

# پیش‌بینی مدول برجهندگی مصالح تثبیت‌شده تحت اثر سیکل‌های تر و خشک‌شدن با استفاده از سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS)

علیرضا غنی‌زاده، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران  
امیر توانا املشی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران  
حکیمه عباسلو، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران  
پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [ghanizadeh@sirjantech.ac.ir](mailto:ghanizadeh@sirjantech.ac.ir)

دریافت: ۹۶/۰۱/۰۹ - پذیرش: ۹۶/۰۳/۲۸

## چکیده

یکی از مهم‌ترین پارامترهای ورودی برای طراحی روسازی با استفاده از روش مکانیستیک-تجربی، مدول برجهندگی مصالح مختلف روسازی است. مدول برجهندگی معمولاً با انجام آزمایش بارگذاری سه محوری دینامیک تعیین می‌شود که بسیار پرهزینه و زمان‌بر است و نیاز به امکانات آزمایشگاهی خاصی دارد. هدف از این مقاله ارائه یک مدل بر پایه سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) به منظور پیش‌بینی مدول برجهندگی مصالح اساس تثبیت‌شده با افزودنی‌های مختلف تحت اثر سیکل‌های تر و خشک شدن است. برای این منظور از یک پایگاه داده آزمایشگاهی متشکل از ۷۰۴ رکورد استفاده شد. در این تحقیق پارامترهای ورودی به مدل ANFIS شامل تعداد سیکل‌های تر و خشک شدن، نسبت آهک آزاد به سیلیس، آلومینا و ترکیبات اکسید آهن در مواد سیمانی (SFA)، نسبت دانسیته خشک حداکثر به درصد رطوبت بهینه، تنش انحرافی و تنش محدودکننده در نظر گرفته شدند. نتایج نشان‌دهنده دقت بالای مدل با ضریب رگرسیون ۰/۹۶۶۹ و ۰/۹۶۲۵ به ترتیب برای مجموعه داده‌های آموزش و آزمون و ۰/۹۶۵۵ برای کل داده‌ها بود. به علاوه نتایج تحلیل حساسیت مدل نشان داد که متغیر نسبت دانسیته خشک حداکثر به درصد رطوبت بهینه (DMR) دارای بیش‌ترین تأثیر و متغیر تعداد سیکل خشک و تر شدن (WDC) کمترین تأثیر را بر مدول برجهندگی اساس تثبیت‌شده دارد. در ضمن نتیجه گرفته شد که مدول برجهندگی وابستگی بیشتری به مقدار تنش انحرافی ( $\sigma_d$ ) در مقایسه با تنش محدودکننده ( $\sigma_3$ ) دارد.

واژه‌های کلیدی: مدول برجهندگی، اساس تثبیت‌شده، سیکل‌های تر و خشک شدن، سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS)

## ۱- مقدمه

این آزمایش یک موج نیمه سینوسی تنش محوری با زمان بارگذاری ۰/۱ ثانیه و زمان استراحت ۰/۹ ثانیه بر روی یک نمونه استوانه‌ای وارد خواهد شد. در این آزمایش مدول برجهندگی مطابق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (1)$$

مدول برجهندگی، همان مدول الاستیسیته بر اساس کرنش‌های برگشت‌پذیر تحت بارهای تکراری است و به صورت نسبت تنش‌های انحرافی به کرنش‌های محوری برگشت‌پذیر تعریف می‌شود (Mallick and El-Korchi, 2013). عکس‌العمل ارتجاعی لایه‌های سنگدانه‌ای با استفاده از آزمایش بارگذاری فشاری سه محوری دینامیکی اندازه‌گیری می‌شود. برای انجام

که در این رابطه، تنش انحرافی و کرنش ارتجاعی است. در آزمایش فشاری تک‌محوری بدون تنش هم‌جانبه،  $\sigma_d$  معادل تنش محوری است. NCHRP 1-28A برای بهبود روند انجام آزمایش AASHTO T 307-99، چندین اصلاحیه را پیشنهاد داده است. این اصلاحات شامل اندازه نمونه که بستگی به ماکزیمم اندازه سنگدانه دارد، زمان بارگذاری بیشتر از ۰/۲ ثانیه برای خاک‌های ریزدانه و مدت‌زمان اعمال بار کمتر از ۰/۸ ثانیه برای مصالح لایه اساس و مراحل بارگذاری مختلف است.

تحقیقات مختلفی در خصوص ارزیابی تأثیر سیکل‌های تر و خشک شدن و ذوب و یخبندان بر روی خواص مکانیکی و فیزیکی لایه اساس تثبیت‌شده انجام شده است (Nunan and Humphrey, 1990; Berg, 1998; Zaman, et al., 1999; Khoury, 2005; Camargo et al., 2009; Guthrie et al., 2009). در همین راستا جورج و داویسون (۱۹۶۳) مطالعه‌ای آزمایشگاهی برای ارزیابی دوام خاک‌های ریزدانه تثبیت‌شده تحت سیکل‌های ذوب و یخبندان انجام دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که اعمال ده سیکل ذوب و یخبندان برای تخریب لایه اساس سنگدانه‌ای به قدر کافی مخرب است (George and Davidson, 1963). پس‌از آن نونان و هامفری (۱۹۹۰) تأثیر سیکل‌های ذوب و یخبندان را روی مدول برجهندگی سنگدانه‌های آهکی تثبیت‌شده با سیمان موردبررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده اهمیت بیشتر سیکل‌های ذوب و یخبندان نسبت به سیکل‌های تر و خشک شدن در تنش‌های انحرافی کم بود. به‌علاوه آن‌ها دریافتند که مدول برجهندگی سنگدانه‌های تثبیت‌شده در طول مراحل اولیه آزمایش ذوب و یخبندان به شدت کاهش می‌یابد (Miller and Zaman, 2000).

در ادامه میلر و همکاران (۱۹۹۹) به منظور ارزیابی خاک‌های تثبیت‌شده در اوکلاهاما، نمونه‌های عمل‌آوری شده را بر اساس روش آزمایش ASTM D 559 تحت سیکل‌های تر و خشک شدن قرار دادند. برای ارزیابی دوام در تحقیق آن‌ها از آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده (UCS) استفاده شد. بررسی‌های انجام‌شده نشان داد که مقاومت با افزایش سیکل‌های تر و خشک شدن افزایش خواهد یافت (Nunan and Humphrey, 1990). خوری و زمان (۲۰۰۲) نیز به بررسی اثر سیکل‌های تر و خشک‌شدن بر روی سنگدانه‌های کم‌کیفیتی که با خاکستر زغال‌سنگ کلاس C (CFA) تثبیت‌شده بودند، پرداختند.

