نشریه علمی - پژوهشی مهندسی سازه و ساخت، دوره ۶، شماره ویژه ۱، سال ۱۳۹۸، صفحه ۱۲۷ تا ۱۴۰

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

ارائه روشی جهت پیش‌بینی اسلامپ بتن مبتنی بر مدل نروفازی تطبیقی

میثم عفتی[1*]، پونه شاه‌ملک‌پور[2]

۱- استادیار، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه گیلان، رشت، ایران
۲- دانشجوی دکتری سازه ، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

چکیده

کارایی بتن از اهمیت بسیار بالایی در پروژه‌های عمرانی برخوردار است. یکی از متداول‌ترین روش‌ها جهت اندازه گیری کارایی بتن، آزمایش اسلامپ است. جهت صرفه‌جویی در زمان، هزینه و مصالح، بهتر است از روش‌های هوشمندی جهت پیش‌بینی اسلامپ بتن استفاده شود. در این تحقیق یکی از روش‌های مبتنی بر محاسبات نرم بکار گرفته می‌شود تا با طراحی شبکه‌ای، بدون نیاز به انجام آزمایش‌های فیزیکی پرزحمت، بتوان تخمینی از اسلامپ بتن بدست آورد. بدین منظور یک مدل نروفازی تطبیقی که مزایای شبکه عصبی و استنتاج فازی را با هم دارا می‌باشد، به منظور پیش‌بینی اسلامپ بتن پیشنهاد می‌شود. به منظور آموزش مدل پیشنهادی جهت پیش‌بینی‌های آتی با جمع‌آوری داده‌های مربوط به ۴۴ تست آزمایشگاهی اسلامپ بتن، متغیرهایی مانند نسبت آب به سیمان، ماسه، شن، میکروسیلیس و فوق روان کننده که از اجزای اصلی سازنده بتن می‌باشند، به عنوان متغیرهای ورودی و مقدار اسلامپ نیز به عنوان متغیر خروجی در نظر گرفته شده است. در نهایت دقت نتایج و کارایی مدل نروفازی تطبیقی پیشنهادی با استفاده از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطا با یک مدل شبکه عصبی مصنوعی مقایسه شده است. نتایج نشان داد که از میانگین نتایج ده دسته‌بندی متفاوت از داده‌های آزمایشگاهی ورودی، ضریب همبستگی بین اسلامپ‌های پیش‌بینی شده به روش پیشنهادی و شبکه عصبی مصنوعی تقریبا برابر است. در حالی‌که مقدار جذر میانگین مربعات خطای اسلامپ‌های روش نروفازی پیشنهادی ۰/۴۴۷۷ تعیین شد که کمتر از مقدار ۰/۶۹۶۴ مربوط به خروجی شبکه عصبی است. از دلایل تفاوت در خطای خروجی دو مدل می‌توان به الگوریتم‌های یادگیری متفاوت بکار رفته در دو مدل و عدم مدلسازی عدم قطعیت، ابهام در انتخاب بهترین تعداد لایه‌های مخفی و نرون‌های این لایه‌ها در مدل شبکه عصبی مصنوعی اشاره کرد.

کلمات کلیدی: اسلامپ بتن، محاسبات نرم، سیستم نروفازی تطبیقی، شبکه عصبی مصنوعی، الگوریتم‌های یادگیری

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	10.22065/JSCE.2018.91259.1252
۱۳۹۶/۰۴/۲۱	۱۳۹۶/۱۰/۰۳	۱۳۹۶/۱۰/۱۲	۱۳۹۶/۱۰/۱۲	۱۳۹۸/۰۴/۰۱	doi: 10.22065/JSCE.2018.91259.1252

*نویسنده مسئول: میثم عفتی

پست الکترونیکی: meysameffati@guilan.ac.ir

Providing a Method for Predicting the Concrete Slump Based on Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

Meysam Effati[1*], Pooneh Shahmalekpour[2]

1- Assistant Professor,Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran
2- PhD Student in Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Yazd University of Technology, Yazd, Iran

ABSTRACT

Concrete performance is of very high importance in civil engineering projects. One of the most common ways to measure the performance of concrete, is the slump test. To save time, money and materials, it is better to use intelligent methods in predicting the slump. Therefore, in this study a method based on soft computing is used, so without the need to perform arduous physical experiments, one can obtain an estimate of the slump. In this study, an adaptive neuro-fuzzy model which has the benefits of both neural network and fuzzy inference system, is used to predict the concrete slump. In order to train the algorithm for future use, comprehensive experimental data is essential .So by collecting data related to 44 concrete slump experimental tests, variables such as water-cement ratio, sand, gravel, silica fume and super plasticizer which are the principal components of concrete, are considered as input variables and the amount of slump is considered as the output variable in the proposed model. In order to evaluate the performance of the proposed model and accuracy of the results, the results of the adaptive neuro-fuzzy model is compared to that of artificial neural network model, which is obtained in a parallel research done by author, by statistical parameters such as correlation coefficient and root mean square error. By averaging the results of ten different classifications of experimental input data, the correlation coefficient is approximately equal between adaptive neuro-fuzzy and neural network slump. While the root mean square error obtained by using adaptive neuro-fuzzy model is 0/4477 which is less than 0/6964 by neural network model. The difference in the output error of the two models are due to different learning algorithms used in two models and unknown number of hidden layers and neurons in the desirable artificial neural network model.

ARTICLE INFO

Received: 12/07/2017
Revised: 24/12/2017
Accepted: 02/01/2018

Keywords:
Concrete slump,
Soft computing,
ANFIS,
Artificial neural network,
Learning Algorithm.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2018.91259.1252

*Corresponding author: Meysam Effati
Email address: meysameffati@guilan.ac.ir

۱-مقدمه

بتن یکی از اصلی‌ترین و مهم‌ترین مصالح ساختمانی مورد استفاده در جهان می‌باشد. جهت دستیابی به مقاومت سازه‌ای حداکثر، تراکم صددرصدی بتن مورد نیاز است. پارامتری که این الزام را ارضا می‌نماید، تحت عنوان کارایی یا اسلامپ بتن نامگذاری می‌شود [۱] . کارایی بتن، سهولت جریان، جادادن و تراکم بتن است و ارتباط مستقیم با روانی آن دارد. معمول‌ترین معیار سنجش کارایی بتن، آزمایش اسلامپ است که به نتیجه بدست آمده، روانی یا اسلامپ بتن گفته می‌شود [۲]. بتن‌ها بسته به میزان اسلامپ و نوع کاربردشان در چهار گروه سفت، خمیری، شل و آبکی تقسیم‌بندی می‌شوند که باید با توجه به تمامی موارد گفته شده، میزان اسلامپ بتن‌ها و طرح اختلاط آن‌ها تعیین گردد [۳]. جهت دست‌یابی به طرح اختلاط بتنی با اسلامپ مورد نظر، باید مخلوط‌های بتنی با طرح اختلاط‌های مختلف ساخته شوند و آزمایش اسلامپ بر روی آن‌ها انجام گیرد که این مسئله موجب اتلاف در مصالح، هزینه و زمان می‌گردد.

هدف این پژوهش ارائه شبکه‌ای مبتنی بر یک سیستم نروفازی تطبیقی برای تخمین اسلامپ بتن و بررسی دقت نتایج و مقایسه کارایی آن با شبکه عصبی مصنوعی، که پیشتر با همین داده‌ها توسط مؤلف انجام شده بود [۴]، می‌باشد. ایده تحقیق حاضر بر این اساس است که با استفاده از روش‌های مبتنی بر محاسبات نرم می‌توان با داشتن یک سری از داده‌های پیشین مربوط به نتایج آزمایش اسلامپ برای تعداد معینی از مخلوط‌های بتنی، میزان اسلامپ را برای سایر طرح‌های اختلاط، بدون ساختن آن‌ها پیش‌بینی نمود تا به طرح با کارایی مورد نظر دست یافت.

