

کاربرد سیستم تطبیقی ANFIS در تخمین پتانسیل تحکیم خاک‌های رسی

جواد احدیان^{۱*} و فاطمه بهروزی^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
واژگان کلیدی: شاخص فشردگی، سیستم تطبیقی ANFIS، خصوصیات فیزیکی خاک، تحکیم، روابط تجربی.	احداث سازه‌ها بر روی خاک‌های رسی اشباع باعث به هم فشردگی ذرات خاک شده که پدیده تحکیم و نشست خاک را به همراه دارد. نشست خاک در برخی از مواقع، خسارات جبران ناپذیری به یک طرح وارد می‌آورد و از این رو پیش بینی صحیح آن در طراحی بسیار مهم می‌باشد. یکی از روش‌های محاسبه نشست، استفاده از شاخص فشردگی است که از طریق آزمایش تحکیم بدست می‌آید. تعیین این ضریب از طریق آزمایش تحکیم بسیار وقت‌گیر و پرهزینه بوده به طوری که از گذشته تاکنون روابط تجربی زیادی بیان شده است تا بوسیله آنها بتوان شاخص فشردگی را پیش بینی نمود. در این تحقیق داده‌های مهم و با ارزشی از نتایج آزمایش تحکیم در نقاط مختلف استان خوزستان جمع‌آوری گردید و با استفاده از داده‌های یاد شده مقادیر شاخص فشردگی تعیین شد. سپس با استفاده از تکنیک تطبیق شبکه عصبی مصنوعی و منطق فازی (ANFIS) نتایج، مورد آزمون و ارزیابی قرار گرفت. همچنین در این تحقیق، نتایج کسب شده از سیستم تطبیقی ANFIS با نتایج حاصل از فرمول‌های تجربی در ارتباط با داده‌های واقعی مورد مقایسه قرار گرفت. در بهترین حالات خطای برخی از روابط تجربی در منطقه مورد مطالعه در حدود ۲۰ درصد محاسبه شد. این در حالی است که اکثر روابط تجربی در منطقه مورد مطالعه دارای دقت قابل قبولی نیستند. نتایج نشان داد که سیستم تطبیقی ANFIS شاخص فشردگی که یکی از پارامترهای مهم و اساسی در برآورد تحکیم خاک‌های رسی است را با دقت قابل قبولی بر اساس نسبت پوکی اولیه و رطوبت طبیعی پیش بینی می‌نماید؛ به گونه‌ای که، در مقایسه با سایر روابط تجربی و شبکه مصنوعی (ANNs) سیستم تطبیقی ANFIS دارای نتایج بهتری است و بر اساس نتایج کسب شده RSME آن حدود ۱۵ درصد و خطای ایجاد شده در حدود ۱۲ درصد است.

۱- مقدمه

سازه‌های مختلف نظیر سدها، سازه‌های آبی، ساختمان‌ها و غیره، این وضعیت پایدار خاکها را به هم زده و باعث می‌شود که خاک از شکل طبیعی خود خارج گشته و تغییر شکل جدیدی را متحمل شود. نشست خاک در برخی از مواقع خسارات جبران‌ناپذیری به یک طرح وارد آورده و از این رو، پیش‌بینی صحیح آن می‌تواند مفید واقع

توده خاک در شرایط طبیعی در طی سالیان دراز به یک حالت ثابت و پایدار رسیده است. احداث ساختمان‌ها و

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: ja_ahadiyan@yahoo.com

۱. دانشیار گروه سازه‌های آبی دانشگاه شهید چمران اهواز

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی دانشگاه شهید چمران اهواز

شود. در رس‌های اشباع، نشست در اثر خروج آبهای موجود در حفرات اتفاق می‌افتد. در این خصوص برآورد نشست حاصل از تحکیم ضروری می‌باشد. محاسبه نشست ناشی از تحکیم خاک، توسط آزمایش تحکیم صورت می‌پذیرد. با استفاده از نتایج آزمایش تحکیم که شامل منحنی‌های تغییر شکل (تحکیم) در مقابل زمان (مقیاس لگاریتمی یا جذر زمان) و تنش - نسبت پوکی است، می‌توان ضرایبی را محاسبه نمود و به کمک این ضرایب مقدار نشست تحکیمی را تخمین زد. یکی از این ضرایب شاخص فشردگی، C_c ، است [۱]. شاخص فشردگی ممکن است تابع پارامترهای مختلفی نظیر نسبت پوکی اولیه خاک، وزن مخصوص خاک، رطوبت اولیه خاک، رطوبت حد روانی، رطوبت حد خمیری، شاخص خمیری، حد انقباض و دیگر خصوصیات فیزیکی خاک باشند. مشخص کردن ارتباط C_c با هر یک از پارامترهای یاد شده، از طریق تجربه صورت می‌پذیرد. عملکرد مثبت فرمول‌های تجربی بستگی به محدوده کاربرد آنها و همچنین تطبیق شرایط محل مورد نظر با محلی که محققین، این روابط را ارائه داده‌اند، دارد. اسکمپتون با آزمایش تحکیم بر روی تعدادی رس دست خورده رابطه‌ای برای ضریب شاخص فشردگی ارائه نمود. رابطه‌ی وی بر اساس نتایج تعداد ۲۵ آزمایش تحکیم، شکل گرفته و ارتباط خطی بین شاخص فشردگی و رطوبت حد روانی را بیان می‌کند [۲]. نیشیدا بر اساس تئوری الاستیسیته، ارتباط بین شاخص فشردگی و نسبت پوکی اولیه خاک را برای انواع خاکهای چسبنده ارائه نمود [۳]. ترزاقی و پک در سال ۱۹۶۷ اظهار می‌دارند که رابطه اسکمپتون برای رس‌های تحکیم عادی یافته با حساسیت کم صادق است [۱]. آنها رابطه خود را بر اساس رطوبت حد روانی از طریق برنامه‌ریزی آماری، با استفاده از نتایج آزمایش تحکیم استخراج نمودند. اوسوالد بر اساس یک تحلیل

آماري بر روی تعداد زیادی داده آزمایشگاهی (در حدود ۱۲۵ داده آزمایشگاهی) رابطه‌ای برای شاخص فشردگی تحت رابطه جهانی شاخص فشردگی ارائه نموده است [۴]. رندون هررو بر اساس مشاهدات خود از چند رس طبیعی، رابطه‌ای را برای شاخص فشردگی، پیشنهاد نموده است [۵]. ناگاراژ و مورتی ارتباط بین شاخص فشردگی و پارامترهای فیزیکی خاک را بصورت رابطه‌ای که در جدول (۱) آورده شده، ارائه نموده‌اند [۶]. پارک و کوموتو با استفاده از نتایج ۸۳ آزمایش تحکیم بر روی نمونه‌های خاک رس دست نخورده رابطه‌ای بر مبنای تخلخل اولیه برای محاسبه شاخص فشردگی ارائه نموده‌اند [۷]. احدیان پس از انجام مطالعاتی بر روی خاکهای مناطق مختلف اهواز به این نتیجه رسید که شاخص فشردگی و پارامتر نسبت پوکی در خاک این منطقه به صورت معنی داری رابطه وجود دارد و رابطه را بر اساس نسبت پوکی اولیه ارائه نمود [۱]. کاوالیری و همکاران در آزمایشی به محاسبه تنش بیش تحکیمی با استفاده از آزمایش تحکیم یک بعدی پرداختند و در نهایت با استفاده از تنش بیش تحکیمی رابطه‌ای برای پیش‌بینی شاخص فشردگی ارائه نمودند [۸]. دریایی و همکاران در تحقیقی روابط تجربی ذکر شده را مورد بررسی قرار داده و با نتایج شبکه عصبی مقایسه نموده‌اند. بر اساس نتایج این محققین مشخص گردیده که شبکه عصبی مصنوعی نسبت به سایر روابط تجربی شاخص فشردگی را با استفاده از تعداد پارامترهای بیشتر و با دقت بالاتری پیش‌بینی می‌نماید. همچنین نتایج این محققین نشان داده است که از میان پارامترهای فیزیکی مورد بررسی توسط شبکه عصبی، نسبت پوکی اولیه بیشترین تاثیر را بر روی شاخص فشردگی دارد که استفاده از این پارامتر غالباً در کلیه روابط تجربی مشاهده می‌شود [۹]. جدول (۱) روابط تجربی استخراج شده توسط محققین مختلف را نمایش می‌دهد.