سنگدانه‌های با کیفیت کم به آخرین حد قابل‌قبول برای استفاده در لایه اساس در اوکلاهاما اطلاق می‌شود. در مطالعه آن‌ها برای ارزیابی اثر سیکل‌های تر و خشک شدن، از مدول برجهندگی، مقاومت فشاری محصور نشده (UCS) و مدول الاستیک استفاده شد. نتایج نشان داد که مقادیر مدول برجهندگی نمونه‌های عمل‌آوری شده در ۲۸ روز تحت ۳۰ سیکل‌تر و خشک شدن، تقریباً ۵ درصد کمتر از مدول برجهندگی نمونه‌های مشابه بدون سیکل‌تر و خشک شدن است (Khoury and Zaman, 2002). در ادامه خوری و زمان (۲۰۰۶)

با بررسی اثر سیکل‌های ذوب و یخبندان بر روی مشخصات خمشی سنگدانه‌های تثبیت‌شده با ۱۰ درصد CFA دریافتند که بعد از عمل‌آوری، مدول برجهندگی در حالت خمشی و مدول گسیختگی با افزایش سیکل‌های ذوب و یخبندان کاهش خواهند یافت. آن‌ها با توجه به نتایج به‌دست‌آمده اذعان داشتند که اثر سیکل‌های ذوب و یخبندان روی این دو خواص مکانیکی تابعی از زمان عمل‌آوری و تعداد سیکل‌های ذوب و یخبندان است (Khoury and Zaman, 2006). آن‌ها همچنین در سال ۲۰۰۷ و در ادامه‌ی تحقیقات خود، اثر سیکل‌های ذوب و یخبندان را بر روی مدول برجهندگی سنگدانه‌های تثبیت‌شده با تثبیت‌کننده‌های مختلف مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که تغییر در مدول برجهندگی تحت سیکل‌های تر و خشک شدن می‌تواند توسط سرعت واکنش‌های شیمیایی مشخص شود. همچنین بیان شد که تغییرات مقادیر مدول برجهندگی با مقادیر آهک، مقادیر SFA ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ )، مقدار رطوبت بهینه و ماکزیمم چگالی خشک به شکل بهتری قابل اصلاح خواهد بود.

سرانجام محققان توانستند مدلی رگرسیونی برای پیش‌بینی اثر این پارامترها و سیکل‌های تر و خشک شدن روی تغییرات مدول برجهندگی پیشنهاد نمایند (Khoury and Zaman, 2007). پس از آن مألوف و همکاران (۲۰۱۲) از روش ماشین بردار پشتیبان (SVM) برای پیش‌بینی مدول برجهندگی سنگدانه‌های تثبیت‌شده در معرض سیکل‌های تر و خشک شدن استفاده نمودند.

آن‌ها نشان دادند که ماشین بردار پشتیبان، ضریب رگرسیون ( $R^2$ ) به مراتب بیشتری را نسبت به روش حداقل مربعات (LS) نتیجه می‌دهد (Maalouf et al., 2012).

با توجه به پیشینه تحقیق، هدف از انجام این پژوهش، ارائه مدلی مبتنی بر سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) برای پیش‌بینی مدول برجهندگی اساس سنگدانه‌ای تثبیت‌شده‌ای است که در معرض سیکل‌های تر و خشک شدن قرار دارند.

## ۲- پایگاه داده

در تحقیق حاضر از مجموعه داده حاصل از مطالعات مألوف و همکاران (۲۰۱۲) استفاده شده است. در این پایگاه داده، چهار نوع سنگدانه شامل مریدان (Meridian)، ریچارد اسپور (Richard Spur)، سایر (Sawyer) و ریولیت (Rhyolite) با عوامل تثبیت‌کننده مختلف تثبیت شده و پس از قرار گرفتن در معرض سیکل‌های تر و خشک شدن، برای یافتن مدول برجهندگی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. مریدان یک سنگدانه آهکی با میانگین تقریبی کلسیم کربنات ( $\text{CaCO}_3$ ) ۹۷ درصد و ریچارد اسپور، سنگدانه‌ای آهکی با مقدار حدودی کربنات کلسیم ۸۷ درصد است. همین‌طور سنگدانه سایر نوعی ماسه-سنگ با میزان بالای  $\text{SiO}_2$  در حدود ۹۴ درصد است. عوامل تثبیت‌کننده در تحقیق مألوف و همکاران، شامل سیمان کیلن داست (CKD)، خاکستر

کلاس C (CFA) و خاکستر بستر سیال (FBA) بوده است. نمونه‌ها در نزدیکی رطوبت بهینه و ماکزیمم چگالی خشک ساخته و برای ۲۸ روز در یک اتاق مرطوب با درجه تقریبی ۲۱ درجه سانتی‌گراد و رطوبت تقریبی کنترل‌شده ۹۰ درصد عمل‌آوری شده‌اند. سپس نمونه‌ها در معرض ۱۶، ۸، ۰ و ۳۰ سیکل تر و خشک شدن قرار گرفته و مدول برجهندگی مصالح تثبیت‌شده برای ارزیابی عملکرد مصالح تثبیت‌شده تحت سیکل‌های تر و خشک شدن تعیین شده است. آزمایش مدول برجهندگی به صورت اعمال یک بار سیکلی نیم‌سینوسی با زمان بارگذاری ۰/۱ ثانیه و زمان استراحت ۰/۹ ثانیه انجام پذیرفت (Maalouf et al., 2012).

در نهایت مجموعه داده‌ای متشکل از ۷۰۴ رکورد و ۵ ورودی تشکیل شد. مشخصات آماری برای این پایگاه داده در جدول ۱ نشان داده شده است. مطالعات قبلی نشان می‌دهد که مدول برجهندگی اساس سنگدانه‌ای تثبیت‌شده تابعی از سیکل‌تر و خشک شدن، میزان آهک آزاد به میزان SAF، خواص فیزیکی مخلوط و سطح تنش است (Khoury, 2005; Khoury and Zaman, 2007).

جدول ۱. حدود آماری مجموعه داده

متغیر	حداقل	حداکثر	متوسط	انحراف معیار	میان
WDC	۰/۰۰	۳۰/۰۰	۱۲/۸۰	۱۱/۱۶	۸/۰۰
CSAFR	۰/۱۱	۰/۵۱	۰/۲۵	۰/۱۸	۰/۱۳
DMR	۲/۳۴	۴/۶۳	۳/۲۷	۰/۷۱	۳/۳۷
$\sigma_3$	۰/۰۰	۱۳۸/۰۰	۷۰/۱۳	۴۸/۸۶	۶۹/۰۰
$\sigma_d$	۶۹/۰۰	۲۷۷/۰۰	۱۷۱/۸۲	۷۷/۶۴	۱۳۸/۰۰
$M_R$	۵۸۵/۰۰	۹۸۰۳/۰۰	۳۶۸۴/۰۶	۱۸۶۰/۴۹	۳۴۲۸/۵۰

WDC: تعداد سیکل خشک و تر شدن.

