمترین مقدار خود قرار دارند، نشست سطح زمین تابع عمق است که با افزایش عمق، نشست سطحی به‌طور محسوس افزایش داشته است؛ اما رفته‌رفته با افزایش پارامترهای مقاومت برشی خاک، وابستگی نشست سطح زمین به عمق کمتر می‌شود تا جایی که وقتی این پارامترها به بیشترین مقدار خود می‌رسند، می‌توان گفت نشست سطح زمین مستقل از عمق حفاری است. در عین حال، با کاهش ضریب نفوذپذیری در خاک، تقریباً در تمامی حالات، زمانی که زاویه اصطکاک داخلی در بیشترین مقدار خود قرار دارد، مقدار نشست سطح زمین، مستقل از عمق است و در تمام اعماق، مقدار نشست ثابتی هم‌گرا شده است. به نظر می‌رسد افزایش بیشتر زاویه اصطکاک داخلی در این اعماق تأثیر چندانی روی نشست نخواهد داشت؛ اما زمانی که چسبندگی خاک و ضریب نفوذپذیری آن در کمترین حالت خود قرار می‌گیرد، میزان نشست سطحی به‌دست‌آمده

با نزدیک شدن به سطح زمین افزایش داشته و با نفوذ در عمق، روند کاهشی یافته است.

۳-۴- بررسی تأثیر زاویه اصطکاک داخلی خاک

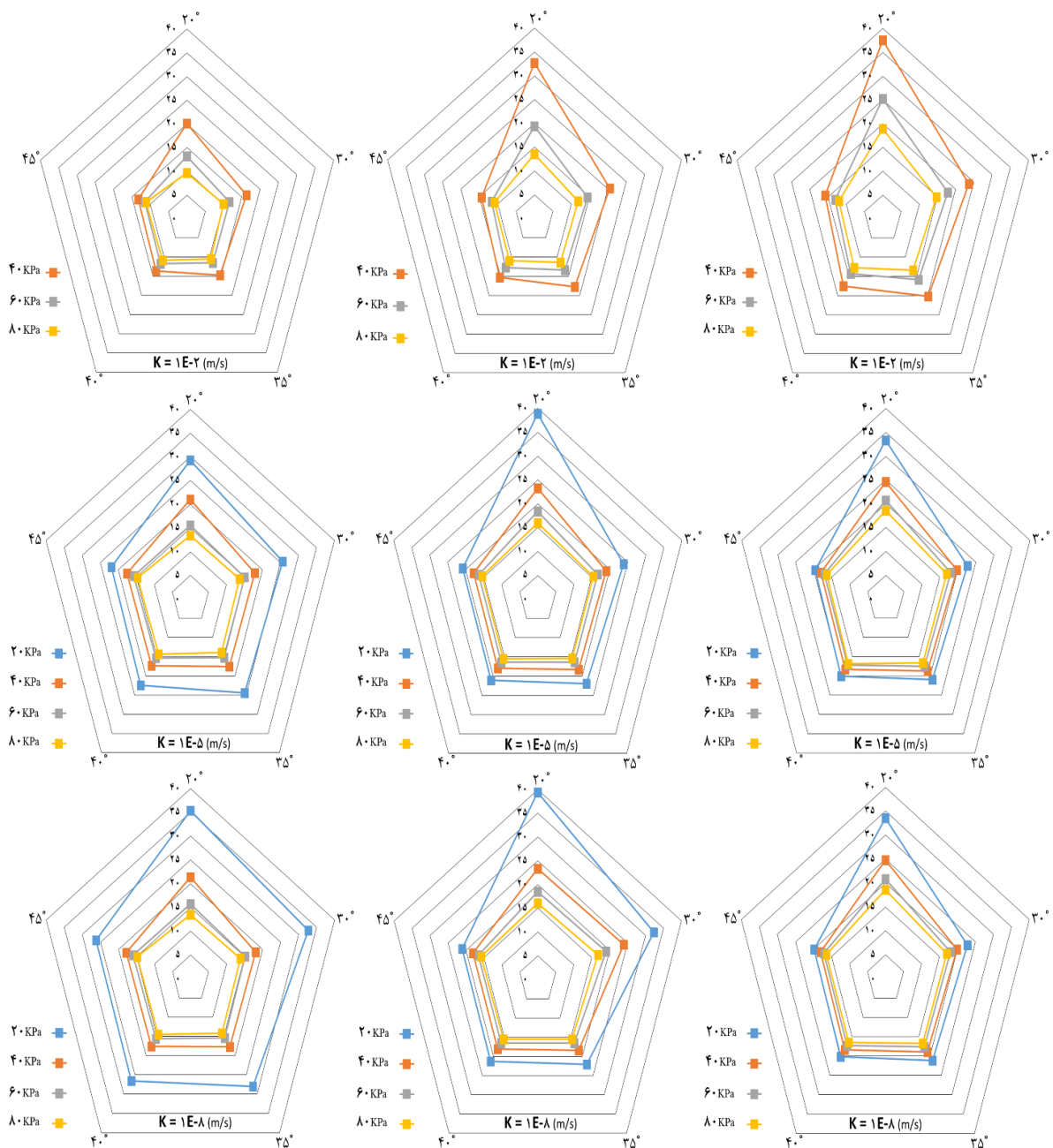
انتظار می‌رفت با افزایش زاویه اصطکاک داخلی و درگیری هرچه بیشتر ذرات خاک، میزان نشست سطح زمین ناشی از تونل‌زنی کاهش یابد. مطابق نتایج جدول ۲ و شکل (۶)، با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک، در بیشتر حالات، این روند کاهشی برای نشست سطحی به دست آمده است. البته هرچه میزان چسبندگی خاک به‌طور هم‌زمان افزایش یافته، این روند کاهشی کمتر شده است و در تحلیل‌هایی که با چسبندگی بزرگ‌تر صورت گرفته، اختلاف بیشترین و کمترین مقدار نشست سطح زمین برای مقادیر مختلف زاویه اصطکاک داخلی کمتر بوده است، به‌طوری که در بعضی از حالات برای چسبندگی‌های بزرگ‌تر از ۴۰ کیلوپاسکال، با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک، نشست سطح زمین افزایش داشته یا ثابت بوده است که این روند برای تونل‌های نزدیک‌تر به سطح زمین بیشتر مشاهده شده است. به‌طور کلی کاهش نشست سطح زمین در اثر افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک برای هر سه مقدار ضریب نفوذپذیری خاک و برای تونل‌هایی با عمق بیشتر مشهود است. در شکل (۷) ماکزیمم مقدار نشست برای هر سه عمق و در سه ضریب نفوذپذیری نشان داده شده است که با افزایش زاویه اصطکاک داخلی، روند کاهشی نشست سطح زمین مشاهده می‌شود.

