

**پیش‌بینی نشست پی‌های سطحی بروی خاک‌های دان‌های با استفاده از برنامه‌نویسی چندعبارتی (MEP)\***

مقاله پژوهشی

علی درخشانی<sup>(۲)</sup>بهاره فراهانی<sup>(۱)</sup>

**چکیده** به‌واسطه طبیعت ناهمگون خاک‌های غیرچسبنده و پیچیدگی پارامترهای مؤثر در نشست، پیش‌بینی دقیق نشست پی معمولاً با دشواری‌های بسیاری همراه است. این موضوع از گذشته مدنظر پژوهشگران مختلفی بوده است و برخی محققان نیز معادلاتی برای پیش‌بینی نشست پی سطحی ارائه کرده‌اند. به دلیل عدم دقت کافی این روابط، پژوهشگران از روش‌های جدیدتری از جمله اجزای محدود، تفاضل محدود، محاسبات نرم و... برای پیش‌بینی نشست استفاده می‌کنند. در پژوهش حاضر مدل جدیدی با استفاده از هوش مصنوعی برای پیش‌بینی نشست ارائه می‌گردد. هدف از توسعه این‌گونه مدل‌ها ایجاد فرمول‌هایی دقیق‌تر و در صورت امکان ساده‌تر می‌باشد. در این مقاله عملکرد الگوریتم برنامه‌نویسی چندعبارتی (Multi expression programming) برای پیش‌بینی نشست پی‌های سطحی واقع بر خاک دان‌های مورد بررسی قرار می‌گیرد و مقادیر به دست آمده از مدل‌های جدید با دقیق‌ترین مدل‌های قبلی، مقایسه می‌شوند. سپس تحلیل عملکرد، مطالعه پارامتری، تحلیل حساسیت و ارزیابی ضریب اطمینان انجام می‌گردد. همان‌طور که از نتایج مشخص است، مقایسه بین مدل MEP و دقیق‌ترین مدل‌ها شامل GP, ANN, GEP و EPR در ادبیات فنی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی در این مطالعه، با ضریب هم‌بستگی ۹۳/۴۵ درصد عملکرد بهتری نسبت به اکثر مدل‌های توسعه یافته قبلی دارد.

**واژه‌های کلیدی** پیش‌بینی نشست، پی‌های سطحی، برنامه‌نویسی چندعبارتی، خاک دان‌های.

**Settlement Prediction of Shallow Foundations on Granular Soils Using Multi Expression Programming (MEP)**

A. Derakhshani

B. Farahani

**Abstract** Due to the non-homogeneous nature of cohesionless soils, and the complexity of the parameters related to settlement, generally the exact estimation of the foundation settlement involves many difficulties. This problem has been studied by many researchers and some equations have been proposed for estimating the settlement of shallow foundations. Because of the low accuracy of these equations, researchers are using more modern techniques like finite elements, finite difference, soft computing, and so on, for calculating the settlement. In the current study, a new model is proposed based on artificial intelligence to predict the settlement. The purpose of developing such models is to achieve more accurate and possibly simpler equations. In this paper, the performance of multi expression programming (MEP) method to predict the settlement of shallow foundations on granular soils is evaluated and the values obtained from the developed models are compared with those from the most accurate previous models. Then, the performance analysis, validation, parametric study and sensitivity analysis are performed. As can be seen from the results, the comparison between the MEP model and the most accurate models including ANN, GP, GEP and EPR in the technical literature showed that the model proposed in this study with correlation coefficient of 93.45 percent, performs better than most previously developed models.

**Key Word** Prediction of Settlement, Shallow foundation, Multi Expression Programming, Granular soil.

\* تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۸/۱۱/۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۲/۱۲ می‌باشد.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده‌ی فنی، دانشگاه شاهد، تهران.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی فنی، دانشگاه شاهد، تهران.

## مقدمه

یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای انتقال بار سازه‌ها به زمین استفاده از پی‌های سطحی می‌باشد. به‌طور کلی، دو معیار اصلی برای طراحی پی سطحی وجود دارد که شامل ظرفیت باربری خاک و نشست پی می‌باشد. با این حال، در طراحی پی سطحی، به‌ویژه در پی با عرض بیش از یک متر، تأثیر نشست پی از ظرفیت باربری بیشتر است [1]. بنابراین پیش‌بینی دقیق نشست پی بسیار بااهمیت است. معمولاً نشست پی‌های سطحی روی خاک‌های غیرچسبنده به دلیل فشردگی خاک، ناشی از تنش‌های اعمال شده و در نتیجه فرسایش خاک و هم‌چنین تغییر شکل جانبی خاک، به دلیل تمایل خاک برای فرار از زیر پی رخ می‌دهد. بارهای استاتیکی تحمیل شده توسط وزن سازه، بارهای دینامیکی وارده، تغییرات درصد رطوبت خاک ناشی از پدیده‌های مختلف طبیعی مانند نوسانات فصلی در سطح سفره‌ی آب زیرزمینی و اثرات پروژه‌های ساختمانی مجاور نیز از دلایل مهم نشست پی هستند [2]. به‌طور کلی شن و ماسه نسبت به خاک رس دارای طبیعت ناهمگون‌تری می‌باشند [3]. در نتیجه، احتمال نشست در شن و ماسه نسبت به پروفیل خاک رسی بیشتر است [4]. خاک‌های غیرچسبنده درجه‌ی نفوذپذیری بالاتری دارند، نشست در آنها به سرعت و بعد از اعمال بار در زمان کوتاهی رخ می‌دهد [5]. چنین نشست سریعی باعث تغییر شکل نسبتاً سریع سازه‌ی فوقانی می‌شود که منجر به ناتوانی در جبران خسارت و جلوگیری از تغییر شکل بیشتر می‌شود. به‌علاوه نشست دائم و بیش از اندازه باعث تخریب سازه می‌شود [6]. محققان باتوجه به پیچیدگی‌های مختلفی که در تعیین نشست اثرگذار می‌باشد و هم‌چنین پایین بودن دقت فرمول‌های تجربی ارائه‌شده در گذشته، شروع به مدل‌سازی پدیده‌ی نشست کرده‌اند [6].

از روش‌های محاسبات نرم می‌توان برای پیش‌بینی نشست پی‌های سطحی واقع بر خاک دانه‌ای استفاده کرد. تعدادی از روش‌های عددی توسعه یافته شامل مطالعات

شاهین و همکاران (۲۰۰۲) با استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANN-Artificial Neural Network) [3]، استفاده از برنامه‌نویسی ژنتیک (GP-Genetic Programming) توسط رضایا و جوادی (۲۰۰۷) [7] و استفاده از (GP)، (GEP-Genetic Expression Programming) و (EPR- Evolutionary Polynomial Regression) توسط شاه‌نظری و همکاران (۲۰۱۴) [8] می‌باشد. این روش‌ها می‌توانند با پیدا کردن روابط پیچیده بین پارامترهای ورودی، پارامتر خروجی را با دقت مناسب تخمین بزنند. در این مطالعه، با استفاده از برنامه‌نویسی ژنتیک (GP) و براساس الگوریتم MEP، یک مدل برای تخمین نشست ارائه شده است. GP شاخه‌ای از الگوریتم‌های محاسباتی تکاملی است که از مفهوم تولید مثل بیولوژیکی گرفته شده است. برای مسائل مختلف مهندسی عمران از جمله مشکلات مهندسی ژئوتکنیک، GP در ارائه‌ی معادلات پیش‌بینی مناسب موفق بوده است (Khorrami 2019, Talebi 2018, Derakhshani 2017) [9,10,11].