CSAFR : نسبت آهک آزاد به SFA (سیلیس، آلومینا و ترکیبات اکسید آهن در مواد سیمانی)

DMR : نسبت دانسیته خشک حداکثر ( $\text{kN/m}^3$ ) به درصد رطوبت بهینه (%)

$\sigma_3$  : تنش محدودکننده (کیلو پاسکال)

$\sigma_d$  : تنش انحرافی (کیلو پاسکال)

MR : مدول برجهنگی (مگا پاسکال)

### ۳- مدل سازی با استفاده از سیستم استنتاج

#### عصبی- فازی تطبیقی (ANFIS)

#### ۳-۱- معرفی سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی

#### (ANFIS)

سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی (ANFIS) که نخستین بار توسط جانگ معرفی شد (Jang, 1993) دارای ویژگی‌هایی از جمله توانایی پیاده‌سازی دانش بشری با استفاده از مفاهیم برچسب‌های زبانی و قواعد فازی، غیرخطی بودن، قابلیت سازش‌پذیری این سیستم‌ها و دقت بهتر آن‌ها در مقایسه با سایر روش‌ها در شرایط محدودیت داده‌ها است. نکته مهم منطق فازی امکان برقراری ارتباط بین فضای ورودی به فضای خروجی است و سازوکار اولیه برای انجام این کار فهرستی از جملات اگر- آنگاه بر اساس مدل درجه اول سوگنو (Takagi and Sugeno, 1985) است، که قانون نامیده می‌شوند. داشتن روشی که با استفاده از آن بتوان اطلاعات موجود برای ساخت این قواعد را استفاده کرد به‌عنوان ابزاری کارآمد به شمار می‌رود. از طرفی، شبکه‌های عصبی مصنوعی به دلیل قابلیت‌های آموزش‌پذیری با استفاده از الگوهای مختلف آموزشی می‌توانند ارتباط مناسبی بین متغیرهای ورودی و خروجی ایجاد نمایند. لذا استفاده ترکیبی از سیستم استنباط فازی و شبکه عصبی مصنوعی به‌عنوان ابزاری قدرتمند که قابلیت پیش‌بینی نتایج با استفاده از داده‌های عددی موجود را دارد، تحت عنوان سیستم استنتاج تطبیقی عصبی-فازی معرفی می‌شود. لذا این سیستم از الگوریتم‌های شبکه عصبی و منطق فازی به‌منظور طراحی نگاشت غیرخطی بین فضای ورودی و خروجی استفاده می‌کند. سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی شبکه ۵ لایه‌ای، متشکل از گره‌ها و کمان‌های اتصال‌دهنده گره‌ها است. ساختار مناسب سیستم عصبی-فازی متناسب با

داده‌های ورودی، درجه عضویت، قوانین و توابع درجه عضویت خروجی انتخاب می‌شود. شکل ۵ نمایشی از معماری شبکه عصبی-فازی با دو ورودی و یک خروجی است. در لایه اول (ورودی) میزان تعلق هر ورودی به بازه‌های مختلف فازی توسط کاربر مشخص می‌شود. در این لایه همه‌ی گره‌ها، گره تطبیقی به همراه تابع گره (مانند تابع گوسی در این مقاله) هستند. سازوکار تابع عضویت گوسی در مدل فازی درجه اول تاکاگی-سوگنو با دو قانون و دو پارامتر ورودی به‌صورت شماتیک در شکل ۶ نشان داده شده است. با ضرب مقادیر ورودی به هر گره در یکدیگر، وزن قانون‌ها ( $w_i$ ) در لایه دوم به دست می‌آید. در لایه سوم عمل محاسبه وزن نسبی قوانین ( $\bar{w}_i$ ) انجام می‌گیرد. لایه چهارم لایه قوانین است که انجام عملیات بر روی پیام‌های ورودی به این لایه حاصل می‌شود ( $\bar{w}_i f_i$ ). لایه آخر خروجی ( $f$ ) است که هدف آن حداقل نمودن اختلاف خروجی به‌دست‌آمده از شبکه و خروجی حقیقی است.

در مرحله آموزش، با اصلاح پارامترهای درجه عضویت بر اساس میزان خطای قابل قبول، مقادیر ورودی به مقادیر حقیقی نزدیک‌تر می‌شوند. روش آموزش اصلی در این سامانه، روش پس انتشار خطا است. در این روش با استفاده از الگوریتم شیب نزولی خطا، مقدار خطا به سمت ورودی‌ها پخش می‌گردد و پارامترها تصحیح می‌شوند.

#### ۳-۲- پارامترهای ارزیابی مدل ANFIS

در این تحقیق از روابط آماری زیر برای محاسبه دقت و عملکرد روش سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی استفاده شده است:

۱- جذر میانگین مربعات خطا (RMSE):

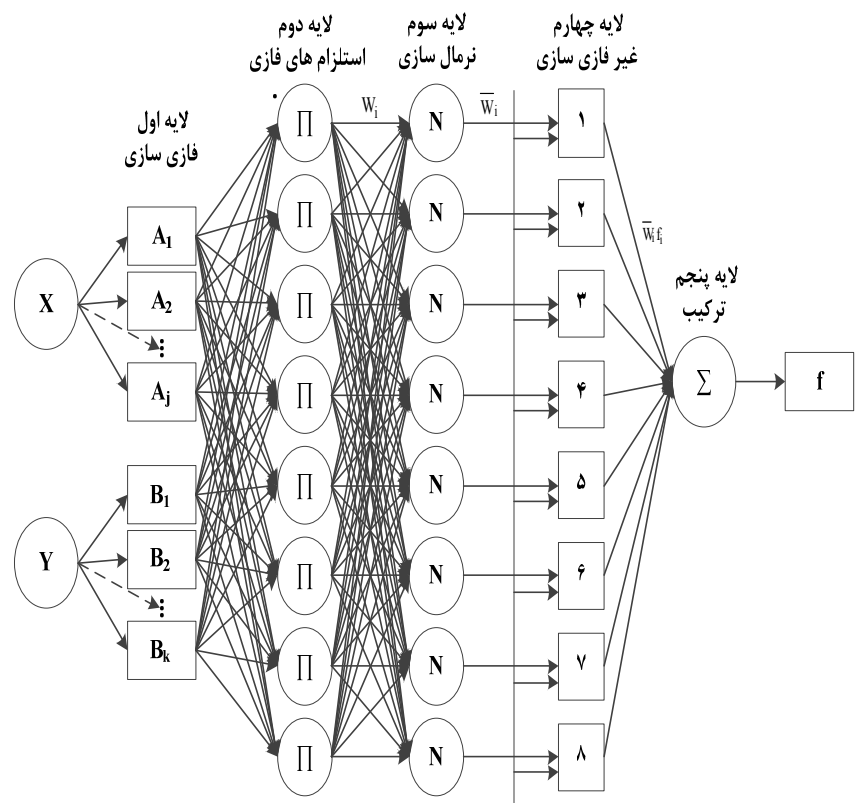
مدول برجهدگی،  $\bar{h}_i$  میانگین  $h_i$  و  $\bar{t}_i$  میانگین  $t_i$  است. مقادیر کمتر RMSE نشان‌دهنده دقت بالاتر مدل پیش‌بینی خواهند بود. در واقع برای یک مدل پیش‌بینی دقیق و بدون هیچ‌گونه خطا می‌توان مقادیر  $R^2$  برابر با یک و RMSE برابر با صفر را انتظار داشت.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (h_i - t_i)^2} \quad (2)$$

