پیش بینی تنش القایی در پوشش بتنی سنگهای مستعد تورم

با استفاده از سیستم استنتاج تطبیقی نرو-فازی

رامین دوست محمدی[۱]; مهدی موسوی[۲]

۱. استادیار دانشگاه زنجان ramin.doostmohammadi@znu.ac.ir
۲. دانشیار دانشگاه تهران mmoosavi@ut.ac.ir

پوشش بتنی تونل های حفر شده در زمینهای مستعد تورم، تحت تنش تابع زمان قرار دارد. یکی از روش های تعیین مقدار تنش، استفاده از روش جبران و نصب جک های تخت است. در این روش ابتدا، یک جفت پین اندازه‌گیری بر روی سطح پوشش بتنی در دو طرف محل شکافی، که بعدا ایجاد خواهد شد، نصب می شوند. فاصله بین این پین ها به وسیله ی جابجایی‌سنج دقیق ثبت می‌شود؛ سپس یک شکاف به وسیله ی اره مدور الماسه‌ای در محل از پیش تعیین شده، مابین دو پین، ایجاد می شود. در اثر این شیار، تنش ها در بتن آزاد شده، که عموما منجر به همگرایی پین ها می‌شود. سپس یک سلول فشار هیدرولیکی (جک تخت) در داخل شکاف قرار گرفته و به یک پمپ هیدرولیکی وصل می شوند. در نهایت جک تخت بارگذاری شده تا تغییر شکل ایجاد شده به حالت اولیه خود برگردد و بدین ترتیب تنش القایی در پوشش تعیین می شود. رفتار متغیر و تابع زمان زمین های نرم در فضاهای زیرزمینی، بیانگر این مطلب است که در صورت استفاده از روش جبران، بایستی ابزارهایی مانند پمپ را به صورت دوره ای و در طول سالها به محل مطالعه حمل، زمان زیادی را صرف قرائت نمود. در این تحقیق توانایی سیستم استنتاج تطبیقی نرو-فازی (انفیس) [i] در تخمین آسان و سریع این تنش، سنجیده و تایید می شود. آزمایشهای تعیین تنش، در پوشش بتنی تونل تهویه مغار نیروگاه سد مسجد سلیمان به عنوان نمونه مطالعاتی این تحقیق استفاده شده است. استفاده از این روش، طراح را قادر می سازد تا تنش در پوشش را با قرائت فاصله بین پین ها پیش بینی نماید.

واژه های کلیدی:تنش در پوشش بتنی تونلها، روش جبران، جک های تخت، سیستم استنتاج تطبیقی نرو-فازی.

[i] Adaptive Network Fuzzy Inference System (ANFIS)

••• مقدمه

فضاهای روباز یا زیرزمینی، که به منظور استخراج مواد معدنی، حمل و نقل، انتقال آب و ... ایجاد می شوند، گاهی در سنگ های متورم شونده حفر می شوند. در صورتی که این سنگهای مستعد تورم در مجاورت آب قرار گیرند، موجب ایجاد فشار تورمی بر سیستم های نگهدارنده می شوند[۱]. با علم بر خسارات سنگین ناشی از این رفتار تابع زمان، بررسی و تعیین مقادیر فشار تورمی برای طراحی حفاری ها ضروری است. اندازه گیری مداوم فشار تورمی سنگ پس از احداث فضاهای موردنظر، طراحان را قادر می سازد که با شناخت از روند تغییرات فشارهای وارده بر سیستم های نگهدارنده، پایداری فضاهای حفر شده را کنترل نمایند. تاکنون روشهای مختلفی برای تعیین فشارهای تابع زمان سنگهای ضعیف ارائه شده اند. یکی از روش های موفق در این زمینه، "روش جبران" با استفاده از جکهای تخت است. اندازه گیری این رفتار تابع زمان، نیازمند حمل پمپ به محل و صرف زمان زیاد، جهت قرائتهای مورد نیاز، است. بنابراین تعیین رابطه فشار-تغییرشکل با استفاده از یک روش ساده تر و در زمان کوتاهتر مطلوب است.