۴- شبکه عصبی مصنوعی

کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی و مزیت استفاده از آن‌ها در مدل‌سازی‌های عددی، توسط پژوهشگران زیادی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. با توجه به اینکه هدف این پژوهش پیش‌بینی حداکثر نشست سطح زمین بوده، از شبکه عصبی به‌دلیل توانایی بالای ساخت مدل پیش‌بینی، استفاده گردید. همچنین سعی بر آن بوده است تا حداکثر متغیرهای مؤثر بر خاک در هنگام تونل‌زنی که شامل متغیرهای هندسی و مکانیک خاکی بوده‌اند، در مدل ایجادشده به‌عنوان متغیر ورودی مورد استفاده قرار گرفته شوند. در حالت کلی می‌توان گفت شبکه عصبی مصنوعی، مدلی از مغز انسان است، با این تفاوت که سرعت عمل آن به مراتب بالاتر از مغز انسان می‌باشد. شبکه‌های عصبی، ابتدا با تجزیه و تحلیل رابطه میان داده‌ها و سپس

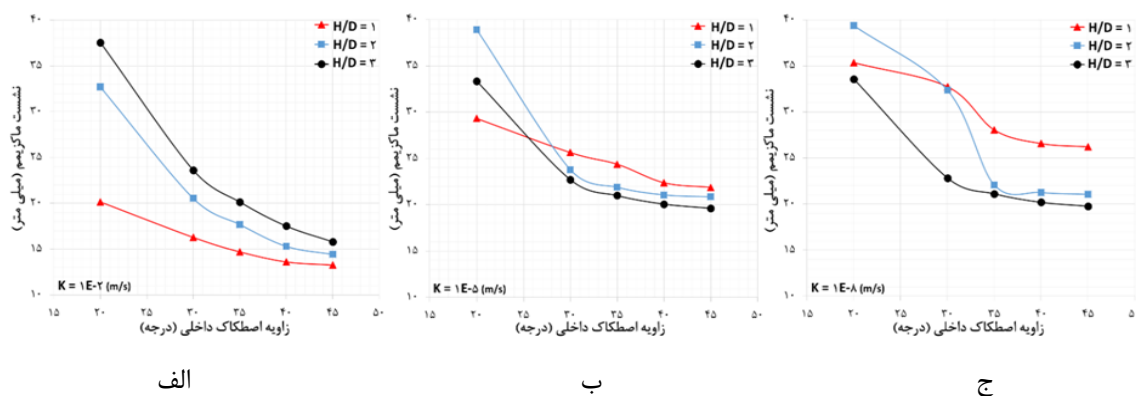
در لایه خروجی، هر گره نشان‌دهنده متغیر یا متغیرهای وابسته است. مغز متفکر هر شبکه عصبی، لایه میانی آن شبکه است. در واقع تمام عملیات‌های ریاضی در این لایه یا لایه‌ها صورت می‌گیرد؛ به این صورت که هر نورون در لایه ورودی از طریق یک رابط یا یال، به تمام نورون‌های لایه میانی (لایه پنهان) متصل می‌شود. هر نورون در لایه میانی، متغیرهای وزن‌دار لایه ورودی را در خود ذخیره و با هم جمع می‌کند [۳۰ و ۳۱].

