

تخمین ظرفیت باربری نوک شمع بر مبنای اطلاعات CPT با استفاده از شبکه‌های عصبی GMDH

علی قربانی* (استادیار)

دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

ابوالفضل اسلانی (دانشیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

حسن ابراهیمی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۲)
دوری ۲-۲۹، شماره ۳، ص. ۸۰-۷۸

آزمایش نفوذ مخروط (CPT)^۱ یک مدل کوچک مقیاس شمع است که برای تعیین ظرفیت باربری شمع‌های واقعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش گروهی داده گردانی (GMDH)^۲ یک نوع شبکه‌ی عصبی است که ساختار آن توسط الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی شده است. در این تحقیق داده‌های ۲۹ آزمایش بارگذاری استاتیکی و دینامیکی شمع و اطلاعات CPT مجاور آن‌ها جمع‌آوری شد. با کمک این داده‌ها، رابطه‌ی بر مبنای GMDH برای تخمین ظرفیت باربری نوک شمع ارائه و تأثیرات q_E (مقاومت مؤثر نوک مخروط) و f_s (مقاومت غلاف مخروط) در مقاومت واحد نوک شمع بررسی شده است. مقایسه‌های انجام‌شده با روابط مستقیم تعیین ظرفیت باربری شمع بر مبنای CPT و CPTu نشان‌دهنده دقت بسیار مناسب رابطه‌ی جدید پیشنهادی برای تخمین ظرفیت باربری نوک شمع است.

واژگان کلیدی: ظرفیت باربری شمع، آزمایش نفوذ مخروط (CPT)، بارگذاری استاتیکی، GMDH.

مقدمه

تاکنون پژوهشگران روابط توریک متعددی برای تخمین ظرفیت باربری شمع‌ها پیشنهاد کرده‌اند، ولی با توجه به ماهیت رفتار خاک و عدم قطعیت‌های موجود واضح است که نتایج حاصل از روابط توریک به تنهایی نمی‌تواند روشی مطمئن برای تعیین ظرفیت باربری شمع باشد. بنابراین استفاده از روابط مبتنی بر نتایج آزمایش‌های صحرائی، راه حل مناسبی برای این مشکل است. برای نیل به این امر نیز به‌کارگیری بانک‌های اطلاعاتی جدید و آزمایش روش‌های محاسباتی و تحلیلی جدید ضروری است.

آزمایش نفوذ مخروط (CPT) روشی ساده، سریع، قابل اعتماد، و اقتصادی است که می‌تواند داده‌های پیوسته‌ی را از خاک‌های زیرین فراهم کند. این داده‌ها مقادیر مقاومت نوک مخروط (q_c) و مقاومت غلاف مخروط (f_s) هستند که برای طبقه‌بندی و شناسایی خاک، ارزیابی خصوصیات مقاومتی و تغییرشکل‌پذیری خاک‌ها کاربرد دارند. به‌دلیل شباهتی که بین نفوذگر مخروطی و شمع وجود دارد، به استفاده از CPT برای تعیین ظرفیت باربری شمع توجه فراوانی شده است.

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۵/۱۸، اصلاحیه ۱۳۹۰/۹/۲۹، پذیرش ۱۳۹۱/۲/۱۱.

ghorbani@guilan.ac.ir
afeslami@yahoo.com
hassan.ebrahimi@gmail.com

پیچیدگی وابستگی فاکتورها به هم در چنین مسائلی استفاده از آنالیز رگرسیون را ناممکن و نیاز به روش‌های تحلیلی پیشرفته‌تر را ضروری می‌سازد. از طرفی دیگر، امروزه از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs) برای حل مسائل بسیار پیچیده‌ی مهندسی ژئوتکنیک نظیر روان‌گرایی با موفقیت قابل قبولی استفاده می‌شود.^[۳-۱] برای اولین بار در سال ۱۹۷۱، GMDH به‌منزله‌ی روش تحلیل چندمتغیره برای مدل‌کردن سیستم‌های پیچیده معرفی شد که بدون داشتن دانش خاصی از سیستم قادر به شناخت الگوهاست.^[۴] هدف اصلی GMDH ساخت مدلی تحلیلی در شبکه‌های یک‌سویه براساس تابع انتقالی گره‌های درجه‌ی دوم است که ضرایب آن از طریق روش رگرسیون به‌دست می‌آیند.^[۵] همچنین استفاده از شبکه‌های خود سامانده باعث کاربرد موفقیت‌آمیز الگوریتمی از نوع GMDH شده است که موجب پیشرفت‌های گسترده‌ی در زمینه‌های علوم مهندسی و اقتصاد شده است.^[۱-۵]

در این نوشتار، شبکه‌ی عصبی از نوع GMDH برای تخمین ظرفیت باربری نوک شمع در خاک‌های مخلوط به‌کار گرفته شده است. بر این اساس برای ساخت مدل از دو پارامتر ورودی مهم در دستگاه نفوذ مخروط: ۱. مقاومت نوک مخروط (q_c); ۲. مقاومت غلاف (f_s) استفاده شده است. پارامتر خروجی این شبکه، ظرفیت باربری واحد نوک شمع است. آنالیز حساسیت به‌دست‌آمده، تأثیرات پارامترهای ورودی را

جدول ۱. خلاصه‌یی از روش‌های مختلف CPT در تعیین مقدار واحد مقاومت نوک شمع.

روش تعیین ظرفیت باربری از طریق CPT	ملاحظات	
Schmertmann & Nottingham, (۱۹۷۸)	$r_t = Cq_{ca} < ۱۵ \text{ Mpa}$ مقادیر فیلترشده به روش حداقل مسیر است.	محدوده‌ی مؤثر بین ۸B بالای شمع تا ۷B ^۰ یا ۴B در پایین نوک شمع است.
De Ruiter & Beringen, (۱۹۷۹)	$r_t = N_c S_u > ۱۵ \text{ Mpa}$ $S_u = q_{ca} / N_K$ در ماسه همانند روش اشمرتمن و ناتینگهام ^[۱۳] است.	مقدار N_c برای خاک‌های OC، ۵/۰ و برای NC برابر با ۱ است. مقدار N_t ضریب بی‌بعدی است که بین ۱۵-۲۰ است.
Bustamante & Gianeselli, (۱۹۸۲)	$r_t = C_{LCP} q_{caa} < ۱۵ \text{ MPa}$ $C_{LCP} = ۰/۴ - ۰/۵۵$ که به نوع خاک بستگی دارد.	میانگین q_{ca} در محدوده‌ی ۱/۵B در بالا و ۱/۵B در پایین شمع است.
Mayerhof, (۱۹۸۳)	در ماسه: $r_t = q_{ca} C_1 C_2$	C_1 ضریب اثر مقیاس، C_2 ضریب عمق نفوذ در لایه‌ی سخت محدوده‌ی مؤثر بین ۴B بالای شمع تا ۱B در پایین شمع است.
Eslami & Fellenius, (۱۹۹۷)	$r_t = C_t \cdot q_{eg}$ q_{eg} میانگین هندسی مقاومت مخروط در محدوده‌ی مؤثر است.	$C_t = ۱$ محدوده‌ی مؤثر بین ۸B بالای شمع تا ۴B پایین شمع است.

مختلف قرار گرفته است. این روش‌ها را می‌توان به دو گروه روش‌های مستقیم و غیرمستقیم تقسیم‌بندی کرد. در روش غیرمستقیم، ابتدا پارامترهای مکانیکی خاک مانند زاویه اصطکاک داخلی و ضریب چسبندگی خاک با استفاده از نتایج آزمایش نفوذ مخروط (q_c و f_s) به‌دست می‌آیند. سپس با کمک این پارامترها، ظرفیت باربری نوک شمع با استفاده از روابط استاتیکی تعیین می‌شود. متقابلاً، در روش‌های مستقیم بین نتایج آزمایش نفوذ مخروط و ظرفیت باربری نوک شمع رابطه‌ی مستقیم برقرار می‌شود.