هدف این مقاله پیش‌بینی دقیق نشست پی سطحی واقع بر خاک‌های غیرچسبنده با استفاده از الگوریتم برنامه‌نویسی چندعبارتی (Multi Expression Programming (MEP)) می‌باشد. ابتدا مدل جدید برای تخمین نشست توسعه داده می‌شود و سپس فرمول پیشنهادی با روابطی که قبلاً با استفاده از تکنیک‌های محاسبات نرم ارائه شده، مقایسه می‌گردد. به‌علاوه، برای تحلیل عملکرد و اعتبارسنجی، مطالعه‌ی پارامتری و تحلیل حساسیت و هم‌چنین بررسی ضرایب اطمینان بر روی مدل انجام می‌شود.

## برنامه‌نویسی چندعبارتی

در حقیقت محاسبات نرم را می‌توان به‌عنوان مجموعه‌ای از تکنیک‌ها در نظر گرفت که رفتار ارگانیسم‌های زنده نظیر گیاهان، حیوانات و انسان‌ها یعنی رفتاری نرم، انعطاف‌پذیر، تطابق‌پذیر و هوشمند را شبیه‌سازی می‌کنند

[12].

می شوند.

۲. والدین برای به دست آوردن دو فرزند جدید ترکیب می شوند.

۳. جهش فرزندان و جایگزین کردن بدترین و بهترین فرد در جمعیت فعلی انجام می شود.

هر کروموزوم MEP تعداد ثابتی ژن دارد. این عدد طول کروموزوم را مشخص می کند. هر ژن شامل یک فرمان و یک یا چند متغیر است. ژنی که یک تابع را کدگذاری می کند، شامل نقاطی برای اثبات تابع می باشد. در اینجا یک مثال از مدل خطی برای فهم بهتر آورده شده است. مدلی را در نظر بگیرید که اعداد در سمت چپ برای برچسب ژن خود قرار گرفته اند. این برچسبها به کروموزوم تعلق ندارند زیرا هدف آن شرح و توضیح مدل است. در این مثال تعدادی عملگر  $F=\{+, \times\}$  و تعدادی متغیر  $T=\{a, b, c, d\}$  آورده شده است.

1. a

2. b

3. +1,2

4. c

5. d

6. +4,5

7.  $\times 3,5$ 

حداکثر تعداد نمادها در کروموزوم MEP توسط فرمول (۱) آورده شده است:

Number of symbols

$$= (n + 1) \times (\text{Number of genes} - 1) + 1$$

(۱)

که در آن n بیشترین تعداد عملگرها (در اینجا عدد ۲) و تعداد ژنها برابر تعداد متغیرها (در اینجا عدد ۴) است.

«ترجمه» نشان دهنده رونویسی از کروموزومهای MEP است. ترجمه با تجزیهی کروموزوم از بالا به پایین به دست می آید. یک نماد متغیر، یک عبارت ساده را مشخص می کند مانند:  $E_1, E_2, E_4, E_5$ . نماد تابع، عبارت

MEP نوعی برنامه نویسی ژنتیک GP است که توسط اولتین (Oltean) و دامیترسکو (Dumitrescu) توسعه یافته است [13] و همچنین تکنیکی برای تولید برنامه های رایانه ای با استفاده از یک رویکرد تکاملی می باشد.

ایده ی اصلی در GP تولید برنامه، الگوریتم و ساختارهای مشابهی نظیر اینها در سطحی مرتبط با الگوریتم های تکاملی است. GP توسط کوزا (Koza) [12] در جهت گسترش الگوریتم های ژنتیک معرفی شد، که در آن برنامه ها با ساختار درختی و به زبان برنامه نویسی کاربردی LISP (Lost In Stupid Parenthese) بیان می شوند [12]. در این الگوریتم متغیرها به عنوان ساختار برنامه نویسی در نظر گرفته می شوند و مقدار خروجی نیز نشان دهنده ی این است که برنامه چه مقدار اهداف خود را تأمین نموده است. شرح جامع GP را می توان در [12,14] یافت. GP با موفقیت در بعضی از مسائل مهندسی عمران به کار رفته است [15-19]. MEP در مقایسه با سایر تکنیک های تکاملی مورد استفاده برای پیش بینی چندین مزیت مهم دارد:

۱. راه حل چندگانه را در یک کروموزوم کدگذاری می کند. این بدان معنی است که فضای جستجو بهتر مورد بررسی قرار می گیرد. ارزیابی چنین کروموزومی (در اکثر موارد) با همان پیچیدگی انجام می شود که در مورد یک راه حل واحد در هر کروموزوم انجام می شود.

۲. برنامه های رایانه ای را فرمان به فرمان ارزیابی می کند و نتایج جزئی را برای کلیدهای داده های آموزشی ذخیره می کند و همچنین سرعت پردازش آن بسیار بالا می باشد.

الگوریتم MEP با ایجاد جمعیت تصادفی از افراد شروع می شود. مراحل زیر تا رسیدن به تعداد مشخصی از تولیدات تکرار می شود [13]:

۱. دو پدر و مادر با استفاده از روش استاندارد انتخاب

$$E_7 = (a + b) \times d.$$

مقدار این عبارات با خواندن کروموزوم از بالا به پایین محاسبه می‌شود. بخشی از نتایج توسط برنامه‌نویسی دینامیکی محاسبه می‌شود و طبق قرارداد ذخیره می‌شود. باتوجه به مدل چندعبارته، هر کروموزوم MEP ممکن است به‌عنوان یک جنگل از درختان و نه به‌عنوان یک درخت واحد (که این یک برنامه‌نویسی ژنتیک) مشاهده شود. بااینکه کروموزوم MEP بیش از یک راه‌حل را کدگذاری می‌کند، اما دارای تناسب (Fitness) است. تناسب کروموزوم معمولاً به‌عنوان تطابق بهترین عبارت کدگذاری‌شده توسط آن کروموزوم تعریف می‌شود. هر یک از این عبارات را می‌توان به‌عنوان یک راه‌حل ممکن برای یک مسئله در نظر گرفت. تطابق هر عبارت کدگذاری‌شده در یک کروموزوم MEP به‌عنوان بهترین تناسب بیان‌شده توسط آن کروموزوم تعریف شده‌است. برای حل مشکلات رگرسیون، تناسب یک کروموزوم MEP با استفاده از معادله‌ی (۲) محاسبه شود [21]:

$$f = \min_{i=1,m} \{ \sum_{j=1}^n |E_j - O_j| \} \quad (2)$$

درجایی که  $n$  تعداد حالت‌های تطابق است،  $E_j$  مقدار مورد انتظار برای تطابق حالت  $j$  است،  $O_j$  مقدار برگشتی برای تطابق حالت  $j$  است که توسط عبارت  $i$  ام در کروموزوم فعلی رمزگذاری شده و  $m$  تعداد ژن‌های کروموزومی است.