جدول ۱- روابط تجربی شاخص فشردگی استخراج شده توسط محققین مختلف

محدوده کاربرد	معادله	مرجع
رس‌های دست خورده، تحکیم عادی یافته با حساسیت کم	$C_C = 0.007 (w_L - 10)$	اسکمپتون (۱۹۴۴)
همه خاکهای تحکیم عادی یافته با حساسیت کم	$C_C = 1.15 (e_0 - 0.35)$	نیشیدا (۱۹۵۶)
تمام خاک‌های طبیعی چسبنده (خاکهای تحکیم عادی یافته با حساسیت کم)	$C_C = 0.54 (2.6 w_0 - 0.35)$	نیشیدا (۱۹۵۶)
خاکهای چسبنده بیش تحکیم یافته غیرآلی (لای، رس لای‌دار، رس)	$C_C = 0.3 (e_0 - 0.27)$	هاف (۱۹۵۷) [۱]
رس تحکیم عادی یافته و دست نخورده و با حساسیت نسبتاً بالا	$C_C = 0.009 (w_L - 10)$	ترزاقی و پک (۱۹۶۷) [۱]
رس‌های برزیلی، رس‌های بیش تحکیم یافته دست خورده	$C_C = 0.0046 (w_L - 9)$	باولز (۱۹۷۹) [۱]
تمام رس‌ها، رس‌های بیش تحکیم یافته دست خورده	$C_C = 0.156 (e_0 + 0.0107)$	باولز (۱۹۷۹) [۱]
برای هر نوع خاک چسبنده بدون محدودیت کاربرد	$C_C = \frac{1}{2} \left(\frac{1+e_0}{G_s} \right)^{2.4}$	اوسوالد (۱۹۸۰)
رس‌های آلبرتا کانادا، رس‌های تحکیم عادی یافته با حساسیت کم	$C_C = -0.1143 + 0.008 w_C + 0.0037 C_P$	کوپالا (۱۹۸۱) [۱]
تمام رس‌ها بدون محدودیت	$C_C = 0.141 G_s^{1.2} \left(\frac{1+e_0}{G_s} \right)^{2.38}$	رندون هررو (۱۹۸۳)
تمام خاکهای تحکیم عادی یافته با ذرات بسیار ریز غیر چسبنده	$C_C = 0.2243 W_L \cdot G_s$	ناگاراژ و مورتی (۱۹۸۵)
Remolded clay	$C_c = \frac{n_0}{371.747 - 4.27 n_0}$	پارک و کوموتو (۲۰۰۴)
رس‌های اهواز، رس‌های با خاصیت خمیری کم تا متوسط	$C_C = 0.0681 e^{1.405 e_0}$	احدیان (۱۳۸۳)
رس با $1.1 < w < 27$ و $1.1 < \rho < 1.5$	$C_C = a + b \rho_i + c w_i$	سافی دادی و همکاران - (۲۰۰۹)
رس‌های با خاصیت خمیری کم تا متوسط	ANNs	دریایی (۱۳۸۸)

جدول (۱) و تعداد روابط بدست آمده برای شاخص فشردگی، نشانه اهمیت پیش بینی این شاخص نسبت به سایر پارامترهای فیزیکی خاک که غالباً به سادگی اندازه‌گیری می‌شوند، برای برآورد نشست خاک است. دانشمندان در تحقیقات خود و طی سالیان متوالی از خصوصیات فیزیکی مختلف خاک برای برآورد شاخص فشردگی مانند حد خمیرایی و نسبت پوکی اولیه استفاده نموده‌اند. با توجه به اینکه هر کدام از روابط بالا برای شرایط و منطقه خاصی محاسبه گردیده، دارای محدودیت‌هایی می‌باشند. برای نمونه رابطه نیشیدا (۱۹۵۶) با فرض اینکه ذرات خاک کروی، یکنواخت و

آرایش آنها غیرقابل تراکم باشد، استخراج گردیده است. بر اساس مطالعات کوپالا (۱۹۸۱)، رابطه نیشیدا (۱۹۵۶) در منطقه مورد مطالعه وی از صحت بسیار کمی برخوردار است. همچنین باولز (۱۹۷۹) بیان می‌کند که تغییرات شاخص فشردگی برای همه رس‌ها با نسبت پوکی اولیه، همبستگی بالایی دارد. وی اظهار می‌دارد که تئوری نیشیدا (۱۹۵۶) برای همه رس‌ها صادق است؛ ولی ضرایب معادله وی، باید برای هر منطقه تصحیح گردد. باولز (۱۹۷۹) روابط خود را برای شهرهای ساوپالو و شیکاگو بدست آورد [۱]. سافی دادی و همکاران رابطه خطی - تجربی بر پایه جرم مخصوص اولیه و رطوبت اولیه ارائه

نمودند. این رابطه ضرایبی دارد که بسته به منطقه مورد مطالعه دارای مقادیر متفاوتی است. محاسبه این ضرایب - خود مستلزم آزمایش است. در این تحقیق با توجه به نوع خاک، مقدار این ضرایب به ترتیب، ۱/۲۴، ۰/۵۲ - و ۰/۰۰۹ - در نظر گرفته شده است [۱۰]. شاهین و همکاران، در خصوص تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی خاکها و برآورد میزان دقت شبکه عصبی مصنوعی تحقیقاتی انجام دادند [۱۱]. در ارتباط با استفاده از سیستم فازی به تحقیقات الویسی می‌توان اشاره نمود که وی بر پایه استنتاج فازی، رقوم سطح آب در شرایط سیلابی را پیش‌بینی نمود [۱۲]. پوستی زاده با استفاده از سیستم استنتاج فازی به پیش‌بینی دبی ورودی رودخانه بختیاری در استان خوزستان پرداخت [۱۳]. سوین و ناندوری یک مدل ANFIS جهت پیش‌بینی جریان آب سیستم پیچیده و غیر خطی حوضه رودخانه که باران را به عنوان ورودی دریافت و رواناب را تولید می‌کند، معرفی نموده‌اند [۱۴]. طارقیان و کاشفی پور دبی ورودی به سد دز را با استفاده از ANFIS مورد بررسی قرار دادند [۱۵]. در این تحقیق شاخص فشردگی خاک، با استفاده از سیستم تطبیقی ANFIS پیش‌بینی می‌گردد و نتایج حاصله با سایر روابط تجربی و نتایج حاصل از سیستم شبکه عصبی مصنوعی مقایسه می‌گردد. پارک و لی شاخص فشردگی را با استفاده از شبکه‌های عصبی پیش‌بینی نمودند [۱۶]. در این تحقیق نیز پیش‌بینی شاخص فشردگی خاک پس از جمع‌آوری تعدادی داده از سطح استان خوزستان، که شامل پارامترهای فیزیکی خاک هستند و با بهره‌گیری از سیستم تطبیقی ANFIS در نرم‌افزار MATLAB، صورت گرفته است.