تاکنون روابط مستقیم متعددی توسط پژوهشگران مختلف ارائه شده است، مثلاً در سال ۱۹۷۹ روش مستقیم با نام اروپایی^[۱۱] در سال ۱۹۸۲ روش دیگری با عنوان LCPC^[۱۲] و همچنین روش‌های مستقیم دیگری پیشنهاد داده شد که خلاصه‌ی آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.^[۱۳-۱۷] بررسی‌های انجام‌شده نشان داده است که این روش‌ها دقت نسبتاً بالاتری در مقایسه با روش‌های صحرایی دیگر (نظیر روش SPT) دارند.^[۱۲، ۱۸] با وجود این، روش‌های مذکور به‌دلیل در نظر نگرفتن اثر فشار آب حفره‌ی اشکالاتی هم دارند، که پژوهشگران سعی کرده‌اند با استفاده از نتایج آزمایش CPTu آن‌ها را برطرف کنند. در سال ۱۹۹۷ نیز روشی مستقیم ارائه شد که در آن اثر پارامتر (u_2)، فشار آب حفره‌ی در شانه‌ی مخروط برای محاسبه‌ی ظرفیت باربری نوک شمع لحاظ شده است.^[۱۸]

نرم‌افزار UniCone

نرم‌افزار UniCone برای پردازش و گزارش نتایج آزمایش نفوذ مخروط CPT و CPTu است. این برنامه دارای قابلیت نمایش نتایج آزمایش نفوذ مخروط (مقاومت نوک، مقاومت جداره، اضافه فشار آب حفره‌ی، و نسبت اصطکاک) به‌صورت گرافیکی است. این نرم‌افزار قادر به تفکیک و شناسایی خاک و همچنین تعیین ظرفیت باربری نوک و جداره‌ی شمع از طریق روش‌های مستقیم است.^[۱۹] در این نوشتار، برای محاسبه‌ی ظرفیت باربری نوک شمع براساس روش‌های مستقیم موجود از این نرم‌افزار استفاده شده است.

در پارامتر خروجی نشان می‌دهد. نهایتاً این روش با روش‌های مستقیم اندازه‌گیری ظرفیت باربری براساس نتایج CPT مقایسه و نشان داده شد که روش پیشنهادی، ظرفیت باربری واحد نوک شمع را با دقتی مناسب محاسبه می‌کند.

مرور روش‌های موجود برای تعیین ظرفیت باربری نوک شمع

ظرفیت باربری شمع از دو قسمت مقاومت نوک (Q_t) و مقاومت جداره (Q_s) تشکیل شده است، که معادله‌ی عمومی آن مطابق فرمول ۱ است:

$$Q_u = Q_t + Q_s = r_t \times A_t + \sum_{i=1}^n f_i \times A_{si} \quad (۱)$$

که در آن، r_t واحد مقاومت نوک شمع، A_t سطح مقطع نوک شمع، f_i میانگین واحد مقاومت جداره در لایه‌ی i ام، A_{si} سطح واحد جداره در لایه‌ی i ام، و n تعداد لایه‌های خاک در امتداد و طول شمع هستند.

روش‌های مختلفی برای تعیین ظرفیت باربری فشاری نوک شمع‌ها وجود دارند که می‌توان آن‌ها را به ۴ دسته شامل روش‌های: استاتیکی، دینامیکی (برای تعیین ظرفیت باربری استاتیکی)، مبتنی بر آزمایش بارگذاری استاتیکی، و نتایج آزمایش‌های صحرایی (نظیر CPT) تقسیم‌بندی کرد.

در روش‌های استاتیکی، فرم کلی رابطه‌ی ظرفیت باربری نوک شمع مشابه رابطه‌ی سه جمله‌ی ظرفیت باربری پی‌های سطحی است. پژوهشگران با فرض سطوح شکست مختلف در ناحیه‌ی نوک شمع، روابط استاتیکی مختلفی برای محاسبه‌ی ظرفیت باربری نوک شمع ارائه کرده‌اند که تفاوت اصلی آن‌ها در مقدار فاکتورهای بی‌بعد ظرفیت باربری است. ظرفیت باربری استاتیکی واقعی شمع در محل را می‌توان با کمک آزمایش دینامیکی شمع (PDA) و تحلیل با روش انطباق سیگنال (CAPWAP) و یا آزمایش بارگذاری استاتیکی و تحلیل با روشی مناسب مانند روش حدی داویسون به‌دست آورد.

در چند دهه‌ی اخیر، استفاده از روش‌های مبتنی بر نتایج آزمایش نفوذ مخروط (CPT و CPTu) به‌منزله‌ی مکمل روش‌های تحلیل استاتیکی مورد توجه پژوهشگران

الگوی گسیختگی و محدوده‌ی مؤثر (گسیختگی) در

تحلیل مقاومت نوک

یکی از مشکلاتی که در استفاده از روش‌های مستقیم وجود دارد، انتخاب محدوده‌ی مؤثر مقاومت نوک مخروط در تعیین مقاومت واحد نوک شمع است. از این رو ضروری است که نوع و منطقه‌ی گسیختگی مشخص شود. به هر حال مدرک خاصی مبنی بر اینکه نوع گسیختگی از نوع پانچ یا برشی ساده است، وجود ندارد. باید توجه داشت که محدوده‌ی گسیختگی در بالا و پایین نوک شمع با قطر شمع کنترل می‌شود و مقدار محدوده باید به صورت تابعی از این قطر باشد.

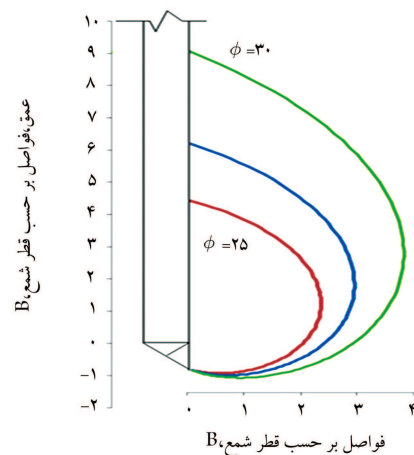
Mayerhof (۱۹۵۱)^[۲۰] و De Beer (۱۹۶۳)^[۲۱] یک الگوی گسیختگی به صورت ماریچ لگاریتمی مطابق معادله‌ی ۲ ارائه داده‌اند که مطابق آن گسیختگی به بدنه‌ی شمع می‌رسد.

$$(2) \quad r = r_0 \times e^{\theta \tan \phi}$$

که در آن، r_0 شعاع ماریچ لگاریتمی برای $\theta = 0$ (هم‌اندازه‌ی قطر نفوذگر مخروط فرض شده است)، θ زاویه‌ی بین شعاع و r_0 و ϕ زاویه‌ی بین شعاع و عمود در هر نقطه بر ماریچ لگاریتمی (هم‌اندازه‌ی زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک فرض شده) است.

چنانچه زاویه‌ی اصطکاک داخلی ۲۵ تا ۳۰ در نظر گرفته شود، محدوده‌ی گسیختگی در بالای شمع بین ۴B-۹B و در پایین شمع بین ۱/۸B-۱/۵B به دست می‌آید (شکل ۱). در معادله‌های مقاومت نوک باید از میانگین مقاومت نوک مخروط در محدوده‌ی مؤثر (گسیختگی) استفاده شود و روش مفید برای در نظر گرفتن این محدوده، روش ماریچ لگاریتمی است. برخلاف خاک‌های یکنواخت، در خاک‌های غیر یکنواخت مقدار این میانگین کاملاً به محدوده‌ی مؤثر در نظر گرفته شده وابسته است.

در روش اشترمن (۱۹۷۸)^[۲۲] و نائینگهام (۱۹۷۵)^[۲۳] محدوده‌ی مؤثر در بالای نوک شمع ۸B است که می‌تواند برای شمع‌هایی که از لایه‌ی سست عبور می‌کنند و به لایه‌ی مقاوم می‌رسند، منطقی باشد. این مقدار برای شمع‌هایی که از خاک‌های سخت عبور می‌کنند و وارد لایه‌ی ضعیف می‌شوند، غیرمنطقی به نظر می‌رسد و ممکن است گمراه‌کننده باشد. روش یونیکون برای چنین حالتی، محدوده‌ی مؤثر را ۲B در بالای نوک شمع و ۸B در پایین نوک شمع پیشنهاد می‌دهد.



شکل ۱. سطوح گسیختگی برای زاویه‌های مختلف بر مبنای تئوری ماریچ لگاریتمی.

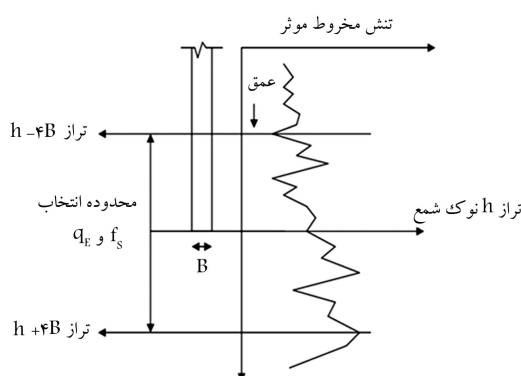
در روش بوستامانته و جیانسلای (۱۹۸۲)^[۱۲] محدوده‌ی مؤثر در ۱/۵B در بالا و ۱/۵B در پایین نوک شمع قرار دارد که در نظر گرفتن این محدوده به منزله‌ی محدوده‌ی مؤثر ممکن است به تخمینی اشتباه منجر شود. نکته‌ی حائز اهمیت این است که میان شمع‌هایی که از خاک سست وارد خاک‌های سخت و یا از خاک سخت وارد لایه‌ی سست می‌شوند، هیچ‌گونه تغییری در انتخاب محدوده‌ی مؤثر ایجاد نشده و از محدوده‌های مؤثر یکسان استفاده شده است.