### پایگاه داده‌ها

پیش‌بینی دقیق نشست نیازمند درک درستی از عوامل مؤثر بر نشست است. در بیشتر روش‌های سنتی عوامل اصلی تأثیرگذار بر نشست شامل تعداد (N) ضربات آزمایش SPT، عرض پی‌ها (B)، ظرفیت باربری پی‌ها (q)، طول پی (L) و عمق مدفون پی (Df) می‌باشند [22]. از عمق سطح آب زیرزمینی در این مقاله صرف‌نظر شده‌است زیرا فرض بر این است که اثر آن در تعداد (N)

پیچیده‌ای شامل متغیر و عملگر است، مانند:  $E_3, E_6, E_7$ . به‌عنوان مثال، ژن‌های ۱، ۲، ۴ و ۵ در مثال قبلی عبارات ساده‌ای را تشکیل می‌دهند که توسط یک نماد متغیر واحد ایجاد شده‌اند که عبارتند از [20]:

$$E_1 = a,$$

$$E_2 = b,$$

$$E_4 = c,$$

$$E_5 = d,$$

ژن ۳ عملگر + را بر روی متغیرهای کروموزوم ۱ و

۲ قرار می‌دهد؛ بنابراین عبارت کدگذاری شده‌ی ژن ۳ به‌این ترتیب است:

$$E_3 = a + b.$$

ژن ۶ عملگر + را بر روی متغیرهای موجود در

موقعیت کروموزومی ۴ و ۵ قرار می‌دهد و عبارت حاصله به‌این ترتیب کدگذاری می‌شود:

$$E_6 = c + d.$$

و ژن ۷ عملگر  $\times$  را در موقعیت کروموزومی ۳ و

۵ قرار می‌دهد، در نتیجه ژن ۷ مانند عبارت پایین کدگذاری می‌شود:

$$E_7 = (a + b) \times d.$$

$E_7$  آخرین عبارتی است که توسط کروموزوم

رمزگذاری شده‌است.

شواهد عملی و نظری برای برتری یکی از این

عبارات نسبت به سایرین وجود ندارد. به‌همین دلیل است که به هر کروموزوم MEP اجازه داده می‌شود تعدادی عبارات برابر با طول کروموزوم (تعداد ژن‌ها) کدگذاری کند. کروموزوم شرح داده‌شده در بالا عبارات زیر را کدگذاری می‌کند:

$$E_1 = a,$$

$$E_2 = b,$$

$$E_3 = a + b.$$

$$E_4 = c,$$

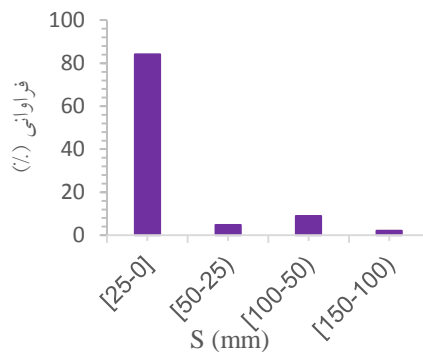
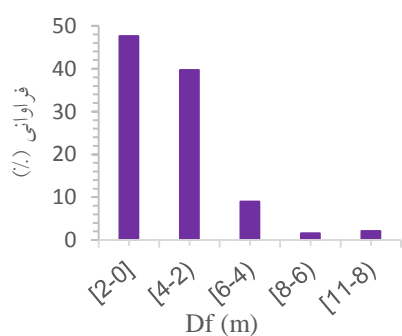
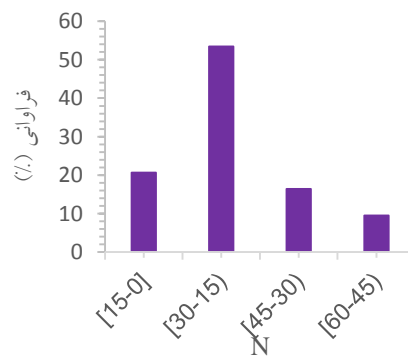
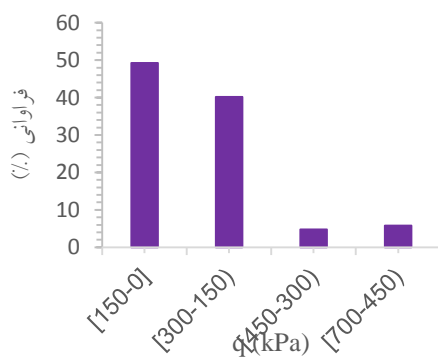
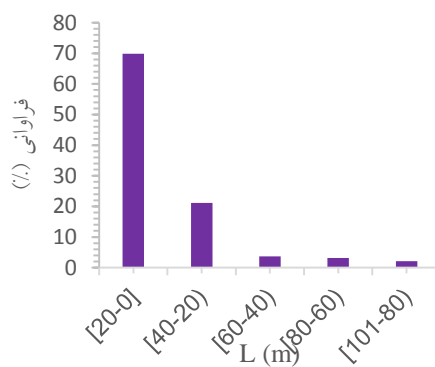
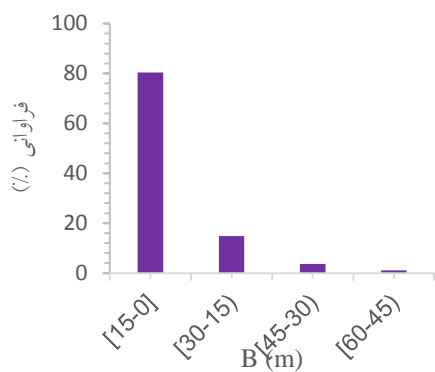
$$E_5 = d,$$

$$E_6 = c + d.$$

جدول ۱ تحقیقات قبلی دربردارنده داده‌های تجربی مورد استفاده در این مطالعه

مراجع	تعداد
Bazaraa 1967 [24]	۵
Briaud and Gibbens 1999 [25]	۴
Burbidge 1982 [26]	۲۲
Burland and Burbidge 1985 [22]	۱۲۵
Maugeri et al. 1998 [4]	۲
Picornell and Monte 1988 [27]	۱
Wahls 1997 [28]	۳۰
کل	۱۸۹

ضربات آزمایش SPT لحاظ شده است [23]. جدول (۱) لیستی از مراجع داده‌های موجود در پایگاه داده‌ی مورد استفاده در این مطالعه را نمایش می‌دهد. ۳۸ داده مربوط به آزمایش‌ها در مقیاس کوچک است و ۱۵۱ داده از آزمایش‌های بزرگ مقیاس به دست آمده‌اند. شکل (۱) هیستوگرام داده‌های مورد استفاده در مدل‌سازی را نشان می‌دهد.



شکل ۱ هیستوگرام داده‌های مورد استفاده در مدل‌سازی

جدول ۲ آمار توصیفی از متغیرهای مورد استفاده برای ساخت مدل

S (mm)	Df (m)	N	q (kPa)	L (m)	B (m)	مجموعه داده	پارامتر
۱۲۱	۱۰	۶۰	۶۶۶	۶۰	۶۰	آموزشی	بیشینه
۱۲۰	۱۰/۷	۶۰	۶۹۷	۱۰۱	۵۵	ارزیابی	
۱/۳	۰	۴	۶۳	۰/۹	۰/۹	آموزشی	کمینه
۰/۶	۰	۴	۱۸/۳۲	۰/۸	۰/۸	ارزیابی	
۲۴/۲	۲/۴۶	۲۳/۸۴	۲۰۷/۵۷	۱۵/۷۳	۱۲/۲۵	آموزشی	میانگین
۱۹/۵	۲/۲۴	۲۴/۷۶	۱۸۱/۹۴	۱۶/۷۸	۷/۹	ارزیابی	
۳۰/۴۵	۲/۱۱	۱۴	۱۵۰/۶۹	۱۳/۸۹	۱۴/۰۵	آموزشی	انحراف استاندارد
۲۵/۵	۱/۸۷	۱۳/۶۵	۱۱۶/۴۶	۱۹/۵۸	۸/۷۴	ارزیابی	

جدول (۴) تنظیمات پارامترهای الگوریتم MEP را برای دست‌یابی به مدل منتخب نهایی نشان می‌دهد.