سیستم استنتاج تطبیقی نرو- فازی (انفیس)، در برخی از مسائل مهندسی به کارگرفته شده، ولی کاربرد این روش در مسائل مربوط به مهندسی ژئوتکنیک بسیار کم گزارش شده است. برای مثال نی[۲] و همکارانش از این روش برای ارزیابی پتانسیل شکست شیروانی ها استفاده کرده اند[۲]. رامو و گارسیا[۳] نیز ویژگیهای دینامیکی خاک-ها را با استفاده از مدل انفیس، تخمین زده اند[۳]. شاهین[۴] و همکارانش و همچنین پادمینی[۵] و همکارانش نیز نشست فوندانسیون ها در خاک های با چسبندگی کم را با با استفاده از مدل انفیس پیش بینی نموده اند [۴] ، [۵].

در این مقاله، سیستم استنتاج تطبیقی نرو-فازی برای مدلسازی و پیش بینی رابطه فشار-تغییرشکل در پوشش بتنی تونل تهویه مغار نیروگاه زیرزمینی تولید برق مسجد سلیمان، که تحت فشار تورمی سنگ های مجاور قرار دارد، به کارگرفته شده است. استفاده از این روش پیشنهادی، مهندسین را قادر می سازد تا تنش ایجاد شده در پوشش بتنی را تنها با قرائت فاصله پین های دو طرف جک تخت، پیش بینی نمایند.

••• روش جبران برای تعیین تنش در پوشش بتنی تونل ها

این روش بر پایه ایجاد یک شرایط مصنوعی آزادی تنش در پوشش تونل ها با استفاده از یک اره و اندازه‌گیری تغییر شکل حاصل از آن بنا نهاده شده است. این تغییر شکل ایجاد شده، با اعمال فشار با یک وسیله مناسب، (جک تخت) جبران شده و فشار لازم جهت جبران جابجایی‌ها و بازگشت به حالت اولیه، معادل تنش اولیه در نظر گرفته می‌شود. شکل ۱ (الف) و ۱(ب) به ترتیب نحوه ایجاد شکاف و جک تخت قرار داده شده در آن را، نشان می‌دهند.

ابتدا یک جفت پین اندازه‌گیری بر روی سطح پوشش بتنی در دو طرف محل شکافی، که بعدا ایجاد خواهد شد، نصب می شوند. فاصله بین این پین ها با جابجایی‌سنج دقیقی با دقت ۰/۰۰۱ میلیمتر ثبت می‌شود. سپس یک شکاف با اره مدور الماسه‌ای در محل از پیش تعیین شده مابین دو پین می شود. در اثر این شیار، تنش ها در بتن آزاد شده، که عموما منجر به همگرایی پین ها می‌شود. سپس یک سلول فشار هیدرولیکی (جک تخت) در داخل شکاف قرار داده و به یک پمپ هیدرولیکی وصل می شود. در نهایت جک تخت بارگذاری شده تا تغییر شکل ایجاد شده به حالت اولیه خود برگردد. فشار اندازه‌گیری شده در جک تخت با در نظر گرفتن فاکتور شکل[۶]، میزان فشار اعمالی و همچنین فاکتور هندسی،[۷] به تنش موجود داخل پوشش تبدیل می‌شود[۶]. این تبدیل با استفاده از فرمول زیر محاسبه می شود:

$$\sigma_n = P.K_m.K_a \qquad (۱)$$

که در این فرمول:

σ_n تنش مماسی پوشش، P فشار روغن در جک تخت، K_m فاکتور شکل جک تخت و K_a نسبت سطح جک تخت به سطح ناحیه برش است. همان طور که از فرمول (۱) مشخص است، یکی از مزایای مهم استفاده از روش جبران این است که در این روش نیازی به اطلاع از ویژگیهای تغییرشکل پذیری مواد مجاور آن (پوشش بتنی) نیست.

••Ni

••Ramo and Garcia

••Shahin

••Padmini

••Shape factor

••Geometric factor

(ب) (الف)

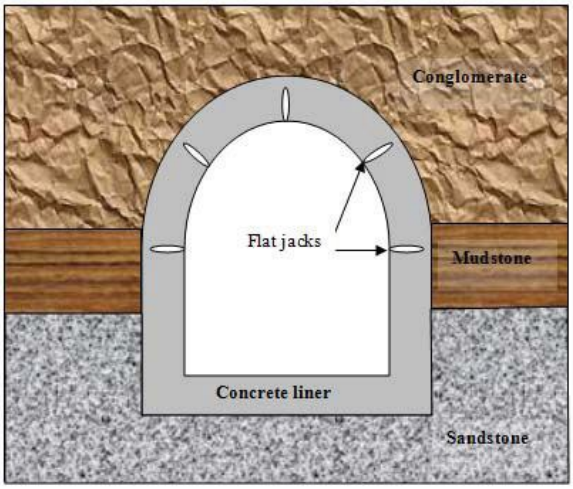
شکل (۱): ایستگاه نصب جک تخت.
(الف): ایجاد شکاف (ب): جک تخت