محدوده‌ی که در این تحقیق به منزله‌ی محدوده‌ی مؤثر در نظر گرفته شده است، ۴B در بالا و پایین نوک شمع است که در شکل ۲ نشان داده شده است. این محدوده برای همه‌ی شمع‌ها یکسان در نظر گرفته شد و در شرایطی که شمع از لایه‌ی سست عبور کرده و وارد لایه‌ی سخت می‌شود و همچنین برعکس، هیچ‌گونه تغییری در محدوده‌ی مؤثر به وجود نمی‌آید. همچنین ذکر این نکته مهم است که برخلاف بیشتر روش‌ها که فقط از پارامتر مقاومت نوک مخروط (q_c) استفاده می‌کنند، پارامترهای اضافه فشار آب حفره‌ی در شانه‌ی مخروط (u_2) و مقاومت غلاف مخروط (f_s) که جنبه‌ی مهمی از اطلاعات CPT و شناسایی خاک محسوب می‌شوند، نیز می‌توانند در اندازه‌گیری مقاومت نوک شمع مؤثر باشند، که از آن‌ها در مدل‌سازی استفاده شده است. گستردگی محدوده‌ی مؤثر انتخابی از روش بوستامانته و جیانسلای^[۱۲] بیشتر است به این دلیل که مطالعات Altaee (۱۹۹۲) نشان داد که محدوده‌ی مؤثر در ۵B (قطر شمع است) بالای نوک شمع تا ۵B پایین‌تر از نوک شمع برای شمع‌های بتنی در خاک‌های یکنواخت و نیمه متراکم ماسه‌یی است و بنابراین شمع‌هایی که نوک آن‌ها بر روی لایه‌ی ضعیف در محدوده‌ی نوک شمع بنا نهاده شده است، با کاهش مقاومت نوک همراه است.^[۲۵، ۲۴، ۱۹]

معمولاً نمودار مقاومت مخروط صحرایی دارای یک سری نقاط کمینه و بیشینه است که این مقادیر پاسخی از مخروط به شرایط محیط هستند و نمی‌توان آن‌ها را به شمع‌ی با سایز چندین برابر قطر مخروط ارتباط داد. بنابراین برای به دست آوردن مقاومت واحد نوک شمع فیلترسازی اطلاعات CPT ضروری است. بدون فیلترکردن داده‌ها، میانگین حسابی به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد. میانگین حسابی مقاومت نوک مخروط از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$(3) \quad q_{ca} = \frac{q_{c1} + q_{c2} + q_{c3} + \dots + q_{cn}}{n}$$

که در آن، q_{ca} میانگین حسابی مقادیر مقاومت نوک مخروط، $q_{c1}, q_{c2}, q_{c3}, \dots, q_{cn}$ مقاومت‌های نوک مخروط اندازه‌گیری شده در محدوده‌ی مؤثر و n تعداد کل داده‌های مقاومت نوک مخروط در محدوده‌ی مؤثر است.



شکل ۲. محدوده‌ی مؤثر در نظر گرفته شده در ساخت شبکه‌ی عصبی مقاومت واحد نوک شمع.

میانگین حسابی فقط می‌تواند برای خاک‌های یکنواخت مفید باشد. در مقابل در صورت استفاده از میانگین هندسی (مطابق رابطه‌ی ۴) تأثیر مقادیر بیشینه‌ها و کمینه‌ها به کمترین حد می‌رسد. [۱۸]

$$q_{cg} = (q_{c1} \times q_{c2} \times q_{c3} \times \dots \times q_{cn})^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

که در آن، میانگین هندسی مقادیر مقاومت نوک مخروط است. بنابراین در صورت استفاده از روش میانگین‌گیری اخیر نیازی به فیلترکردن اطلاعات نیست.

مدل‌سازی با شبکه‌های عصبی از نوع GMDH

با الگوریتم GMDH مدل‌هایی که حاوی مجموعه‌یی از نرون‌ها هستند، به‌وجود می‌آیند. این نرون‌ها از طریق یک چندجمله‌یی درجه‌ی دو به هم مرتبط‌اند و باعث تولید نرونی جدید در لایه‌ی بعدی می‌شوند. هدف اصلی این شبکه یافتن تابع تقریبی $\hat{f}$ با خروجی $\hat{y}$ برای مجموعه‌یی از ورودی‌های $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ با کمترین خطا نسبت به مقدار واقعی خروجی y است. بنابراین برای M داده‌ی آزمایشگاهی شامل n ورودی و یک خروجی، مقدار واقعی خروجی (y_i) به‌صورت رابطه‌ی ۵ است:

$$y_i = f(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{in}), \quad i = 1, 2, \dots, M. \quad (5)$$

در مرحله‌ی آموزش شبکه، مقادیر خروجی‌های $\hat{y}_i$ براساس رابطه‌ی ۶ به‌دست می‌آیند:

$$\hat{y}_i = \hat{f}(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{in}), \quad i = 1, 2, \dots, M. \quad (6)$$

در این مرحله باید مربع خطای بین مقادیر واقعی و مقادیر آموزش‌دیده کمینه شود (رابطه‌ی ۷):

$$\sum_{i=1}^M [\hat{f}(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{in}) - y_i]^2 \rightarrow Min. \quad (7)$$

ارتباط بین متغیرهای ورودی و خروجی را می‌توان به‌صورت چندجمله‌یی پیچیده بیان کرد (رابطه ۸):

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_{ijk} x_i x_j x_k. \quad (8)$$

ولی به هر حال شکل درجه‌ی دوم و دومتغیره‌ی آن بیشترین کاربرد را دارد که به‌صورت رابطه‌ی ۹ استفاده می‌شود:

$$\hat{y} = G(x_i, x_j) = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_j + a_3 x_i x_j + a_4 x_i^2 + a_5 x_j^2 \quad (9)$$

ضرایب a_i در معادله‌ی ۹ با روش‌های رگرسیون به‌گونه‌یی حل می‌شوند که اختلاف بین خروجی واقعی (y) و مقادیر محاسبه‌شده ($\hat{y}$) برای هر جفت متغیر ورودی x_i و x_j ، کمینه شود. [۶-۴] بنابراین ضرایب مجموعه‌یی از چندجمله‌یی‌های درجه‌ی دو براساس معادله‌ی ۹ محاسبه می‌شوند. به همین صورت برای هر تابع G_i (هر نرون ساخته‌شده)، ضرایب برای کمینه‌کردن خطای کل نرون‌ها برای بهینه‌شدن ورودی‌ها بر تمام جفت مجموعه‌های ورودی - خروجی به‌دست می‌آیند (رابطه‌ی ۱۰).

$$E = \frac{\sum_{i=1}^M (y_i - G_i())^2}{M} \rightarrow Min. \quad (10)$$

در شکل اصلی و پایه‌یی الگوریتم GMDH، تمامی نرون‌ها از n متغیر ورودی ساخته می‌شوند و ضرایب مجهول کلیه‌ی نرون‌ها با استفاده از روش مربعات کمینه به دست می‌آیند. بنابراین $\binom{n}{2} = \frac{n(n-1)}{2}$ نرون در اولین لایه‌ی مخفی به‌صورت مجموعه زیر ساخته می‌شوند (رابطه‌ی ۱۱).

$$\{(y_i, x_{ip}, x_{iq}) | (i = 1, 2, \dots, M) \& p, q \in (1, 2, \dots, n)\}. \quad (11)$$

بنابراین در معادله‌ی ۹ برای هر M ردیف سه‌تایی به‌صورت زیر است:

$$\begin{bmatrix} x_{1p} & x_{1q} & \vdots & y_1 \\ x_{2p} & x_{2q} & \vdots & y_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{Mp} & x_{Mq} & \vdots & y_M \end{bmatrix}. \quad (12)$$

برای هر ردیف می‌توان معادلات را به‌صورت ماتریسی (رابطه‌ی ۱۳) بیان کرد:

$$Aa = y. \quad (13)$$

که در آن a بردار ضرایب مجهول چندجمله‌یی درجه‌ی دوم در معادله‌ی ۹ است.