یادگیری و ذخیره کردن آن در خود، با توان و سرعت بالا به پردازش داده‌ها می‌پردازند. شبکه‌های عصبی مصنوعی که به منظور پیش‌بینی مورد استفاده قرار می‌گیرند، معمولاً شامل یک لایه ورودی، یک لایه خروجی و یک یا چند لایه میانی هستند. شبکه مورد استفاده در این پژوهش، شبکه قدرتمند پرسپترون چندلایه است که توان بالایی در پیش‌بینی متغیر مورد نظر دارد. هر لایه، از گره یا گره‌ها که با نام نورون نیز شناخته می‌شوند، تشکیل شده است. در لایه ورودی، هر گره یک متغیر مستقل را نشان می‌دهد و



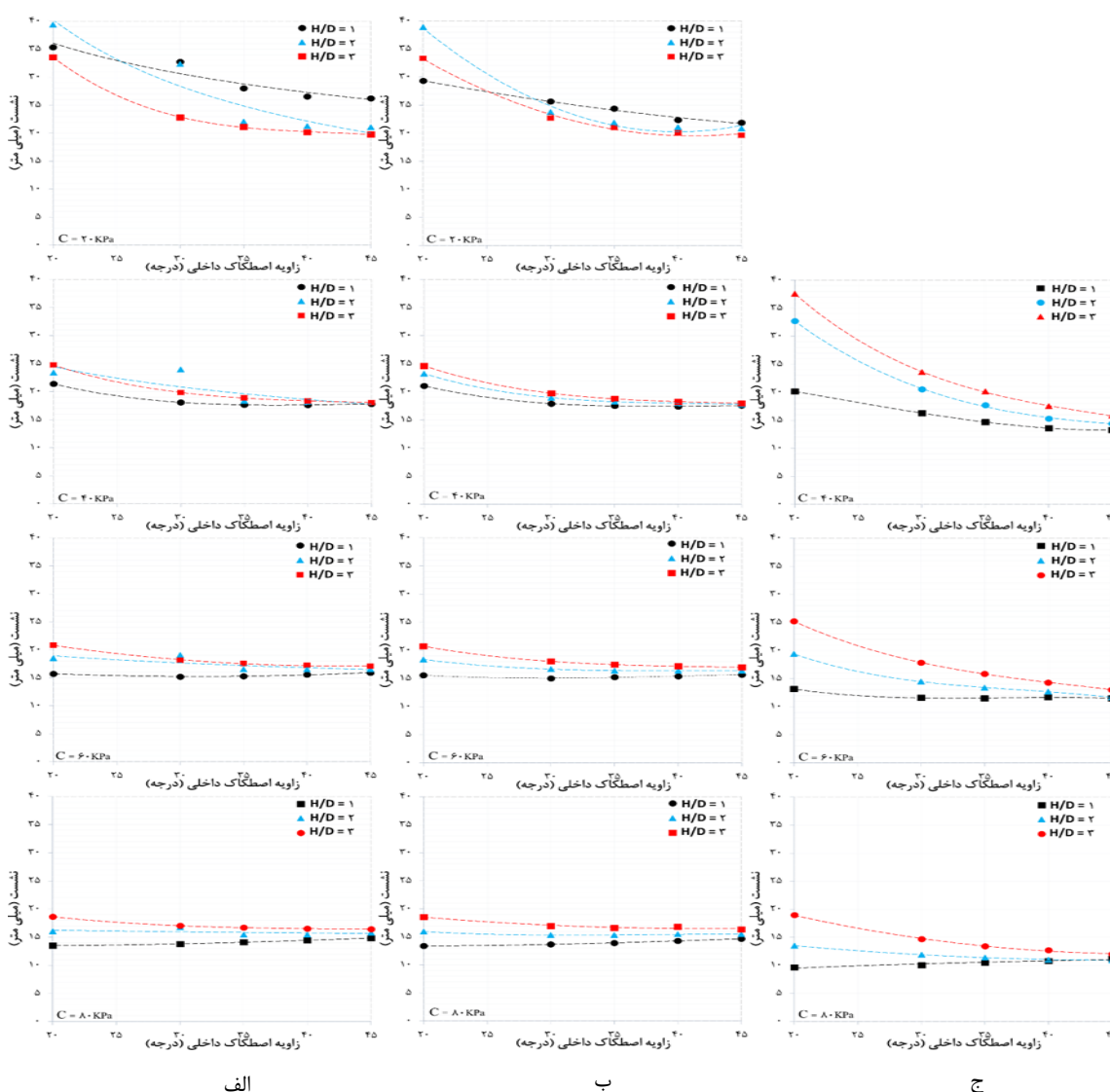
شکل ۵- نمودارهای نشست سطح زمین برای چسبندگی‌های مختلف خاک در سه نسبت عمق به قطرهای مختلف الف) $H/D=1$ ، ب)