روش پیشنهادی در تقابل با محاسبات سخت قرار می‌گیرد و موجب صرفه‌جویی در زمان، هزینه و مصالح خواهد شد. محاسبات سخت، محاسبات مرسومی است که به مدل تحلیلی کاملا دقیق و زمان محاسبه زیادی برای حل مسائل پیچیده نیاز دارد. اما مسائل موجود در دنیای واقعی اغلب در یک محیط غیر ایده‌آل بوده و در شرایط عدم قطعیت و ابهام قرار دارند. برخلاف محاسبات سخت، محاسبات نرم برای مدلسازی مسائل کم‌دقت، توأم با عدم قطعیت و تقریب بکار می‌رود و قادر به حل مسائل پیچیده در مدت زمان کمتری است [۵]. محاسبات نرم در سالیان اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است. روش های مبتنی بر محاسبات نرم همچون شبکه عصبی[1]، سیستم استنتاج فازی[2] و یا سیستم نروفازی تطبیقی[3] که مزایای شبکه عصبی و استنتاج فازی را با هم دارا می‌باشد، در حل مسائل مختلفی که راه حل دقیق برای آنها یا وجود نداشته و یا هزینه مالی و زمانی زیادی دارد، بکار گرفته می‌شوند.

در این پژوهش، به دلیل دشواری انجام آزمایش‌های پرزحمت در شرایط دشوار آزمایشگاهی به منظور تعیین کارایی بتن، که از پارامترهای مهم در تعیین ویژگی بتن مصرفی می‌باشد، یک مدل نروفازی پیشنهاد شده است. چراکه شبکه‌های عصبی علیرغم قابلیت یادگیری، نسبت به مدلسازی عدم قطعیت و بکارگیری نظر متخصصین ناتوان هستند. همچنین سیستم‌های استنتاج فازی علیرغم بکارگیری نظر متخصصین، در یادگیری و تطبیق با شرایط جدید ناتوانند. سیستم‌های نروفازی مزایای شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم‌های استنتاج فازی را دارا می‌باشند. سیستم نروفازی تطبیقی از کاراترین سیستم‌های نروفازی می‌باشد که روی یک سیستم استنتاج فازی سوگنو [4](TSK)، اجرا می‌گردد. این سیستم از اولین مدلهای نروفازی بود که در سال ۱۹۹۷ توسط راجر جانگ پیشنهاد گردید [۶]. در نهایت خروجی مدل پیشنهادی تحقیق با یک مدل شبکه عصبی مصنوعی، که در مطالعه‌ای جداگانه توسط محقق انجام شده، مقایسه شده است.

در بخش بعدی مطالعات انجام شده توسط محققین مختلف در حوزه اسلامپ بتن مورد بررسی قرارگرفته است. در بخش ۳ مراحل روش پیشنهادی به صورت مروری ارائه شده و مختصری از استنتاج فازی، شبکه عصبی مصنوعی و مدل نروفازی تطبیقی در بخش ۴ ارائه شده است. در بخش ۵ پیاده سازی و بحث انجام می‌گیرد. در نهایت در بخش ۶ به بررسی نتایج پرداخته شده است.

[1] Artificial neural network
[2] Fuzzy inference system
[3] Adaptive neuro-fuzzy inference system
[4] Takagi, Sugeno, and Kang

۲- پیشینه تحقیق

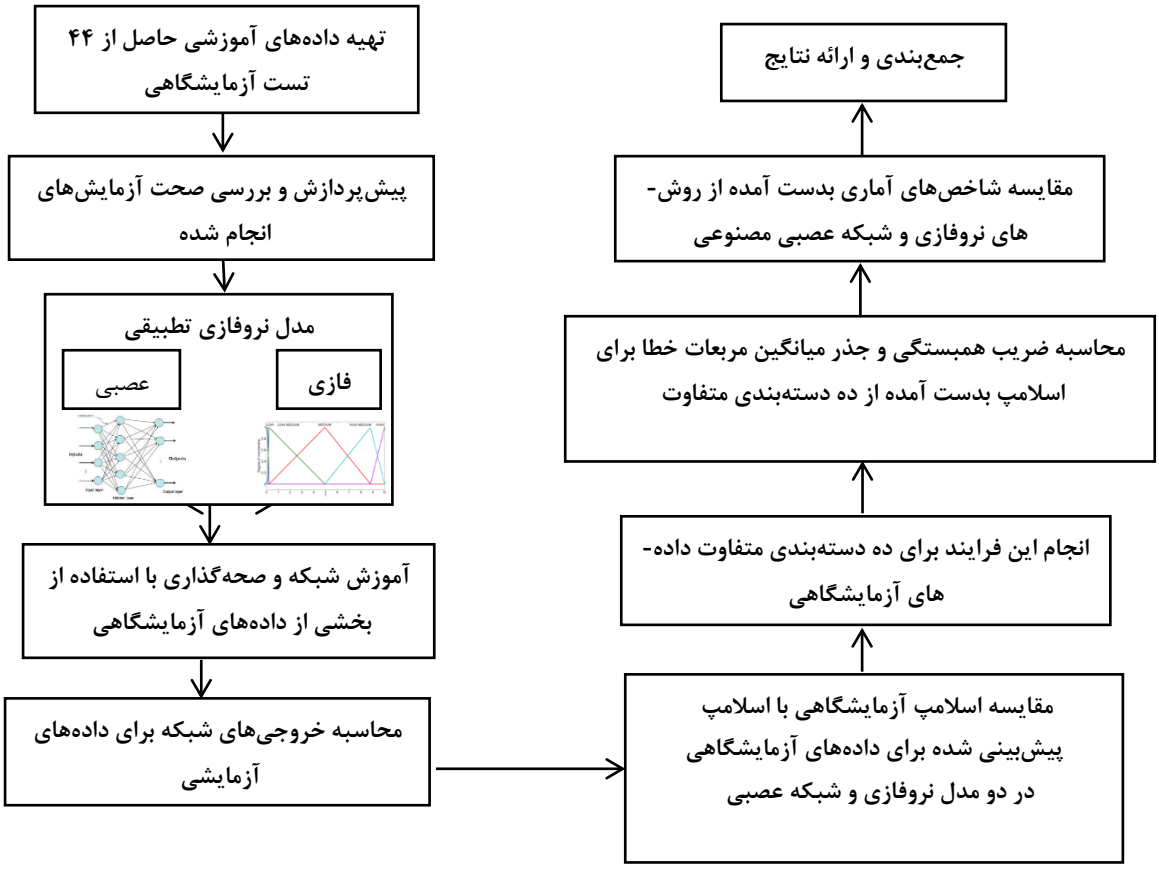
تا کنون، مطالعات متعددی در رابطه با پیش‌بینی میزان اسلامپ بتن انجام گردیده است. Cheng و Wang (۲۰۱۰) از شبکه عصبی مصنوعی از نوع GMDH در پیش‌بینی اسلامپ بتن‌های با کارایی بالا استفاده نمودند [۷]. Agrawal و Sharma (۲۰۱۰) مطالعه‌ای را بر روی پیش‌بینی اسلامپ بتن‌های با مقاومت بالا با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی انجام داده‌اند [۸]. Bilgil (۲۰۱۲) کاربرد شبکه عصبی مصنوعی MLP در پیش‌بینی اسلامپ بتن‌های با کارایی بالا را بررسی نمود [۹] . در تمامی تحقیقات مذکور، شبکه عصبی مصنوعی به عنوان یک مدل مناسب در پیش‌بینی اسلامپ بتن معرفی شد. تحقیقات متعدد دیگری نیز در رابطه با مقایسه شبکه عصبی مصنوعی با سایر روش‌ها جهت پیش‌بینی اسلامپ بتن صورت گرفته است. Paratibha و همکاران (۲۰۱۳) مقایسه‌ای را بین مدل شبکه عصبی مصنوعی و منطق فازی در پیش‌بینی مقاومت فشاری و اسلامپ بتن انجام دادند [۱۰] . نتایج این تحقیق نشان داد که هر دو روش مذکور می‌تواند اسلامپ بتن را با دقت مطلوبی پیش‌بینی نماید، البته ضریب همبستگی بین مقادیر پیش‌بینی شده و اصلی در شبکه عصبی بیش‌تر از منطق فازی بوده است.