$$a = \{a_0, a_1, \dots, a_5\}. \quad (14)$$

$$y = \{y_1, y_2, \dots, y_M\}^T. \quad (15)$$

به‌راحتی رابطه‌ی ۱۶ قابل مشاهده است:

$$\begin{bmatrix} 1 & x_{1p} & x_{1q} & x_{1p}x_{1q} & x_{1p}^2 & x_{1q}^2 \\ 1 & x_{2p} & x_{2q} & x_{2p}x_{2q} & x_{2p}^2 & x_{2q}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{Mp} & x_{Mq} & x_{Mp}x_{Mq} & x_{Mp}^2 & x_{Mq}^2 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

روش کمترین مربعات از آنالیز رگرسیون چند متغیره^۳ حل معادلات را به‌صورت رابطه‌ی ۱۷ می‌دهد:

$$a = (A^T A)^{-1} A^T \quad (17)$$

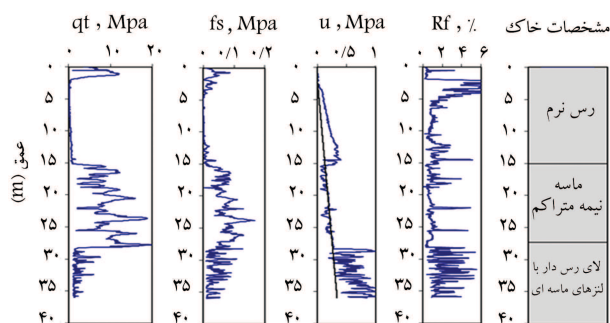
از این طریق می‌توان بردار ضرایب مجهول چندجمله‌یی معادله‌ی ۹ را برای مجموعه‌ی M ردیف سه‌تایی محاسبه کرد. لازم به ذکر است که این روند برای هر نرون در لایه‌ی مخفی بعدی با توجه به شکل و ساختار شبکه‌ی عصبی تکرار می‌شود، ولی به هر حال در این روش احتمال بروز خطای ناشی از گردکردن خطاها و مهم‌تر اینکه احتمال تکینگی^۴ در معادلات وجود دارد.

تجزیه‌ی مقادیر منفرد (SVD)^۵ روشی برای حل مسائل کمترین مربعات است، که در آن‌ها احتمال بروز تکینگی وجود دارد. [۲۶] از این روش برای محاسبه‌ی بهینه‌ی بردار ضرایب چندجمله‌یی درجه‌ی دوم استفاده می‌شود.

کاربرد الگوریتم ژنتیک در طراحی ساختار شبکه‌ی

عصبی نوع GMDH

براساس آنچه که در تاریخچه‌ی ادبیات فنی آمده است روش‌های انتخاب اتفاقی همانند الگوریتم ژنتیک که برای آموزش شبکه‌های عصبی استفاده می‌شوند، عملکرد



شکل ۴. نمونه‌یی از اطلاعات CPTu. [۲۷]

و هشت ضلعی) هستند و روش اجرای آن‌ها به ۲ صورت کوبیدنی و درجاست. طول شمع‌ها بین ۶ تا ۳۵ متر، و قطر آن‌ها بین ۲۷۳ تا ۸۰۰ میلی‌متر متغیر است. خاک سایت‌ها مشتمل بر نهشته‌های رسی نرم، رس سخت، سیلت، و ماسه‌ی نرم و متراکم هستند. نوک و جداری شمع‌ها ابزارگذاری شده‌اند و به این ترتیب مقاومت نوک (r_t) تمامی شمع‌ها موجودند. ملاحظه می‌شود که r_t بین ۰٫۳ تا ۳۰ مگاپاسکال متغیر است، که نشان‌دهنده‌ی تغییرات وسیع مقاومتی خاک در این بانک اطلاعاتی است. از ۱۹ آزمایش (۶۷٪ داده‌ها) برای آموزش شبکه و از باقیمانده‌ی داده‌ها (۱۰ مورد) برای آزمون مدل استفاده شده است.

در تمامی سایت‌ها، آزمایش نفوذ مخروط (CPT) در مجاورت شمع‌های بارگذاری شده برای تعیین مشخصات خاک اجرا شده است. یک نمونه آزمون CPTu (UBC۳) در شکل ۴ نشان داده شده است.

مدل‌سازی مقاومت نوک شمع با استفاده از شبکه‌ی

عصبی از نوع GMDH

آموزش شبکه بر مبنای ۱۹ آزمایش بارگذاری واقعی شمع انجام شده است. پارامترهای ورودی مدل شامل q_E و f_s و پارامتر خروجی r_t هستند. چون طراحی GMDH به صورت ژنتیکی است، از تعداد ۲۵۰ نسل و جمعیت و احتمال پیوند ۰٫۷ و احتمال جهش ۰٫۰۷ در این نوشتار استفاده شده است. با افزایش جمعیت پیشرفتی در جهت دقت بیشتر حاصل نشد. ساختار ارائه شده در این نوشتار متشکل از ۲ لایه مخفی است که در شکل ۵ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۵، رابطه‌ی چندجمله‌یی مقاومت واحد نوک شمع به این صورت به دست می‌آید (رابطه‌های ۱۸ الف الی ج):

$$\begin{aligned}
 Y_1 &= (0.521712463530819) + (0.802234360301321) \times (q_E) \\
 &+ (-0.555162534288506) \times (f_s) + (0.008764690402031) \\
 &\times (q_E)^2 + (-19.908769829182) \times (f_s)^2 \\
 &+ (-0.459425691542058) \times (q_E) \times (f_s) \quad (18 \text{ الف}) \\
 Y_2 &= (0.43080247000181) + (-0.78253105225317) \\
 &\times (f_s) + (0.986108102673899) \times (Y_1) \\
 &+ (-0.19362388953416) \times (f_s)^2 + (0.000350757189766) \\
 &\times (Y_1)^2 + (0.30930539683689) \times (f_s) \times (Y_1) \quad (18 \text{ ب})
 \end{aligned}$$

بهتری را نسبت به روش‌های قطعی دارند. [۹] در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک برای طراحی شکل شبکه‌ی GMDH استفاده می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد که تلاش‌های گسترده‌یی در استفاده از روش‌های تکاملی برای طراحی ساختار و یا تعیین ضرایب مجهول به صورت جداگانه انجام پذیرفته است. [۲۷] در بیشتر شبکه‌های عصبی نوع GMDH، نرون‌ها در هر لایه فقط با نرون‌های لایه‌ی قبل در ارتباط هستند. [۹] برای این نوع شبکه‌های عصبی، روشی ساده برای کدگذاری جمعیت‌ها در فضای جستجو در مرجع پیشنهاد شده است. [۹] این شبکه‌ی عصبی متداول^۶ اصطلاحاً CS-GMDH نامیده می‌شود.

شبکه‌های عصبی نوع GS-GMDH

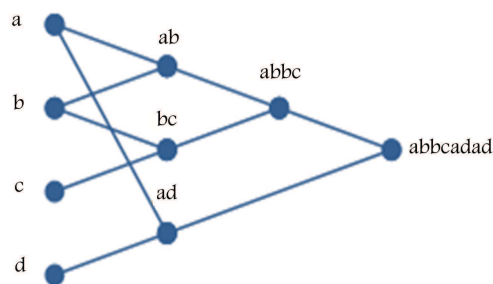
در این تحقیق از شبکه‌ی عصبی نوع GS-GMDH استفاده شده است، که در آن برخلاف شبکه‌ی CS-GMDH قید استفاده از لایه‌ی مجاور در تولید نرون جدید حذف شده است. بنابراین برای ساخت لایه‌ی جدید می‌توان از تمامی نرون‌های لایه‌های قبل استفاده کرد. در شکل ۳ ساختار یک کروموزوم تولیدشده در شبکه‌ی عصبی نوع GS-GMDH نشان داده شده است.

مشاهده می‌شود که نرون ad در اولین لایه مخفی مستقیماً به خروجی با دومین لایه مخفی ترکیب شده است. بنابراین برای نام‌گذاری نرون خروجی، نام نرون جهش‌یافته (ad) را ۲ بار تکرار می‌کنیم که به صورت abbcadad است. در برخی موارد ممکن است که نرون از تعداد لایه‌های بیشتری جهش کند، که در آن صورت تعداد تکرار نرون با طول کوچک‌تر برابر 2^n است، که n نشان‌دهنده‌ی تعداد لایه‌هایی است که نرون از آن‌ها جهش کرده است. به سادگی قابل تشخیص است که کروموزوم‌هایی همانند acacadad برخلاف ababacbc غیرقابل قبول‌اند و به راحتی می‌توان آن‌ها را به صورت acad نمایش داد.

با به کارگیری عمل‌گرهای شبکه‌ی عصبی و معیار انتخابی چرخ رولت، تمام جمعیت‌های رشته‌یی اولیه به تدریج بهینه می‌شوند. به طور کلی فرمول طول نرون 2^{Hl+1} (Hl تعداد لایه‌های مخفی است)، ارتباط بین طول نرون و تعداد لایه‌های مخفی را نشان می‌دهد؛ بنابراین شبکه‌یی که دارای ۲ لایه مخفی است، نرونی با طول $2^{2+1} = 8$ است.