از آنجایی که تورم یک رفتار تابع زمان است، تنش در پوشش نیز با زمان تغییر می‌کند. این نکته بیانگر این مطلب است که در صورت استفاده از روش جبران برای تعیین رفتار تابع زمان تنش در پوشش، بایستی ابزارهای سنگین، مانند پمپ بارگذاری را به صورت دوره‌ای و در طول سالیان زیاد به محل مطالعه حمل و زمان زیادی صرف قرائت نمود. بنابراین تعیین رابطه فشار-تغییرشکل در پوشش ها با استفاده از یک روش آسان و سریع، همواره موردنظر بوده است. در بخش های آینده، سیستم استنتاج تطبیقی نرو-فازی به منظور مدلسازی و پیش‌بینی رابطه فشار-تغییرشکل پوشش بتنی در تونل تهویه مغار نیروگاه زیرزمینی سد مسجد سلیمان به کار گرفته می‌شود. استفاده از این روش، طراح را قادر می‌سازد تا تنش در پوشش را به وسیله قرائت فاصله بین پین‌ها پیش‌بینی نماید.

••• مغار نیروگاه زیرزمینی سد مسجد سلیمان و رفتار تورمی گلسنگ

مغار نیروگاه زیرزمینی سد مسجد سلیمان به وسیله ی شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، بر روی رودخانه کارون، در جنوب غربی ایران، ساخته شده است. سنگ ها در نیروگاه زیرزمینی بخش هایی از سازند بختیاری هستند. گلسنگ‌ها در این مغار به صورت سیلتستون و کلیستون با نودولهای کلسیت و دولومیت همراه هستند [۷].

چندین لایه گلسنگ توسط لایه‌های ماسه سنگ و کنگلومرا، به صورت لنزهای با ضخامت مختلف، از یکدیگر تفکیک شده‌اند. در ۴۳ متری دهانه تونل تهویه مغار نیروگاه، یک لایه گلسنگ مشاهده می‌شود (شکل ۲). به منظور ثبت نمودن فشار تورمی گلسنگ بر روی پوشش بتنی، دو مقطع از تونل تهویه، به منظور نصب جک‌های تخت، انتخاب شدند. اندازه‌گیری تنش در تونل تهویه بر مبنای توضیحات داده شده در بخش ۲ صورت گرفت.



شکل (۲): زمین شناسی دیواره های جانبی تونل تهویه و مکانهای نصب جکهای تخت

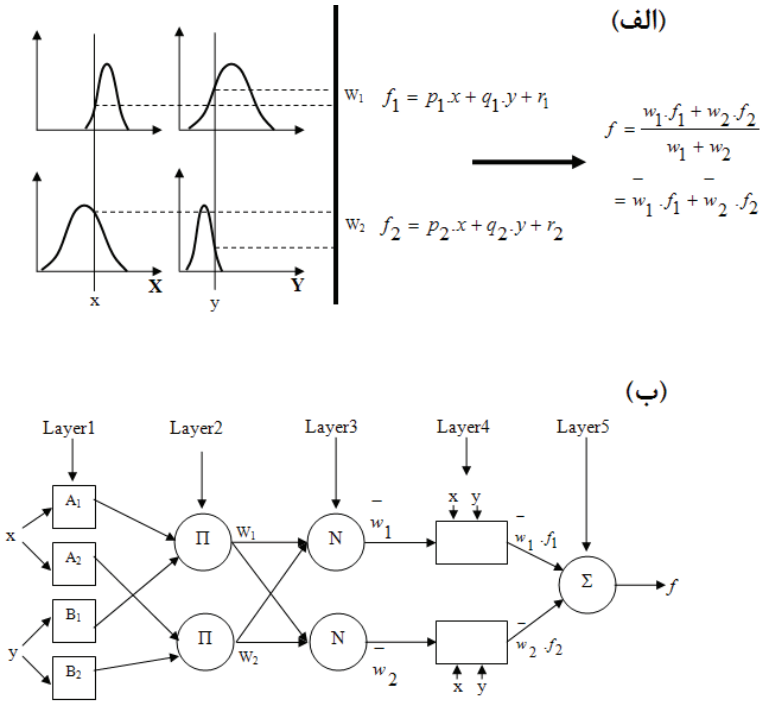
••• سیستم استنتاج تطبیقی نرو-فازی

سیستم استنتاج تطبیقی نرو-فازی (انفیس)، سیستم استنتاج فازی از نوع سوگنو است. ساختار عمومی انفیس در شکل ۳ نشان داده شده است. اگر فرض کنیم که یک سیستم استنتاج فازی دارای دو ورودی x و y و یک خروجی z بوده، پایگاه قوانین آن دارای دو قانون از نوع تاکاگی-سوگنو است [۸]، آنگاه قوانین زیر را داریم:

قانون اول
If x is A_1 and y is B_1 Then $f_1=p_1.x+q_1.y+r_1$

قانون دوم
If x is A_2 and y is B_2 Then $f_2=p_2.x+q_2.y+r_2$

که در این روابط A_1 و A_2 توابع عضویت مربوط به ورودی x و همچنین B_1 و B_2 توابع عضویت مربوط به ورودی y هستند. p_1، q_1، r_1 و p_2، q_2، r_2 پارامترهای تابع خروجی به شمار می آیند. شکل ۳(الف) مکانیزم استدلال فازی برای مدل سوگنو را به منظور استخراج یک تابع خروجی f از بردار ورودی [x,y] ، نشان می دهد. معماری انفیس متناظر این مدل در شکل ۳(ب)آمده و فرایندی که در مدل انفیس صورت می گیرد به شرح زیر است[۸]:



شکل (۳): شماتیک سیستم استنتاج تطبیقی نرو-فازی
الف) سیستم استنتاج فازی ب)مدل انفیس معادل

لایه اول: هر گره[۸] در این لایه، درجه عضویتی را برای متغیر ورودی ایجاد می کند. خروجی گره ها در لایه اول به صورت OP_i^1 تعریف شده و با استفاده از روابط (۲) و (۳) به دست می آیند:

$$OP_i^1 = \mu_{Ai}(x) \qquad i=1, 2 \qquad (۲)$$

$$OP_i^1 = \mu_{B(i-2)}(x) \qquad i=3, 4 \qquad (۳)$$

در این روابط، x و y ورودی گره ها، A_i و $B_{(i-2)}$ همان مجموعه های فازی[۹] همراه با این گره ها هستند که توسط توابع عضویت در گره مربوطه، تعیین می شوند. در صورتی که این تابع عضویت، از نوع زنگوله ای شکل باشد، آنگاه مقدار خروجی OP_i^1 با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می شود:

$$OP_i^1 = \mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left|\frac{x - c_i}{a_i}\right|^{2b_i}} \qquad (۴)$$

[۸] Node

[۹] Fuzzy sets

در این رابطه $\{a_i, b_i, c_i\}$ پارامترهای مربوط به تابع عضویت هستند، که شکل این تابع عضویت را تعیین می کنند. مقدار بیشینه این تابع یک و مقدار کمینه آن صفر است.

لایه دوم: هر گره در این لایه، مقادیر ورودی به آن را در هم ضرب می کند (که در شکل ۳ با علامت $\prod$ نشان داده شده است). خروجی این لایه (OP_i^2) از رابطه (۵) محاسبه می شود:

$$OP_i^2 = w_i = \mu_{A_i}(x).\mu_{B_i}(y) \quad i=1, 2 \quad (۵)$$

لایه سوم: گره i ام در این لایه (که در شکل ۳ با N نشان داده شده است) مقدار نرمال شده مقادیر خروجی از لایه دوم را با استفاده از رابطه (۶)، محاسبه می کند:

$$OP_i^3 = \overline{w_i} = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \qquad i=1, 2 \quad (۶)$$

لایه چهارم: گره i ام در این لایه، سهم قانون i ام در مقادیر خروجی را توسط رابطه (۷) محاسبه می کند:

$$OP_i^4 = \overline{w_i} f_i = \overline{w_i}(p_i x + q_i y + r_i) \quad (۷)$$

که در این رابطه $\overline{w_i}$ خروجی لایه سوم و $\{p_i, q_i, r_i\}$ دسته پارامترهای تنظیم مقادیر خروجی هستند.