$H/D=2$ (ج)، $H/D=3$



شکل ۶- نمودارهای نشست سطح زمین برای سه عمق حفاری تونل با چسبندگی‌های مختلف خاک در سه ضریب نفوذپذیری مختلف

(الف) $k = 1e-2$ ، (ب) $k = 1e-5$ ، (ج) $k = 1e-8$



شکل ۷- نمودار ماکزیمم مقدار نشست سطح زمین برای سه عمق حفاری مختلف تونل در سه ضریب نفوذپذیری مختلف (الف)

(الف) $k = 1e-2$ ، (ب) $k = 1e-5$ ، (ج) $k = 1e-8$

تعیین می‌شود. در سری داده‌هایی که در قسمت آموزش قرار می‌گیرند، پس از آنکه خروجی مربوط به این داده‌ها به دست آمد، این مقدار با مقدار واقعی مقایسه می‌شود و اختلاف آن به عنوان خطای شبکه به حساب می‌آید. سپس این مقدار خطا روی اتصالات وزن دار بین لایه ورودی و میانی به منظور کاهش خطا توزیع می‌شود و این کار آن قدر ادامه می‌یابد تا شبکه به حداقل خطای ممکن برسد. در جدول ۳ متغیرهای لایه ورودی به عنوان متغیرهای مستقل نشان داده شده است. همچنین متغیر لایه خروجی (نشست سطح زمین) به عنوان متغیر وابسته تعیین شده است. در این پژوهش، ساخت مدل پیش‌بینی نشست سطح زمین با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی MLP، پس از به دست آمدن مقادیر نشست در نرم‌افزار آباکوس انجام گردیده که مطابق جدول ۴ مقدار ۷۰ درصد سری داده‌ها به عنوان داده های آموزش، ۱۵ درصد برای مرحله ارزیابی و ۱۵ درصد برای مرحله تست در نظر گرفته شده است. همچنین برای آموزش شبکه و کاهش خطای محاسباتی، از الگوریتم لوبنبرگ-مارکواریت^۴ استفاده شده است. الگوریتم لوبنبرگ-مارکواریت روشی برای یافتن کمینه یک تابع غیرخطی چندمتغیره است که به عنوان یک روش استاندارد برای حل مسئله کمینه مربعات برای توابع غیرخطی درآمده است. شماتیک کلی شبکه طراحی شده در شکل (۸) آورده شده است.

از میان روش‌های مختلف آموزش، به روش پس‌انتشار خطا، الگوریتم لوبنبرگ-مارکواریت، به دلیل همگرایی سریع‌تر در آموزش شبکه‌هایی با اندازه متوسط، برای استفاده در تحقیق حاضر انتخاب شده است. الگوریتم پس‌انتشار خطا، وزن‌های شبکه و مقادیر بایاس را در جهتی تغییر می‌دهد که تابع عملکرد با سرعت بیشتری کاهش یابد.

جدول ۳- اطلاعات مربوط به داده‌های ورودی شبکه عصبی مصنوعی

کل داده‌ها	داده‌های آموزش	داده‌های ارزیابی	داده‌های تست	تعداد متغیر ورودی	تعداد متغیر خروجی	تعداد نورون لایه میانی (پنهان)
۱۷۰	۱۱۸	۲۶	۲۶	۴	۱	۷

سپس یک تابع از پیش تعیین شده که توسط کاربر طراحی و به عنوان تابع فعال‌ساز شناخته می‌شود، با اعمال روی حاصل جمع‌های نورون‌ها، مقدار متغیر خروجی موردنظر را محاسبه می‌کند. در حین ساخت شبکه، برای محاسبه خطای ایجا شده در شبکه و ارزیابی کارکرد بهینه آن در پیش‌بینی متغیر وابسته، از معیار ارزیابی میانگین مربع خطاها^۱ و نیز از معیاری دیگر با عنوان جذر میانگین مربع خطاها^۲ استفاده شده است. این معیار با وضوح بیشتری میزان خطاها را به نمایش می‌گذارد. در واقع هرچه این مقدار، کمتر و به صفر نزدیک‌تر باشد، شبکه پیش‌بینی دقیق‌تری نسبت به پارامتر وابسته دارد. رابطه معیارهای میانگین مربع خطاها و جذر میانگین مربع خطاها در روابط ۳ و ۴ آورده شده است [۳۱ و ۳۲].