بانک اطلاعاتی

برای بسط رابطه‌ی ظرفیت باربری نوک شمع، اطلاعات مربوط به ۲۹ آزمون بارگذاری تمام مقیاس شمع جمع‌آوری شد. در جدول ۲، خلاصه‌یی از اطلاعات جمع‌آوری شده نشان داده شده‌اند. شمع‌ها از جنس فلزی (لوله‌یی، H شکل) و بتنی (مدور، مربعی)



شکل ۳. ساختار کروموزوم شبکه‌ی نوع GS-GMDH.

جدول ۲. خلاصه‌یی از داده‌های جمع‌آوری شده.

ردیف	مورد عملی	مرجع	قطر شمع (میلی‌متر)	طول مدفون شمع (متر)	شکل، نوع نصب و جنس شمع	روش انجام آزمایش	r_t (Mpa)
۱	NWUP	[۲۸]	۴۵۰ و ۹/۵	۱۵/۲	لوله‌یی، کوبیدنی، فلزی	استاتیکی	۰/۳۹
۲	T۱	[۲۹]	۶۰۰	۶	مدور، درجا، بتنی	استاتیکی	۱/۷۶۷
۳	E۹	[۲۹]	۶۰۰	۶	مدور، درجا، بتنی	استاتیکی	۱/۷۶۷
۴	Grimsby	[۳۰]	۶۰۰	۱۱/۵	مدور، درجا، بتنی	استاتیکی	۱/۷۶۷
۵	UBC۵	[۳۱]	۳۲۴ و ۱۱/۵	۳۱/۱	لوله‌یی، کوبیدنی، فلزی	استاتیکی	۲/۱۹۵
۶	T۲	[۲۹]	۶۰۰	۶	مدور، درجا، بتنی	دینامیکی	۲/۲۳۷
۷	USPB۲	[۳۲]	۴۰۰	۹/۴	مدور، درجا، بتنی	استاتیکی	۲/۴۶
۸	UBC۳	[۳۱]	۳۲۴ و ۹/۵	۱۶/۸	لوله‌یی، کوبیدنی، فلزی	استاتیکی	۳/۳۸۱
۹	UHUC۱	[۳۳]	۲۷۳ و ۹	۱۳	لوله‌یی، کوبیدنی، فلزی	استاتیکی	۴/۰۶۸
۱۰	UHUC۱۱	[۳۳]	۲۷۳	۱۳	لوله‌یی، کوبیدنی، فلزی	استاتیکی	۴/۱۵۳
۱۱	BGHD۱	[۲۵، ۲۴]	۲۸۵	۱۱	مربعی، کوبیدنی، بتنی	استاتیکی	۴/۴۴۴
۱۲	TWNTF۶	[۳۴]	۶۰۹ و ۱۲	۳۴/۲۵	لوله‌یی، کوبیدنی، فلزی	استاتیکی	۵/۶۷
۱۳	BGHD۲	[۲۵، ۲۴]	۲۸۵	۱۵	مربعی، کوبیدنی، بتنی	استاتیکی	۵/۹۲۶
۱۴	FHWASF	[۳۵]	۲۷۳ و ۹/۱	۹/۲	لوله‌یی، کوبیدنی، فلزی	استاتیکی	۶/۰۱۷
۱۵	C۰	[۲۹]	۳۵۰	۶	مربعی، کوبیدنی، بتنی	دینامیکی	۶/۱۷۱
۱۶	Axelsson	[۳۶]	۲۳۵	۱۹	مربعی، کوبیدنی، بتنی	دینامیکی	۸/۲۳۹
۱۷	A&N۲	[۳۵]	۴۵۰	۱۳/۷۵	مربعی، کوبیدنی، بتنی	استاتیکی	۹/۳۶
۱۸	POLA۱	[۳۷]	۶۰۰	۲۵/۸	هشت ضلعی، کوبیدنی، بتنی	استاتیکی	۱۳/۱۵
۱۹	JPNOT۱	[۳۸]	۸۰۰ و ۱۲/۱	۸/۲ (L=۱۱)	لوله‌یی، کوبیدنی، فلزی	استاتیکی	۲۹/۲۶۸
۲۰	NWUH	[۲۸]	۳۷۱ × ۳۴۶	۱۵/۲	شکل H، کوبیدنی، فلزی	استاتیکی	۰/۳۹۱
۲۱	E۲	[۲۹]	۶۰۰	۶	مدور، درجا، بتنی	دینامیکی	۲/۱۸۴
۲۲	USPB۱	[۳۲]	۳۵۰	۹/۴	مدور، درجا، بتنی	استاتیکی	۲/۵
۲۳	MP۱	[۳۹]	۳۶۸ × ۴۰۰	۱۴	شکل H، کوبیدنی، فلزی	استاتیکی	۴/۳۴۸
۲۴	TWNTF۴	[۳۴]	۶۰۹ و ۱۲	۳۴/۲۵	لوله‌یی، کوبیدنی، فلزی	استاتیکی	۵/۴۹۸
۲۵	C۱	[۲۹]	۳۵۰	۶	مربعی، کوبیدنی، بتنی	دینامیکی	۵/۶۹۱
۲۶	A&N۱	[۴۰]	۴۵۰	۱۴	مربعی، کوبیدنی، بتنی	دینامیکی	۷/۳۸۹
۲۷	MUM۸	[۴۱]	۲۷۳ و ۵/۶	۱۲/۲	لوله‌یی، کوبیدنی، فلزی	استاتیکی	۹/۰۵۱
۲۸	POLA۲	[۴۲]	۶۰۰	۳۲/۶	هشت ضلعی، کوبیدنی، بتنی	استاتیکی	۱۱/۵۵۸
۲۹	KP۱	[۳۹]	۳۶۸ × ۴۰۰	۱۴	شکل H، کوبیدنی، فلزی	استاتیکی	۲۱/۷۳۹

از رابطه‌های پیشنهادی ۱۸ با مقادیر واقعی مقایسه شده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده، نشان‌دهنده‌ی سازگاری بسیار مناسب برای هر ۲ مرحله‌ی آموزش و آزمون است. مشاهده می‌شود که رابطه‌ی پیشنهادی می‌تواند مقادیر ظرفیت باربری شمع‌هایی را که در مرحله‌ی آموزش وجود نداشتند، با خطای نسبتاً کمی پیش‌بینی کند. مقدار ضریب همبستگی (r^2) برای دسته‌ی آموزش ۰/۹۸ و برای آزمون ۰/۸۷ است.

$$r_t = (-0.422700001526625) + (-0.374501172124272) \times (q_E) + (1.56766812172072) \times (Y_t) + (0.318459625583241) \times (q_E)^2 + (0.390577741311277) \times (Y_t)^2 + (-0.716257770173448) \times (q_E) \times (Y_t) \quad (ج ۱۸)$$

در شکل ۶ مقادیر محاسبه‌شده‌ی ظرفیت باربری واحد نوک شمع با استفاده

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، در بیشتر روش‌ها از مقاومت نوک مخروط برای تعیین مقاومت نوک شمع استفاده می‌شود. آنالیز حساسیت انجام شده نشان می‌دهد که با افزایش مقدار q_E واحد مقاومت نوک افزایش می‌یابد. تغییرات مقدار f_s تأثیر زیادی در مقدار واحد مقاومت نوک ندارد که این تأثیر در مقادیر بالای q_E بیشتر مشخص می‌شود. قابل ذکر است که برای ارزیابی بیشتر تأثیرات مقادیر q_E و f_s باید از داده‌های بیشتری که محدوده‌هایی بیشتر از این پارامترها را در بر می‌گیرند، در مدل‌سازی استفاده کرد.

ارزیابی نتایج حاصله

برای بررسی بیشتر دقت روش پیشنهادی، مقایسه‌ای با ۵ روش مستقیم گذشته شامل روش‌های دی روترو برینگن^[۱۱]، بوستامانته و جیانسلی^[۱۲]، مایرهوف^[۱۳-۱۵]، اشمرتمن و ناتینگهام^[۱۶، ۱۷] و یونیکون^[۱۸] انجام شده است.