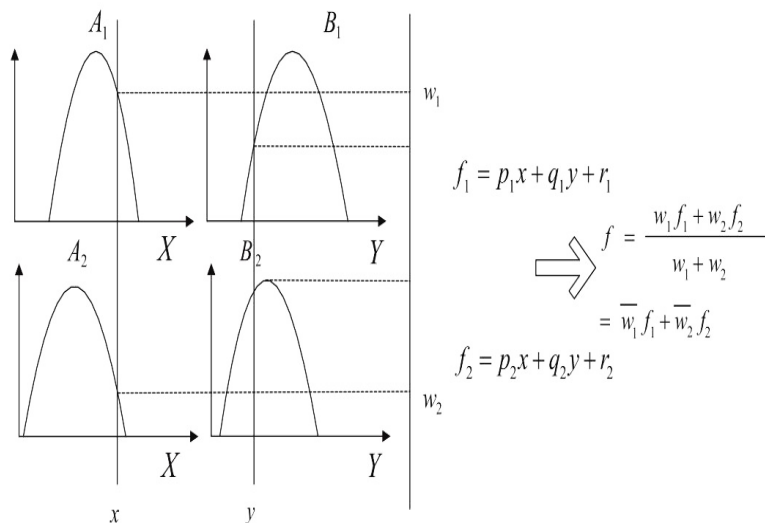
۲- ضریب رگرسیون ( $R^2$ ):

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^M (h_i - \bar{h}_i)(t_i - \bar{t}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M (h_i - \bar{h}_i)^2 \sum_{i=1}^M (t_i - \bar{t}_i)^2}} \right]^2 \quad (3)$$

که  $M$  تعداد کل داده‌ها در هر مجموعه،  $h_i$  مقدار اندازه‌گیری شده  $i$ امین مدول برجهدگی،  $t_i$  مقدار پیش‌بینی شده  $i$ امین



شکل ۱. معماری سیستم استنتاج تطبیقی عصبی - فازای



شکل ۲. مدل فازی درجه اول تاکاگی-سوگنو با دو قانون و دو پارامتر ورودی

و RMSE به ترتیب برابر با ۰/۹۶۶۹ و ۳۳۶/۵۸۵۸ برای مجموعه داده آموزش و ۰/۹۶۲۵ و ۳۶۵/۶۴۲۷ برای مجموعه داده آزمون دارای بهترین عملکرد و مدل D با ۳ ورودی و مقادیر  $R^2$  و RMSE به ترتیب برابر با ۰/۹۲۷۶ و ۴۹۷/۷۶۳۱ برای مجموعه داده آموزش و ۰/۹۰۶۱ و ۵۷۶/۱۳۷۳ برای مجموعه داده آزمون دارای ضعیف‌ترین عملکرد در بین چهار مدل ساخته شده می‌باشند. همین‌طور حذف متغیر  $\sigma_d$  در مدل B، منجر به کاهش بیشتر دقت مدل در قیاس با حذف متغیر  $\sigma_3$  در مدل C شد. که این خود نشان از وابستگی بیشتر مدول برجهندگی مصالح اساس تثبیت شده به پارامتر  $\sigma_d$  است. شکل ۳، مقادیر پیش‌بینی شده مدول برجهندگی مصالح اساس تثبیت شده با استفاده از مدل ANFIS با در نظر گرفتن ۵ ورودی برای مدل (مدل A) را در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده، با توجه به مجموعه داده‌های آموزش و آزمون نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی قادر به پیش‌بینی مدول برجهندگی در محدوده خطای کمتر از ۲۰ درصد نسبت به خط برابری (خط صفر) است. همچنین هیستوگرام فراوانی خطا برای داده‌های آموزش و آزمون در شکل ۴ نشان داده شده است که

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- ارزیابی عملکرد و دقت سیستم استنتاج

