پیش‌بینی نشست تونل خط ۷ متروی تهران با استفاده از روش رگرسیون خطی و سیستم استنتاج فازی ممدانی

سید گودرز الهامیان[۱]، عباس آقاجانی بزازی[۲]، نوید حسینی علائی[۳]

۱. کارشناس ارشد استخراج معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران؛ Goodarz_Elhamian@yahoo.com

۲. عضو هیأت علمی گروه مهندسی معدن دانشگاه کاشان، کاشان، ایران؛ a_aghajani_bazzazi@kashanu.ac.ir

۳. عضو هیأت علمی گروه مهندسی معدن دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب؛ n_hosseini@azad.ac.ir

چکیده

امروزه در شهرهای بزرگ، متروها و تونل‌های شهری یکی از کلیدی‌ترین و مهم‌ترین زیرساخت‌های شبکه حمل و نقل شهری به شمار می‌آیند. با توجه به اینکه پروژه‌های نوین باید در زیر مناطق پر جمعیت شهری ساخته شوند، ساخت و اجرای این سیستم‌های زیرزمینی ممکن است عوارضی را برای تاسیسات و همچنین آسیب‌هایی به سازه‌های سطحی و زیر سطحی درپی داشته باشد. در این تحقیق به دلیل اهمیت موضوع عبور از بافت فرسوده شهری و وجود سازه‌های مهم در طی مسیر خط ۷ مترو تهران هم چون ساختمان‌های بزرگراه نواب صفوی، تونل توحید و ...، پیش‌بینی نشست و مطالعه در این مقطع به کمک روش رگرسیون خطی و سیستم استنتاج فازی ممدانی بر روی ۱۰۹ داده نشست صورت گرفت و نتیجه حاصل با مقدار واقعی مقایسه شده است. میزان اختلاف مقدار پیش‌بینی شده با مقدار واقعی، کم و قابل قبول است که مربوط به نشست در دو لایه زمین شناسی است. اطلاعات ورودی شامل چسبندگی، زاویه اصطکاک، مدول الاستیسیته، نسبت پوآسون، وزن مخصوص، دانه بندی و نرخ نفوذ ماشین حفاری می‌باشد. نتایج حاصله حاکی از آن است که سیستم استنتاج فازی ممدانی ابزار مناسبی برای پیش‌بینی میزان نشست تونل‌های تهران است.

کلمات کلیدی

پیش‌بینی نشست، تونل، خط ۷ متروی تهران، رگرسیون خطی، سیستم استنتاج فازی ممدانی

۱- مقدمه

از میان کلیه فعالیت‌های مهندسی، حفر تونل و به طور کلی فضای زیرزمینی بیش از همه نیاز به بررسی دقیق و تحلیل مناسب دارد. مسأله نشست از جمله عوامل مهم در احداث تونل‌ها در مناطق شهری است. در شرایطی که امکان نشست وجود دارد، برای حفر تونل و نگهداری آن باید از روش‌هایی استفاده کرد که نشست زمین به حداقل ممکن محدود گردد. ضریب تعیین و پیش‌بینی میزان نشست از روش‌های موثردر تحلیل پایداری تونل است. در این تحقیق از تحلیل رگرسیون خطی به عنوان پرکاربردترین روش پیش‌بینی در بین روش‌های آماری و همچنین منطق فازی استفاده شده است. منطق فازی روشی آسان برای رسیدن به نتایج معین بر پایه اطلاعات ورودی مبهم و غیر دقیق است که امروزه کاربرد فراوانی پیدا کرده است. که در این تحقیق به علت در اختیار داشتن محدوده عملیات کوتاهی از مسیر خط ۷ و به دلیل نبودن داده‌های کافی از قبیل آب‌های زیرزمینی، روباره و ...، از دقت معادله ارایه شده کاسته شده است اما در نهایت با مقایسه این دو روش با مقدار واقعی معادله مناسبی برای پیش‌بینی نشست تونل ارایه گردیده است.