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (4)$$

که در آن، n تعداد داده‌ها، Y_i مقدار متغیر وابسته محاسبه شده و \hat{Y}_i مقدار متغیر وابسته پیش‌بینی شده توسط شبکه است. در هر شبکه، زمانی می‌توان کارکرد شبکه را مورد قبول دانست که خطای حاصل از اندازه‌گیری آن، به حداقل مقدار ممکن برسد. خطای حاصل از ایجاد شبکه براساس تعدادی الگوریتم مشخص که در زمان طراحی توسط کاربر ایجاد می‌شود، محاسبه شده است.

روش رایج برای بهبود شبکه و کاهش خطا در شبکه MLP، استفاده از الگوریتم پس‌انتشار پیش‌خور^۳ است. در این روش، سری داده‌ها به سه دسته داده‌های آموزش، ارزیابی و تست تقسیم و مقدار خطای مجاز موردنظر توسط کاربر

³ Feed Forward Back Propagation

⁴ Levenberg-Marquardt

¹ MSE : Mean Squared Error

² RMSE : Root Mean Squared Error

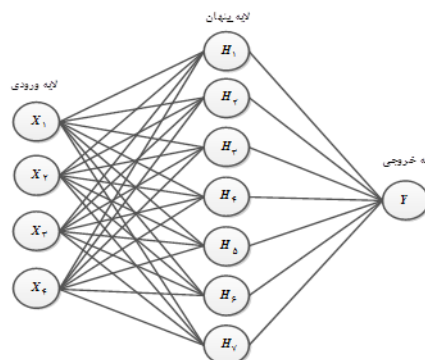
جدول ۴- اطلاعات تکمیلی مربوط به داده‌های شبکه عصبی مصنوعی

نماد و واحد اندازه‌گیری	مقادیر استفاده‌شده	داده‌های ورودی
$H/D (m)$	۳-۲-۱	نسبت عمق تاج به قطر تونل
$k(m/s)$	1×10^{-2} - 1×10^{-5} - 1×10^{-8}	ضریب نفوذپذیری اولیه
$\varphi(^{\circ})$	۴۵، ۴۰، ۳۵، ۳۰، ۲۰	زاویه اصطکاک داخلی
$C(kPa)$	۸۰، ۶۰، ۴۰، ۲۰	چسبندگی

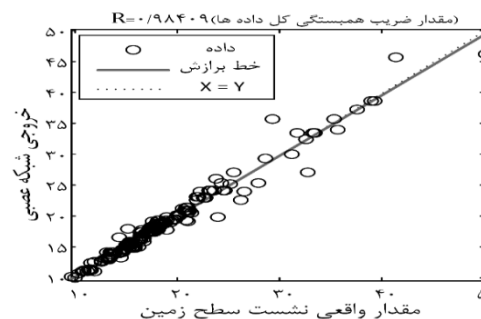
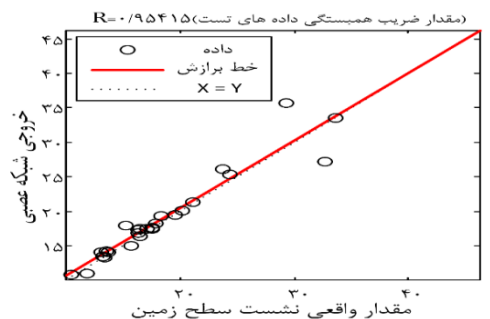
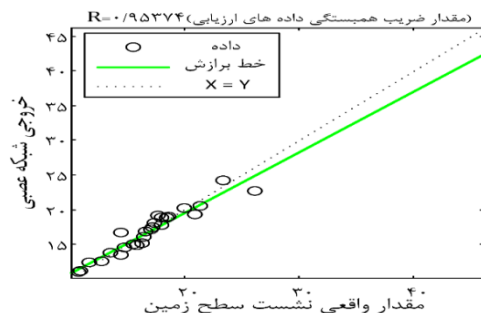
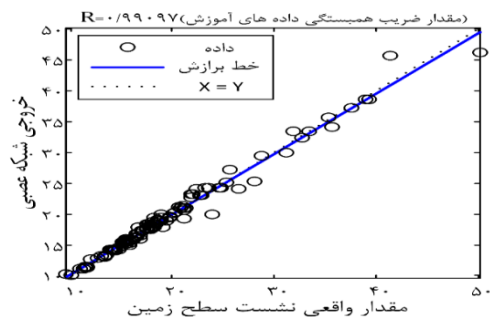
شبکه تعداد ۷ نورون برای لایه میانی در نظر گرفته شده است. تابع فعال‌ساز لایه میانی، مطابق رابطه ۵ که تابع سیگموئید^۱ نام دارد، مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین از یک تابع خطی برای انتقال خروجی از لایه میانی به لایه آخر استفاده شده است.