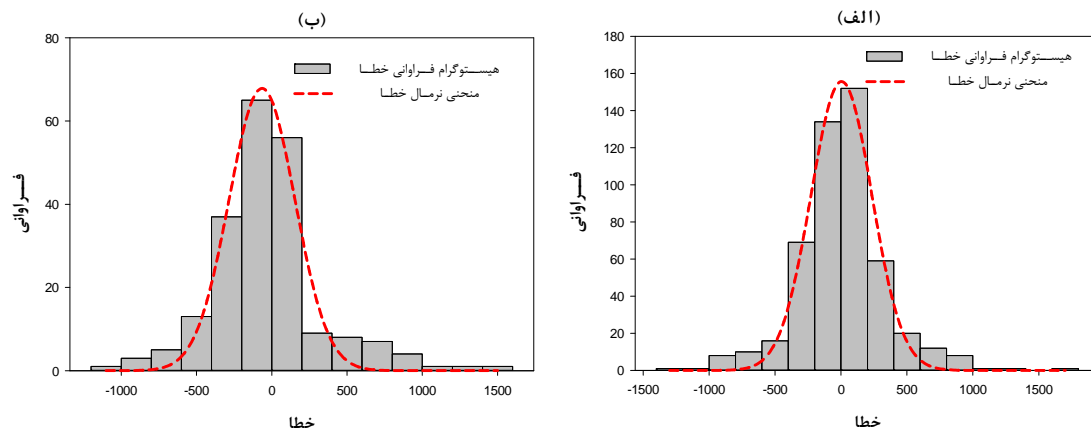
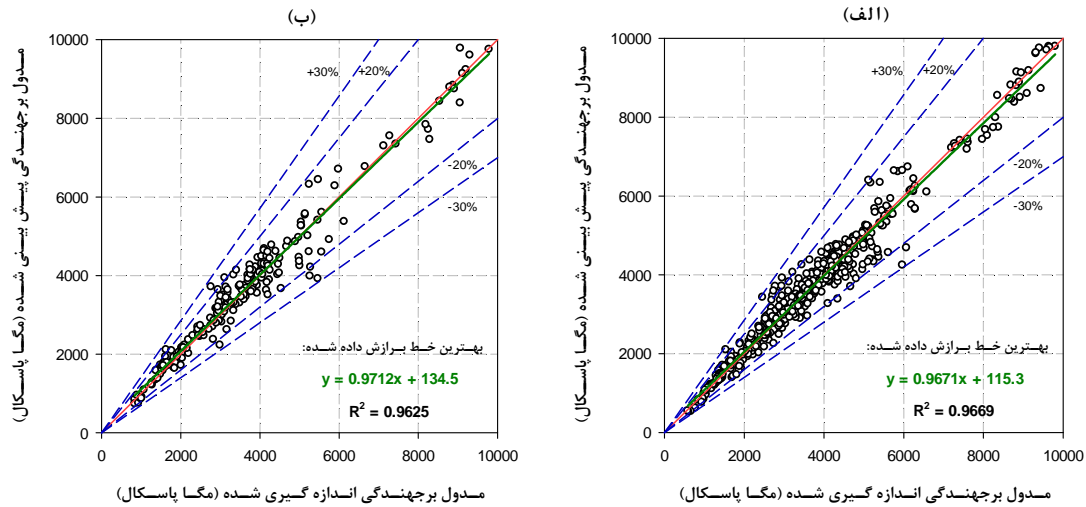
##### عصبی-فازی تطبیقی برای پیش‌بینی مدول برجهندگی

برای ساخت مدل‌های ANFIS به ترتیب از ۷۰ و ۳۰ درصد مجموع کل داده‌ها به‌عنوان مجموعه آموزش و آزمون استفاده شد. تعداد قانون‌ها (Rules) و معماری سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی پس از ارزیابی حالت‌های مختلف توسط جعبه‌ابزار سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی برنامه MATLAB، برابر با ۱۰ تعیین شد. پس از یافتن معماری بهینه با استفاده از ۵ ورودی ذکر شده در جدول ۱، با حذف ورودی و مدل‌سازی مجدد تأثیر هر کدام از پارامتر بر دقت و عملکرد سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج پارامترهای آماری اشاره شده در بخش ۳-۲ به‌منظور ارزیابی مدل‌های ساخته شده در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌گونه که در این جدول می‌توان دید، با توجه به مقادیر  $R^2$  و RMSE دقت چهار مدل ساخته شده به‌صورت  $R^2$   $A > C > B > D$  است. در واقع مدل A با ۵ ورودی و مقادیر  $R^2$

با توجه به منحنی نرمال خطا می‌توان نتیجه گرفت که پراکندگی خطا در مدل ساخته‌شده تقریباً به حالت نرمال نزدیک است.

جدول ۲. دقت مدل‌های ساخته‌شده با استفاده از روش ANFIS

آزمون		آموزش		ورودی	مدل
RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>		
۳۶۵/۶۴۲۷	۰/۹۶۲۵	۳۳۶/۵۸۵۸	۰/۹۶۶۹	WDC, CSAFR, DMR, $\sigma_3, \sigma_d$	<b>A</b>
۵۰۸/۲۵۳۵	۰/۹۲۷۰	۴۷۵/۱۸۲۰	۰/۹۳۴۰	WDC, CSAFR, DMR, $\sigma_3$	<b>B</b>
۴۳۳/۲۵۱۵	۰/۹۴۷۰	۳۴۱/۴۳۴۱	۰/۹۶۵۹	WDC, CSAFR, DMR, $\sigma_d$	<b>C</b>
۵۷۶/۱۳۷۳	۰/۹۰۶۱	۴۹۷/۷۶۳۱	۰/۹۲۷۶	WDC, CSAFR, DMR	<b>D</b>



۴-۲- مقایسه نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر با نتایج مألوف و همکاران (۲۰۱۲)

حاضر و تحقیق مألوف و همکارانش در جدول ۳ به خوبی نشان می‌دهد که روش ANFIS در مقایسه با دو روش دیگر، دقیق‌تر بوده است؛ به عنوان مثال، برای مدل A، مقدار  $R^2$  برای کل داده‌ها با استفاده از روش ANFIS برابر با ۰/۹۶۵۵ است. به دست آمده که این مقدار برای دو روش SVM و LS به ترتیب برابر با ۰/۶۴۰۰ و ۰/۶۸۵۱ است.

همان‌طور که در بخش ۲ به آن اشاره شد، پایگاه داده مورد استفاده در تحقیق حاضر برگرفته از نتایج تحقیق مألوف و همکاران (۲۰۱۲) بود. آن‌ها در تحقیق خود علاوه بر انجام مطالعات آزمایشگاهی، به ارائه مدلی جهت پیش‌بینی مدول بر جهندگی با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان (SVM) و مقایسه آن با روش حداقل مربعات پرداختند. مقایسه نتایج به دست آمده از تحقیق

جدول ۳. مقایسه مدل‌های ساخته شده با استفاده از روش ANFIS و مدل‌های ساخته شده در تحقیق مألوف و همکاران (۲۰۱۲)

LS (Maalouf et al., 2012)		SVM (Maalouf et al., 2012)		ANFIS		ورودی	مدل
RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$		
۱۰۳۸/۹۴۱۸	۰/۶۸۵۱	۱۱۳۴/۵۹۲۴	۰/۶۴۰۰	۳۴۵/۵۵۱۱	۰/۹۶۵۵	WDC, CSAFR, DMR, $\sigma_3, \sigma_d$	A
۱۰۸۲/۶۸۱۹	۰/۶۵۸۱	۶۵۹/۷۵۰۰	۰/۸۷۵۰	۴۸۵/۳۳۰۶	۰/۹۳۱۹	WDC, CSAFR, DMR, $\sigma_3$	B
۱۰۴۶/۳۲۶۹	۰/۶۸۰۵	۳۷۱/۳۰۸۵	۰/۹۵۹۳	۳۷۱/۳۰۳۴	۰/۹۶۰۱	WDC, CSAFR, DMR, $\sigma_d$	C
۱۰۸۹/۳۱۱۷	۰/۶۵۳۸	۵۹۳/۵۴۰۲	۰/۹۰۰۱	۵۲۲/۴۸۸۳	۰/۹۲۱۰	WDC, CSAFR, DMR	D

$$R_i = \frac{\sum_{k=1}^m x_{ik} y_k}{\sqrt{\sum_{k=1}^m x_{ik}^2 \sum_{k=1}^m y_k^2}} \quad (20)$$