۲- معرفی مسیر خط ۷ متروی تهران

مسیر خط ۷ به دو بخش شمالی - جنوبی و شرقی – غربی تقسیم شده است که بخش شمالی - جنوبی خط ۷ متروی تهران از خیابان کوهستان سرو غربی نزدیک بزرگراه یادگار امام در شمال غرب تهران آغاز می‌شود و بصورت شرقی - غربی تا میدان سرو ادامه می‌یابد. در حوالی میدان سرو بصورت شمال – جنوبی تغییر جهت داده و در راستای بلوار پاکنژاد به بزرگراه همت برخورد می‌کند. مسیر تونل در محل بزرگراه همت با پیچشی به سمت شرق در حاشیه بزرگراه چمران و سپس بزرگراه نواب تا تقاطع به بخش شرقی- غربی متصل می‌شود. این بخش از مسیر تونل در مجموع دارای طولی حدود ۱۴ کیلومتر و در بردارنده ۱۲ ایستگاه است. با توجه به نتایج بدست آمده از مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی و همچنین با در نظر گرفتن مقیاس نقشه، لایه‌های خاکی دربرگیرنده مسیر تونل به پنج واحد (گونه) زمین‌شناسی مهندسی ET-۱ تا ET- ۵ تفکیک شده‌اند [۱]. این تحقیق در حد فاصل بریانک تا پل کمیل واقع در بزرگراه نواب است که در این مسیر تنها دو لایه زمین‌شناسی ET-۲ و ET-۴ مشاهده شده است که تفاوت آن‌ها بیشتر در میزان درصد عبوری خاک از الک ۲۰۰ بوده است و هر دو لایه از شن و ماسه و خاک رس تشکیل شده اند. درصد عبوری از الک ۲۰۰ برای لایه ET-۲ بین ۱۲تا۳۰ ٪ و برای لایه ET-۴ بین ۲۲تا۳۴ ٪ اندازه‌گیری شده است [۱].

جدول(۱): مقادیر پارمترهای ژئوتکنیکی پیشنهادی برای واحدهای زمین شناسی مهندسی مسیر تونل [۱]

واحد زمین شناسی مهندسی	علامت‌های اختصاری	فاصله اطمینان ET۲		مقدار پیشنهادی ET۲	فاصله اطمینان ET۴		مقدار پیشنهادی ET۴
چسبندگی تحکیم شده زهکش نشده(kg/c^2)	C	۰/۱	۰/۳	۰/۲۵	۰/۳	۰/۴	۰/۳۵
زاویه اصطکاک داخلی تحکیم شده زهکش نشده(درجه)	Φ	۳۲	۳۸	۳۴	۲۶	۳۵	۳۰
چسبندگی(kg/c^2)	C'	۰/۱	۰/۳	۰/۲۰	۰/۲	۰/۴	۰/۳۰
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	Φ'	۲۸	۳۲	۳۰	۲۵	۲۹	۲۶
مدول الاستیسیته	E	۷۵	۸۵	۸۰۰	۵۵۰	۶۵۰	۶۰۰

(kg/c^2)							
ضریب پواسون	υ	۰/۳			۰/۳		
وزن مخصوص (kg/c^3)	W	۱/۹۰			۱/۷۵		

۳- روش رگرسیون خطی

در تحلیل همبستگی هدف اولیه اندازه‌گیری میزان همبستگی خطی بین دو متغیر است، اما اصولاً در تحلیل رگرسیون سعی می‌شود مقدار متوسط یک متغیر را بر اساس مقادیر ثابت متغیرهای دیگر تخمین یا پیش‌بینی کرد. در حقیقت تحلیل رگرسیونی روشی آماری برای بررسی و مدل سازی ارتباط بین متغیرها است. می‌توان گفت تحلیل رگرسیونی، پرکاربردترین روش در بین روش‌های آماری است. به طور کلی یک تحلیل رگرسیونی ساده به صورت زیر می‌باشد:

رابطه بین دو متغیر بررسی می‌شود، تحلیل‌گر یک خط مستقیم بین نقاط ترسیم می‌کند که هر چه نقاط نزدیک‌تر در امتداد خط قرار گیرند بیان کننده همبستگی کامل‌تر بین متغیرها است و همچنین اگر خط ترسیم شده شیب دار باشد همبستگی بالاتر و هر چه قدر خط به صورت عمودی یا افقی ترسیم شود همبستگی کاهش پیدا می‌کند، نشست‌های ثبت شده را بر اساس ۹ متغیر که شامل اطلاعات زمین‌شناسی و ماشین حفاری است، ابتدا در لایه ET۲ و سپس در لایه ET۴ تخمین و بررسی شده است. در نهایت یک نمودار و یک رابطه کلی بین نشست و ۹ داده ورودی نوشته شده است و ضرایب معادله پیش‌بینی نشست به صورت معادله (۱) می‌باشد [۶]، [۷].