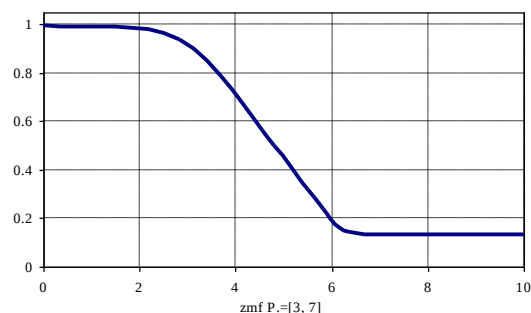
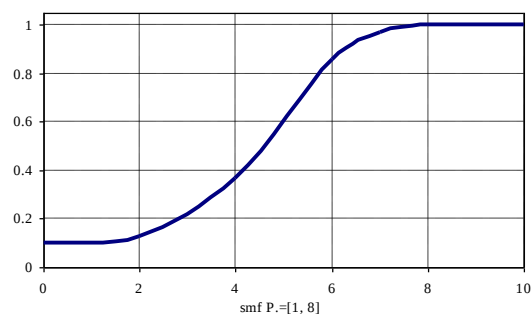
۲- مواد و روشها

همان‌طوری که در بخش‌های مقدماتی نیز بیان شد در این تحقیق با استفاده از سیستم تطبیقی ANFIS

همبستگی شاخص فشردگی با دیگر پارامترهای فیزیکی در خاک مورد بررسی قرار گرفته است. مبنای سیستمهای هوشمند، کشف و استخراج دانش نهفته در داده‌ها، ذخیره کردن آن و تعمیم آن در موقعیت‌های دیگر است [۱۷]. شبکه عصبی مصنوعی متشکل از مجموعه‌ای از نرون‌ها با ارتباطات داخلی بین یکدیگر می‌باشد که قادر است بر اساس اطلاعات و داده‌های ورودی، جوابهای خروجی را پیش‌بینی نماید. شبکه‌های عصبی معمولاً به صورت لایه لایه و منظم ایجاد می‌گردند. اولین لایه که اطلاعات ورودی به آن وارد می‌گردند، لایه ورودی است. لایه‌های میانی، لایه‌های مخفی و آخرین لایه که جوابهای خروجی از مدل را فراهم می‌نماید، لایه خروجی می‌باشد [۱۸]. مجموعه‌های فازی در برابر مجموعه‌های کلاسیک Crisp قرار دارند. در منطق کلاسیک ارزش درستی گزاره‌ها دو مقداری بوده و یک گزاره می‌تواند درست و یا نادرست باشد. منطق فازی شکل تعمیم یافته منطق کلاسیک بوده که در آن درستی گزاره‌ها می‌تواند در محدوده [0,1] تغییر نماید و بدین ترتیب امکان استدلال تقریبی فراهم می‌گردد.

$$X_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \in A \\ 0 & \text{if } x \notin A \end{cases} \quad (1)$$

لطفی‌زاده (۱۹۶۵) با توسعه این مفهوم درجه عضویت را روی بازه صفر و یک تعریف نمود به طوریکه صفر نشان عدم عضویت و یک نشان دهنده عضویت کامل می‌باشد؛ ولی بی‌نهایت عدد بین این نقاط کرانه‌ای وجود داشته که درجه عضویت اعضاء مختلف یک مجموعه را نشان می‌دهند. مجموعه‌های فازی زیرمجموعه مرجع X بوده که برای آن‌ها می‌توان درجه عضویت تعریف نمود [۱۳]. درجه عضویت عضو X مربوط به مجموعه فازی B ، با $X_B(x)$ نشان داده می‌شود. بنابراین مجموعه فازی B با زوج مرتب $(X, \mu(X))$ شناخته می‌شود که $\mu(X)$ درجه عضویت X در مجموعه B می‌باشد. مفهوم درجه عضویت عدم قطعیت ناشی از مفاهیم از دیدگاه انسان است. به طور کلی اختلاف اساسی بین مجموعه‌های فازی



شکل (۲) تابع عضویت حلقوی S و Z

در این تحقیق از دو تابع zmf و smf که در شکل (۲) نشان داده شده است، استفاده گردید. این نوع توابع حلقوی به صورت گسترده‌ای در تابع انتقال شبکه‌های عصبی کاربرد دارند. بنابراین، در شبیه‌سازی رفتار یک سیستم استنتاج فازی توسط شبکه‌های عصبی از این توابع استفاده می‌شود.

۲-۱- مدل فازی تاکاگی-سوگنو

مدل فازی تاکاگی-سوگنو (TSK) بوسیله تاکاگی، سوگنو (۱۹۸۵) به منظور توسعه یک روش سیستماتیک جهت استنتاج قوانین فازی از اطلاعات ورودی-خروجی پیشنهاد شد. یک قانون فازی نمونه در مدل فازی تاکاگی-سوگنو، شکل کلی زیر را داراست:

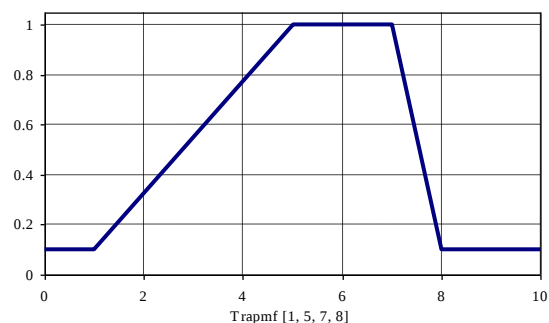
$$\text{if Input1} = x \text{ and Input2} = y, \text{ then output is } z = ax + by + c \quad (4)$$

با توجه به اینکه هر قانون یک خروجی عددی دارد، خروجی کل از طریق میانگین وزندار شده همه قواعد بدست می‌آید [۱۹].

و کلاسیک در توابع عضویت آن‌ها می‌باشد. توابع عضویت استاندارد شامل تابع مثلثی، دوزنقه‌ای، گوسی، حلقوی مانند نوع S و Z هستند؛ که با توجه به شرایط تابع، توابع دوزنقه‌ای و حلقوی قابل استفاده در تحقیق حاضر می‌باشند. هر تابع عضویت دوزنقه‌ای با چهار پارامتر $\{a, b, c, d\}$ که بیانگر مختصات چهار راس دوزنقه هستند به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{trapmf}(x, a, b, c, d) = \begin{cases} 0 \leftrightarrow x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} \leftrightarrow a \leq x \leq b \\ 1 \leftrightarrow b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} \leftrightarrow c \leq x \leq d \\ 0 \leftrightarrow x \geq d \end{cases} \quad (2)$$

شکل (۱) نمودار تابع عضویت تابع دوزنقه‌ای را نشان می‌دهد.



شکل (۱) تابع عضویت دوزنقه‌ای

تابع عضویت حلقوی با رابطه زیر بیان شده که a شیب را در نقطه تقاطع $x=c$ کنترل می‌نماید.

$$\text{sig}(x; a, c) = \frac{1}{1 + \exp[-a(x-c)]} \quad (3)$$

بسته به علامت پارامتر a، تابع عضویت حلقوی از چپ یا راست باز خواهد بود. شکل (۲) نمودار تابع عضویت smf و zmf را نشان می‌دهد. [۱۷]

۲-۲- سیستم استنتاجی فازی- عصبی تطبیقی

ANFIS

در منطق فازی روند سینماتیکی برای طراحی یک کنترل کننده فازی وجود ندارد؛ از این رو، جنگ در سال ۱۹۹۳ مدل ANFIS را ارائه نمود که قابلیت ترکیب توانایی دو روش شبکه عصبی و منطق فازی را داراست [۱۷]. سیستم تطبیقی ANFIS یک شبکه پیشخور چند لایه می‌باشد که از الگوریتمهای یادگیری شبکه عصبی و منطق فازی به منظور ترسیم یک فضای ورودی به یک فضای خروجی استفاده می‌کند. به منظور ساده‌سازی، فرض می‌شود که سیستم استنتاجی مورد نظر دو ورودی x و y و یک خروجی z دارد. ساختار ANFIS دارای ۵ لایه است که لایه اول، گره‌های ورودی بوده و مقادیر عضویتی که به هر یک از مجموعه‌های فازی مناسب تعلق دارند را با استفاده از تابع عضویت برآورد می‌نمایند. در لایه دوم، عملگر AND به کار برده می‌شود تا خروجی که نمایانگر بخش مقدم آن قانون است، بدست آید. خروجی‌های این لایه، حاصلضرب درجات مربوط به لایه اول هستند. هدف اصلی در لایه سوم، تعیین نسبت وزن i امین قانون به مجموع همه وزن‌های قوانین می‌باشد. در نتیجه w_i به عنوان وزن نرمال شده به دست می‌آید. در لایه چهارم، تابع گره چهارمین لایه توزیع i امین قانون به کل خروجی محاسبه می‌گردد. لایه پنجم، که مربوط به گره‌های خروجی می‌باشد. این تک گره، خروجی کلی را با جمع کردن همه سیگنالهای ورودی محاسبه می‌نماید. بنابراین، در این لایه فرآیند غیرفازی‌سازی، نتایج هر قانون فازی را به خروجی غیرفازی تغییر شکل میدهد. خروجی نهایی سیستم، میانگین وزن دار شده خروجی همه قواعد خواهد بود که به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$Final Output = \frac{\sum_{i=1}^N w_i z_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (5)$$