جدول ۳ نحوه معرفی پارامترهای ورودی و خروجی به مدل MEP

B, 1/L, LN(q), LN(N), Df	پارامترهای ورودی
S	پارامتر خروجی

جدول ۴ تنظیمات پارامترهای الگوریتم MEP

پارامتر	تنظیمات پارامتر
Num subpopulation	۵
Subpopulation size	۲۰۰
Code length	۵۰
Crossover probability	۰/۱
Num generations	۲۰۰
Num threads	۲
Num runs	۲۰
Operator	×, ÷, +, -

معادله‌ی توسعه‌یافته با به‌کارگیری پارامترها و تنظیمات ارائه‌شده در جداول مذکور، با استفاده از رویکرد MEP، به صورت زیر است:

$$S = \frac{1}{\ln(N)} \times \frac{L \times D_f \times \ln(q)}{(L \times \ln(N)) + 1} +$$

برطبق شکل (۱) پراکندگی داده‌های پارامترها، متنوع و متفاوت است. داده‌های مسئله برای ساخت و بررسی مدل به دو مجموعه داده‌های آموزشی (۸۰٪) و ارزیابی (۲۰٪) تقسیم‌بندی شده‌اند. این داده‌ها بایستی از لحاظ شاخص‌های مقدار بیشینه، کمینه، میانگین و انحراف استاندارد نزدیک به هم باشند تا تطابق مناسبی با هم داشته باشند. مقادیر این شاخص‌ها برای مجموعه داده‌های آموزشی و ارزیابی به صورت جدول (۲) است. در جدول (۲) نشان داده شده است که مقادیر شاخص‌های آماری محاسبه شده برای دو مجموعه داده‌ی نزدیک به هم هستند.

## طراحی مدل

### مدل‌سازی با استفاده از MEP

برای ساخت مدل پیش‌بینی نشست پی‌های سطحی، داده‌های آموزش به الگوریتم MEP معرفی شدند. داده‌ها شامل پارامترهای ورودی مستقل و پارامتر خروجی وابسته هستند. برای رسیدن به معادله‌ی پیش‌بینی منطقی و دقیق، الگوریتم MEP بارها با تنظیمات مختلف و لحاظ نمودن اشکال مختلف پارامترهای ورودی، اجرا گردید و مدل‌های متعددی ایجاد شد و از بین آنها مناسب‌ترین مدل انتخاب شد. جدول (۳) نحوه‌ی معرفی پارامترها و

۴. میانگین خطای مطلق (MAE: Mean absolute error)

$$MAE = \frac{\sum(x_i - y_i)}{N} \quad (7)$$

که در این روابط  $x_i$  مقادیر اندازه‌گیری شده،  $y_i$  مقادیر پیش‌بینی شده،  $N$  تعداد مقادیر اندازه‌گیری شده و  $\bar{x}$  و  $\bar{y}$  مقادیر متوسط اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده هستند. نزدیک بودن مقدار عددی دو شاخص جذر میانگین مربعات خطا و میانگین انحراف مطلق خطا به عدد صفر نشان‌دهنده‌ی عملکرد بهتر مدل است. به علاوه، هرچه مقدار ضریب هم‌بستگی و ضریب تعیین به عدد یک نزدیک‌تر باشند مشخص می‌شود مدل عملکرد بهتری داشته‌است.

### تحلیل نتایج مدل توسعه‌یافته

مدل جدید برای پیش‌بینی نشست پی سطحی بر روی خاک دانه‌ای با استفاده از ارزیابی شاخص‌های آماری مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۲) مقادیر نقاط داده برای مدل MEP را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۲) نقاط داده به خط ایده‌آل (اندازه‌گیری شده = پیش‌بینی شده) نزدیک هستند و مدل جدید قادر است با دقت بالایی مقادیر پیش‌بینی را نزدیک به مقادیر هدف برآورد کند. این هم‌بستگی در مقادیر پایین‌تر نشست بسیار زیاد می‌باشد و با افزایش مقادیر فاصله‌ی نقاط از خط ایده‌آل بیشتر می‌شود. هم‌چنین مدل در هر سه گروه داده‌ی آموزش، ارزیابی و کل از توانایی خوبی در پیش‌بینی مقادیر نشست پی‌های سطحی برخوردار است که نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب مدل پیشنهادی است.

مطابق شکل (۳) مقایسه‌ای بین نتایج مدل‌های مختلف پیش‌بینی نشست پی سطحی انجام گرفته‌است. این نمودارها نشان می‌دهند مدل در MEP عملکرد بهتری در پیش‌بینی دقیق مقادیر نشست برای پی‌های سطحی دارد و همان‌طور که در شکل (۳) مشخص است مدل MEP در مقایسه با روش‌های قبلی که شامل مدل ANN شاهین و همکاران (۲۰۰۲) [3]، GP رضایا و جوادی

$$(\ln(q - N)) \times \frac{2 \times (\ln(q) + B)}{\frac{2}{L} + \ln(N) + D_f} \quad (3)$$

که در این معادله  $B$  عرض پی (متر)،  $L$  طول پی (متر)،  $D_f$  عمق مدفون پی (متر)،  $q$  ظرفیت باربری پی (کیلو پاسکال) و  $N$  عدد آزمایش SPT هستند. لازم به ذکر است که فرمول پیشنهادی، همانند دیگر روابط توسعه‌یافته با کمک روش‌های محاسبات نرم، فقط در محدوده‌ی داده‌های به‌کارگرفته‌شده (مطابق جدول ۲) معتبر است.

### شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل

به منظور بررسی عملکرد مدل از داده‌های ارزیابی که نقشی در ساخت مدل نداشته‌اند استفاده شده‌است. این داده‌ها برای مقایسه بین نتایج روش این پژوهش با روش‌های محققان قبلی نیز استفاده شده‌اند. هم‌چنین عملکرد مدل بر روی داده‌های آموزشی و کل نیز بررسی شده‌است. ارزیابی مدل‌ها در این پژوهش، براساس چهار شاخص آماری متداول، بر روی نتایج پیش‌بینی نشست پی سطحی با استفاده از مدل MEP توسعه‌یافته در این مطالعه و مدل‌های ارائه‌شده توسط محققان قبلی صورت گرفته‌است. معادلات ریاضی این شاخص‌های آماری برای ارزیابی مدل در ادامه ارائه شده‌اند.