$$y=((۱۸/۴۸\times \Phi')+(-۱۵ /۱۸\times \Phi)+(-۰ /۰۹\times E)+(-۷۲ /۳۲\times W)+(-۰ /۰۲\times X)+(۷ /۲۵\times S)) \quad (۱)$$

معادلات پیش‌بینی نشست در لایه ET۲ مطابق با رابطه (۱) دارای ضریب تعیین ۰/۷۲است. به کمک روش غیر خطی سعی در بهبود معادله شده اما به دلیل ناچیز بودن بهبود ضریب تعیین، از روش رگرسیون غیر خطی صرف نظر شده است. برای نشست در لایه ET۴ مراحل به همان ترتیب انجام گردیده است که در نهایت، ضرایب معادله پیش‌بینی نشست به صورت معادله (۲) نوشته شده و ضریب تعیین برابر ۰/۷۱ است. پارامتر X، معرف دانه بندی و پارامتر S، معرف نرخ نفوذ ماشین حفاری است و بقیه پارامترها مطابق با جدول (۱) معرفی شده است.

$$y=((۹/۵\times \Phi')+(-۱ /۹\times \Phi)+(-۳۵۷ /۳۸\times \upsilon)+(-۹۰ /۶۳\times W)+(۰ /۸۷\times X)+(۸ /۵۲\times S)) \quad (۲)$$

۴- سیستم استنتاج فازی ممدانی

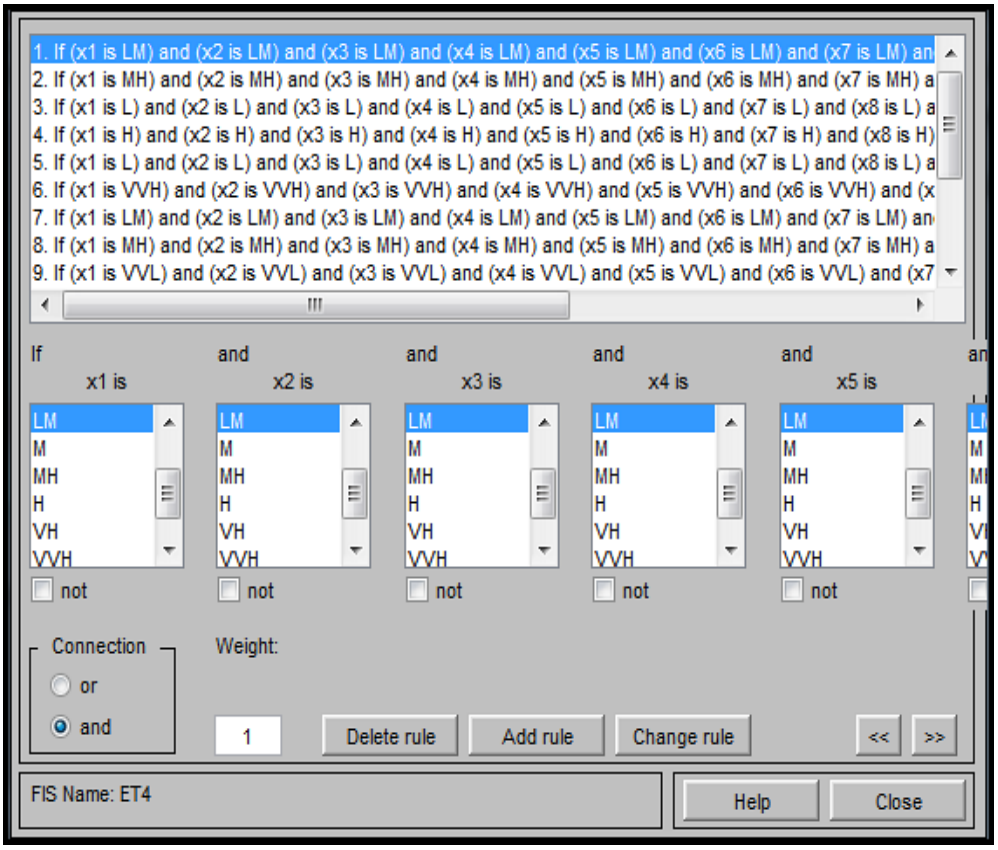
برای پیش‌بینی نشست، داده‌های ژئوتکنیکی از جمله چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، مدول الاستیسیته، ضریب پوآسون، چگالی، دانه‌بندی و خصوصیات ماشین حفاری همچون نرخ نفوذ برای هر دو لایه ET۲ و ET۴ و یک خروجی در اختیار است. که برای مدل کردن داده‌ها از جدول (۲) استفاده شده است. به این صورت که ابتدا میزان حداقل و حداکثر هر یک از پارامترها تعریف شده، سپس عددهای مورد نظر را به صورت تعاریف فازی بیان می‌شود. همان‌طور که در شکل (۲) و شکل (۳) مشاهده می‌شود این توابع هر کدام بسته به اختلاف حداقل و حداکثر هر پارامتر به حالت‌های مختلف بسیاربسیارضعیف، بسیارضعیف، متوسط‌ضعیف، متوسط، متوسط‌قوی، قوی، بسیارقوی، بسیاربسیارقوی تقسیم بندی شده‌اند. به عنوان نمونه در شکل (۴) اگر چسبندگی بین ۰/۲۲ و ۰/۲۳ باشد، به این معنی است که هم به حالت ضعیف و هم به حالت خیلی ضعیف تعلق دارد. در واقع اگر از عدد مورد نظر چسبندگی خطی به صورت عمود رسم گردد حالت ضعیف را در پایین‌ترین نقطه نزدیک به درجه صفر قطع کرده و حالت خیلی ضعیف را در درجه ۰/۹ قطع می‌کند که نتیجه این است که چسبندگی مورد نظر در حالت خیلی ضعیف قرار می‌گیرد [۳]، [۵].