که N تعداد قوانین موجود در FIS می‌باشد. پس هدف اصلی آموزش شبکه‌های تطبیقی تخمین توابع نامشخص- حاصل از اطلاعات آموزش بوده و مقدار دقیقی برای پارامترهای یاد شده برآورد می‌نماید. ویژگی متمایز کننده ANFIS، فراهم نمودن الگوریتم یادگیری پیوندی، روش شیب‌گردان و روش حداقل مربعات، به منظور اصلاح پارامترها می‌باشد. روش شیب گردان به کار گرفته می‌شود تا پارامترهای غیرخطی مقدماتی را تنظیم نماید، درحالیکه روش حداقل برای تعیین پارامترهای خطی بخش تالی به کار می‌رود. مراحل عمل در سیستم تطبیقی با آموزش از طریق دو روش یاد شده صورت می‌پذیرد. قبل از شروع روال آموزش FIS، باید ساختار اولیه FIS تعیین شود. بدین منظور برای این تحقیق FIS اولیه تعیید شد که در بخش‌های بعدی به آن اشاره می‌شود. برای تعیین FIS معمولاً تعدادی از داده‌ها برای مشخص کردن پارامترهای ورودی به سیستم انتخاب و وارد می‌شوند. پس از تعیین آن، FIS توسط سیستم تطبیقی ANFIS آموزش داده شده و در مرحله واسنجی کنترل شده و برپایی ساختار این سیستم برای تعیین خروجی در مرحله تست مورد ارزیابی واقع می‌شود. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل ۱۲۵ داده مهم از مناطق مختلف استان خوزستان است. این داده‌ها مربوط به نمونه‌های دست نخورده مسیر تصفیه‌خانه اهواز، مسیر شرق رودخانه کارون اهواز، نمونه‌های مورد مطالعه در پروژه‌های تلمبه‌خانه و کانال انتقال ایثارگران جفیر، کانال انتقال و خاکریز پایین دست سد انحرافی هندیجان، قرارگاه مقدم جنوب، شبکه آبیاری و زهکشی رامهرمز، پل کمربندی اهواز، نمونه‌های دست نخورده از سطح شهر اهواز و نمونه‌هایی دست نخورده که در آزمایشگاه مکانیک خاک راه و ترابری استان خوزستان می‌باشند که همگی تقریباً از نیمه به سمت جنوب استان بوده است. مشخصات فیزیکی و داده‌های تعدادی از نمونه‌ها در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲- مشخصات مهندسی و فیزیکی خاک تعدادی از نمونه‌های جمع‌آوری شده

ردیف	عمق (متر)	رطوبت (درصد)	γ_d (gr/cm ³)	G_s	e_0	LL	PL	C_c
۱	۱۱	۲۵	۱/۶۳	۲/۶۶	۰/۶۴	—	—	۰/۱۵۵
۲	۱۰	۲۵	۱/۶۳	۲/۶۴	۰/۶۲	۳۸	۱۵/۵	۰/۱۲۳
۳	۳/۵	۲۷	۱/۶	۲/۶۶	۰/۶۳	۳۵	۱۹	۰/۱۳۲۸
۴	۳	۲۵	۱/۶۶	۲/۶۳	۰/۵۵	۳۱	۱۰	۰/۰۶۶۴
۵	۸	۲۶	۱/۶۳	۲/۶۴	۰/۶	۴۲/۵	۱۹/۵	۰/۱۱۵۲۷
۶	۶	۲۴	۱/۵۷	۲/۶۶	۰/۶۸	۳۰	۱۱	۰/۱۶۶
۷	۵	۲۸	۱/۷	۲/۶۴	۰/۷۲	۲۹	۱۰/۵	۰/۱۱۵۳
۸	۵	۲۴	۱/۶۳	۲/۶۴	۰/۷۲	۳۳	۱۱	۰/۱۴۲۸
۹	۸	۲۴	۱/۷	۲/۶۵	۰/۷	۲۵	۶	۰/۱۲۴۹
۱۰	۴/۵	۲۵	۱/۶۴	۲/۶۳	۰/۶۲	۳۸	۱۹	۰/۱۱۹
۱۱	۶	۲۴	۱/۶۹	۲/۶۳	۰/۵۹	۲۹	۱۰/۵	۰/۱۸۷
۱۲	۴/۵	۲۶	۱/۶۱	۲/۶۴	۰/۶۸	۳۴	۲۱	۰/۱۳
۱۳	۴	۲۳	۱/۶۱	۲/۶۷	۰/۶۶	۳۲	۱۴	۰/۱۶۶
۱۴	۳/۵	۲۱	۱/۶	۲/۶۱	۰/۶۳	۲۱	—	۰/۱۱۴۷
۱۵	۲/۷۵	۲۳	۱/۷	۲/۶۳	۰/۶۶	۳۳	۱۳	۰/۱۱۳۵
۱۶	۳	۲۱	۱/۷۷	۲/۶۸	۰/۶۶	۳۶	۱۲	۰/۱۰۸
۱۷	۷	۲۲	۱/۷۹	۲/۶۶	۰/۵۷	۳۳	۱۶/۰۵	۰/۱
۱۸	۷/۵	۲۶	۱/۵۹	۲/۶۱	۰/۵۹	—	—	۰/۰۹۳

در این تحقیق تعداد ۷۰ داده به صورت تصادفی برای آموزش مدل، ۳۷ داده برای واسنجی و ۱۸ داده نیز برای مرحله تست مدل در نظر گرفته شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- برپایی سیستم تطبیقی ANFIS

همان‌گونه که در بخش‌های گذشته نیز اشاره شد در این تحقیق ابتدا اقدام به برپایی سیستم تطبیقی ANFIS گردید. بدین منظور تعداد ۱۰ داده از داده‌های موجود در این تحقیق به صورت تصادفی برای تعیین ساختار اولیه

ورودی استفاده شد. در سیستم ANFIS نرم‌افزار MATLAB از سیستم فازی سوگنو استفاده گردید که تنها دارای یک خروجی است. هر سیستم فازی سوگنو حداکثر دو نوع داده ورودی را می‌پذیرد و سایر ورودی‌ها را ثابت فرض می‌کند. با توجه به اینکه سایر روابطی که در گذشته بیان شده بر اساس نسبت پوکی اولیه بوده است، در این تحقیق نیز ابتدا نسبت پوکی اولیه به عنوان پارامتر اصلی انتخاب گردید و برای تشخیص نوع داده‌های ورودی، نسبت پوکی اولیه به تنهایی و در ادامه پارامترهای فیزیکی خاک دو به دو به مدل تعریف شد که نتایج حاصل شده در جدول (۳) آمده است:

جدول ۳- بررسی اهمیت پارامترهای فیزیکی با شاخص فشردگی

پارامتر	ضریب رگرسیون (R^2)	RMSE
ضریب C_c با e	۰/۵۲۴۷	۰/۲۰۶
ضریب C_c با e و w	۰/۸۳۸۲	۰/۰۹۷۷
ضریب C_c با e و G_s	۰/۷۹۲۵	۰/۲۶۸
ضریب C_c با e و LL	۰/۰۴۲۹	۰/۲۱۴۷
ضریب C_c با e و LP	۰/۰۰۴۹	۰/۱۷
ضریب C_c با e و γ_d	۰/۰۵۹۲	۰/۱۷۵۲

همانطوری که در جدول (۳) مشاهده می‌شود اثر نسبت پوکی به تنهایی بر شاخص فشردگی کاملاً روشن و مبرهن می‌باشد. همچنین بر اساس نتایج همین جدول مشخص است که، اثر دو پارامتر نسبت پوکی اولیه و رطوبت طبیعی خاک بر روی شاخص فشردگی نسبت به سایر پارامترها در سیستم تطبیقی ANFIS تاثیر معنی‌دارتری را به همراه دارد. به عبارتی:

$$C_c = f(e_0, w_i) \quad (۶)$$

با توجه به ماهیت ضریب شاخص فشردگی و محدوده قابل تغییر هریک از پارامترهای فیزیکی خاک سه قانون برای برپایی FIS اولیه، در نظر گرفته شد. جهت آموزش FIS مناسب به ANFIS، نیاز به تعدادی الگوی آموزش دهنده

مناسب می‌باشد. بدین منظور در این تحقیق ۱۲۵ نمونه مورد بررسی قرار گرفت. از این تعداد داده، ۷۰ داده به منظور آموزش سیستم تطبیقی ANFIS تعریف گردید. برای تجزیه و تحلیل میزان توانایی سیستم تطبیقی ANFIS برای پیش‌بینی شاخص فشردگی باید مقادیر خطا به لحاظ آماری برآورد گردد. برای این منظور از روش درصد خطا و RMSE استفاده شد. همچنین برای بررسی روند پیش‌بینی داده‌ها از پارامتر ضریب رگرسیون استفاده گردید. با توجه به ازدیاد داده‌ها، در جدول (۴) تعدادی از داده‌ها برای پیش‌بینی شاخص فشردگی به روش سیستم تطبیقی ANFIS به عنوان نمونه آورده شده است:

جدول ۴- برآورد شاخص فشردگی توسط ANFIS

Measured C_c	Predicted C_c
۰/۱۲۳	۰/۱۳۵
۰/۱۳۳	۰/۱۳۸
۰/۱۶۶	۰/۱۴۸
۰/۱۱۵۳	۰/۱۵۹
۰/۱۴۳	۰/۱۵۸
۰/۱۲۵	۰/۱۵۳
۰/۱۳۶	۰/۱۴۷
۰/۱۱۹	۰/۱۳۵
۰/۱۳۶	۰/۱۵۶
۰/۱۴۲	۰/۱۲۴
۰/۱۳	۰/۱۴۹

اولیه است. همچنین پس از برپایی سیستم تطبیقی ANFIS مقادیر شاخص آماری برای دقت پیش‌بینی مورد ارزیابی قرار گرفتند که نتایج آن در جدول (۵) آمده است:

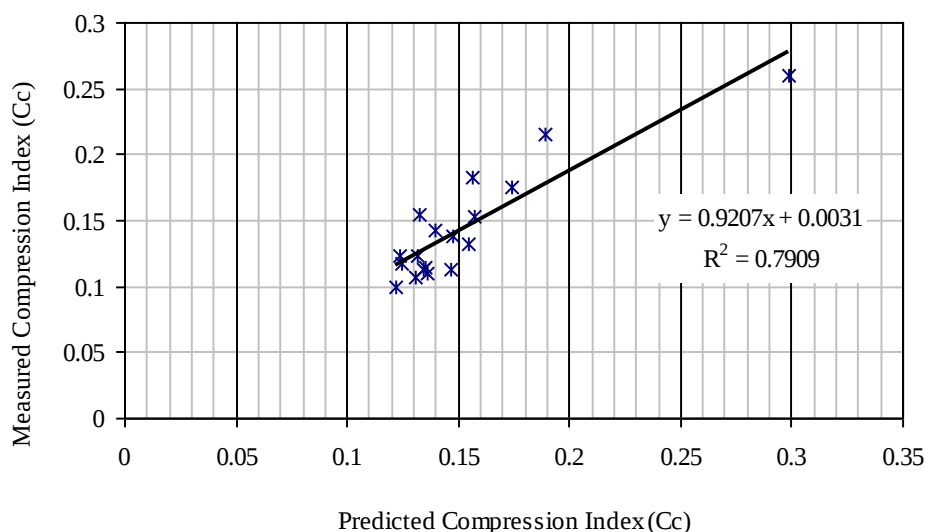
پس از برآورد شاخص فشردگی توسط سیستم ANFIS، مشاهده شد که تغییرات چندانی در FIS اولیه که به سیستم داده شده بود رخ نداده است که این خود حاکی از انتخاب درست توابع عضویت FIS

جدول (۵) نتایج حاصل از تحلیل آماری (اعداد بر حسب درصد)

RMSE	E	R ²	
۱۶/۶	۱۲/۷	۷۴	مرحله آموزش
۱۱/۷۸	۱۰/۱۱	۶۷/۸۹	مرحله واسنجی
۱۴/۶۸	۱۲/۴۲	۷۹/۰۹	مرحله تست

پیش‌بینی نماید که نتیجه رضایت بخشی است. همچنین شکل (۳) تغییرات شاخص فشردگی پیش‌بینی شده را با شاخص فشردگی اندازه‌گیری برای مرحله تست نشان می‌دهد.

مطابق با نتایج مندرج در جدول (۵) مشخص است که سیستم تطبیقی ANFIS برای پارامترهای فیزیکی نسبت پوکی اولیه و رطوبت طبیعی توانسته است که شاخص فشردگی را با دقت قابل قبولی (حدود ۸۷ درصد)



شکل ۳- تغییرات شاخص فشردگی پیش‌بینی در مقابل اندازه‌گیری شده

۳-۲- مقایسه سیستم تطبیقی ANFIS با روابط

تجربی در پیش‌بینی C_c

پیش‌بینی شاخص فشردگی، دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها دارد.

با توجه به تحلیل آماری انجام شده بر روی روابط تجربی و داده‌های پیش‌بینی شده توسط ANFIS جدول (۶) استخراج شد. جدول (۶) نشان می‌دهد که ANFIS در

جدول ۶- مقایسه با ANFIS تحلیل آماری روابط تجربی برای داده‌های موجود

مرجع	E	R-Sq	RMSE
اسکمپتون (۱۹۴۴)	۳۶/۲	۰/۰۴۷۶	۰/۳۸۶۵
نیشیدا (۱۹۵۶)	غیر قابل قبول	۰/۴۴۶	۰/۶۶۹۹
نیشیدا (۱۹۵۶)	۳۴/۴۱	۰/۲۴۰۱	۰/۴۸۵۴
هاف (۱۹۵۷)	۲۶/۴	۰/۴۴۶	۰/۴۱
ترزاقی و پک (۱۹۶۷)	۵۶/۱۵۹	۰/۰۴۷۶	۰/۴۶۶۱
باولز (۱۹۷۹)	۳۲/۱۹	۰/۰۴۷۶	۰/۵۲۴۱
باولز (۱۹۷۹)	۳۳/۱۹	۰/۴۴۶	۰/۵۷۵۳
اوسوالد (۱۹۸۰)	۱۸/۶	۰/۴۶۴۹	۰/۲۳۲۱
کوپالا (۱۹۸۱)	غیر قابل قبول	۰/۰۶۹۸	۱/۳۸
رندون هررو (۱۹۸۳)	۱۸	۰/۴۶۸۴	۰/۲۴۵۹
ناگاراژ و مورتی (۱۹۸۵)	غیر قابل قبول	۰/۰۴۸۷	۱/۰۱۶
پارک و کوموتو (۲۰۰۴)	۳۴/۳۴	۰/۴۵۵۳	۰/۳۰۳۳
احدیان (۱۳۸۳)	۲۲/۲۷	۰/۴۷۹۹	۰/۲۴۳۲
سافی دادی و همکاران - (۲۰۰۹)	غیر قابل قبول	۰/۰۲۳۶	۱/۰۸
دریایی (۱۳۸۸)	۱۳/۸	۰/۶۴	۰/۱۹۳۹
ANFIS	۱۲/۴۲	۰/۷۹	۰/۱۴۶۸