که در این رابطه،  $x_{ik}$  مقدار متغیر مستقل  $i$ ام برای داده  $k$ ام و  $y_k$  مقدار متغیر وابسته برای داده  $k$ ام (نظیر  $x_{ik}$ ) و  $m$  تعداد کل داده‌ها است. در صورتی که مقدار  $R_i$  نزدیک به ۱ باشد، نشان‌دهنده این است که بین پارامتر ورودی و پارامتر خروجی همبستگی وجود دارد. همچنین در صورت عدم ارتباط پارامتر خروجی و ورودی، مقدار  $R_i$  برابر با صفر خواهد بود. شکل ۵ درجه اهمیت هر یک از متغیرهای ورودی

۴-۳- تحلیل حساسیت

یکی از روش‌های تعیین درجه اهمیت هر یک از پارامترهای ورودی بر روی پارامتر خروجی، روش دامنه کسینوس است که می‌تواند به منظور بررسی تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی بر پارامتر خروجی مورد استفاده قرار گیرد (Yang and Zhang, 1997). در این روش درجه حساسیت پارامتر ورودی با تعیین درجه همبستگی بین جفت داده‌های ورودی و خروجی و با استفاده از رابطه ۲۰ تعیین می‌شود.



را در تعیین میزان مدول برجهندگی اساس تثبیت‌شده نشان می‌دهد. این تحلیل حساسیت بر اساس ۷۰۴ داده استفاده‌شده در این تحقیق که برگرفته از نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه آزمایشگاهی مألوف و همکارانش (۲۰۱۲) بود، انجام شده است. با توجه به شکل ۵ می‌توان دید که در محدوده داده‌های مورد ارزیابی در این مقاله، متغیر نسبت دانسیته خشک حداکثر به درصد رطوبت بهینه (DMR) دارای بیش‌ترین تأثیر و متغیر تعداد سیکل خشک و تر شدن (WDC) کمترین تأثیر را بر مدول برجهندگی اساس تثبیت‌شده دارند. در ضمن همان‌گونه که در بخش ۴-۱ به عنوان بخشی از نتایج به آن اشاره گردید، به‌خوبی می‌توان دید که مدول برجهندگی وابستگی بیشتری به مقدار متغیر  $\sigma_d$  در مقایسه با متغیر  $\sigma_3$  دارد.

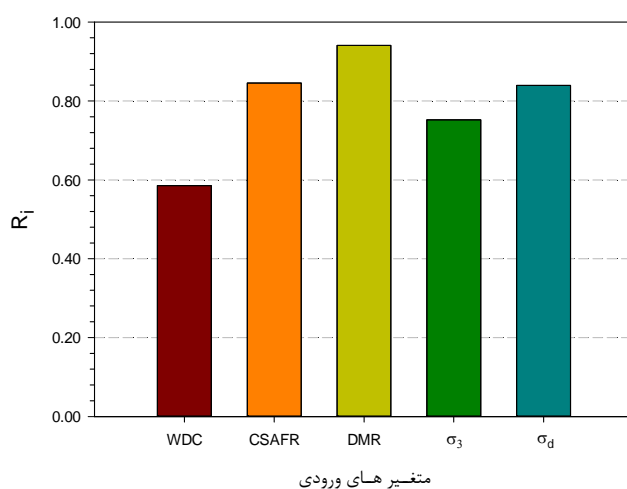
#### ۴-۵- مطالعه پارامتریک مدل

محدودیت‌های زمانی و نبود امکانات کافی معمولاً از موانع اصلی مطالعات آزمایشگاهی به شمار می‌روند. در اکثر مواقع جهت بررسی هر کدام از متغیرهای تأثیرگذار بر نتایج آزمایش در یک دامنه تغییرات وسیع، نیاز به پرداخت هزینه بیشتر، ساخت نمونه‌های زیادتر و صرف زمان‌های طولانی مدت است. ازجمله مزیت‌های ساخت مدل‌های پیشگو، امکان استفاده از آن به‌منظور مطالعات پارامتریک و بررسی نحوه اثرگذاری هر کدام از متغیرهای ورودی بر خروجی مدل است.

از همین رو، با توجه به جدول ۴، دامنه تغییرات هر کدام از متغیرهای ورودی به شکل زیر و به‌گونه‌ای در نظر گرفته شد که تغییرات هر کدام، در محدوده‌ی حداکثر و حداقل ارائه‌شده برای آن‌ها در جدول ۱ باشد:

در ضمن، بررسی هر کدام از متغیرها با ثابت نگه‌داشتن سایر متغیرهای ورودی در مقادیر میانگینشان (جدول ۱) صورت پذیرفت.