۵- قانون اگر-آنگاه

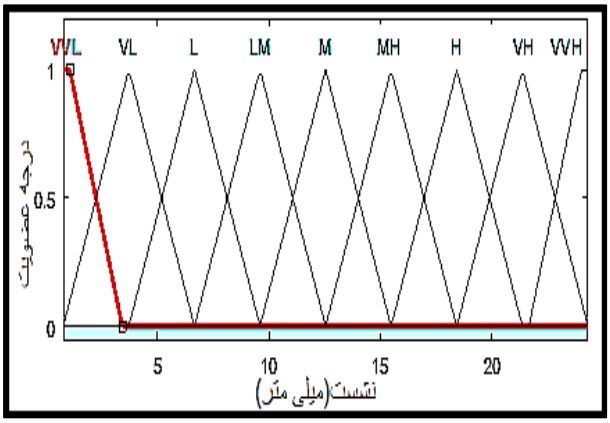
با توجه به اعداد داخل جدول (۲) آن‌ها مطابق با شکل(۲) و (۳) به صورت مقادیر فازی، از بسیاربسیارقوی تا بسیار بسیار ضعیف تقسیم بندی شده است [۴]. سپس در انتها مدل درست شده به صورت دفازی نمایش داده شده است. شکل (۳) و (۴) نمایش دفازی شده مدل است.

جدول(۲): میزان حداقل و حداکثردر نظر گرفته شده برای فازی سازی

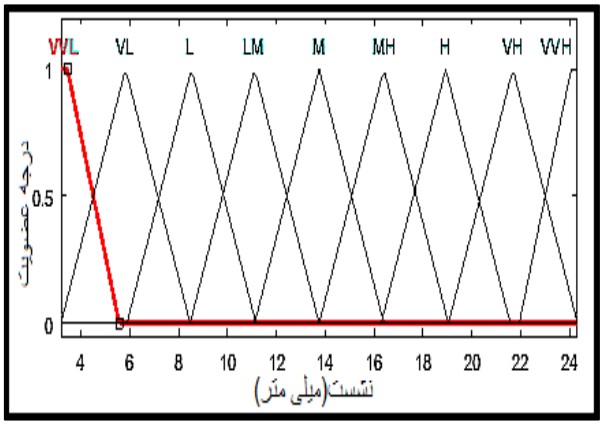
نوع اطلاعات	پارامتر(میلی متر)	اعدادحداقل در لایه ET2	اعدادحداکثر در لایه ET2	اعدادحداقل در لایه ET4	اعداد حداکثر در لایه ET4
ورودی	چسبندگی تحکیم نشده زهکش شده	۰/۲۲	۰/۲۷	۰/۳۱	۰/۳۶
	زاویه اصتحکاک داخلی تحکیم نشده زهکش شده	۳۳	۳۵/۵	۲۶/۵	۲۹
	چسبندگی	۰/۱۷	۰/۲۲	۰/۲۶	۰/۳۱
	زاویه اصتحکاک	۲۹	۳۱/۵	۲۵/۵	۲۸
	مدول الاستیسیته	۷۸۰	۸۳۰	۵۷۰	۶۲۰
	ضریب پواسون	۰/۲۷	۰/۳۲	۰/۲۶	۰/۳۱
	وزن مخصوص	۱/۸۷	۱/۹۲	۱/۷۱	۱/۷۶
	دانه بندی	۱۸	۲۶	۲۳/۵	۲۹
	نرخ نفوز	۱/۸	۲/۳۲۴	۱/۸	۲/۳۲۴
خروجی	نشست	۰/۷۸	۲۴/۳۲	۳/۱۹	۲۴/۳۲