۱. ضریب هم‌بستگی (CC: Correlation coefficient)

$$CC = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

۲. ضریب تعیین ( $R^2$ : Coefficient of Determination)

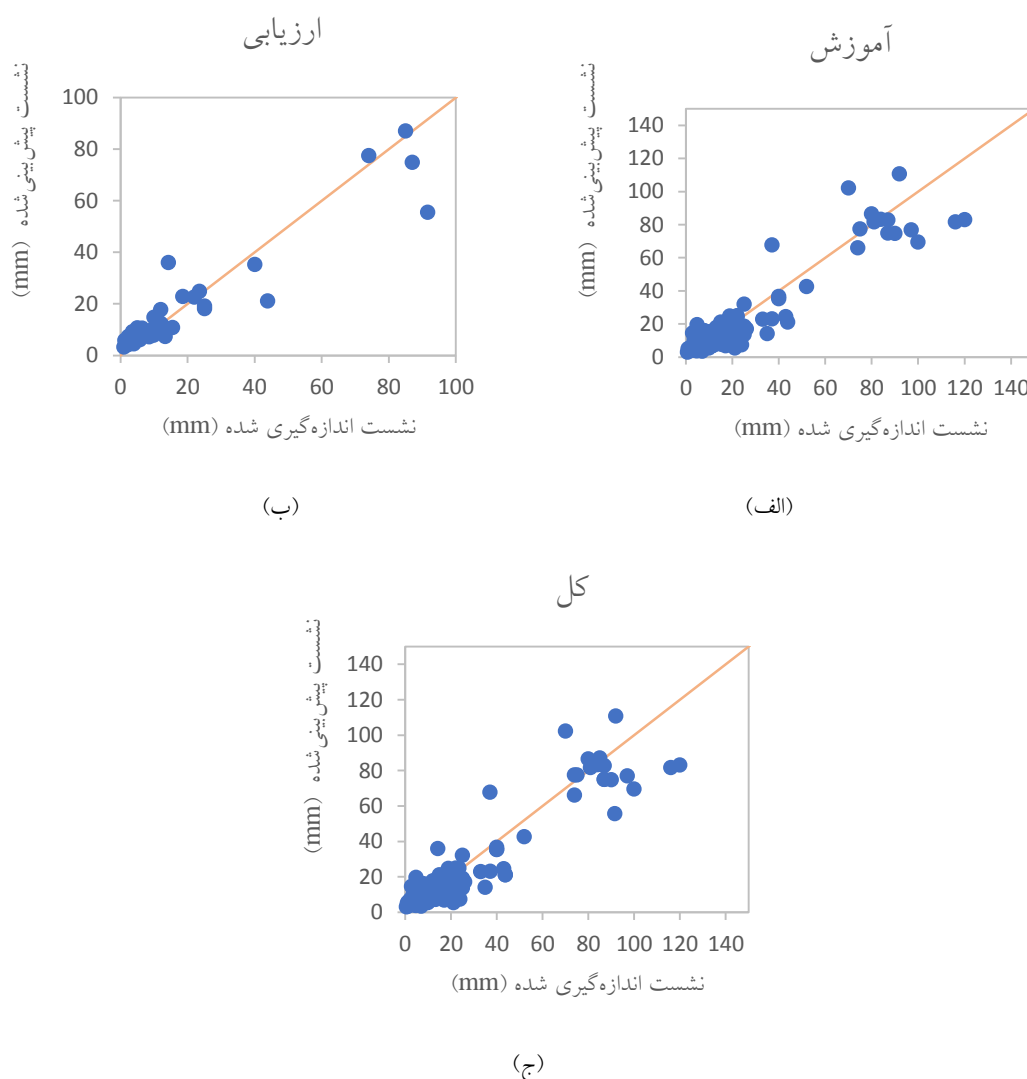
$$R^2 = 1 - \frac{\sum(x_i - y_i)^2}{\sum(x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

۳. خطای میانگین ریشه‌ی مربعات (RMSE: Root mean square error)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum(x_i - y_i)^2} \quad (6)$$

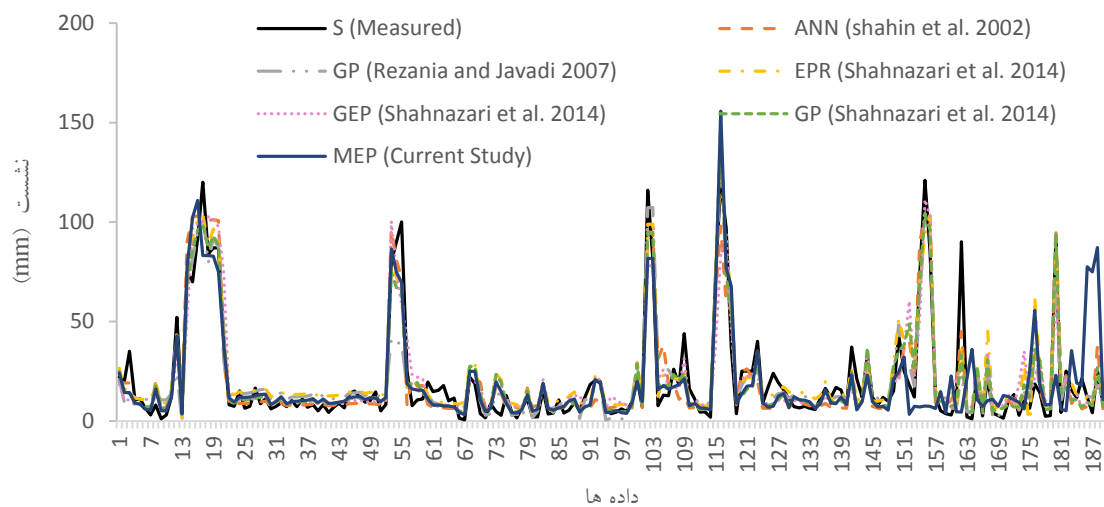
مربعات (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) انجام گرفته‌است و همان‌طور که مشاهده می‌شود عموماً برتری با مدل MEP است. از نقاط قوت مدل MEP می‌توان به‌سادگی ساختار آن، برتری از نظر ضرایب ( $R^2$ ) و (CC) در اکثر موارد و داشتن کمترین خطای میانگین ریشه‌ی مربعات (RMSE) و نیز میانگین خطای مطلق (MAE) در قیاس با تمام مدل‌های دیگر اشاره نمود.

(۲۰۰۷) [7] و GP، GEP و EPR شاه‌نظری و همکاران (۲۰۱۴) [8] با دقت بیشتری مقادیر را پیش‌بینی می‌کند. شاخص‌های آماری مدل توسعه‌یافته برای نشست پی سطحی بر روی خاک‌های دانه‌ای در جدول (۵) با روش‌های قبلی مقایسه شد. در این جدول مقایسه‌ی مدل ارائه‌شده با مدل‌های گذشته برپایه‌ی ضریب هم‌بستگی (CC)، ضریب تعیین ( $R^2$ )، خطای میانگین ریشه‌ی



شکل ۲ مقادیر نقاط داده برای مدل MEP: (الف) داده‌های آموزشی (ب) داده‌های ارزیابی (ج) کل داده‌ها





شکل ۳ مقایسه نتایج مدل‌های مختلف پیش‌بینی نشست پی سطحی

جدول ۵ مقایسه بین شاخص‌های آماری نتایج مدل MEP با دیگر روش‌ها

شاخص‌های آماری				روش	مراجع
MAE	RMSE	R <sup>2</sup> (%)	CC (%)		
۷/۱۲	۹/۸۹	۸۵/۸۲	۹۲/۶۲	ANN	شاهین (۲۰۰۲)
۶/۷۷	۱۱/۰۷	۸۲/۵۹	۶۷/۶۶	GP	رضانیا و جوادی (۲۰۰۷)
۶/۸۸	۹/۵۳	۸۷/۰۹	۹۳/۰۶	EPR	شاه نظری (۲۰۱۴)
۷/۷۳	۱۱/۸۹	۷۹/۹۳	۸۹/۴۱	GEP	شاه نظری (۲۰۱۴)
۶/۰۳	۹/۲۷	۸۷/۷۸	۹۳/۶۹	GP	شاه نظری (۲۰۱۴)
۵/۷۷	۹/۱۳	۸۷/۲۵	۹۳/۴۵	MEP	مطالعه حاضر

نشست‌های پیش‌بینی شده انجام شد. روند تغییرات نشست پی سطحی پیش‌بینی شده و آزمایشگاهی، برحسب افزایش پارامترهای ورودی برای تمام روش‌ها در شکل (۴) نشان داده شده است.