مطالعات پیشین نشان داد که شبکه‌های عصبی نسبت به مدلسازی عدم قطعیت و بکارگیری نظر متخصصین ناتوان هستند، همچنین سیستم‌های استنتاج فازی در یادگیری و تطبیق با شرایط جدید ناتوانند. در سیستم‌های نروفازی مزایای شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم‌های استنتاج فازی با هم وجود دارد. بدین منظور در تحقیق حاضر به بررسی دقت و کارایی شبکه نروفازی تطبیقی در پیش‌بینی اسلامپ بتن معمولی حاوی میکروسیلیس پرداخته می‌شود.

۳- روش‌شناسی تحقیق

شکل ۱ روش پیشنهادی تحقیق را به صورت گام به گام نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱، در این پژوهش به منظور پیش‌بینی اسلامپ بتن، یک سیستم نروفازی تطبیقی پنج لایه‌ای شامل یک لایه ورودی، یک لایه خروجی و سه لایه پنهان پیشنهاد شده است. الگوریتم یادگیری مدل پیشنهادی، هیبریدی، نوع توابع عضویت متغیرهای ورودی، مثلثی با سه مقدار زبانی کم، متوسط و زیاد و خروجی ثابت است.

در روش پیشنهادی تحقیق، داده‌ها بطور تصادفی به سه دسته آموزشی، صحت‌سنجی و آزمایشی دسته‌بندی شده و سپس در مدل فراخوانی می‌شوند. برای ایجاد سیستم استنتاج فازی، تعداد و نوع توابع عضویت متغیرهای ورودی و نوع تابع عضویت خروجی تعیین می‌شوند. با انتخاب الگوریتم هیبریدی برای یادگیری، شبکه آموزش داده شده و مقادیر اسلامپ بدست آمده برای هر سه دسته داده با اسلامپ آزمایشگاهی مقایسه می‌شوند. این مراحل برای دسته‌بندی‌های متفاوت داده‌های ورودی انجام شده و شاخص‌های آماری ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطای اسلامپ‌های بدست آمده با همین شاخص‌های آماری حاصل از روش شبکه عصبی مصنوعی[۴] مقایسه می‌شوند. در بخش بعد، استنتاج فازی، شبکه عصبی مصنوعی و مدل نروفازی پیشنهادی شرح داده می‌شوند.



شکل ۱: روش پیشنهادی

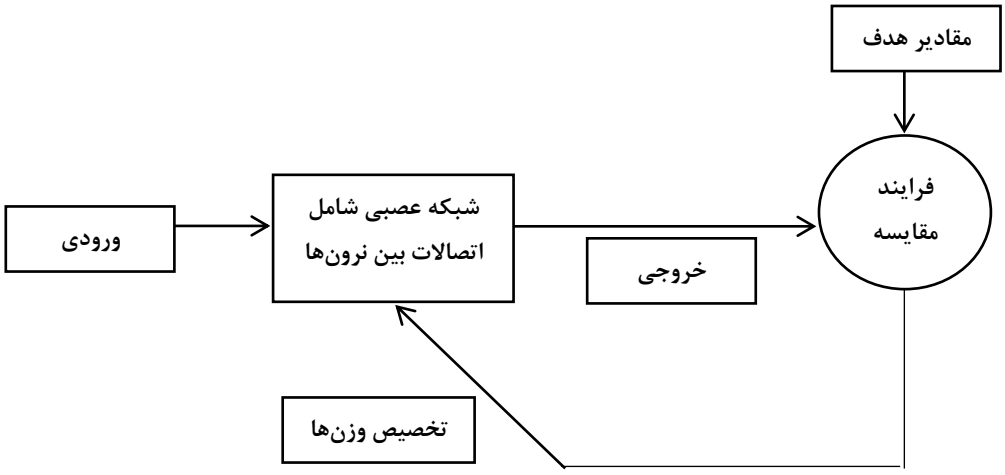
۳- ۱- استنتاج فازی

منطق فازی اساسا یک سیستم برای تعامل با عدم قطعیت و ابهام است [۱۱]. تئوری مجموعه‌های فازی که در ابتدا توسط لطفی علی‌عسگرزاده معرفی شد، از اطلاعات تقریبی و عدم قطعیت با استفاده از استنتاج بشر تصمیم‌گیری می‌کند. منطق فازی در مسائل مبهم به متغیرها اجازه می‌دهد تا درجه عضویت جزئی بدارند. استنتاج فازی، با قوانین فازی اگر... آنگاه ....، عبارات زبانی را قادر می‌کنند تا بطور ریاضی عمل‌کنند [۱۳،۱۲].

۳- ۲- شبکه عصبی مصنوعی

شبکه عصبی یکی از مدل‌های پرکاربرد محاسبات نرم الهام گرفته از مغز انسان و شامل اتصالات وزن‌دار بین نرونهای مصنوعی است که از یک لایه ورودی، یک یا چند لایه مخفی و یک لایه خروجی تشکیل شده است. تفاوت بین خروجی شبکه و خروجی مطلوب یک تابع خطا را تعریف می‌کند. سپس خطا برگشت می‌کند و وزنها و بایاس‌ها اصلاح می‌شوند تا خطا را کاهش دهد. این پروسه، که گام یادگیری نامیده می‌شود، آنقدر تکرار می‌شود تا بیشترین دقت در خروجی‌ها حاصل شود. گام صحت‌سنجی در حین یادگیری به صورت غیرمستقیم انجام می‌شود تا بیش‌برازش[5] شبکه عصبی را نشان دهد و وقتی خطای صحت‌سنجی شروع به افزایش می‌کند باعث توقف فرایند یادگیری می‌شود. آخرین گام مدلسازی شبکه عصبی مصنوعی، گام آزمایش است که صرفا برای تعیین میزان کارایی شبکه آموزش-دیده انجام می‌شود [۱۴]. شکل ۲ فرایند کلی یک شبکه عصبی مصنوعی را نشان می‌دهد.

[5] Overfitting



شکل۲ : ساختار یک شبکه عصبی مصنوعی

۳-۳- مدل نروفازی تطبیقی پیشنهادی

سیستم نروفازی تطبیقی[6] از تئوری شبکه عصبی مصنوعی به منظور تعیین ویژگی‌های الگوهای داده (توابع عضویت و قوانین فازی) در آموزش یک سیستم استنتاج فازی استفاده می‌کند. به بیان دیگر، ANFIS با استفاده از ویژگی‌های ریاضی شبکه‌های عصبی مصنوعی در تنظیم یک سیستم استنتاج فازی مبتنی بر قانون، شبکه‌های عصبی مصنوعی و منطق فازی را ترکیب می‌کند [۱۵]. در واقع، ANFIS از کاراترین سیستم‌های نروفازی می‌باشد که روی یک سیستم استنتاج فازی سوگنو اجرا می‌گردد. در استنتاج‌گر فازی سوگنو، قسمت نتیجه قاعده از یک تابع ریاضی از متغیرهای ورودی یا یک ثابت عددی تشکیل شده است. مدل ANFIS پیشنهادی این تحقیق از پنج لایه تشکیل شده که عبارتند از: لایه ورودی، لایه تابع عضویت ورودی، لایه قانون فازی، لایه تابع عضویت خروجی ولایه خروجی. قانون پس‌انتشار[7] به عنوان روش یادگیری در نظر گرفته شده است که در آن خطای لایه خروجی به صورت برگشتی انتشار می‌یابد تا پارامترهای موردنظر فازی را بهبود داده و خطای خروجی را کمینه کند. همچنین در مدل پیشنهادی، روش یادگیری هیبریدی[8] به منظور آموزش مدل، بکارگرفته شده که یک روش یادگیری سریع برای مقاصد پیش‌بینی است. الگوریتم هیبریدی که ترکیبی از الگوریتم پس‌انتشار و کمترین مربعات است به عنوان یک الگوریتم دقیق توسط بسیاری از دانشمندان شناخته شده است [۱۶].