شکل(۱): نحوه ثبت قانون‌های اگر و آنگاه برای مدل تعرف شده درسیستم استنتاج فازی ممدانی



شکل(۲): تابع عضویت نشست در لایه ET۲



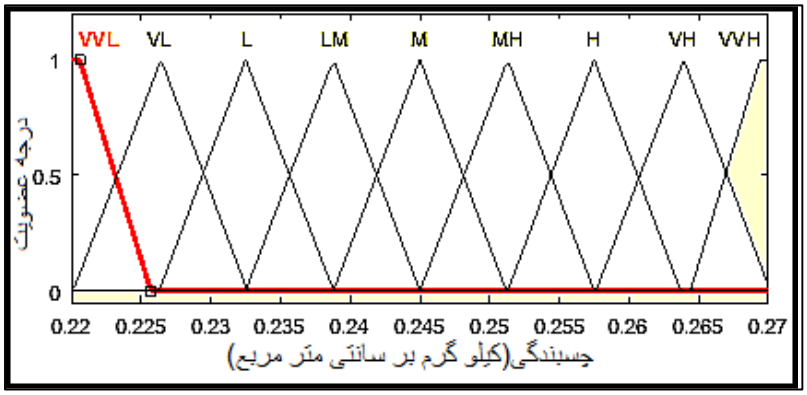
شکل(۳): تابع عضویت نشست در لایه ET۴

۶- محاسبه خطا (RMSE) و ضریب تعیین(R^2)

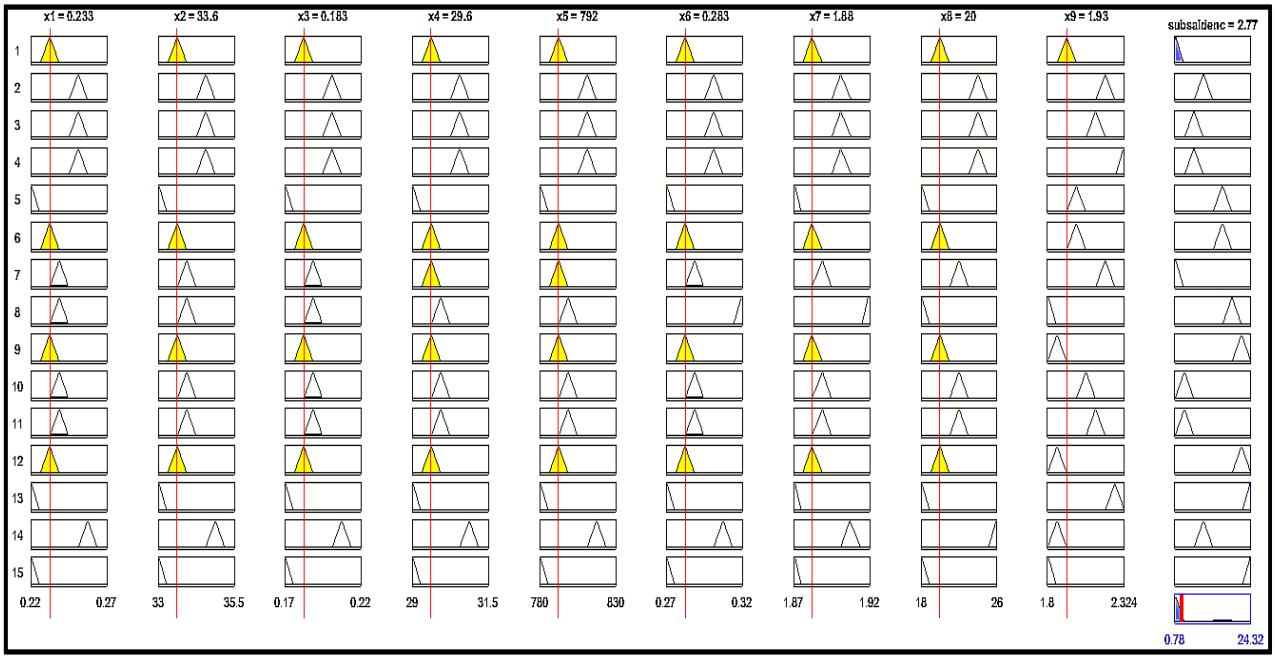
خطای جذر میانگین مربعات یا انحراف جذر میانگین مربعات یا خطای جذر میانگین مربعها یک سیستم ارزیابی مدل می‌باشد که معمولا برای مدل‌های رگرسیون استفاده می‌گردد و تفاوت میان مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل یا برآوردگر آماری و مقدار واقعی را بررسی می‌کند. برای به دست آوردن خطا، ابتدا اختلاف بین هرکدام از مقادیرنشست پیش‌بینی شده توسط مدل فازی و نشست واقعی را محاسبه می‌شود، سپس مطابق معادله زیر محاسبه و انجام می‌شود [۲].