با توجه به جدول (۶) می‌توان بیان نمود که با داشتن خصوصیات فیزیکی خاک یک منطقه خاص نظیر نسبت پوکی اولیه و رطوبت طبیعی آن و با استفاده از این روش به ضریب همبستگی دقیق‌تری برای شاخص فشردگی خاک مورد نظر و در نتیجه نشست خاک دست یافت. اما مقایسه نتایج حاصله با سایر روابط تجربی حاکی از آن است که محققینی مانند نیشیدا (۱۹۵۶)، باولز (۱۹۷۹) و احدیان (۱۳۸۳) که در گذشته سعی بر یافتن رابطه‌ای برای شاخص فشردگی داشتند و روابط خود را بر اساس نسبت پوکی اولیه بیان نموده‌اند، تا حدودی به این هدف نائل آمده‌اند. اما با توجه به نتایج ذکر شده در جدول (۳) شاخص فشردگی همبستگی خوبی با رطوبت و چگالی نسبی خاک داراست که البته با توجه به نتایج رطوبت خاک تأثیر بیشتری داشته است. محققین در گذشته برای برآورد شاخص فشردگی فرمول‌های متفاوتی را ارائه داده‌اند، که خود ناشی از پیچیدگی برآورد این شاخص

است. روابط ارائه شده در گذشته، عموماً مربوط به یک منطقه خاص و محدود بوده است. همچنین با توجه به وقت‌گیر و پرهزینه‌بودن آزمایش تحکیم معمولاً تعداد داده‌های جمع‌آوری شده توسط محققین کم بوده است و تنها اوسوالد (۱۹۸۰) از تعداد قابل قبولی داده (۱۲۵) داده استفاده نموده است. با توجه اینکه سازه‌های مختلف در مکان‌های مختلف ساخته شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند و با توجه به تفاوت در نوع خاک هر منطقه نمی‌توان از روابط تجربی به طور وسیع و در هر جایی بهره‌وری نمود. اکثر روابط ارائه شده در گذشته، تنها بر اساس یک پارامتر فیزیکی خاک که نسبت پوکی اولیه خاک است، بیان شده‌اند و این در حالی است که جداول (۲) و (۵) نشان می‌دهد که شاخص فشردگی خاک علاوه بر نسبت پوکی اولیه، وابستگی خوبی با رطوبت طبیعی خاک و چگالی نسبی آن دارد و این خود دلیلی دیگر بر ایجاد خطا در روابط تجربی است. در جدول (۷) پیش‌بینی

تعدادی از داده‌ها توسط روابط تجربی، شبکه عصبی و سیستم تطبیقی ANFIS آورده شده است.

جدول ۷- مقایسه نتایج شاخص فشردگی در روابط تجربی و سیستم تطبیقی ANFIS

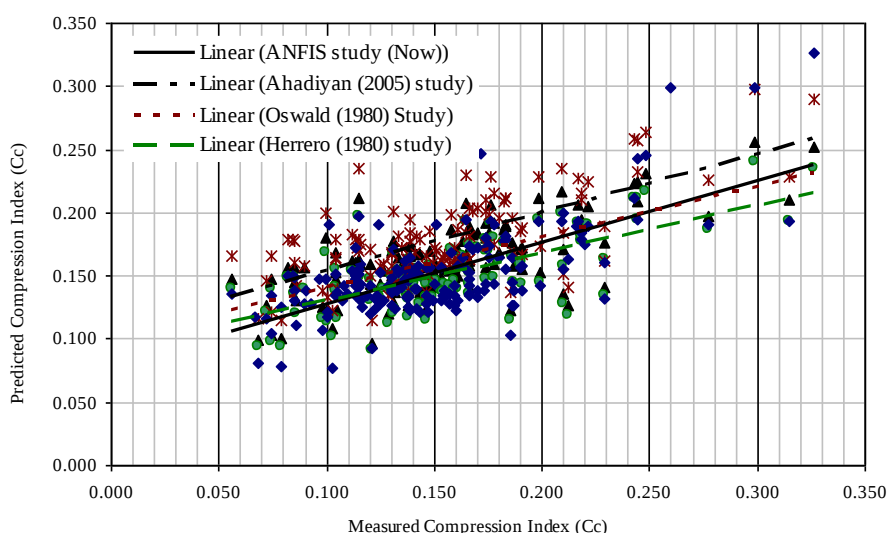
اسکمپتون	نیشیدا (۲)	نیشیدا (۱)	هاف	ترزاقی و پک	بولز (۱)	بولز (۲)	Measured
۰/۲۲۴	۰/۰۹۴	۰/۳۳	۰/۱۱	۰/۲۸۸	۰/۱۵۱	۰/۱	۰/۱۳
۰/۱۵۴	۰/۱۴	۰/۳۳۶	۰/۱۱۱	۰/۱۹۸	۰/۱۰۵	۰/۱	۰/۱۳
۰/۲۱	۰/۰۴۸	۰/۱۴۸	۰/۰۶۲	۰/۲۷	۰/۱۴۲	۰/۰۷۶	۰/۱
۰/۱۹۶	۰/۱۳۳	۰/۳۳۱	۰/۱۱	۰/۲۵۲	۰/۱۳۳	۰/۱	۰/۱۵۵
۰/۰۸۴	۰/۰۹۱	۰/۳۶۹	۰/۱۲	۰/۱۰۸	۰/۰۵۹	۰/۱	۰/۱۱۶
۰/۲۵۲	۰/۱۶۲	۰/۴۲۶	۰/۱۳۵	۰/۳۲۴	۰/۱۷	۰/۱۱۴	۰/۱۹۱
۰/۱۶۱	۰/۱۱۹	۰/۲۹۲	۰/۱	۰/۲۰۷	۰/۱۱	۰/۰۹۵	۰/۱۲۶
۰/۱۴۷	۰/۱۳۳	۰/۳۱۷	۰/۱۰۶	۰/۱۸۹	۰/۱	۰/۰۹۹	۰/۱۰۴
۰/۱۸۲	۰/۱۰۵	۰/۴۰۱	۰/۱۲۸	۰/۲۳۴	۰/۱۲۴	۰/۱۱	۰/۱۴۲
۰/۱۴	۰/۱۵۹	۰/۴۷۷	۰/۱۴۸	۰/۱۸	۰/۰۹۶	۰/۱۲۱	۰/۰۹۹
رندون هررو	ناگاراژ و مورتی	پارک و کوموتو	احدیان	سافی دادی و همکاران	اوسوالد	ANFIS	Measured
۰/۱۳۸	۲۵/۹	۰/۱۸۹	۰/۱۶۶	۰/۰۰۸	۰/۱۴۳	۰/۱۳۷	۰/۱۳
۰/۱۵	۱۸/۵۱	۰/۱۹۱	۰/۱۶۸	۰/۰۲	۰/۱۶۹	۰/۱۳۹	۰/۱۳
۰/۱۱۳	۲۳/۷۵	۰/۱۳۸	۰/۱۳۳	-۰/۰۰۰۲۱	۰/۱۲۳	۰/۱۱۷	۰/۱
۰/۱۴۳	۲۲/۷۵	۰/۱۸۹	۰/۱۶۶	-۰/۰۰۹۵	۰/۱۵۴	۰/۱۳۸	۰/۱۵۵
۰/۱۴۸	۱۳/۲۷	۰/۲	۰/۱۷۴	۰/۰۵۵	۰/۱۵۹	۰/۱۴۴	۰/۱۱۶
۰/۱۶	۲۷/۷	۰/۲۱۷	۰/۱۸۷	۰/۰۰۰۹۹	۰/۱۷۱	۰/۱۵۸	۰/۱۹۱
۰/۱۳۹	۱۹/۳۵	۰/۱۷۸	۰/۱۵۹	۰/۰۰۷	۰/۱۵۴	۰/۱۳۰	۰/۱۲۶
۰/۱۴	۱۸/۵۴	۰/۱۸۵	۰/۱۶۴	-۰/۰۱۵۹	۰/۱۵۲	۰/۱۳۵	۰/۱۰۴
۰/۱۵۵	۲۱/۶۸	۰/۲	۰/۱۸۱	۰/۰۵۶۸	۰/۱۶۶	۰/۱۵۱	۰/۱۴۲
۰/۱۶۸	۱۸/۱۷	۰/۲۳۲	۰/۱۹۹	۰/۰۲۳	۰/۱۸	۰/۱۴۷	۰/۰۹۹