۴- پیاده‌سازی و بحث

در جدول ۱ داده‌های آزمایشگاهی حاصل از ۴۴ آزمایش اسلامپ که بر اساس آیین نامه ASTM C143-78 بر روی مخلوط‌های بتنی تازه انجام شده، ارائه شده است [۱۷] . این داده‌ها برای استفاده در مدل پیشنهادی به طور تصادفی به سه دسته آموزشی، صحت‌سنجی و آزمایشی دسته‌بندی شدند. مطابق جدول ۲، ۷۵ درصد داده‌ها برای آموزش، ۱۴ درصد داده‌ها برای صحت‌سنجی و ۱۱ درصد داده‌ها برای آزمایش درنظرگرفته شدند. بعد از وارد کردن داده‌های آموزشی، صحت‌سنجی و آزمایشی در سیستم نروفازی تطبیقی، نوع و تعداد توابع عضویت ورودی برای هر پنج متغیر ورودی شامل نسبت آب به سیمان، شن، ماسه، میکروسیلیس و فوق روان کننده، از نوع مثلثی و با سه مقدار زبانی کم، متوسط و زیاد تعریف شدند. همچنین نوع خروجی نیز در این مرحله می‌بایست تعیین شود. با دانستن اینکه در سیستم نروفازی تطبیقی از استنتاج‌گر سوگنو استفاده می‌شود، پس خروجی یک عدد ثابت و یا یک تابع خطی از متغیرهای ورودی خواهد بود [۵]. از آنجا که اطلاعاتی از روابط میان متغیرهای ورودی در دست نیست، نوع خروجی مدل پیشنهادی، عددی ثابت انتخاب شد. سپس با تعیین

[6] Adaptive Neuro-fuzzy Inference System (ANFIS)
[7] backpropagation
[8] Hybrid

روش یادگیری هیبریدی، تعداد ۲۴۳ قاعده به طور خودکار توسط سیستم نروفازی ایجاد می‌شود که در آن تمامی حالات ممکن برای پیش‌بینی اسلامپ بتن در نظر گرفته شده اند. نمونه‌ای از این قواعد در جدول ۳ ارائه شده است. لازم به ذکر است که در تعیین این قواعد می‌توان از نظر کارشناسان استفاده کرده و مجموعه‌ای از قواعد علمی و تجربی را به مدل معرفی نمود.

جدول۱: طرح اختلاط و نتایج آزمایش اسلامپ مخلوط‌های بتنی

شماره آزمایش	آب به سیمان	سیمان (kg/m3)	میکروسیلیس (kg/m3)	شن (kg/m3)	ماسه (kg/m3)	آب (kg/m3)	فوق روان کننده(kg/m3)	اسلامپ (cm)
۱	۰/۳۵	۴۰۰	۰	۶۴۰	۹۶۰	۱۴۰	۰	۴
۲	۰/۴	۴۰۰	۰	۶۴۰	۹۶۰	۱۶۰	۰	۱۰
۳	۰/۳۵	۴۰۰	۰	۸۰۰	۸۰۰	۱۴۰	۰	۳/۶
۴	۰/۳۷۵	۴۰۰	۰	۸۰۰	۸۰۰	۱۵۰	۰	۶/۸
۵	۰/۳۸۸	۴۰۰	۰	۸۰۰	۸۰۰	۱۵۵	۰	۷
۶	۰/۴	۴۰۰	۰	۸۰۰	۸۰۰	۱۶۰	۰	۷/۶
۷	۴۱۳/۰	۴۰۰	۰	۸۰۰	۸۰۰	۱۶۵	۰	۷/۸
۸	۰/۳۷۵	۳۶۰	۴۰	۸۰۰	۸۰۰	۱۵۰	۰	۱/۳
۹	۰/۴	۳۶۰	۴۰	۸۰۰	۸۰۰	۱۶۰	۰	۲/۵
۱۰	۰/۴۲۵	۳۶۰	۴۰	۸۰۰	۸۰۰	۱۷۰	۰	۳/۵
۱۱	۰/۵	۳۶۰	۴۰	۸۰۰	۸۰۰	۱۸۰	۰	۵/۹
۱۲	۰/۳۶۸	۳۸۰	۲۰	۶۴۰	۹۶۰	۱۴۰	۰	۱/۱
۱۳	۰/۳۹۵	۳۸۰	۲۰	۶۴۰	۹۶۰	۱۵۰	۰	۳/۶
۱۴	۰/۴۲۱	۳۸۰	۲۰	۶۴۰	۹۶۰	۱۶۰	۰	۶
۱۵	۰/۴۳۴	۳۸۰	۲۰	۶۴۰	۹۶۰	۱۶۵	۰	۷
۱۶	۰/۴۱۷	۳۶۰	۴۰	۶۴۰	۹۶۰	۱۵۰	۰/۴	۱
۱۷	۰/۴۴۴	۳۶۰	۴۰	۶۴۰	۹۶۰	۱۶۰	۰/۴	۳/۵
۱۸	۰/۴۵۸	۳۶۰	۴۰	۶۴۰	۹۶۰	۱۶۵	۰/۴	۴/۵
۱۹	۰/۴۷۲	۳۶۰	۴۰	۶۴۰	۹۶۰	۱۷۰	۰/۴	۶/۳
۲۰	۰/۴۸۶	۳۶۰	۴۰	۶۴۰	۹۶۰	۱۷۵	۰/۴	۷/۲
۲۱	۰/۴۱۷	۳۶۰	۴۰	۸۸۰	۷۲۰	۱۵۰	۰/۴	۰/۵
۲۲	۰/۴۴۴	۳۶۰	۴۰	۸۸۰	۷۲۰	۱۶۰	۰/۴	۳

ادامه جدول۱ :