لایه پنجم: گره موجود در لایه پنجم، خروجی کلی از مدل انفیس را با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می کند:

$$OP_i^5 = Overall_output = \sum_i \overline{w_i} f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (۸)$$

همانطور که از مراحل فوق ملاحظه می شود، پارامترهای بهینه سازی یک مدل انفیس شامل پارامترهای بخش مقدم $\{a_i, b_i, c_i\}$ و پارامترهای بخش نتیجه گیری $\{p_i, q_i, r_i\}$ هستند. پارامترهای بخش مقدم، شکل تابع عضویت را مشخص می کنند و پارامترهای بخش نتیجه گیری خروجی کلی مدل را تعیین می کنند.

قانون یادگیری اصلی در یک شبکه تطابقی، یعنی الگوریتم، پس از انتشار خطا در ترکیب با روش کمترین مربعات خطا به صورت موفقیت آمیزی در تخمین پارامترهای توابع عضویت و پارامترهای خروجی به کار گرفته می شوند[۹]،[۱۰]،[۱۱].

۵- ارائه مدل انفیس جهت تعیین رابطه فشار-تغییرشکل

به منظور ثبت نمودن فشار تورمی گلسنگ بر روی پوشش بتنی، دو مقطع از تونل تهویه، به منظور نصب جک‌های تخت، انتخاب شدند، (یکی از این مقاطع در شکل ۱ مشاهده می شود). در مدلسازی انجام شده در این بخش، پارامترهای زیر جهت معرفی به مدل در نظر گرفته شدند:

الف- ورودی اول: جابجایی پین ها قبل از ایجاد شکاف بلافاصله پس از ایجاد شکاف (A).

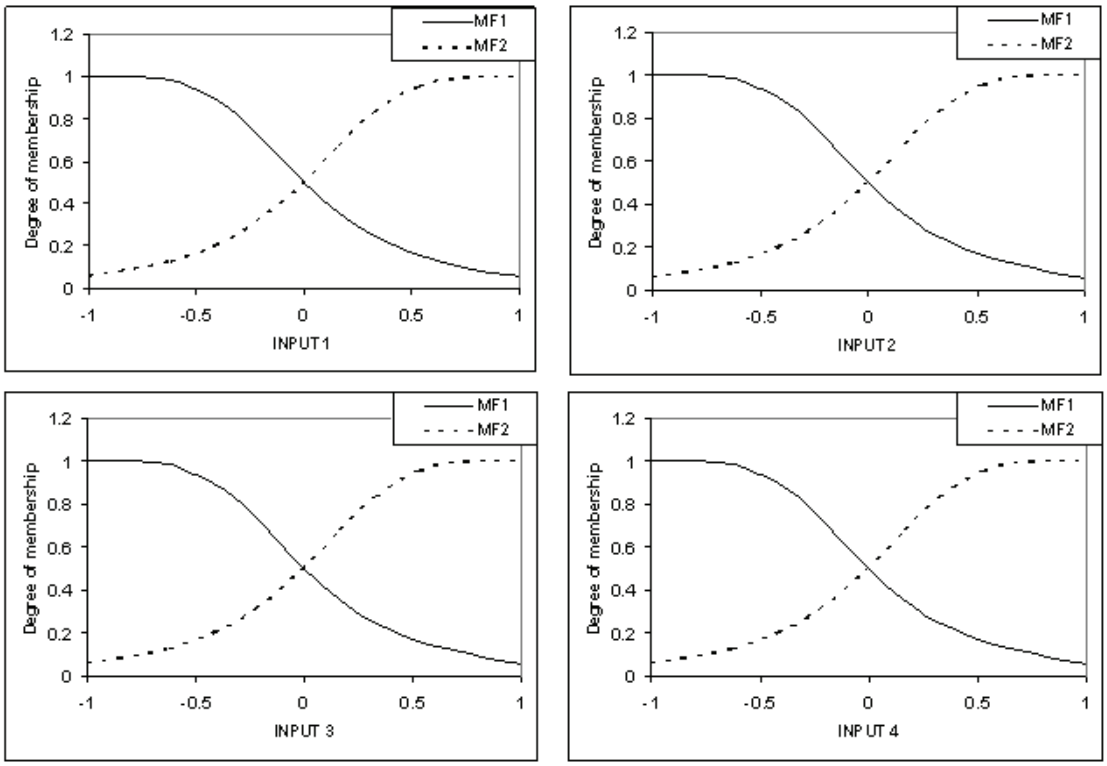
ب- ورودی دوم: جابجایی پین ها بلافاصله پس از حفر شکاف تا ۶۰ ساعت پس از حفر شکاف (B).