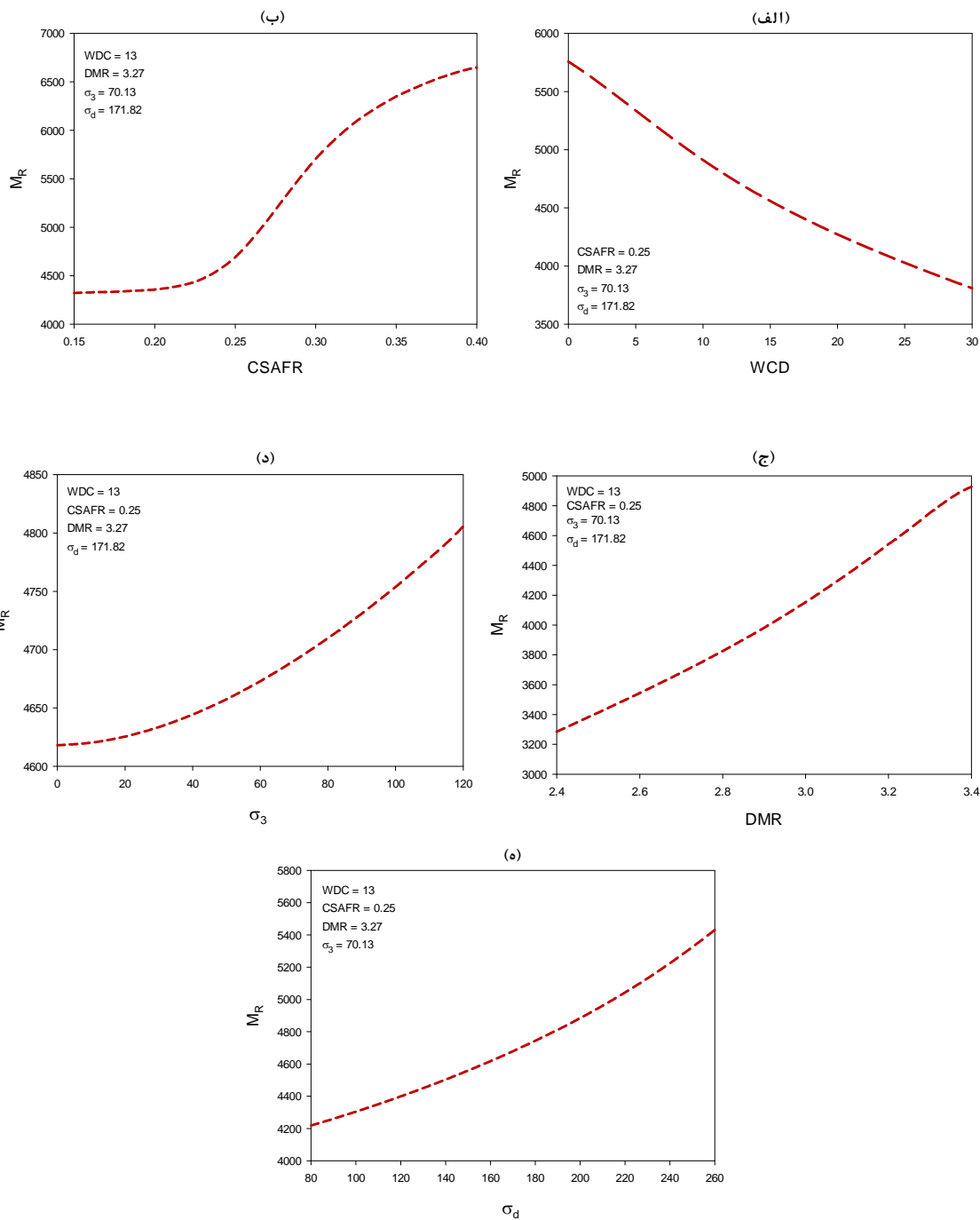
با توجه به شکل ۶ - (الف)، می‌توان دید که افزایش تعداد سیکل خشک و تر شدن، کاهش مقدار مدول برجهندگی را به همراه داشته است. همین‌طور به ازاء افزایش نسبت آهک آزاد به SFA، شاهد افزایش مدول برجهندگی خواهیم بود که شیب این افزایش به ازاء مقادیر CSAFR بیش از ۰/۲۵، بیش‌تر خواهد شد. این روند صعودی مدول برجهندگی در شکل ۶ - (ج) نیز به ازاء افزایش مقدار نسبت دانسیته خشک حداکثر به درصد رطوبت بهینه قابل مشاهده می‌باشد. همین‌طور از شکل ۶ - (د) و (ه) می‌توان دریافت که با افزایش ۱۰ کیلو پاسکال برای متغیر  $\sigma_d$ ، به‌طور میانگین شاهد ۶۸/۳۱۳۷ مگا پاسکال افزایش مدول برجهندگی خواهیم بود که همین میزان تغییر برای متغیر  $\sigma_3$ ، به‌طور میانگین ۱۷/۲۳۱۱ مگا پاسکال افزایش مدول برجهندگی را به همراه خواهد داشت و این خود تصدیقی بر تأثیرگذاری بیشتر  $\sigma_d$  نسبت به  $\sigma_3$  بر مدول برجهندگی اساس تثبیت‌شده است.



شکل ۵. درجه اهمیت هر یک از پارامترهای ورودی بر مدول برجهندگی اساس تثبیت‌شده

جدول ۴: دامنه تغییرات هر کدام از متغیرها جهت انجام مطالعه پارامتریک

محدوده تغییرات	متغیر ورودی
۰-۳۰	WDC
۰/۱۵-۰/۴۰	CSAFR
۲/۴۰-۳/۴۰	DMR
۰-۱۲۰	$\sigma_3$
۸۰-۲۶۰	$\sigma_d$



شکل ۶. تغییرات مدول برجهنگی اساس تثبیت شده به ازای تغییر در مقادیر هر کدام از متغیرهای ورودی

## ۵- نتیجه گیری

نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر قابل بیان می‌باشند:

- ۱- پس از یافتن معماری بهینه مدل ANFIS با استفاده از ۵ ورودی شامل تعداد سیکل‌های تر و خشک شدن (WDC)، نسبت آهک آزاد به سیلیس، آلومینا و ترکیبات اکسید آهن در مواد سیمانی (CSAFR)، نسبت دانسیته خشک حداکثر به درصد رطوبت بهینه (DMR)، تنش محدودکننده ( $\sigma_3$ ) و تنش انحرافی ( $\sigma_d$ )، با حذف ورودی و مدل‌سازی مجدد، تأثیر هر کدام از پارامترها بر دقت و عملکرد سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی مورد بررسی قرار گرفت.
- ۲- در نهایت مدل A با در نظر گرفتن هر ۵ ورودی، مدل B با در نظر گرفتن ۴ ورودی و حذف  $\sigma_d$ ، مدل C با در نظر گرفتن ۴ ورودی و حذف  $\sigma_3$  و مدل D با در نظر گرفتن ۳ ورودی و حذف دو متغیر  $\sigma_d$  و  $\sigma_3$  ساخته شد.
- ۳- با توجه به مقادیر  $R^2$  و RMSE می‌توان نتیجه گرفت که دقت چهار مدل ساخته شده به صورت  $A > C > B > D$  است. در واقع مدل A با ۵ ورودی و مقادیر  $R^2$  و RMSE به ترتیب برابر با ۰/۹۶۶۹ و ۳۳۶/۵۸۵۸ برای مجموعه داده آموزش و ۰/۹۶۲۵ و ۳۶۵/۶۴۲۷ برای مجموعه داده آزمون دارای بهترین عملکرد و مدل D با ۳ ورودی و مقادیر  $R^2$  و RMSE به ترتیب برابر با ۰/۹۲۷۶ و ۴۹۷/۷۶۳۱ برای مجموعه داده آموزش و ۰/۹۰۶۱ و ۵۷۶/۱۳۷۳ برای مجموعه داده آزمون دارای ضعیف‌ترین عملکرد در بین ۴ مدل ساخته شده می‌باشند.
- ۴- حذف متغیر  $\sigma_d$  در مدل B، منجر به کاهش بیشتر دقت مدل در قیاس با حذف متغیر  $\sigma_3$  در مدل C شد.
- ۵- نتایج تحلیل حساسیت مدل نشان داد که متغیر نسبت دانسیته خشک حداکثر به درصد رطوبت بهینه (DMR) دارای بیش‌ترین تأثیر و متغیر تعداد سیکل خشک و تر شدن (WDC) کمترین تأثیر را بر مدول برجهندگی اساس تثبیت شده دارند. در ضمن مدول برجهندگی وابستگی بیشتری به مقدار متغیر  $\sigma_d$  در مقایسه با متغیر  $\sigma_3$  دارد.
- ۶- مطالعه پارامتریک نشان داد که افزایش تعداد سیکل خشک و تر شدن، کاهش مقدار مدول برجهندگی را به همراه داشته است.