شماره آزمایش	آب به سیمان	سیمان (kg/m3)	میکروسیلیس (kg/m3)	شن (kg/m3)	ماسه (kg/m3)	آب (kg/m3)	فوق روان کننده(kg/m3)	اسلامپ (cm)
۲۳	۰/۴۵۸	۳۶۰	۴۰	۸۸۰	۷۲۰	۱۶۵	۰/۴	۳/۶
۲۴	۰/۴۷۲	۳۶۰	۴۰	۸۸۰	۷۲۰	۱۷۰	۰/۴	۵
۲۵	۰/۴۸۶	۳۶۰	۴۰	۸۸۰	۷۲۰	۱۷۵	۰/۴	۶
۲۶	۰/۵۶۳	۳۲۰	۸۰	۶۴۰	۹۶۰	۱۸۰	۰/۸	۰/۶
۲۷	۰/۵۹۴	۳۲۰	۸۰	۶۴۰	۹۶۰	۱۹۰	۰/۸	۳/۶
۲۸	۰/۶۱	۳۲۰	۸۰	۶۴۰	۹۶۰	۱۹۵	۰/۸	۴/۵
۲۹	۰/۶۲۵	۳۲۰	۸۰	۶۴۰	۹۶۰	۲۰۰	۰/۸	۵/۵
۳۰	۰/۶۴۱	۳۲۰	۸۰	۶۴۰	۹۶۰	۲۰۵	۰/۸	۷/۲
۳۱	۰/۶۶	۳۲۰	۸۰	۶۴۰	۹۶۰	۲۱۰	۰/۸	۹
۳۲	۰/۴۲	۳۷۰	۳۰	۶۰۰	۱۰۰۰	۱۵۵	۰	۱/۲
۳۳	۰/۴۳۲	۳۷۰	۳۰	۶۰۰	۱۰۰۰	۱۶۰	۰	۰/۵
۳۴	۰/۴۵	۳۷۰	۳۰	۶۰۰	۱۰۰۰	۱۶۵	۰	۳/۵
۳۵	۰/۴۶	۳۷۰	۳۰	۶۰۰	۱۰۰۰	۱۷۰	۰	۵
۳۶	۰/۴۷۳	۳۷۰	۳۰	۶۰۰	۱۰۰۰	۱۷۵	۰	۷
۳۷	۰/۴۸۶	۳۷۰	۳۰	۶۰۰	۱۰۰۰	۱۸۰	۰	۸/۹
۳۸	۰/۴۹۳	۳۷۰	۳۰	۶۰۰	۱۰۰۰	۱۸۲/۵	۰	۹
۳۹	۰/۳۵۹	۳۹۰	۱۰	۶۰۰	۱۰۰۰	۱۴۰	۰/۴	۲/۳
۴۰	۰/۳۷۲	۳۹۰	۱۰	۶۰۰	۱۰۰۰	۱۴۵	۰/۴	۰/۷۵
۴۱	۰/۳۷۸	۳۹۰	۱۰	۶۰۰	۱۰۰۰	۱۴۷/۵	۰/۴	۵/۵
۴۲	۰/۳۸۵	۳۹۰	۱۰	۶۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰	۰/۴	۶/۷
۴۳	۰/۳۹۱	۳۹۰	۱۰	۶۰۰	۱۰۰۰	۱۵۲/۵	۰/۴	۸/۶
۴۴	۰/۳۹۷	۳۹۰	۱۰	۶۰۰	۱۰۰۰	۱۵۵	۰/۴	۱۰

جدول۲ : تعداد داده‌های آموزشی، صحت‌سنجی و آزمایشی

نوع داده‌ها	درصد ٪	تعداد
آموزشی	۷۵	۳۳
صحت‌سنجی	۱۴	۶
آزمایشی	۱۱	۵

جدول۳: نمونه‌ای از قوانین ایجاد شده توسط مدل پیشنهادی

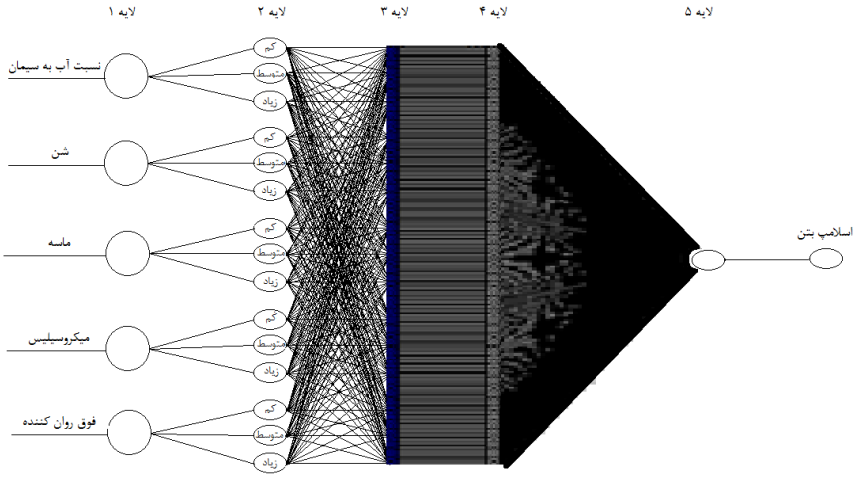
شماره	قانون
۱	اگر نسبت آب به سیمان کم، مقدار شن کم، مقدار ماسه کم، مقدار میکروسیلیس کم و مقدار فوق روان کننده کم باشد آنگاه مقدار اسلامپ کم است.
۲	اگر نسبت آب به سیمان زیاد، مقدار شن کم، مقدار ماسه کم، مقدار میکروسیلیس کم و مقدار فوق روان کننده کم باشد آنگاه مقدار اسلامپ کم است.
۳	اگر نسبت آب به سیمان کم، مقدار شن زیاد، مقدار ماسه کم، مقدار میکروسیلیس کم و مقدار فوق روان کننده کم باشد آنگاه مقدار اسلامپ کم است.
۴	اگر نسبت آب به سیمان کم، مقدار شن کم، مقدار ماسه زیاد، مقدار میکروسیلیس کم و مقدار فوق روان کننده کم باشد آنگاه مقدار اسلامپ کم است.
۵	اگر نسبت آب به سیمان زیاد، مقدار شن زیاد، مقدار ماسه زیاد، مقدار میکروسیلیس زیاد و مقدار فوق روان کننده زیاد باشد آنگاه مقدار اسلامپ زیاد است.

در جدول ۴ مشخصات و در شکل ۲ ساختار مدل پیشنهادی در فرآیند پیش‌بینی اسلامپ بتن ارائه شده است. همانطور که در بخش ۳-۳ گفته شد، مدل نروفازی تطبیقی پیشنهادی از پنج لایه تشکیل شده است. در این مدل، طی فرایند آموزش توابع عضویت اولیه و قوانین ایجاد شده اولیه تغییر می‌کنند و این فرآیند در راستای کامل شدن نظر افراد خبره است. مطابق اشکال ۳ الی ۷، تنها توابع عضویت نسبت آب به سیمان، میکروسیلیس و فوق روان کننده بعد از آموزش سیستم نروفازی تطبیقی کمی تغییر کرده و سایر توابع عضویت تقریبا بدون تغییر مانده‌اند. برای ده دسته‌بندی متفاوت داده‌ها، مقادیر پیش‌بینی شده اسلامپ از مدل پیشنهادی را بدست آورده و مقادیر ضریب همبستگی R[9] و جذر میانگین مجموع مربعات خطا RMSE[10] مربوط به میانگین محاسبه شد.

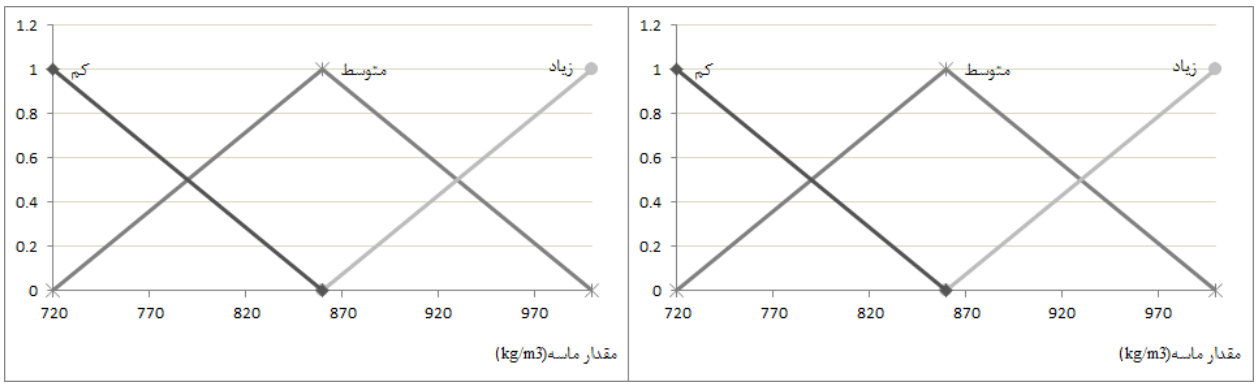
جدول۴ : مشخصات مدل ANFIS در پیش‌بینی اسلامپ بتن