نتایج مقایسه‌های انجام شده در شکل ۸ نشان داده شده است. واضح است که هر چه مقادیر به خط ۱:۱ نزدیک‌تر باشند، پراکندگی کمتری دارند. انحراف استاندارد

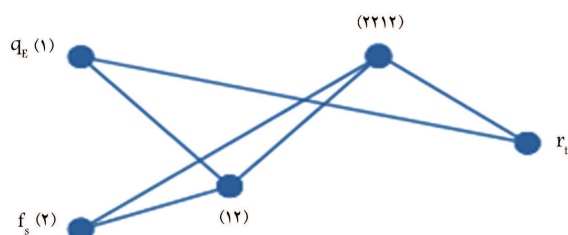
و میانگین نیز برای ارزیابی روش‌های مختلف بر روی شکل‌ها ذکر شده است. مشاهده می‌شود که تقریباً تمامی مقادیر پیش‌بینی شده با مدل پیشنهادی و روش UniCone در داخل و یا نزدیک محدوده $\pm 2\%$ قرار می‌گیرند؛ در حالی که نتایج سایر روش‌ها غالباً خارج محدوده‌ی فوق هستند. در جدول ۳ مقادیر ضریب همبستگی (r^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، و میانگین روش‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج بیان‌گر برتری رابطه‌ی یونیکون^[۱۸] و پیشنهادی نسبت به سایر روابط هستند. مقادیر ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطا برای رابطه‌ی پیشنهادی به ترتیب 0.938 و 2.197 است. این مقادیر برای رابطه‌ی UniCone به ترتیب 0.943 و 2.099 هستند، که اندکی نتایج بهتری را نسبت به روش پیشنهادی نشان می‌دهند. در مقایسه‌ی مقادیر ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطا، روش مایرهوف^[۱۳-۱۵] بعد از این ۲ روش نتایج نسبتاً خوبی را ارائه می‌دهد.

همان‌گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، در روش بوستامانته و جیانسلی^[۱۲] تقریباً تمامی نقاط در زیر خط ۱:۱ قرار گرفته‌اند، که نشان می‌دهد بیشتر پیش‌بینی‌ها کمتر از مقدار واقعی صورت گرفته است. مقدار میانگین برای این روش 0.69 است که مؤید تخمین کمتر از مقادیر واقعی برای روش مذکور است.

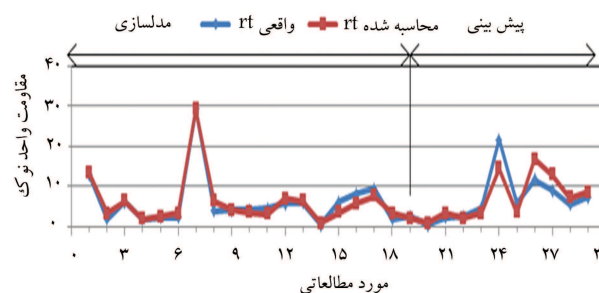
روش دیگری که جهت مقایسه ارائه شده است، نمودار لگاریتم نرمال نسبت مقادیر واحد مقاومت نوک تخمین زده شده به اندازه‌گیری شده در مقابل احتمال تجمعی آن‌هاست. براساس پژوهش انجام شده در سال ۱۹۹۵ استفاده از تحلیل آماری فوق، اطلاعات ارزشمند و با کیفیتی را از توانایی پیش‌بینی و همبستگی تجربی به ما ارائه می‌دهد.^[۲۲]

جدول ۳. مقایسه‌ی ضریب همبستگی و ریشه‌ی میانگین مربعات خطا در روش‌های مختلف.

روش پیشنهادی	Eslami & Fellenius, (۱۹۹۷)	De Ruiter & Beringen, (۱۹۷۹)	Bustamante & Gianeselli, (۱۹۸۲)	Mayerhof, (۱۹۸۳)	Schmertmann & Nottingham, (۱۹۷۸)	
r^2	۰٫۹۴۳	۰٫۸۰۹	۰٫۷۶۴	۰٫۹۲۷	۰٫۸۴۸	
RMSE	۲٫۰۹۹	۳٫۸۵۷	۴٫۲۸۲	۲٫۳۸	۳٫۴۳۸	
میانگین	۱٫۹۶۹	۱٫۰۶۷	۰٫۶۹	۱٫۰۶۶	۱٫۰۲۶	



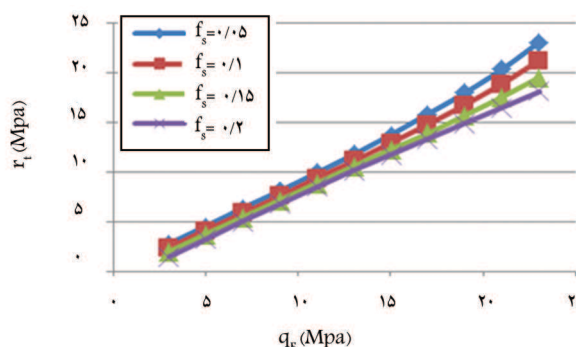
شکل ۵. ساختار بهینه شده GMDH برای مقاومت واحد نوک شمع.



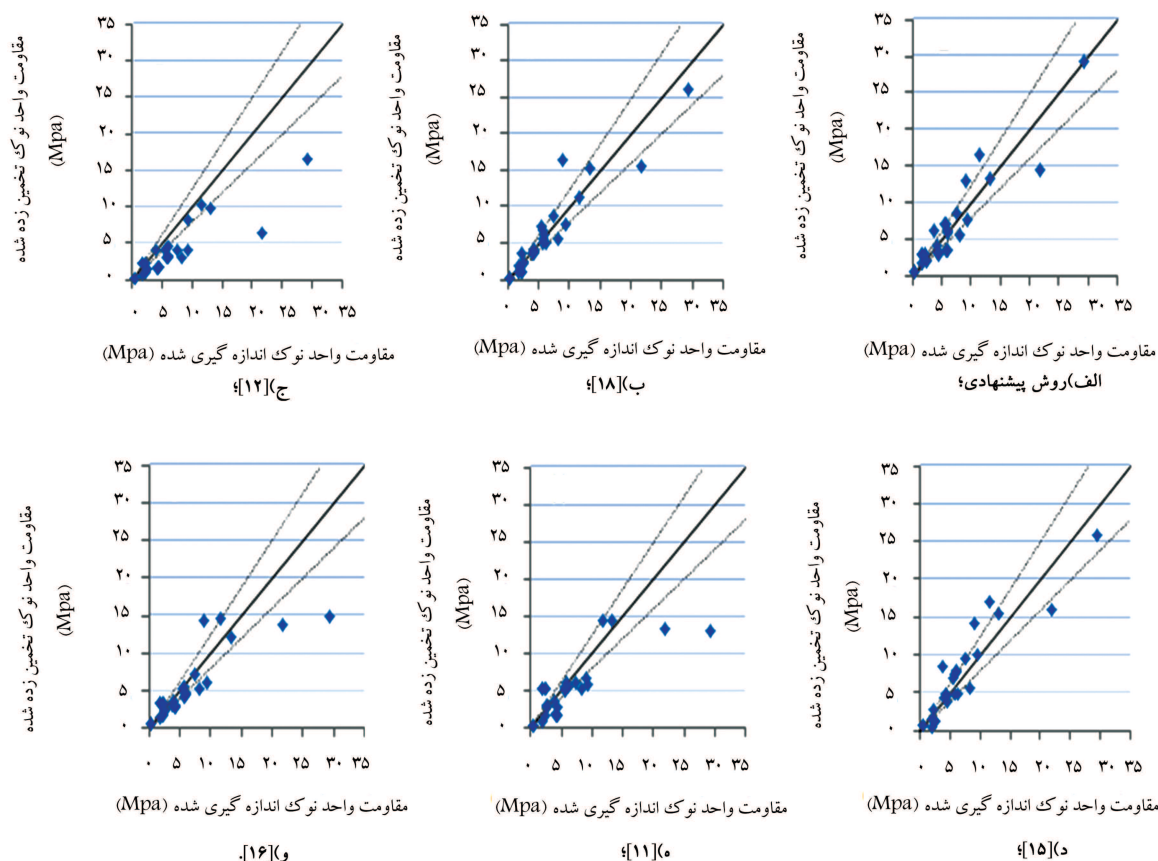
شکل ۶. مقایسه‌ی مقادیر اندازه‌گیری شده واحد نیروی نوک شمع (بر حسب مگاپاسکال) با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل GMDH.

آنالیز حساسیت مدل پیشنهادی

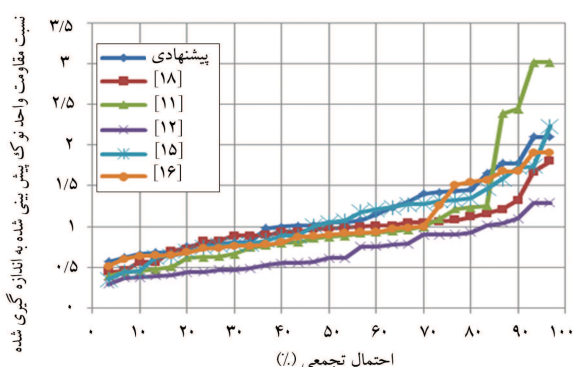
از آنجایی که رابطه‌ی ظرفیت باربری پیشنهادی به صورت یک معادله‌ی پیچیده‌ی چندجمله‌ای است، تأثیرات پارامترهای ورودی (q_E و f_s) روی خروجی مدل (r_t) به خوبی واضح و مشخص نیست. آنالیز حساسیت مدل به منظور نشان دادن تأثیرات فوق است. نتایج تحلیل‌های حساسیت انجام شده در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷. نتایج به دست آمده از آنالیز حساسیت مدل ساخته شده برای واحد مقاومت نوک.