محدودیت‌هایی که در بخش‌های پیشین و در جدول (۱) ذکر شد، خود دلیلی بر ایجاد اختلاف در برآورد شاخص فشردگی توسط سیستم‌های هوشمند و سایر روابط تجربی است. برای مقایسه بین دقت روابط می‌توان از جدول (۶) کمک گرفته و مقایسه‌ای بین درصد خطای هر کدام از رابطه‌ها و سیستم‌های هوشمند انجام داد. برای نمونه می‌توان بیان داشت که تفاوت ایجاد شده در دقت پیش‌بینی شاخص فشردگی بین رابطه اسکمپتون (۱۹۴۴) و سیستم‌های هوشمند بدلیل در نظر گرفتن محدوده‌های متفاوتی از حد روانی خاک مورد بررسی می‌باشد. سیستم تطبیقی ANFIS دقتی معادل ۸۷ درصد و اسکمپتون

(۱۹۴۴) دقتی در حدود ۶۰ درصد دارد. رابطه پارک (۲۰۰۴) و رابطه نیشیدا (۱۹۵۶) دقتی در حدود ۶۶ درصد داشته که کمی بالاتر از اسکمپتون بوده و بسیار پایین‌تر از سیستم تطبیقی هوشمند است. بولز (۱۹۷۹) در رابطه اول خود دقتی معادل ۶۸ و در دومین رابطه به دقتی معادل ۶۷ درصد رسیده که باز هم کمتر از سیستم تطبیقی ANFIS می‌باشد. هاف (۱۹۵۷) دقتی معادل ۷۳ درصد داشته که ۱۴ درصد کمتر از سیستم تطبیقی ANFIS می‌باشد. احدیان (۱۳۸۳) با دقتی معادل ۷۸ درصد، در حدود ۱۰ درصد کمتر از سیستم تطبیقی ANFIS می‌باشد. اوسوالد (۱۹۸۰) و رندون هررو (۱۹۸۳)

سایر روابط تجربی دارند ولی با توجه به نتایج بدست آمده در این تحقیق می‌توان بیان نمود که سیستم تطبیقی ANFIS دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها دارد. برای بررسی دقیق‌تر روند پیش‌بینی شاخص فشردگی، تغییرات مقادیر پیش‌بینی شده در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده روش‌های احدیان (۱۳۸۳)، اوسوالد (۱۹۸۰) هررو (۱۹۸۰) و ANFIS (مطالعه حاضر) بر روی یک نمودار ترسیم گردید. شکل (۴) این موضوع را نشان می‌دهد.

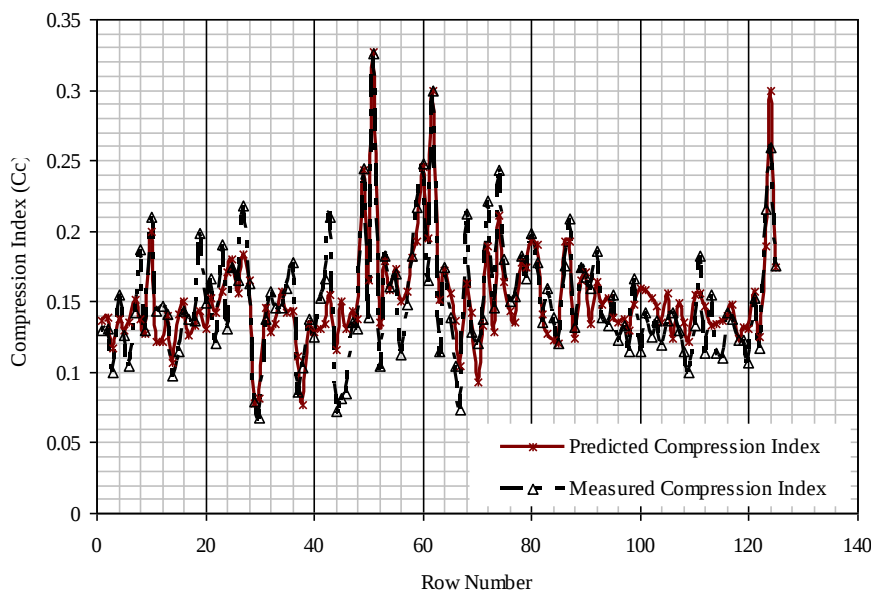
که روط خود را تحت عنوان روابط جهانی و همه‌گیر معرفی نموده‌اند، دقتی در حدود ۸۱ درصد داشته‌اند که ۶ درصد کمتر از سیستم تطبیقی ANFIS بوده است. همچنین برای رابطه سافی دادی و همکاران (۲۰۰۹) نیز این تفاوت بسیار زیاد که منجر به غیر قابل قبول شدن آن گردیده است، بدلیل در نظر گرفتن محدوده‌های متفاوتی از رطوبت اولیه خاک و جرم مخصوص در این تحقیق با منطقه مورد مطالعه آن‌ها می‌باشد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، شبکه‌های عصبی دقت بالاتری نسبت به



شکل ۴- مقایسه دقت پیش‌بینی بهترین روش‌های تجربی با نتایج ANFIS

متوسط کلیه داده‌های شاخص فشردگی را نسبت به متوسط کلیه نتایج اندازه‌گیری شده، در حدود ۳ درصد بیشتر پیش‌بینی می‌نماید. شکل (۵) مقایسه روند تغییرات شاخص فشردگی پیش‌بینی شده توسط سیستم تطبیقی ANFIS و شاخص فشردگی اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد است. این شکل مشخص می‌نماید که استفاده از سیستم تطبیقی ANFIS دقت قابل قبولی برای پیش‌بینی شاخص فشردگی دارد.

همان‌طوری که در شکل (۴) مشاهده می‌شود شیب تغییرات مقادیر اندازه‌گیری در مقابل مقادیر پیش‌بینی برای هر چهار روش ذکر شده تقریباً یکسان است که مقایسه آماری برای محاسبه دقت‌ها نیز این موضوع را تایید می‌نماید. ولی لازم به توضیح است که روش احدیان مقادیر شاخص فشردگی را نسبت به سایر روش‌ها بیشتر پیش‌بینی می‌نماید. این مقدار بیشتر در حدود ۱۸ درصد است. از طرفی روش‌های ANFIS و رندون هررو (۱۹۸۰)



شکل ۵- تغییرات روند شاخص فشردگی در روش ANFIS با مقادیر اندازه‌گیری شده

شبکه‌های عصبی و سیستم‌های استنتاج فازی انطباقی، تنها با استفاده از داده‌های نمونه از سیستم هدف، قادر به ساخت مدل‌ها بوده و از این رو با در نظر گرفتن ویژگی‌های مدلسازی عصبی- فازی، می‌توان بیان نمود که سیستم ANFIS می‌تواند در برآورد شاخص فشردگی، با دقت بیشتری عمل نماید.