جزئیات	گزینه انتخابی
الگوریتم یادگیری	Hybrid
تعداد ورودی	۵
تعداد خروجی	۱
تعداد توابع عضویت	۳ ۳ ۳ ۳ ۳
نوع توابع عضویت	Trimf
تعداد تکرار	۲۰
نوع خروجی	Constant
روش تلفیق	Sum-product
روش غیرفازی سازی	Weighted average method

[9] Correlation coefficient
[10] Root mean square error

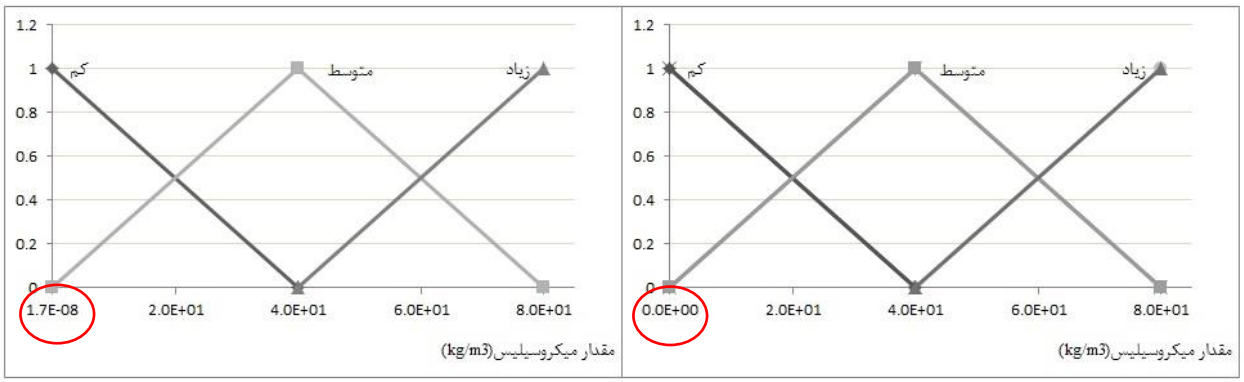


شکل۲ : ساختار مدل نروفازی تطبیقی پیشنهادی



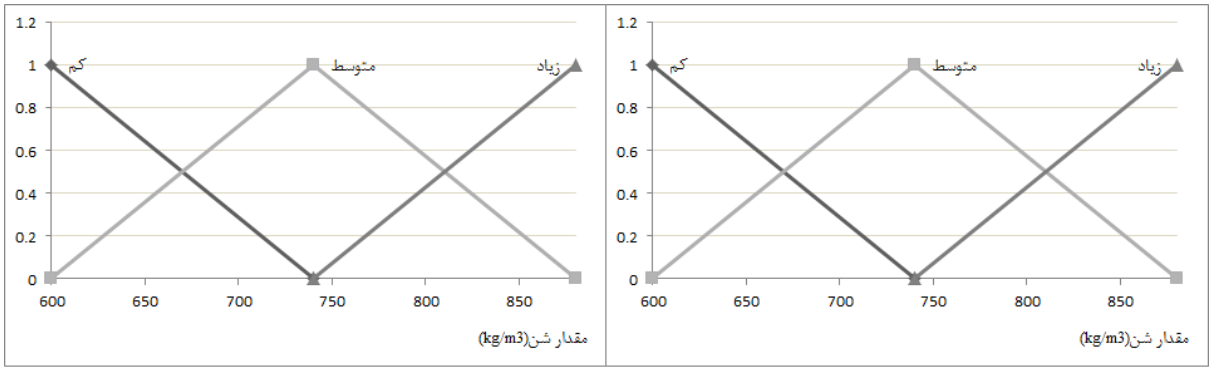
شکل۳ : تابع عضویت ماسه

(الف)قبل از آموزش (ب)بعد از آموزش



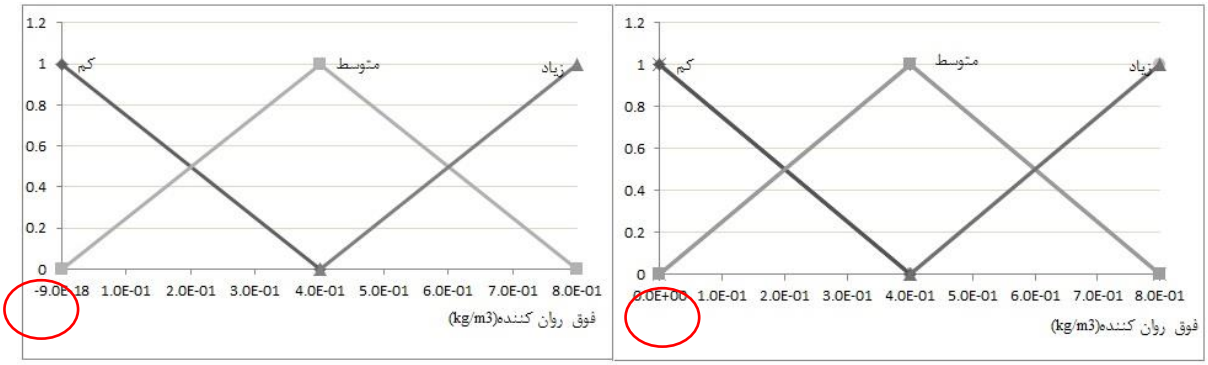
شکل۴ : تابع عضویت میکروسیلیس

(الف)قبل از آموزش (ب)بعد از آموزش



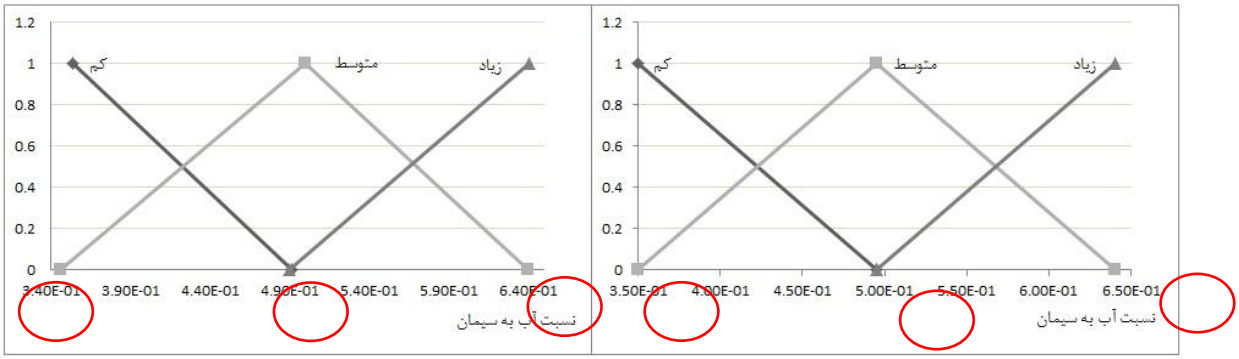
شکل۵ : تابع عضویت شن

(الف)قبل از آموزش (ب)بعد از آموزش



شکل۶ : تابع عضویت فوق روان کننده

(الف)قبل از آموزش (ب)بعد از آموزش

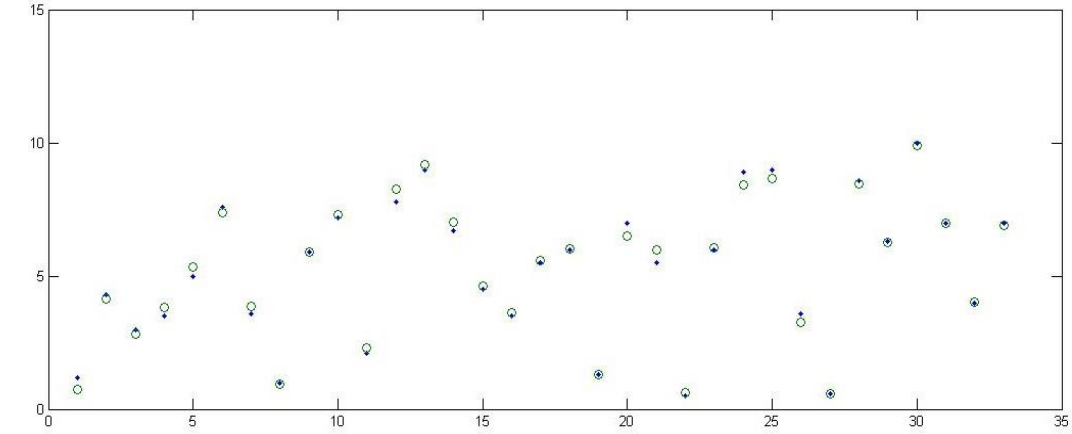


شکل۷ : تابع عضویت نسبت آب به سیمان

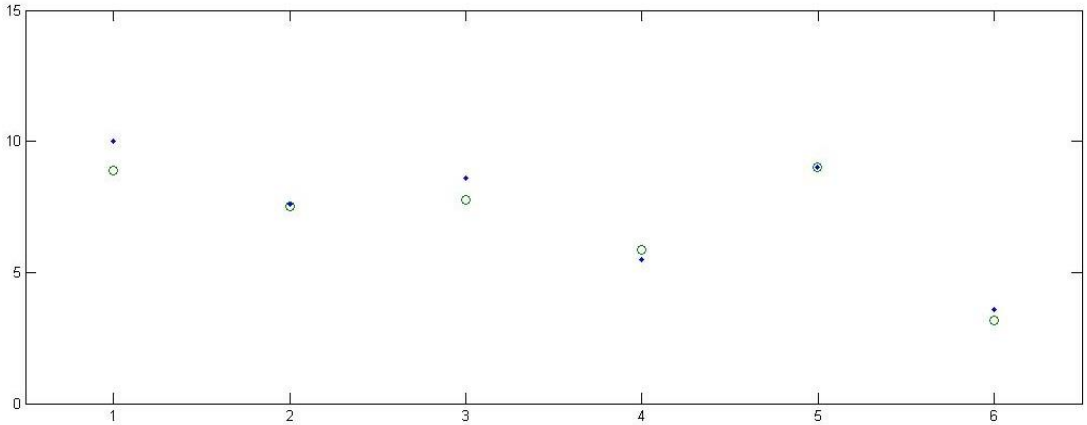
(الف)قبل از آموزش (ب)بعد از آموزش

۵- بحث

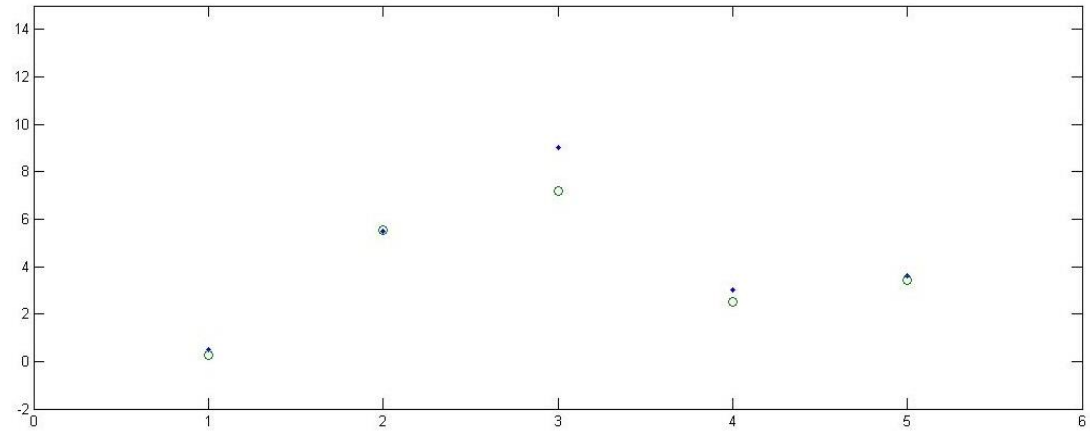
در این پژوهش، یک مدل نروفازی تطبیقی برای تخمین اسلامپ بتن که متأثر از پنج متغیر مختلف است، طراحی و پیاده‌سازی شد. شکل ۸ مقایسه بین اسلامپ پیش‌بینی شده از مدل پیشنهادی و اسلامپ آزمایشگاهی را برای داده‌های آموزشی، صحت‌سنجی و آزمایشی را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل۸ : مقایسه خروجی شبکه('.') و اسلامپ آزمایشگاهی('o') برای داده‌های (الف)آموزشی، (ب)صحت‌سنجی و (ج)آزمایشی