شکل ۸. مقاومت واحد نوک تخمین زده شده در مقابل اندازه گیری شده.



شکل ۹. نمودار احتمال تجمعی $r_{t,e}/r_{t,m}$ برای روش های مختلف.

مقدار واقعی و روش دی رویترو برینگن^[۱۱] در بعضی موارد به تخمین زیاده تر (حتی تا ۳ برابر در بعضی موارد) تمایل دارد. ارائه ی خط با شیب کمتر و همچنین پراکندگی کمتر توسط روش یونیکون^[۱۸] و همچنین مایرهوف^[۱۵-۱۳] گویای نتیجه ی بهتر و پیش بینی دقیق تر از سایر روش هاست.

نتیجه گیری

در این تحقیق از شبکه ی عصبی نوع GMDH بهینه شده با الگوریتم ژنتیک برای مدل سازی ریاضی و نشان دادن وابستگی پارامترها استفاده شده و همچنین تلاش بر

بنابراین، برای مجموعه یی از اطلاعات، نسبت واحد مقاومت نوک تخمین زده شده به اندازه گیری شده $(r_t(e)/r_t(m))$ را به صورت صعودی و شماره گذاری شده $(1, 2, 3, \dots, i, \dots, n)$ مرتب می کنیم، همچنین مقدار احتمال تجمعی (p) را برای هر واحد مقاومت شمع طبق معادله ی ۱۹ به دست می آوریم:

$$p = \frac{i}{n + 1} \quad (19)$$

که در آن، i شماره ی مقدار در نظر گرفته شده ی p است. این روش در ارزیابی پراکندگی روش پیش بینی کننده حاوی اطلاعات ارزشمندی است:

۱. نسبت تخمین زده شده به اندازه گیری شده در احتمال $p = 50\%$ ، تمایل روش را به تخمین کم یا زیاد واحد مقاومت نوک شمع نشان می دهد. هر چه این مقدار به ۱ نزدیک تر باشد، پیش بینی بهتری را انجام داده است.
۲. توزیع لوگ نرمال در امتداد یک خط راست قرار بگیرد.
۳. شیب خط بیانگر پراکندگی و انحراف استاندارد است. هر چه خط با شیب کمتر باشد، نتیجه ی بهتری را نشان می دهد.

در شکل ۹، نمودار واحد مقاومت نوک تخمین زده شده به اندازه گیری شده مقابل احتمال تجمعی برای روش های مختلف ترسیم شده اند. برای احتمال 50% روش پیشنهادی و UniCone و مایرهوف بسیار به ۱ نزدیک هستند. همان گونه که از این شکل مشخص است، روش بوستامانه و جیانسلی^[۱۲] تمایل به تخمین پایین تر از

فوق نشان می‌دهد که تأثیر پارامتر q_E از f_s بیشتر است. با در نظر گرفتن q_E ثابت و با کم شدن مقدار f_s مقدار مقاومت واحد نوک شمع افزایش می‌یابد. از تحلیل‌های آماری و احتمال تجمعی برای مقایسه‌ی روش‌های مستقیم CPT در تعیین واحد مقاومت نوک و روش پیشنهادی نشان داده شده است. مقدار میانگین، ضریب همبستگی (r^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای ارزیابی کمی روش‌های مختلف استفاده شده است. مقایسه نشان می‌دهد که روش بوستامانته و جیانسلای^[۱۲] با میانگین 0.69 میل به پیش‌بینی و تخمین کم دارد و در مقابل روش پیشنهادی با میانگین 1.14 میل به تخمین بیشتر از مقدار واقعی دارد. نتایج حاصله نشان دادند که روش پیشنهادی ظرفیت باربری نوک شمع‌ها را با دقتی مناسب و پراکندگی کمی تخمین می‌زند.

آن بوده است که با استفاده از روش محاسباتی پیشرفته ارتباط بین q_E و f_s را تولید کنیم. برای مدل‌سازی از ۲ پارامتر q_E و f_s پارامترهای ورودی و r_t خروجی شبکه است. ۴B در بالا و پایین نوک شمع به منزله‌ی محدوده‌ی مؤثر در نظر گرفته شده است. مجموعه‌ی بی‌نمونه‌های موردی مشتمل بر ۲۹ آزمون بارگذاری تمام مقیاس شمع جمع‌آوری شده است. آنالیز حساسیت برای نشان دادن تأثیرات پارامترهای ورودی در مدل خروجی و البته در محدوده‌ی $q_E = 0.36 - 2.87$ و $f_s = 0.1 - 0.25$ مگا پاسکال صورت گرفت. هر چند که داده‌ها طیف وسیعی از محدوده‌های مقاومتی خاک را شامل می‌شوند، ولی بدیهی است در نظر گرفتن محدوده‌ی خارج از داده‌های آموزش ممکن است به تولید تابعی متفاوت منجر شود، البته با تغییر متغیرهای ورودی در محدوده‌ی ذکر شده، مدلی تقریباً دقیق مستحصل می‌شود. آنالیز حساسیت مدل

پانویس‌ها

1. cone penetration test (CPT)
2. group method of data handling (GMDH)
3. multiple-regression
4. singularity
5. singular value decomposition (SVD)
6. conventional structure

منابع (References)

1. Shahin, M.A., Jaksa, M.B. and Maier, H.R. "Artificial neural network application in geotechnical engineering", *Aust. Geomech.*, **36**(1), pp. 49-62 (March 2001).
2. Shahin, M.A., Jaksa, M.B. and Maier, H.R. "State of the art of artificial neural networks in geotechnical engineering", *Electron J. Geotech. Eng.*, **8**, pp. 1-26 (2008).
3. Ardalani, H., Eslami, A. and Nariman-Zadeh, N. "Piles shaft capacity from CPT and CPTu data by polynomial neural networks and genetic algorithms", *Computers and Geotechnics*, **36**(4), pp. 616-625 (2009).
4. Ivakhnenko, A.G. "Polynomial theory of complex systems", *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern. SMC-1*, **4**, pp. 364-78 (1971).
5. Farlow, S.J., *Self-Organizing Method in Modelling: GMDH Type Algorithm*, Marcel Dekker Inc. (1984).
6. Iba, H., DeGaris, H. and Sato, T. "A numerical approach to genetic programming for system identification", *Evol. Comput.*, **3**(4), pp. 417-452 (1996).
7. Mueller, J.A. and Lemke, F., *Self-Organising Data Mining: An Intelligent Approach to Extract Knowledge from Data*, Hamburg, Pub. Libri (2000).
8. Nariman-Zadeh, N., Darvizeh, A., Darvizeh, M. and Gharababaei, H. "Modelling of explosive cutting process of plates using GMDH-type neural network and singular value decomposition", *J. Mater Process Technol.*, **128**(1), pp. 80-87 (2002).
9. Nariman-Zadeh, N., Darvizeh, A. and Ahmad-Zadeh, G.R. "Hybrid genetic design of GMDH-type neural networks using singular value decomposition for modelling and prediction of the explosive cutting process", *Proc. I MECH E Part B J. Eng. Manufact.*, **217**, pp. 779-790 (2003).
10. Atashkari, K., Nariman-Zadeh, N., Gölcü, M., Khalkhali, A. and Jamali, A. "Modelling and multi-objective optimization of a variable valve-timing spark-ignition engine using polynomial neural networks and evolutionary algorithms", *Energ. Convers. Manage.*, **48**(3), pp. 1029-1041 (2007).
11. DeRuiter, J. and Beringen, F.L. "Pile foundation for large North Sea structures", *Mar Geotechnol.*, **3**(3), pp. 267-314 (1979).
12. Bustamante, M. and Ganeselli, L. "Pile bearing capacity prediction by means of static penetrometer CPT, In: *Proceedings of the second European symposium on penetration testing* ESOP-2, Amsterdam, A.A. Balkema **2**, pp. 493-500 (May 1982).
13. Mayerhof, G.G. "Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE*, **82**(1), pp. 1-19 (1956).
14. Mayerhof, G.G. "Bearing capacity and settlement of pile foundations. The Eleventh Terzaghi Lecture", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **102**(GT3), pp. 195-228 (1976).
15. Mayerhof, G.G. "Scale effects of pile capacity", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **108**(GT3), pp. 95-228 (1983).
16. Schmertmann, J.H. "Guidelines for cone test, performance and design", Federal Highway Administration, Report FHWA-TS-78209, Washington, 145 p. (1978).
17. Nottingham, L.C. "Use of quasi-static friction cone electrometer data to estimate capacity of displacement piles", PhD thesis, Department of Civil Engineering, University of Florida, Gainesville (1975).