سیستم تطبیقی ANFIS، دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها دارد. خلاصه نتایج تحقیق را می‌توان در بندهای زیر خلاصه نمود.

- در بین روابط تجربی رابطه اول نیشیدا (۱۹۵۶)، کوپالا (۱۹۸۱)، ناگاراژ و مورتی (۱۹۸۵) و سافی دادی و همکاران (۲۰۰۹) در منطقه مورد مطالعه این تحقیق کمترین دقت را در میان روابط تجربی دارا می‌باشند.

- از بین روابط تجربی روابط رندون هررو (۱۹۸۳) و اوسوالد (۱۹۸۰) در منطقه مورد مطالعه این بیشترین دقت را داشته که در حدود ۸۱ درصد است. دقت این دو رابطه ۶ درصد کمتر از سیستم تطبیقی ANFIS می‌باشد ولی باید توجه

شکل (۵) نشان دهنده پیش بینی قابل قبول توسط ANFIS است. همان‌گونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود در برخی از نقاط ماکزیمم و مینیمم اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده وجود داشته که ناشی از در نظر گرفتن تابع عضویت دوزنقه‌ای است چراکه برای داده‌هایی که بین رئوس بالایی دوزنقه قرار می‌گیرند، شاخص فشردگی تقریباً یکسانی پیش‌بینی می‌نماید.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق ارتباط شاخص فشردگی خاک با پارامترهای فیزیکی آن در سیستم تطبیقی ANFIS مورد بررسی قرار گرفت. از آنجایی که اندازه‌گیری شاخص فشردگی نیازمند صرف هزینه زیاد و زمان طولانی است، محققین مختلف در گذشته این شاخص را به سایر پارامترهای فیزیکی خاک که عموماً به سادگی اندازه‌گیری می‌شوند مرتبط نموده‌اند. همچنین در مطالعه حاضر نتایج حاصل از سیستم تطبیقی ANFIS با نتایج حاصل از فرمول‌های تجربی با لحاظ نمودن متغیرهای موجود در منطقه مورد مطالعه در این تحقیق مقایسه شد. به طور کلی نتایج نشان داد که پیش بینی شاخص فشردگی با

سایر روش‌ها ۱۸ درصد بیشتر پیش‌بینی می‌نماید. از طرفی روش‌های ANFIS و هررو (۱۹۸۰) متوسط کلیه داده‌های شاخص فشردگی را نسبت به متوسط کلیه نتایج اندازه‌گیری شده، در حدود ۳ درصد بیشتر پیش‌بینی می‌نماید.

- با توجه به نتایج، دقت شبکه عصبی معادل ۸۶ درصد بوده که کمتر از سیستم تطبیقی ANFIS است. همچنین پارامتر RMSE شبکه عصبی در حدود ۰/۱۹۳۹ بوده در حالی که این پارامتر برای سیستم تطبیقی ANFIS در حدود ۰/۱۵ می‌باشد. ضریب همبستگی شبکه عصبی ۰/۶۴ و این پارامتر برای سیستم تطبیقی ANFIS ۰/۷۹ است.

داشت که ضریب همبستگی سیستم تطبیقی ANFIS ۷۹ درصد، رندون هررو (۱۹۸۳) ۰/۴۶۸۴ و اوسوالد (۱۹۸۰) ۰/۴۶۴۹ می‌باشد. این در حالی است که رابطه احدیان (۱۳۸۳) با داشتن دقتی معادل ۷۸ درصد دارای دقت کمتری (در حدود ۳ درصد) کمتر از رندون هررو (۱۹۸۳) و اوسوالد (۱۹۸۰) است ولی ضریب همبستگی بالاتری و در حدود ۰/۴۸ دارد.

- شیب تغییرات مقادیر اندازه‌گیری در مقابل مقادیر پیش‌بینی برای روش‌های احدیان (۱۳۸۳)، هررو (۱۹۸۰)، اوسوالد (۱۹۸۰) و ANFIS تقریباً یکسان است. ولی روش احدیان (۱۳۸۳) مقادیر شاخص فشردگی را نسبت به

۵- منابع:

- [۱] احدیان، ج. ۱۳۸۳. برآورد شاخص شاخص فشردگی، C_c با استفاده از خصوصیات فیزیکی در منطقه در منطقه اهواز. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز.
- [2] Sketmpton, A. W. 1944. Notes on the compressibility of clays. Quarterly Journal of the Geotechnical Society of London. Vol.100. pp.110-135.
- [3] Nishida, Y. 1956. A brief note on compression index of soil. Journal of the Soil Mechanic and Foundation Engineering Division. ASCE. Vol. 82 (SM3): pp. 1027-1-1027-14.
- [4] Oswald, R.H. 1980. Universal compression index equation. Journal of Geotechnical Engineering Division. ASCE. 106:1179-1199.
- [5] Rendon-Herrero, O. 1980. Universal compression index equation. Journal of Geotechnical Engineering Division. ASCE. Vol. 106(11) pp.1179-1200.
- [6] Nagaraj, T., and Murty B.R.S. 1985. Prediction of the predication of the pre-consolidation pressure and recompression index of soil. Geotechnical Testing Journal. Vol.8.no.4. 199-202.
- [7] Park, J.H., and Koumoto, t. 2004. New compression index equation. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE. 130(2) pp.223-226.
- [8] Cavalieri, K., M., V., Arvidsson, J., Piers da Silva, A., Keller, T. 2008. Determination of pre-compression stress from un-axial compression tests. Soil & Tillage Research Vol. 98, pp.17-26.
- [۹] دریایی، م.، کاشفی پور، م.، احدیان، ج.، قبادیان، ر. ۱۳۸۸. مدلسازی شاخص فشردگی خاک‌های ریزدانه به کمک شبکه عصبی مصنوعی و مقایسه با سایر روابط تجربی. مجله ی آب و خاک جلد ۲۴ شماره ی ۴، صص ۶۵۹-۶۶۷.
- [10] Saffih-hdadi, K., Defossez, P., Richard, G., Cui, Y.J., Tang, A.M., Chaplain, V. 2009. A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density. Soil & Tillage Research. Vol.105, pp.96-103.
- [11] Shahin, M.A., Jaksa, M.B., and Maier, H.R. 2001. Artificial neural network

applications in geotechnical engineering. Australian Geomechanics.pp. 49-62.

- [12] Alivisi, s.Mascellani, G.,Franchini, M.,and Bardossy,A.2005.Water level Forecasting through Fuzzy logic and Artificial Neural Network Approaches.Hydrol.Earth Sys.Sci.Discuss.,2,pp.1107-1145.

[۱۳] پوستی زاده، ن. ۱۳۸۵. پیش بینی جریان رودخانه با استفاده از سیستم استنتاج فازی. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس.

- [14] Swain,P.C. and Nanduri,U.V.2005. Stream flow Forecasting using Nauru-Fuzzy Inference System.Advanced in Water Resources.Vol.32, Issue 2, pp.1-14.

[۱۵] طارقیان، ر. ۱۳۸۶. پیش بینی دبی ورودی و سطح آب مخزن سد دز با استفاده از سیستم‌های فازی و شبکه‌های عصبی. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده مهندسی علوم آب شهید چمران اهواز.

- [16] Park,H and Lee,S.R.2011. Evaluation of the compression index of soils using an artificial neural network. Computers and Geotechnics.Vol.38, pp.472-481.

[۱۷] کیا، م. ۱۳۸۹. منطق فازی در MATLAB، انتشارات کیان رایانه سبز. ۳۰۴ صفحه.

[۱۸] منهای، م. ۱۳۷۹. مبانی شبکه‌های عصبی، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر. ۷۱۵ صفحه.

- [19] Takagi, T. and Sugeno, M. 1985.Fuzzy Identification of Systems and its Application to Modeling and Control. IEEE Trans. Syst.Man. Cybernetic; Vol.15, pp.116-13.