ج- ورودی سوم: فاصله پین ها در یک دوره قرائت مورد نظر(D).

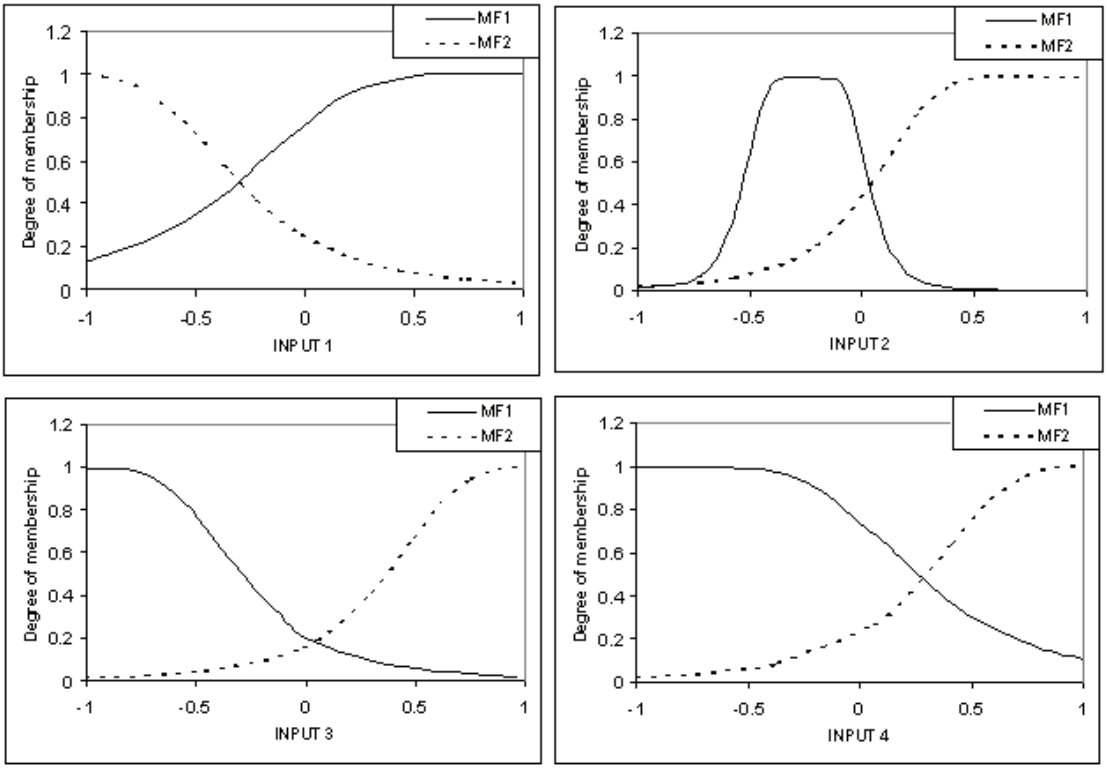
د- ورودی چهارم: فشار داخل جک تخت (P).

ه- خروجی: تغییرشکل ایجاد شده به علت فشار اعمالی جک تخت (E).

در این مقاله دو تابع عضویت زنگوله ای شکل برای هر متغیر ورودی اختصاص داده شده است. شکل (۴) توابع عضویت این ورودی ها قبل از شروع فرایند آموزش مدل را نشان می دهد. از معیار کمینه بودن خطای داده های کنترل، به عنوان معیاری در توقف مرحله یادگیری جهت جلوگیری از پدیده بیش برازش استفاده شد. به منظور آموزش مدل، ۷۰۷ دسته داده ورودی (بر پایه نتایج آزمایش های جک های تخت در ۱۰ ایستگاه در طول ۱۱ دوره قرائت) انتخاب شدند. توابع عضویت متغیرهای ورودی پس از فرایند آموزش مدل انفیس در شکل (۵) نشان داده شده اند.