$$F(n) = \frac{1}{1 + e^{-n}} \quad (5)$$

تعداد داده‌ها و نورون‌های شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه در جدول ۴ آورده شده است که به تفکیک نشان‌دهنده تعداد داده‌های به‌کارگرفته‌شده در دسته‌های مختلف، تعداد متغیرهای مستقل و وابسته و تعداد نورون‌های لایه‌های مختلف است.



شکل ۸- شمای کلی شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه در هر شبکه عصبی معمولاً تعداد لایه‌های میانی و نورون‌های آن، با توجه به تجربه کاربر و همچنین تعداد متغیرهای لایه ورودی تعیین و محاسبه می‌شود. در این



شکل ۹- نمودار رگرسیونی مربوط به داده‌ها به‌صورت تفکیک‌شده در شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه

^۱ Sigmoid

داده‌های اولیه و درواقع میزان اطمینان به صحت و دقت پیش‌بینی شبکه دارد. شکل (۹) نمودار رگرسیون تفکیکی به‌دست‌آمده برای دسته داده‌های مختلف آموزش، ارزیابی، تست و درنهایت تمامی داده‌ها را نشان می‌دهد. تمرکز داده‌های رگرسیونی روی خط $x = y$ ، نشان از قدرت و دقت بالای شبکه در پیش‌بینی مقادیر واقعی دارد.

در جدول ۵ نتایج آماری شبکه که نشان‌دهنده دقت پیش‌بینی متغیر وابسته که در اینجا نشست سطح زمین می‌باشد، آورده شده است. هرچه مقدار ضریب همبستگی (R) به مقدار ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده وجود رابطه خطی بین متغیرهای مستقل لایه ورودی و متغیر وابسته لایه خروجی است و هرچه ضریب تعیین (R^2) به مقدار ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان از دقت شبکه برای پوشش بیشتر

جدول ۵- نتایج شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه

نوع داده	ضریب همبستگی R	MSE	RMSE
داده‌های آموزش	۰/۹۹۰۹۷	-	-
داده‌های ارزیابی	۰/۹۵۳۷۴	-	-
داده‌های تست	۰/۹۵۴۱۵	-	-
کل داده‌ها	۰/۹۸۴۰۹	۱/۳۱۶۲	۱/۱۴۹۳

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با مدل‌سازی در نرم‌افزار ABAQUS، تحلیل المان محدود به‌صورت پارامتریک، برای بررسی نشست سطح زمین در اثر حفاری تونل تک با مقطع دایره‌ای، با تغییر در مشخصات هندسی از جمله قطر و عمق تونل (نسبت عمق به قطر) و همچنین تغییرات مشخصات مکانیکی خاک محل حفاری نظیر چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و ضریب نفوذپذیری خاک صورت پذیرفت. سپس مقادیر به‌دست‌آمده برای نشست سطح زمین در حالت‌های مختلف به‌عنوان متغیر وابسته (داده خروجی) و چهار متغیر چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، ضریب نفوذپذیری و درنهایت نسبت عمق به قطر تونل به‌عنوان متغیر مستقل (داده‌های ورودی)، برای تولید شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه در نرم‌افزار MATLAB مورد استفاده قرار گرفت. خلاصه نتایج به‌دست‌آمده در مراحل مختلف به شرح زیر است:

۱. بررسی تأثیر میزان ضریب نفوذپذیری خاک و فشار آب حفره‌ای، بر مقدار نشست سطح زمین و جابه‌جایی خاک در اطراف محیط تونل انجام گرفت. با افزایش ضریب نفوذپذیری در خاک، نشست سطح زمین ناشی از تونل‌زنی کاهش داشته است.
۲. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده برای $H/D=3$ ، با نفوذ در عمق زمین، هرچه مقدار نفوذپذیری در خاک بیشتر باشد، مقدار نشست سطح زمین نیز افزایش می‌یابد که البته با افزایش زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی در خاک، شدت این روند کمتر شده، به روند مشابه برای سایر اعماق نزدیک گردیده است.
۳. کاهش میزان نفوذپذیری بیش از مقادیر $k=1e-5$ و $k=1e-8$ تأثیر چندانی روی نشست سطح زمین نخواهد داشت.
۴. افزایش میزان چسبندگی در تمامی حالات و تحلیل‌های صورت‌گرفته، باعث کاهش میزان نشست سطح زمین شده است.
۵. افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک، در بیشتر حالات باعث کاهش نشست سطح زمین شده است. البته هرچه میزان چسبندگی خاک به‌طور هم‌زمان افزایش یافته، این روند کاهشی کمتر مشاهده شده است.
۶. در بعضی از حالات برای چسبندگی‌های بزرگ‌تر از ۴۰ کیلوپاسکال، با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک، نشست سطح زمین افزایش داشته یا ثابت بوده که این روند برای تونل‌های نزدیک‌تر به سطح بیشتر مشاهده شده است.