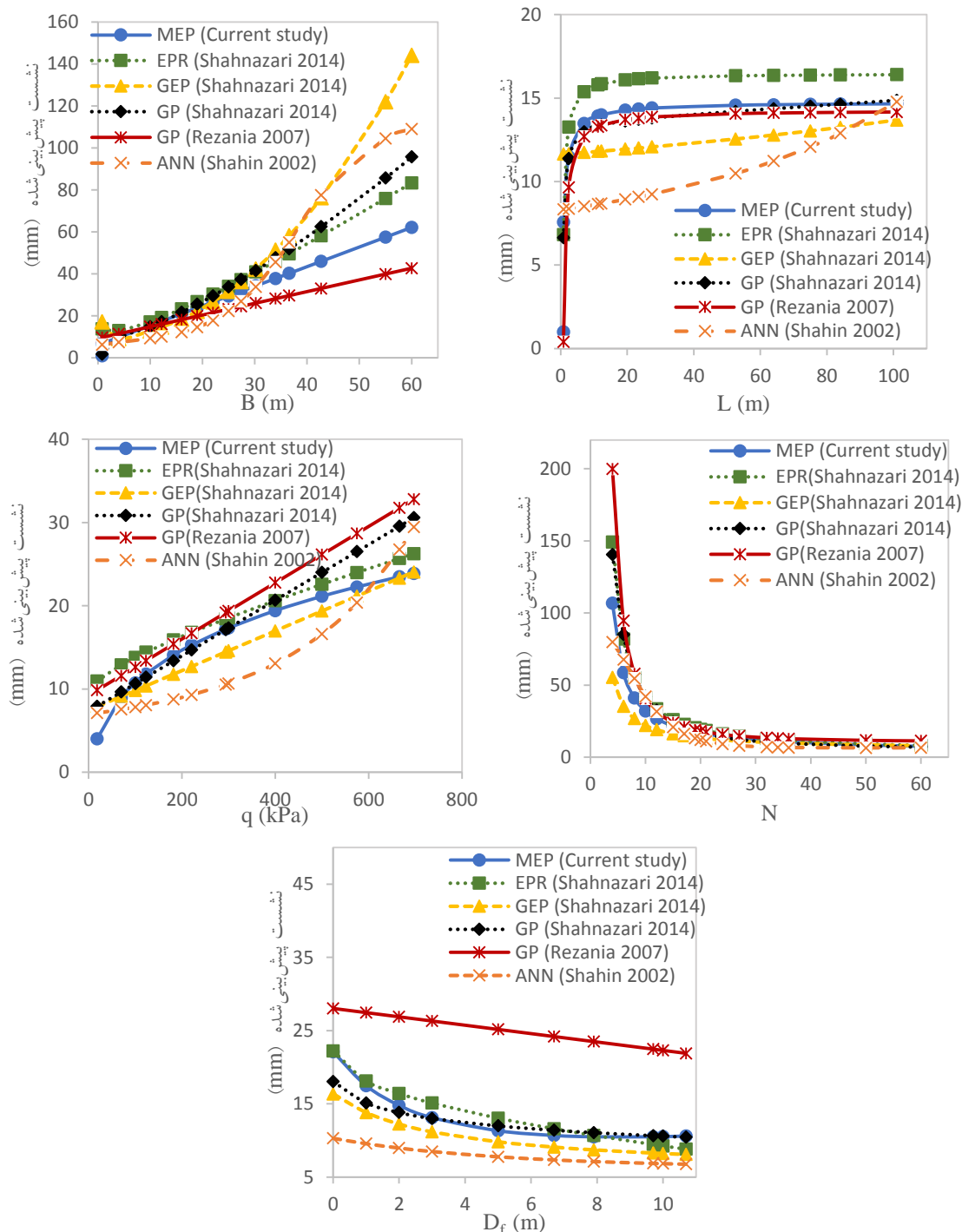
همان‌طور که مشاهده می‌شود همه‌ی مدل‌ها قادر به تطابق رفتار فیزیکی مسئله نشست مطابق با تحقیقات تجربی هستند. برای مثال در تمام مدل‌ها می‌توان دریافت که نشست پی همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش عرض پی، طول پی و ظرفیت باربری افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، نشست با افزایش عمق مدفون پی و متوسط تعداد ضربات آزمایش SPT، کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که با وجود این‌که تمامی مدل‌ها قادر به ارائه‌ی

### مطالعه‌ی پارامتری

مطالعه‌ی پارامتری به بررسی رفتار مدل‌های پیش‌بینی شده مطابق با آنچه در تحقیقات تجربی دیده می‌شود، پرداخته و اثر تغییرات هر پارامتر ورودی، مورد مطالعه قرار گرفته است، درحالی‌که پارامترهای ورودی دیگر با توجه به پایگاه داده‌ی موجود ثابت و برابر مقدار میانگین مقادیر آزمایشگاهی خود در نظر گرفته می‌شوند. برای بررسی بیشتر توانایی پیش‌بینی مدل‌های توسعه‌یافته در این مطالعه و برای مقایسه با مدل‌های قبلا توسعه‌یافته توسط شاهین و همکاران (۲۰۰۲) [3] و رضانیا و جوادی (۲۰۰۷) [7] و شاه‌نظری و همکاران (۲۰۱۴) [8] یک مطالعه‌ی پارامتری برای بررسی تأثیر ورودی‌های مدل در

کلی می‌توان نتیجه گرفت که تمامی پارامترهای ورودی بر نشست پی‌های سطحی روی خاک دانه‌ای مؤثر هستند اما وزن اثرات آنها متفاوت است.

روندهای متناسب با رفتار نشست هستند، مقدار نشست محاسبه‌شده توسط هر یک از مدل‌ها در شرایط مشابه دارای تفاوت می‌باشد. براساس مطالعات پارامتری، به‌طور



شکل ۴ روند تغییرات نشست پیش‌بینی‌شده با افزایش مقدار پارامترهای ورودی و مقایسه آن با مدل‌های پیشین

## تحلیل حساسیت

آنالیز حساسیت به منظور مشخص نمودن میزان تأثیر پارامترهای مختلف بر روی مدل انجام می‌شود. برای برآورد کردن میزان تأثیر هر پارامتر مدنظر در معادله، داده‌های ورودی آن پارامتر از مسئله حذف می‌شود و مدل با داده‌های بقیه‌ی پارامترها ساخته می‌شود. این روند برای تک‌تک پارامترها انجام می‌شود تا با محاسبه‌ی خطاهای مدل‌های جدید و مقایسه‌ی آنها میزان تأثیر تمامی پارامترها مشخص شود. در جدول (۶) میزان تغییر بیشتر در دقت مدل با حذف یک پارامتر، نشان از تأثیرگذاری بیشتر آن پارامتر بر مدل پیش‌بینی دارد.