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i - y_i)^2}{N}} \qquad (۳)$$

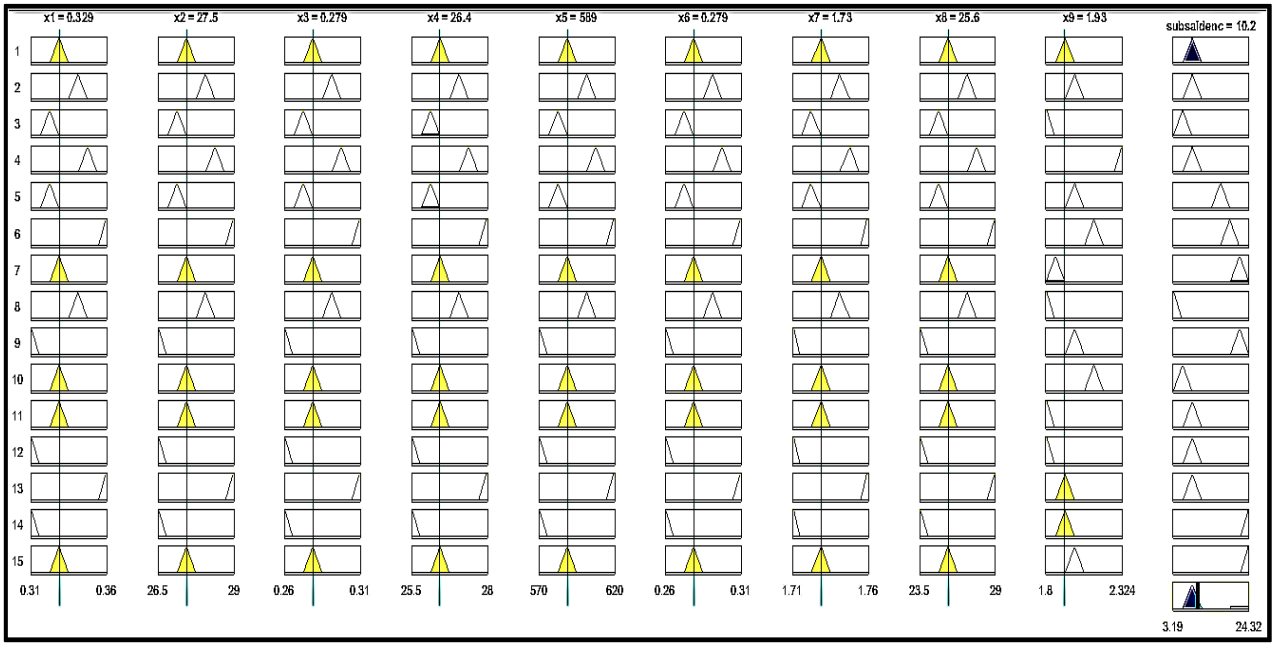
اگر خط رگرسیون از تمام نقاط بگذرد توانایی معرفی همه متغیرها را دارد و هرچه از نقاط دورتر باشد نشان دهنده توانایی کمتر است. این توانایی را ضریب تعیین می‌نامند، ضریب تعیین، در اصل بیان کننده این است که تغییرات در y چقدر بر روی x تأثیر می‌گذارد یا چه مقدار از تغییرات متغیر وابسته تحت تاثیر متغیر مستقل مربوطه بوده و مابقی تغییرات متغیر وابسته مربوط به سایر عوامل می‌باشد که با R^2 نمایش داده می‌شود، هر چقدر به عدد یک نزدیک‌تر باشد نشان دهنده همبستگی بیشتر بین دو متغییر است. مقدار ضریب تعیین در محدوده $0 < R^2 < 1$ می‌باشد و معرف درصدی از داده‌هاست که به خط رگرسیون نزدیک‌ترهستند. ضریب تعیین شاخصی است که درجه همبستگی بین دو متغیر را به صورت عددی نشان می‌دهد و به این صورت تحلیل همبستگی به سهولت و روشنی بیشتری امکان پذیر می‌شود.