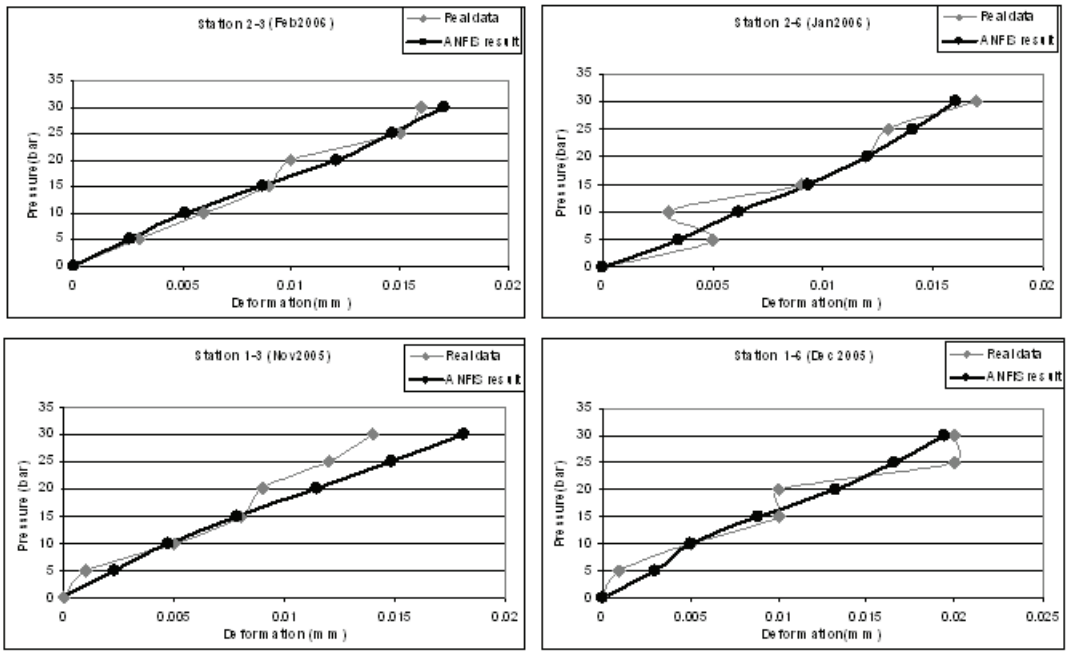
شکل (۴): توابع عضویت ورودی های مدل انفیس قبل از فرایند آموزش مدل



شکل (۵): توابع عضویت ورودی های مدل انفیس قبل از فرایند آموزش مدل

۶- تجزیه و تحلیل عملکرد مدل انفیس و پیش بینی رابطه فشار-تغییرشکل در دوره های جدید

به منظور آزمون مدل انفیس، ۱۵۴ سری داده از ایستگاه های انجام آزمایش جبران، استفاده شدند. این داده‌ها به طور تصادفی و به گونه‌ای انتخاب شدند که ایستگاههای نصب جک‌های تخت را پوشش دهند. نمونه‌هایی از روابط فشار- تغییرشکل پیش‌بینی شده توسط مدل انفیس، در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که مدل انفیس ارائه شده، کارایی لازم برای پیش‌بینی رابطه فشار-تغییرشکل را دارد. ضریب همبستگی ۰/۹۳ بین مقادیر واقعی و مقادیر خروجی از مدل انفیس، نشان دهنده پیش‌بینی دقیق مدل ارائه شده است. با توجه به این که رابطه فشار-تغییرشکل در پوشش بتنی باید به صورت خطی است و خطای ناشی از قرائت کننده، خطای دستگاه اندازه گیری فاصله بین پین ها، حضور حباب های هوای محبوس داخل جک های تخت و خطای پمپ فشار روغن به داخل جک های تخت باعث بروز تغییر در این رابطه می‌شود (همانطور که در شکل ۶ برای داده‌های واقعی دیده می‌شود)، بنابراین تعیین صحیح این رابطه وظیفه بسیار مهم مهندس مربوطه به شمار می‌آید. همان طور که از شکل ۶ مشاهده می شود، مدل انفیس و یک رابطه مناسب خطی بین فشار و تغییرشکل در هر مورد پیشنهاد می نماید، که این عملکرد مدل بسیار با اهمیت و مهم است. در استفاده از این مدل می‌توان تنها با قرائت فاصله بین پین ها در یک دوره قرائت مورد نظر (متغیر D در مدل) و ارائه مقادیر فرض ی به فشار داخل جک (پارامتر P)، جابجایی ناشی از این فشار را تخمین زد و رابطه فشار-تغییرشکل را تعیین نمود.