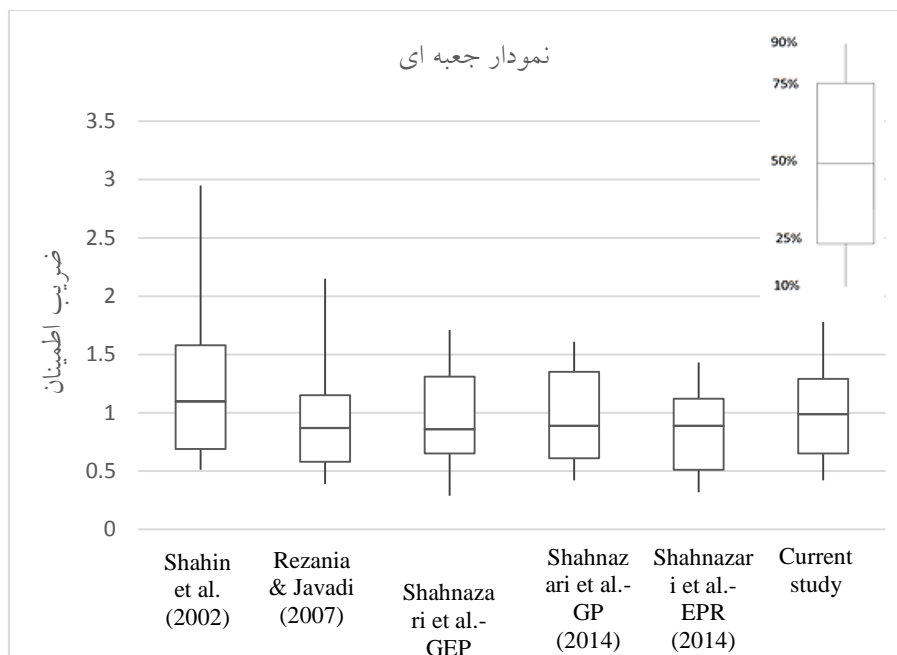
مقادیر چهار شاخص آماری  $CC$ ،  $R^2$ ،  $RMSE$  و  $MAE$  در جدول (۶) نشان می‌دهند که پارامتر  $N$  بیشترین اثر را بر روی مدل  $MEP$  دارد زیرا با حذف آن شاخص‌های  $R^2$  و  $CC$  به شدت کاهش یافته و شاخص‌های  $RMSE$  و  $MAE$  به میزان قابل توجهی افزایش داشته‌اند و بعد از آن پارامتر عرض پی (B)، پارامتر ظرفیت باربری (q) و عمق مدفون پی (Df) به ترتیب بر روی مدل تأثیرگذار می‌باشند؛ اما حذف پارامتر طول پی (L) چندان مؤثر به نظر نمی‌رسد.

## ضریب اطمینان

به منظور ارائه‌ی ضرایب اطمینان مدل در این پژوهش از نمودارهای جعبه‌ای استفاده شده‌است. برای تهیه‌ی نمودارهای جعبه‌ای ابتدا نسبت مقادیر نشست پی سطحی اندازه‌گیری شده به پیش‌بینی شده محاسبه می‌گردد و توزیع احتمالاتی آنها به دست می‌آید. سپس مقادیر چارک اول، میانه، چارک سوم، مقداری که ۱۰٪ داده‌ها از آن کوچک‌تر هستند و مقداری که ۹۰٪ داده‌ها از آن کوچک‌تر هستند، به دست می‌آید و نمودار جعبه‌ای بر اساس آنها رسم می‌شود. بر این اساس، هر چه نمودار جعبه‌ای جمع‌تر و مقدار میانه به عدد یک نزدیک‌تر باشد عملکرد مدل از لحاظ قابلیت اطمینان پیش‌بینی بهتر است. شکل (۵) نمودار جعبه‌ای مدل  $MEP$  را در کنار نمودارهای جعبه‌ای سایر روش‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با توجه به طول نمودارهای جعبه‌ای، مدل  $MEP$  کمترین پراکندگی را نشان می‌دهد و نیز مقدار متناظر با ۵۰٪ (میانه) آن در مقایسه با روش‌های دیگر به عدد یک نزدیک‌تر می‌باشد؛ بنابراین می‌توان گفت عدم قطعیت در پیش‌بینی نشست با مدل  $MEP$  در مقایسه با مدل‌های دیگر محققان کمتر است.

جدول ۶ آنالیز حساسیت مدل  $MEP$ 

شاخص‌های آماری				مدل
MAE	RMSE	R <sup>2</sup> (%)	CC (%)	
۵/۷۷	۹/۱۳	۸۷/۲۵	۹۳/۴۵	MEP
۵/۶۶	۹/۱۴	۸۷/۲۳	۹۳/۶۳	MEP در غیاب 1/L
۷/۲۹	۱۲/۲۹	۷۶/۹۳	۸۷/۷۸	MEP در غیاب B
۶/۴۱	۱۰/۶۸	۸۲/۵۶	۹۱	MEP در غیاب Ln(q)
۱۰/۳۱	۱۹/۰۹	۴۴/۳۲	۶۹/۲۷	MEP در غیاب Ln(N)
۶	۱۰/۳۲	۸۳/۷۳	۹۱/۹۹	MEP در غیاب Df



شکل ۵ نمودار ضرایب اطمینان مدل‌های مختلف پیش‌بینی نشست پی سطحی

### نتیجه‌گیری

موفقیت در پروژه‌های عملی مورد استفاده قرار گیرد.

۲. مقایسه بین مدل MEP و دقیق‌ترین مدل‌ها شامل ANN، GP، GEP و EPR در ادبیات فنی نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی در این مطالعه، عملکرد بهتری نسبت به اکثر مدل‌های توسعه‌یافته‌ی قبلی دارد.

۳. در مطالعه‌ی حاضر شاخص‌های آماری  $R^2$  و CC به ترتیب برابر ۹۳/۴۵ درصد و ۸۷/۲۵ درصد و شاخص‌های آماری RMSE و MAE به ترتیب برابر ۹/۱۳ و ۵/۷۷ به دست آمد که نشان‌دهنده‌ی برتری این مدل جدید نسبت به مدل‌های پیشین است.

۴. نتایج مطالعه‌ی پارامتری انجام‌شده بر روی داده‌ها نشان می‌دهد که رفتار مدل MEP ارائه‌شده با رفتارهای مورد انتظار از دید ژئوتکنیکی هم‌خوانی دارند.