برای ارزیابی کارایی مدل پیشنهاد شده، خروجی اسلامپ پیش‌بینی شده با اسلامپ حاصله از داده‌های آزمایشی مقایسه شده و نتایج در شکل ۸ج ارائه شده است. در این شکل تطابق خوبی بین اسلامپ خروجی مدل پیشنهادی و اسلامپ آزمایشگاهی قابل مشاهده است. در ادامه، نتایج اسلامپ مدل نروفازی تطبیقی برای ده دسته‌بندی متفاوت از داده‌ها با نتایج پیش‌بینی مدل شبکه عصبی مصنوعی که در تحقیقی دیگر توسط محقق انجام شده بود [۴]، مقایسه شدند. برای بررسی و مقایسه مدل‌ها از معیارهای ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطا استفاده شده و نتایج در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول۵ : مقایسه شاخص‌های ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطا در نتایج حاصل از مدل پیشنهادی و شبکه عصبی مصنوعی

روش	ضریب همبستگی R	جذر میانگین مربعات خطا RMSE
مدل نروفازی تطبیقی	۰/۹۸۴۷۳	۰/۴۴۷۷۰
مدل شبکه عصبی مصنوعی	۰/۹۸۵۳۰	۰/۶۹۶۴۰

این نتایج نشان می‌دهند که که ضریب همبستگی تقریبا برابری بین خروجی‌های مدل پیشنهادی و شبکه عصبی مصنوعی وجود دارد. در حالیکه معیار جذر میانگین مربعات خطا از روش پیشنهادی بسیار کمتر از شبکه عصبی است که این امر برتری مدل پیشنهادی را بر شبکه عصبی مصنوعی نشان می‌دهد. به بیانی دیگر، در پیش‌بینی اسلامپ بتن به روش پیشنهادی با تلفیق شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم فازی در قالب یک سیستم نروفازی یکپارچه، استفاده همزمان از ویژگی‌های محاسبات پردازش موازی و قابلیت یادگیری شبکه عصبی مصنوعی با توانایی نمایش دانش متخصصین و کاربران و قابلیت عامه‌فهم بودن فازی امکان‌پذیر شد. در نتیجه شبکه‌های عصبی واضح‌تر و قابل تفسیرتر شده و از طرفی سیستم‌های فازی دارای توانایی یادگیری و تعمیم شدند.