۱. بررسی تأثیر میزان ضریب نفوذپذیری خاک و فشار آب حفره‌ای، بر مقدار نشست سطح زمین و جابه‌جایی خاک در اطراف محیط تونل انجام گرفت. با افزایش ضریب نفوذپذیری در خاک، نشست سطح زمین ناشی از تونل‌زنی کاهش داشته است.

۷. نشست سطح زمین در اعماق مختلف کاملاً وابسته به پارامترهای مقاومت برشی خاک است. زمانی که ضریب نفوذپذیری در بیشترین مقدار و زاویه اصطکاک داخلی خاک در کمترین مقدار خود قرار دارند، نشست سطح زمین تابع عمق است که با افزایش عمق، نشست سطحی به‌طور محسوس افزایش داشته است.
۸. رفته‌رفته با افزایش پارامترهای مقاومت برشی خاک، وابستگی نشست سطح زمین به عمق کمتر می‌شود تا جایی که وقتی این پارامترها به
- بیشترین مقدار خود می‌رسند، می‌توان گفت نشست سطح زمین مستقل از عمق حفاری است. ۹. شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه با استفاده از الگوریتم تصحیح خطای لوببرگ-مارکوات و با بهره‌گیری از الگوی پس‌انتشار پیش‌خور، به‌خوبی توانایی خود را در پیش‌بینی نشست سطح زمین نشان داده است. ضرایب همبستگی و تعیین، گویای رابطه صحیح و خطی بین نتایج به‌دست‌آمده در نرم‌افزار و نتایج حاصل از شبکه عصبی مصنوعی هستند.

مراجع

- [۱] F. Martos, "Concerning an approximate equation of the subsidence trough and its time factors", Proc Int Strata Control Congress, Leipzig, 1958, pp.191-205.
- [۲] R. Peck, "Deep excavations and tunnelling in soft ground", Proc 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, Mexico City, 1969, pp. 225-290.
- [۳] M. O'Reilly and B. New, "Settlements above tunnels in the United Kingdom, their magnitude and prediction", Proc Tunnelling '82 Inst of Mining & Metallurgy, Brighton, 1982, pp 173-181.
- [۴] S. Suwansawat and H.H. Einstein, "Describing settlement troughs over twin tunnels using a superposition technique", J Geotech Geoenviron Eng, Vol. 133, 2007, pp. 445- 468.
- [۵] X. Yang, J. Wang, "Ground movement prediction for tunnels using simplified procedure", Tunn Undergr Space Technol, Vol. 26, 2014, pp. 462-471.
- [۶] Y. Fang, C. Wu, S. Chen and C. Liu, "An estimation of subsurface settlement due to shield tunneling", Tunnelling and underground space technology, Vol. 44, 2014, pp. 121-9.
- [۷] K. Park, "Analytical solution for tunnelling-induced ground movement in clays", Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 20, 2005, pp. 249-261.
- [۸] X. Yang and J.M. Wang, "Ground movement prediction for tunnels using simplified procedure", Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 26, 2011, pp. 462-471.
- [۹] R. Saeid and E. Dindarloo, "Maximum surface settlement based classification of shallow tunnels in soft ground", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 378, No. 19, 2015, pp. 4-5.
- [۱۰] W. Abdellah, MA. Ali and H-S. Yang, "Studying the effect of some parameters on the stability of shallow tunnels", Journal of Sustainable Mining, Vol. 17, No. 1, 2018, pp. 20-33.
- [۱۱] G. Idinger, P. Aklik, W. Wu and R.I. Borja, "Centrifuge model test on the face stability of shallow tunnel", Acta Geotech, Vol. 6, 2001, pp. 105-117.
- [۱۲] D. Chapman, C.D.F. Rogers and D.V.L. Hunt, "Predicting the settlements above twin tunnels constructed in soft ground", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 378, No. 19, 2004, pp. 4-5.
- [۱۳] C. Ng, Y. Hong and M. Soomro, "Effects of piggyback twin tunnelling on a pile group: 3D centrifuge tests and numerical modelling", Geotechnique. Vol. 65. No. 1, 2015, pp. 38-51.
- [۱۴] A. Kirsch, "Experimental investigation of the face stability of shallow tunnels in sand", Acta Geotech. Vol. 5, No. 1, 2010, pp. 43-62.