شکل(۴): تابع عضویت چسبندگی تحکیم شده زهکش نشده در لایهET۲

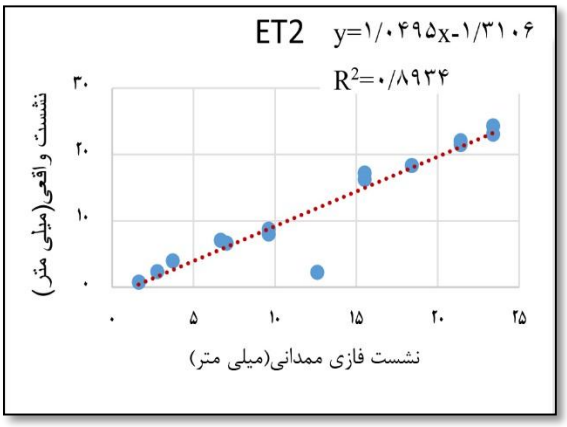


شکل(۳): طرح شماتیکی از سیستم استنتاج فازی ممدانی ساخته شده درلایه ET۲

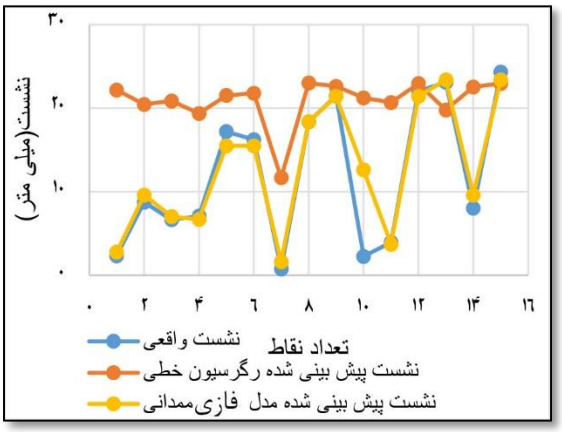


شکل(۴): طرح شماتیکی از سیستم استنتاج فازی ممدانی ساخته شده درلایه ET۴

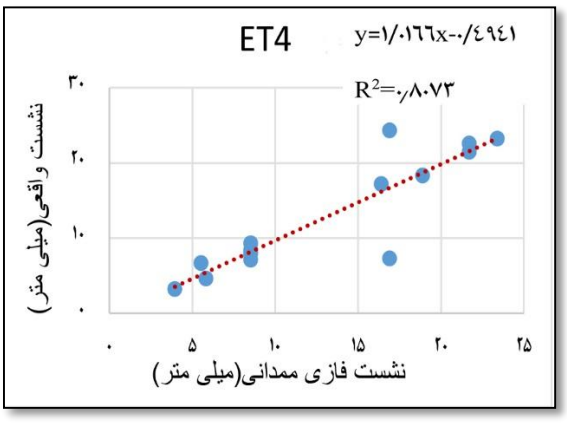
به طور مثال شکل۴، x1 تا x9 به ترتیب [۲۳/۰، ۱۳/۹۹، ۲۵/۶، ۱/۷۳، ۰/۲۷۹ ، ۵۸۹، ۲۶/۴، ۰/۲۷۹، ۲۷/۵] وخروجی برابر با ۱۰/۲ است. سپس برای تعیین ضریب تعیین طبق نمودارهای زیر کلیه خروجی‌های پیش‌بینی شده با روش سیستم استنتاج فازی، محور x و نشت‌های ثبت شده واقعی، محور y در نظر گرفته شده است.