شکل (۶):نمونه هایی از روابط فشار-تغییرشکل ارائه شده توسط مدل انفیس و مقایسه آن با مقادیر واقعی

۷- نتیجه گیری

فشار تورمی تابع زمان سنگ های مستعد تورم، باعث تغییرات قابل ملاحظه‌ای در مقدار تنش داخلی سازه نگهدارنده فضاهای روباز یا زیرزمینی حفر شده در این سنگ ها با گذر زمان می‌شود. در این مقاله، یک مدل انفیس، به منظور پیش‌بینی رابطه فشار-تغییرشکل پیشنهاد شد. این مدل اختلاف فاصله بین پین ها قبل و بلافاصله بعد از ایجاد شکاف، ۶۰ ساعت بعد از ایجاد شکاف، فشار داخل جک تخت و تغییرشکل ایجاد شده به علت فشار اعمالی را، به عنوان پارامترهای مدلسازی استفاده کرده است و در نهایت رابطه فشار-تغییر شکل را در پوشش تعیین می‌کند. استفاده از این روش، امکان تخمین فشار تابع زمان زمین را بدون حمل تجهیزات سنگین به محل و صرف زمان زیاد مقدور می‌سازد.

مراجع

[1]. Blatt, H.; "Sedimentary petrology", The Maple-Vail Book Manufacturing Group, 563pp, 1982.

[2]. Ni, S.H.; Lu, P.C; Juang C.H.; "A fuzzy neural network approach to evaluation of slope failure potential", J Microcomp Civil Eng. 11, 59–66, 1996.

[3]. Romo, M.P.; Garcia, S.R.; "Neurofuzzy mapping of CPT values into soil dynamic properties", Soil Dyn Earthqk Eng. 23, 473–82, 2003.

[4]. Shahin, M.A.; Maier, H.R.; Jaksa, M.B.; "Settlement prediction of shallow foundations on granular soils using B-spline neurofuzzy models", Comput Geotech. 30, 637–47, 2003.

[5]. Padmini, D.; Ilamparuthi, K.; Sudheer, K.P.; " Ultimate bearing capacity rediction of shallow foundations on cohesionless soils using neurofuzzy models", Computers and Geotechnics 35, 33-46, 2008.

[6]. Gregorczyk, P.; Lourenco, P.B.; "A review on flat-jack testing", Engenharia Civil 9, 39-50, 2000.

[7]. Anagnosti, P.; Beer, G.; Brown, E.T.; " Masjed-Soleiman HEPP panel of experts report", 45pp, 2002.

[8]. Jang, J.S.R.; "ANFIS: Adaptive network based fuzzy inference system", IEEE Trans Syst Man Cybernet. 23, 665–83, 1993.

[9]. Takagi, T.; Sugeno, M.; "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control", IEEE Trans Syst Man Cybernet. 15, 116–32, 1985.

[10]. Werbos, P.; "Beyond regression: new tools for prediction and analysis in the behavioral sciences", PhD thesis, Harvard University, 1974.

[11]. Jang, J.S.R.; Sun, C.T.; "Neurofuzzy modeling and control", Proc IEEE. 83, pp. 378–406, 1995.

Prediction of induced stress in concrete liner of swellable rocks using Adaptive-Network Based Fuzzy Inference System

R. Doostmohammadi[10, a], M. Moosavi[b]

[a]Mining Engineering Department, Zanjan University, Zanjan, Iran

[b] School of Mining Engineering, University of Tehran, Iran

Abstract

Concrete liner of excavations in swellable rocks is under time dependent stress. One of the most famous methods for determining the stress is compensation method using flat-jacks. As the first step, measuring pins are cemented on the surface of the concrete lining in an appropriate arrangement on both sides of the planned cut. The distances between the pins are recorded by an accurate displacement sensor. Following the zero measurement, a slot is cut with a diamond-tipped circular saw blade. Hydraulic pressure cell (flat-jack) is inserted into the slot and is connected with a hydraulic pump fitted to a precision manometer. Finally, the flat jack is loaded until the relief-induced deformations are compensated. Since swelling is a time dependent behavior, the stress of liner changes with time. This needs a periodic measurement using heavy pumping device and requires a time consuming process. In this paper, the ability of adaptive network based fuzzy inference system is examined to predict the mentioned stresses. The performed compensation test at Masjed-Soleiman underground power house has been used as an example to illustrate the method. Using this method an engineer is enabled to predict the lining stress by reading the slot closure across a flat jack device.

Keywords: Stress in concrete liner; Compensation method; Flat jacks; Adaptive network based fuzzy inference system;

**** Corresponding author. Tel.: +98 241 5154015

E-mail address: ramin.doostmohammadi@znu.ac.ir (R. Doostmohammadi).