18. Eslami, A. and Fellenius, B.H. "Pile capacity by direct CPT and CPTu methods applied to 102 case histories", *Can. Geotech. J.*, **34**(6), pp. 886-904 (1997).
19. Fellenius, B.H., Eslami, A. and Infante, J.A., *UniCone User Manual*, Unisoft LTD, Canada (2002).
20. Mayerhof, G.G. "The ultimate bearing capacity of foundations", *Geotechnique*, **2** (4), pp. 301-332 (1951).
21. De Beer, E.E. "The scale effect in the transposition of the results of deep sounding tests on the ultimate bearing capacity of piles and caisson foundations", *Geotechnique*, **13** (1), p.p. 39-75 (1963).
22. Schmertmann, J.H. "Guidelines for cone penetration test, performance and design", Federal Highway Administration, Report FHWA-TS-78-209, p.145 (1978).
23. Nottingham, L.C. "Use of quasi-static friction cone penetrometer data to predict load capacity of displacement piles", Ph.D. dissertation, Dept. of Civil Eng., University of Florida (1975).
24. Altaee, A., Fellenius, B.H. and Evgin, E. "Axial Load transfer for piles in sand.i", *Tests on an Instrumented Precast Pile, Canadian Geotechnical Journal*, **29**(1), pp. 11-20 (1992a).
25. Altaee, A., Evgin, E. and Fellenius, B.H. "Axial load transfer for piles in sand.ii.", *Numerical Analysis. Canadian Geotechnical Journal*, **29**(1), pp. 21-30 (1992b).
26. Golub, G.H. and Reinesh, C. "singular value decomposition and least squares solutions", *Numer. Math.*, **14**(5), pp. 403-420 (1970).
27. Yao, X. "Evolving artificial neural networks", *Proceedings of IEEE*, **87**(9), pp. 1423-1447 (1999).
28. Finno, R.J. "Subsurface conditions and pile installation data", *American Society of Civil Engineers, In Proceedings of a Symposium on Predicted and Observed Behavior of Piles, Evanston, Ill.*, (June 30 1989). American Society of Civil Engineers, Geotechnical Special Publication 23, pp. 1-74 (1989).
29. Fellenius, B.H., Santos, J.A. and viana da Fonseca, A. "Analysis of piles in a residual soil-The Isc'2 prediction", *Can. Geotech. J.*, **44**(2), pp. 201-220 (2007).
30. Brown, M.J., Hyde, A.F.L. and Anderson, W.F. "Analysis of a rapid load test on an instrumented bored pile in clay", *Geotechnique*, **56**(9), pp. 627-638 (2006).
31. Campanella, R.G., Robertson, P.K., Davies, M.P. and Sy, A. "Use of in-situ tests in pile design", *In Proceedings of 12th Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, ICSMFE, Rio de Janeiro*, **1**, pp. 199-203 (August 1989).
32. Albeiro, J.H., Sacilotto, A.C., Mantilla, J.N., Telxeria, J. and Carvalho, D., "Successive load tests on bored piles", *In Proceedings of the 10th pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico City, **2**, pp. 992-1002 (October-November 1995).
33. O'Neill, M.W., *Field Study of Pile Group Action. U.S. Federal Highway Administration*, FHWA Report RD-81/002 (1981).
34. Yen, T.L., Chin, C.T. and Wang, R.F. "Interpretation of instrumented driven steel pipe piles", *In Kulhawy FH, editor. ASCE Proceedings of the Foundation Engineering Congress, Current Principles and Practice*, Evanston, Ill, Geotechnical Special Publication 22, American Society of Civil Engineers, pp. 1293-308 (June 1989).
35. O'Neill, M.W., "Pile group prediction symposium. Summary of prediction results", Federal Highway Administration, FHWA, Draft Report, 51p. (1988).
36. Axelsson, G. "Long-term increase in shaft capacity of non-cohesive soils", Thesis, Royal Institute of Technology, Division of Soil and Rock Mechanics, Stockholm, 122 p. (1998).
37. CH2M HILL., Geotechnical Report on Indicator Pile Testing and Static Pile Testing. Berths 225-229 at Port of Los Angeles, CH2M Hill, Los Angeles (1987).
38. Matsumoto, T., Michi, Y. and Hirono, T. "Performance of axially loaded steel pipe piles driven in a soft rock", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **121**(4), pp. 305-315 (1995).
39. Weber, L. "Efficiency improvement of steel H-bearing piles", Arbed Research, Final Report 7210.SA/503 (1987).
40. Haustorfer, I.J. and Plesiotis, S. "Instrumented dynamic and static pile load testing at two bridges", *In: Proceedings of the 5th Australia-New Zealand Conference on Geomechanics*, prediction versus performance, Sydney, (August 1988).
41. Hunt, S.W. "Piles for marquette university math building", *In Proceedings of the ASCE Convention on Design and Performance of Deep Foundations*, Dallas, Tex. American Society of civil Engineers, Geotechnical Special Publication 38, pp. 91-108 (1993).
42. Fellenius, B.H., *Foundations. In Geotechnical Engineering Handbook*, Chapter 22, Edited by W.F. Chen. CRC Press, New York, pp. 817-853 (1995).
43. Long, J.H. and Shimel, I.S. "Drilled shafts, a data-base approach", *In ASCE Proceedings of the Foundation Engineering Congress: Current Principles and Practices*, Evanston, Ill, (June 25-29 1989). In: Kulhawy FH, editor. Geotechnical special publication 22, 2, American Society of Civil Engineers, pp. 1091-1108 (1989).

ESTIMATION OF THE TIP BEARING CAPACITY OF SINGLE PILE FROM CPTU DATA USING GMDH TYPE NEURAL NETWORKS

A. Ghorbani(corresponding author)

ghorbani@guilan.ac.ir

Dept. of Civil Engineering

University of Guilan

A. Eslami

afeslami@yahoo.com

Dept. of Civil Engineering

Amirkabir University of Technology

H. Ebrahimi

hassan.ebrahimi@gmail.com

Dept. of Civil Engineering

University of Guilan

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 29, Issue 3, Page 71-80, Original Article

© Sharif University of Technology

- Received 9 August 2011; received in revised form 20 December 2011; accepted 30 April 2012.

Abstract

Piles have been used for many years as a type of structural foundation. The design of pile foundations and estimation of static pile bearing capacities, based on measured soil properties, have been improved considerably over the years. However, due to inherent soil uncertainties and disturbances, there is always an element of uncertainty about the design capacity. Therefore, most theoretical approaches have been mainly based on simplifications and assumptions. The cone penetration test (CPT) is considered as one of the most useful in situ tests for the characterization of soil. Due to the similarity between the cone and the pile, determination of the pile capacity from CPT data is among its earliest applications. The measured cone resistance (q_c) and sleeve friction (f_s) usually are employed for estimation of the pile Tip and shaft resistances, respectively. Over the last few years or so, the use of artificial neural networks (ANNs) has increased in many areas of engineering. In particular, ANNs have been applied to many geotechnical engineering problems and have demonstrated some degree of success. Group method of data handling (GMDH) type neural networks optimized using genetic algorithms (GAs), are used to model the effects of effective cone Tip resistance (q_E) and cone sleeve friction (f_s) as input parameters on pile Tip resistance, by applying some experimentally obtained training and test data. 29 pile case histories have been compiled, including static and dynamic loading tests, performed at sites, including CPT

sounding. The pile embedment lengths range from 9 m through 31 m. The pile Tip resistances range from 0.4 MPa through 29.4 MPa. A sensitivity analysis of the obtained model has been carried out to study the influence of input parameters on model output. According to the sensitivity analysis results, the pile Tip resistance (r_t) is considerably influenced by the effective cone Tip resistance (q_E), and the value rises by increasing q_E values. Also, for a constant value of effective cone Tip resistance (q_E), by decreasing the cone sleeve friction (f_s), the pile Tip resistance increases. Pile toe capacities calculated by the proposed method are compared Tip capacities calculated by five other direct methods. The proposed method gives values that are more consistent and closer to measured ones than current methods. The results demonstrate that the proposed method gives values that are consistent and close to the measured ones.

Key Words: Pile bearing capacity, cone penetration test, artificial neural networks.