- [۱۵] S. Divall, R. Goodey and R. Taylor, "Ground movements generated by sequential twin-tunnelling in over-consolidated clay", Geotechnical Engineering Research Group, City University London, 2012.
- [۱۶] M. Sams, "Numerical and physical modelling of a 2D tunnel heading at collapse", University of Southern Queensland, Bachelor Research Project. 2013.
- [۱۷] H. Mödlhammer, "Numerical methods for tunneling using ABAQUS and investigations of long-time-effects of the shotcrete shell and its impact on the combined support system", Master Thesis, MIT, 2010.
- [۱۸] M. Karakus, "Appraising the methods accounting for 3D tunnelling effects in 2D plane strain FE analysis", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 22, No. 1, 2007, pp. 47-56.
- [۱۹] M. Karakus and R.J. Fowell, "Back analysis for tunnelling induced ground movements and stress redistribution", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 20, No. 6, 2005, pp. 514-24.
- [۲۰] I. Shahrour and H. Mroueh, "Three-dimensional non linear analysis of a closely twin tunnels", Sixth international symposium on numerical models in geomechanics, (NUMOG VI), 1997.
- [۲۱] T. Addenbrooke, D.M. Potts and A.M. Puzrin, "The influence of pre-failure soil stiffness on the numerical analysis of tunnel construction", Geotechnique, Vol. 47, No. 3, 1997, pp. 693-712.
- [۲۲] M.S. Pakbaz, S. Imanzadeh and K.H. Bagherinia, "Characteristics of diaphragm wall lateral deformations and ground surface settlements: Case study in Iran-Ahwaz metro", Tunneling and Underground Space Technology, Vol 35, 2013, PP 109-121.
- [۲۳] M. Baziar, M. Rabeti Moghadam, Y. Choo and D. Kim, "Tunnel flexibility effect on the ground surface acceleration response", Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Vol 15, No. 3, 2016, pp 457-476
- [۲۴] K. Priddy and PE. Keller, Artificial neural networks: an introduction, SPIE press, 2005.
- [۲۵] M. Koopialipoor, EN. Ghaleini, H. Tootoonchi, DJ. Armaghani, M. Haghghi and A. Hedayat, "Developing a new intelligent technique to predict overbreak in tunnels using an artificial bee colony-based ANN", Environmental Earth Sciences, Vol. 78, No. 5, 2019, pp. 165.
- [۲۶] M. Hajihassani, DJ. Armaghani, H. Sohaei, ET. Mohamad and A. Marto, "Prediction of airblast-overpressure induced by blasting using a hybrid artificial neural network and particle swarm optimization", Applied Acoustics, Vol. 80, 2014, pp. 57-67.
- [۲۷] S. Suwansawat and H.H. Einstein, "Artificial neural networks for predicting the maximum surface settlement caused by EPB shield tunneling", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 21, No. 2 2006, pp. 133-150.
- [۲۸] K. Yamamoto, A.V. Lyamin, D.W. Wilson, S.W. Sloan and A.J. Abbo, "Stability of a circular tunnel in cohesive-frictional soil subjected to surcharge loading", Computers and Geotechnics, Vol. 38, No. 4, 2011, pp. 504-514.
- [۲۹] J. Shiau, M. Sams, J. Zhang and R. Kemp, "Settlement analyses of underground circular tunneling in soft clay", Geotechnical aspects of underground construction in soft ground, 2014, pp. 347-52.
- [۳۰] فاطمه کریمی‌زاد گوهری و اکبر شاهسوند، «مقایسه نتایج حاصل از شبکه‌های عصبی MLP و RBF در پیش‌بینی نتایج حاصل از هم‌زمانی پدیده‌های انتقال جرم و انتقال حرارت»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۱، شماره ۳۳، ۱۳۹۲، صفحه ۲۷-۴۳.
- [۳۱] علیرضا مرتضایی و علی خیرالدین، «مدل‌سازی و تخمین طول مفصل پلاستیک ستون‌های بتن‌آرمه به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۰، شماره ۲۹، ۱۳۹۱، صفحه ۱-۱۷.
- [۳۲] حمید پورباقری، افشین پورتنقی و پیام اشتری، «پیش‌بینی پاسخ دینامیکی سیال در مخازن هوایی آب با استفاده از شبکه عصبی»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۴۸، ۱۳۹۶، صفحه ۱۳۹-۱۵۰.