- ۷- به ازای افزایش نسبت آهک آزاد به SFA، شاهد افزایش مدول برجهندگی خواهیم بود که شیب این افزایش به ازای مقادیر CSAFR زیادتر از ۰/۲۵، بیش‌تر خواهد شد.
- ۸- روند صعودی مدول برجهندگی به ازای افزایش مقدار نسبت دانسیته خشک حداکثر به درصد رطوبت بهینه نیز قابل مشاهده خواهد بود.
- ۹- به ازای افزایش ۱۰ کیلو پاسکال برای متغیر  $\sigma_d$ ، به‌طور میانگین شاهد ۶۸/۳۱۳۷ مگا پاسکال افزایش مدول برجهندگی خواهیم بود که همین میزان تغییر برای متغیر  $\sigma_3$ ، به‌طور میانگین ۱۷/۲۳۱۱ مگا پاسکال افزایش مدول برجهندگی را به همراه خواهد داشت.

## ۶- مراجع

- Berg, K. C. (1998), "Durability and strength of activated reclaimed Iowa class C fly ash aggregate in road bases, Iowa State University (Doctoral dissertation, Master Thesis).
- Camargo, F. F., Edil, P. E., Tuncer, B., Benson PhD, P. E., & Craig, H. (2009), "Strength and stiffness of recycled base materials blended with fly ash". In Transportation Research Board 88th Annual Meeting (No. 09-1971).
- George, K. P., & Davidson, D. T. (1963), "Development of a freeze-thaw test for design of soil-cement". Highway Research Record (36).
- Guthrie, W., Michener, J., Wilson, B., & Eggett, D. (2009), "Effects of environmental factors on construction of soil-cement pavement layers. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board", (2104), pp.71-79.
- Jang, J. S. (1993), "ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, 23(3), pp.665-685.
- Khoury, N. N. (2005), "Durability of cementitiously stabilized aggregate bases for pavement application" (Doctoral dissertation).

soil stabilizer. Transportation Research Record": Journal of the Transportation Research Board, (1714), pp.25-32.

-Nunan, T. A., & Humphrey, D. (1990), "A review and experimentation of gravel stabilization methods". Maine Department of Transportation, FHWA ME-90-2.

-Nunan, T. A., & Humphrey, D. H. (1990), "A review and experimentation of gravel stabilization methods". Technical Report, Maine Department of Transportation. Technical Services Division. Executive summary (No. FHWA ME-90-2).

-Takagi, T., & Sugeno, M. (1985), "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control". IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, (1), pp.116-132.

-Yang, Y. & Zhang, Q. (1998), "The Application of Neural Networks to Rock Engineering System (RES)". Int J Rock Mech Min Sci 35(6), pp.727-745.

-Zaman, M., Zhu, J. H., & Laguros, J. (1999), "Durability effects on resilient moduli of stabilized aggregate base". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (1687), pp.29-38.

-Khoury, N., & Zaman, M. (2002), "Effect of wet-dry cycles on resilient modulus of class C coal fly ash-stabilized aggregate base. Transportation Research Record": Journal of the Transportation Research Board (1787), pp.13-21.

-Khoury, N., & Zaman, M. (2006), "Durability effects on flexural behavior of fly ash stabilized limestone aggregate. Journal of Testing and Evaluation, 34(3), pp.167.

-Khoury, N., & Zaman, M. (2007), "Influences of various cementations' agents on the performance of stabilized aggregate base subjected to wet-dry cycles". Int. J. Pavement Eng., 8(4), pp.265-276.

-Maalouf, M., Khoury, N., Laguros, J. G., & Kumin, H. (2012), "Support vector regression to predict the performance of stabilized aggregate bases subject to wet-dry cycles. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics", 36(6), pp.675-696.

-Mallick, R. B., & El-Korchi, T. (2013), "Pavement engineering: principles and practice": CRC Press.

-Miller, G., & Zaman, M. (2000), "Field and laboratory evaluation of cement kiln dust as a

# Prediction of Resilient Modulus of Stabilized Aggregate Base Subjected To Wet-Dry Cycles Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)

*A. R. Ghanizadeh, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran.*

*A. Tavana Amlashi, M.Sc., student, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran.*

*H. Abbasou, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran.*

*E-mail: [ghanizadeh@sirjantech.ac.ir](mailto:ghanizadeh@sirjantech.ac.ir)*

Received: Feb. 2017-Accepted: May. 2017

## **ABSTRACT**

One of the most important input parameters for pavement design using empirical mechanistic method is the resilient modulus of various materials. Resilient modulus is commonly determined by dynamic triaxial loading test which is very costly and time-consuming and requires special laboratory facilities. The purpose of this paper is to develop a model based on adaptive Neuro-Fuzzy inference system (ANFIS) for prediction of resilient modulus of stabilized base materials subjected to wet– dry cycles. For this purpose an experimental database consists of 704 records were used. In this study, the number of wet-dry cycles (WDC), the ratio of free lime to SAF (CSAFR), the ratio of maximum dry density (in  $\text{kN/m}^3$ ) to the optimum moisture content (in %) (DMR), the confining pressure ( $\sigma_3$ ) and the deviator stress ( $\sigma_d$ ) were considered as ANFIS input parameters. Results showed high accuracy of model with coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.9669 and 0.9625 for training and testing data sets and 0.9655 for overall data set, respectively. In addition, the result of sensitivity analysis showed that DMR and WDC have the most and least effectiveness on resilient modulus of stabilized bases, respectively. In addition, it was concluded that resilient modulus is more dependent on the value of  $\sigma_d$  variable compared with  $\sigma_3$ , and results of parametric studies also confirm this issue.

**Keywords:** Resilient Modulus, Stabilized Aggregate Bases, Wet–Dry Cycles, Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)