۵. براساس تحلیل حساسیت انجام‌شده در این پژوهش می‌توان دریافت عدد SPT لایه‌ی زیرین، عرض پی، ظرفیت باربری پی، عمق مدفون پی و طول پی به ترتیب مهم‌ترین پارامترهای ورودی هستند که بر

باتوجه به اهمیت پیش‌بینی نشست پی سطحی بر روی خاک دانه‌ای در این مقاله یک مدل جدید برای پیش‌بینی نشست تهیه شده‌است. این مدل براساس الگوریتم برنامه‌نویسی چندعبارتی (MEP) برطبق روش‌های برنامه‌نویسی ژنتیک ساخته شده‌است. برای ایجاد این مدل ۱۸۹ داده‌ی آزمایشگاهی از مطالعات پیشین جمع‌آوری شده‌است. داده‌ها ابتدا به صورت آموزشی و ارزیابی تقسیم‌بندی شده و سپس داده‌ها به الگوریتم MEP ارائه شده‌است. مدل جدید تولیدشده با دقیق‌ترین روبرو در ادبیات فنی موجود مقایسه شده‌اند. به علاوه مطالعه‌ی پارامتری، تحلیل حساسیت و همچنین بررسی ضرایب اطمینان بر روی مدل انجام شده‌است. برپایه‌ی نتایج حاصل از این مطالعه می‌توان موارد زیر را بیان نمود:

۱. مدل MEP پیشنهادشده قادر است به درستی نشست پی سطحی بر روی خاک‌های غیرچسبنده را پیش‌بینی کند. باتوجه به دقت و سادگی آن، این مدل می‌تواند با

فهرست علائم	تخمین نشست پی سطحی واقع بر خاک دانه‌ای تأثیر می‌گذارند.
GP	برنامه‌نویسی ژنتیک
MEP	برنامه‌نویسی چندعبارتی
ANN	شبکه‌ی عصبی مصنوعی
GEP	برنامه‌نویسی بیان ژن
EPR	رگرسیون چندمتغیره‌ی تکاملی
B	عرض پی، m
L	طول پی، m
q	ظرفیت باربری پی، kPa
N	عدد آزمایش SPT
Df	عمق مدفون پی، m
S	نشست، mm
CC	ضریب هم‌بستگی
R <sup>2</sup>	ضریب تعیین
RMSE	خطای میانگین ریشه‌ی مربعات
MAE	میانگین خطای مطلق

تخمین نشست پی سطحی واقع بر خاک دانه‌ای تأثیر می‌گذارند.

۶. باتوجه به بررسی ضریب اطمینان و نمودار ارائه‌شده می‌توان گفت عدم قطعیت در پیش‌بینی نشست با مدل MEP در مقایسه با مدل‌های دیگر محققان کمتر است.

۷. در تحقیق حاضر قابلیت رویکرد MEP در یافتن راه‌حل برای مسئله‌ی غیرخطی نشست شالوده‌های سطحی روی خاک‌های دانه‌ای به‌وضوح نشان داده شده‌است. علاوه بر این، امکان پیشرفت بیشتر قابلیت پیش‌بینی توسط تکنیک پیشنهادی با آموزش مجدد مدل با داده‌های جدید فراهم است. اطلاعات بیشتر در مورد پارامترهای منعکس‌کننده‌ی شرایط میدانی زمین و بار می‌تواند به‌طور محسوسی به محققان کمک کند تا مدل‌های قابل اطمینان‌تری را برای پیش‌بینی دقیق نشست پی‌های سطحی بر روی خاک‌های دانه‌ای ارائه دهند.

## مراجع

- Schmertmann, J. H., "Static Cone to Compute Static Settlement over Sand", *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, Vol. 96, No. 3, pp. 1011-1043, (1970).
- Poulos, Harry George, "Settlement of Isolated Foundations", University of Sydney, School of Civil Engineering, (1975).
- Shahin, M. A., Maier, H. R., and Jaksa, M. B., "Predicting Settlement of Shallow Foundations Using Neural Networks", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 128.9, pp. 785-793, (2002).
- Maugeri, M., et al., "Observed and Computed Settlements of two Shallow Foundations on Sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*, Vol. 124.7, pp. 595-605, (1998).
- Coduto, D. P., "Foundation Design; Principles and Practis", Practice Hall International, New Jersey, (1994).
- Sower, G. B., and G. F. Sower, "Introductory Soil Mechanics and Foundation", pp. 102, (1970).
- Rezania, M., and Javadi, A. A., "A New Genetic Programming Model for Predicting Settlement of Shallow Foundations", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 44.12, pp. 1462-1473, (2007).
- Shahnazari, H., Shahin, M. A., and Tutunchian, M. A., "Evolutionary-based Approaches for Settlement Prediction of Shallow Foundations on Cohesionless Soils", *International Journal of Civil*

- Engineering*, Vol. 12.1, pp. 55-64, (2014).
9. Derakhshani, A., "Estimating Uplift Capacity of Suction Caissons in Soft Clay: A Hybrid Computational Approach Based on Model Tree and GP", *Ocean Engineering*, Vo. 146, pp. 1-8, (2017).
  10. Talebi, A., and Derakhshani, A., "Estimation of P-multipliers for Laterally Loaded Pile Groups in Clay and Sand", *Ships and Offshore Structures*, Vol. 14.3, pp. 229-237, (2019).
  11. Khorrami, R., and Derakhshani, A., "Estimation of Ultimate Bearing Capacity of Shallow Foundations Resting on Cohesionless Soils Using a New Hybrid M5'-GP Model", *Geomechanics and Engineering*, Vol. 19.2, pp. 127-139, (2019).
  12. Oltean, M., and Dumitrescu, D., "Multi Expression Programming", *Journal of Genetic Programming and Evolvable Machines*, Kluwer, second tour of review, (2002).
  13. Banzhaf, W., et al., *Genetic Programming: An Introduction*. Vol. 1. San Francisco: Morgan Kaufmann, (1998).
  14. Alavi, A. H., et al., "Utilisation of Computational Intelligence Techniques for Stabilised Soil", *6th International Conference on Engineering Computational Technology*, ECT 2008, (2008).
  15. Alavi, A. H., et al., "Soft Computing Based Approaches for High Performance Concrete", *6th International Conference on Engineering Computational Technology*, ECT 2008, (2008).
  16. Gandomi, A. H., et al., "Application of a Coupled Simulated Annealing-genetic Programming Algorithm to the Prediction of Bolted Joints Behavior", *American-Eurasian Journal of Scientific Research*, Vol. 3.2, pp. 153-162, (2008).
  17. Gandomi, A. H., et al., "Behavior Appraisal of Steel Semi-rigid Joints Using Linear Genetic Programming", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 65.8-9, pp. 1738-1750, (2009).
  18. Cevik, A., and Firat Cabalar, A., "Modelling Damping Ratio and Shear Modulus of Sand-mica Mixtures Using Genetic Programming", *Expert Systems with Applications*, Vol. 36.4, pp. 7749-7757, (2009).
  19. Oltean, M., and Groşan, C., "Evolving Evolutionary Algorithms Using Multi Expression Programming", *European Conference on Artificial Life*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 651-658, (2003).
  20. Oltean, M., and Groşan, C., "A Comparison of Several Linear Genetic Programming Techniques", *Complex Systems*, Vol. 14.4, pp. 285-314, (2003).
  21. Burland, J. B., et al., "Settlement of Foundations on Sand and Gravel", *Proceedings of the institution of Civil Engineers*, Vol. 78.6, pp. 1325-1381, (1985).
  22. Meyerhof, G. G., "Shallow Foundations", *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, 91, Proc. pp. 4275, (1965).
  23. Bazaraa, A., Sadik, S., "Use of the Standard Penetration Test for Estimating Settlements of Shallow

- Foundations on Sand", University of Illinois at Urbana-Champaign, (1968).
24. Briaud, J. L., and Gibbens, R., "Behavior of five large spread footings in sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125.9, pp. 787-796, (1999).
25. Burbidge, M. C., "A Case Study Review of Settlements on Granular Soil", Diss. Imperial College, University of London, (1982).
26. Picornell, M., and Del Monte, E., "Prediction of Settlements of Cohesive Granular soils", Measured Performance of Shallow Foundations, ASCE, (1988).
27. Wahls, H. E., "Settlement Analysis for Shallow Foundations on Sand", *Proceedings of the 3rd International Geotechnical Engineering Conference*, Cairo, Egypt, pp. 7-28 , (1997).