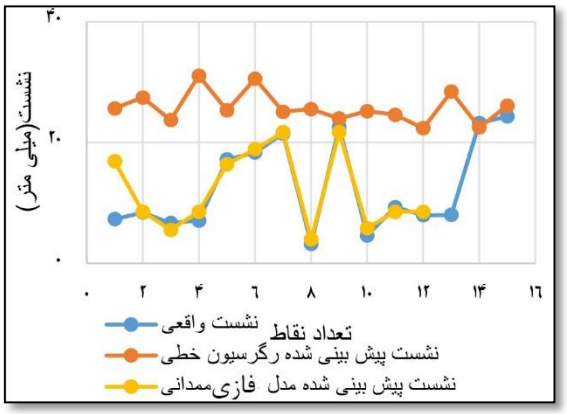


شکل(۵): ضریب تعیین نشست واقعی در لایه ET۲ و ET۴ و نشست پیش‌بینی شده توسط مدل فازی ممدانی



شکل(۶): مقایسه نشست‌های پیش‌بینی شده با نشست‌های واقعی در لایه ET۲ و ET۴





۷- نتیجه‌گیری

با توجه به شرایط ژئومکانیکی محیط بررسی شده، تحلیل پایداری و پیش‌بینی نشست تونل خط ۷ متروی تهران با استفاده از روش رگرسیون خطی و سیستم استنتاج فازی ممدانی بررسی شده است و به شرح زیر است.

۱) میانگین مربعات خطا برای ۱۵ مورد مدل شده در روش فازی برابر با ۳/۳۳،حداکثر برابر با ۷/۴۲و حداقل برابر با ۲/۱۲ برای عداد نشست در لایه ET۲ وبه ترتیب میانگین ۲/۶۰، حدکثر ۴/۲۹ وحداقل ۰/۸۹ برای اعداد نشست در لایه ET۴ حاصل شده است.

۲) بالاترین ضریب همبستگی به دست آمده ۷۲٪ برای اعداد نشست در لایه ET۲ و ۷۱٪ برای نشست در لایه ET۴ به روش رگرسیون خطی حاصل شده است. همچنین ضریب همبستگی ۸۹٪ برای نشست در لایه ET۲ و ۸۰٪ برای نشست در لایه ET۴ به کمک سیستم استنتاج فازی ممدانی به دست آورده شد.

۳) با توجه به تحقیقات انجام شده موثرترین پارامترها بر نشست سطح زمین، در این تحقیق پارمترهای ژئوتکنیکی از جمله چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، مدول الاستیسیته، ضریب پوآسون، چگالی، دانه‌بندی و خصوصیات ماشین حفاری از جمله نرخ نفوذ می‌باشد. همچنین با توجه به جنس خاک مورد بررسی، مدول الاستیسیته و نرخ نفوذ ماشین بیشترین تاثیرگذاری را در نشست تونل دارند.

منابع

[۱] موسسه مهندسین مشاور ساحل: مطالعات زمین شناسی مهندسی مسیر تونل اسفند ۱۳۸۸

[2] H. Eskandari, M.R., Rezaee, M ,Mohammadnia,. 2004. Application of multiple regression and artificial neural network techniques to predict shear wave velocity from wireline log data for a carbonate reservoir south-west Iran. CSEG Recorder 42, 48.

[3] M. A. Grima, (2000). Neuro-fuzzy modelling in engineering geology. Rotterdam: A.A. Balkema.

[4] H. Hellendoorn, , & C. Thomas, (1993). Defuzzification in fuzzy controllers. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 1, 109–123.

[5] Y. T Huang , & T. J. Siller, (1997). Fuzzy representation and reasoning in geotechnical site characterization. Computers and Geotechnics, 21(1), 65–86.

[6] K. V. Mardia, J. T. Kent and J. M. Bibby (1979). Multivariate Analysis. Academic Press

[7] K.J. Friston, A.P. Holmes, K.J. Worsley, J. -B. Poline, C.D. Frith and R.S.J. Frackowiak (1995). "Statistical