از طرف دیگر، در طراحی شبکه عصبی تعداد لایه‌های مخفی و تعداد نرون‌های این لایه‌ها بر نتایج شبکه تاثیرگذار هستند و بهترین مدل شبکه عصبی از مقایسه اسلامپ‌های بدست آمده از ساختارهای مختلف شبکه (از جهت تعداد لایه‌های مخفی و تعداد نرون-های این لایه‌ها) بدست می‌آید. لذا در هر کاربرد انواع مدل‌ها و ساختارهای شبکه عصبی می‌بایست تست گردد، تا بهترین ساختار و پاسخ بهینه حاصل شود. در نتیجه در استفاده از مدل شبکه عصبی برای پیش‌بینی اسلامپ نمی‌توان به سرعت به ساختار مناسب و پاسخ ایده‌آل رسید؛ که این امر سریع‌تر بودن نتیجه‌گیری از طریق مدل نروفازی تطبیقی و برتری آن را نشان می‌دهد. این ویژگی می‌تواند یکی از دلایل وجود اختلاف در مقدار خطای دو مدل باشد. از سوی دیگر، در این تحقیق برای آموزش شبکه عصبی از الگوریتم پس‌انتشار استفاده شده است که در آن ابتدا محاسبات از ورودی شبکه به سوی خروجی شبکه انجام می‌شود، سپس مقادیر خطای محاسبه شده به لایه‌های قبل انتشار می‌یابد و وزن‌ها تعدیل و اصلاح می‌شوند. در حالیکه در مدل نروفازی تطبیقی از الگوریتم هیبریدی، که ترکیب دو الگوریتم پس‌انتشار و کمترین مربعات است، برای اصلاح وزن ها و پارامترهای توابع عضویت استفاده شده است. تفاوت در الگوریتم‌های یادگیری به کار رفته می‌تواند یکی دیگر از دلایل تفاوت در نتایج دو مدل نروفازی تطبیقی و شبکه عصبی مصنوعی باشد. لازم به ذکر است که در شکل‌های ۳ الی ۷ با آموزش شبکه نروفازی تطبیقی، با وجود تغییر ناچیز در توابع عضویت "آب به سیمان"، "میکروسیلیس" و "فوق روان‌کننده" که البته قابل صرف نظر کردن هستند، توابع عضویت اولیه سایر متغیرها که شبکه تعریف کرده بود، تغییری نکرده‌اند. این نتیجه می‌تواند به دلیل درنظرگیری ابهام زیاد در تعریف توابع عضویت اولیه باشد. چراکه در طراحی مدل پیشنهادی همپوشانی قابل ملاحظه‌ای بین توابع عضویت در نظر گرفته شد و مرز بین مقادیر زبانی کم، متوسط و زیاد، در مدل فازی معلوم نیست.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک مدل نروفازی تطبیقی که مزایای استنتاج فازی و شبکه عصبی را تؤاما دارا می‌باشد به منظور پیش‌بینی اسلامپ بتن پیشنهاد و بررسی شد. نتایج مدل پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی و همچنین مدل شبکه عصبی مصنوعی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که:

۱- با استفاده از روش‌های مبتنی بر محاسبات نرم و با داشتن تعداد کافی داده‌های آموزشی قبلی که حاصل آزمایشات و تجربیات موجود هستند، ضمن لحاظ نمودن خطا و عدم قطعیت موجود در داده‌ها می‌توان بدون نیاز به انجام آزمایش‌های پرهزینه، میزان اسلامپ بتن را برای مصارف مختلف ساختمانی پیش‌بینی نمود.

۲- مدل نروفازی تطبیقی پیشنهادی به دلیل دارا بودن همزمان ویژگی‌های یادگیری و حل مسائل شامل عدم قطعیت، اسلامپ بتن را با خطای کم‌تری پیش‌بینی می‌کند. کمتر بودن شاخص آماری جذر میانگین مربعات خطای مدل نروفازی تطبیقی نسبت به مدل شبکه عصبی مصنوعی، گواه این نتیجه است.

۳- ضریب همبستگی تقریبا برابری در خروجی‌های آزمایش اسلامپ حاصل از دو مدل نروفازی تطبیقی و شبکه عصبی مصنوعی موجود است، پس هر دو روش می‌توانند قابلیت پیش‌بینی اسلامپ را در حد مطلوب و مناسب داشته باشند.

۴- تنها با معرفی نوع و تعداد توابع عضویت، به یک مدل نروفازی تطبیقی مطلوب می‌رسیم. در صورتیکه در طراحی شبکه عصبی می‌بایست بهترین تعداد لایه‌های مخفی و تعداد نرون‌های این لایه‌ها با سعی و خطا بدست آید و در نتیجه رسیدن به بهترین مدل شبکه عصبی زمان‌بر خواهد بود. این امر علاوه براینکه یکی از دلایل تفاوت در خطای خروجی دو مدل است، می‌تواند یکی از دلایل برتری مدل نروفازی بر شبکه عصبی مصنوعی نیز باشد.
۵- یکی دیگر از دلایل تفاوت خطای خروجی دو مدل در پیش‌بینی اسلامپ، تفاوت در الگوریتم یادگیری آنها است. همانطور که در متن اشاره شد، الگوریتم یادگیری شبکه عصبی از نوع پس‌انتشار خطا ولی الگوریتم یادگیری سیستم نروفازی از نوع هیبریدی است.
۶- محاسبات نرم و به ویژه سیستم نروفازی تطبیقی در پیش‌بینی نتایج آزمایشگاهی با وجود داده‌های آموزشی قابل اعتماد است و ضمن در اختیار قرار دادن اطلاعات کلی به محقق بتن جهت جلوگیری از انجام طرح اختلاط‌های غیرکارا، صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای را در زمان و هزینه به همراه خواهد داشت.

در پایان لازم به ذکر است که با وجود ناچیز بودن خطای موجود در مدل نروفازی تطبیقی، به جهت هرچه دقیق‌تر شدن اسلامپ پیش‌بینی شده، در تحقیقات آینده بکارگیری روابطی جهت درنظرگیری حدود مشخصی برای مقادیر زبانی کم، متوسط و زیاد اسلامپ بتن با استناد به روابط موجود در تکنولوژی بتن توصیه می‌شود. همچنین مشابه اسلامپ، می‌توان سایر ویژگی‌های بتن همچون مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته و ... را با در دست داشتن داده‌های آموزشی مربوط به این ویژگی‌ها تخمین زد. بعلاوه می‌توان پیش‌بینی اسلامپ را با الگوریتم‌های دیگری از محاسبات نرم انجام داده و نتایج را با خروجی نتایج آزمایشگاهی و مدل پیشنهادی تحقیق مقایسه نمود.

مراجع

[1] Mehta, P. K. and. Monteiro, P. J. M. (1993). *Concrete-Structure, properties and materials*. USA: Prentice Hall.

[۲] طاحونی، ش: طراحی ساختمان‌های بتن‌مسلح، مؤسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، تهران، ۱۳۸۵.

[۳]اشرفی، ح: تکنولوژی، طرح مخلوط و ضوابط پذیرش بتن. انتشارات نورپردازان، تهران، ۱۳۹۱.

[۴]عفتی، م; قاسم‌زاده موسوی‌نژاد، س; فلاحتکار گشتی، م: (پیش‌بینی اسلامپ بتن با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی و روش رگرسیون چندمتغیره خطی). در حال چاپ در مجله علمی پژوهشی تحقیقات بتن دانشگاه گیلان.

[5]Gupta, P., Kulkarni, N. (2013). An Introduction of Soft Computing Approach over Hard Computing. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*, Volume3 (1), 258-264.

[6]Jang, J., Sun, C., and Mizutani, E. (1997). *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*. USA: Prentice Hall, 614p.

[7] Cheng, L., Wang, T. (2010). Modeling slump of concrete using the group method data handling algorithm. *Indian journal of engineering and material sciences*, Volume17, 179-185.

[8] Agrawal, V., Sharma, A. (2010). Prediction of Slump in Concrete using Artificial Neural Networks. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, Volume4 (9).

[9] Bilgil, A. (2010). Estimation of slump value and Bingham parameters of fresh concrete mixture composition with artificial neural network modeling. *Scientific research and Essays*, Volume5 (8), 1753-1765.

[10] Paratibha, A., Yogesh, A., Kapil, G., Ahmad Bhat, S. (2013). Prediction of slump and compressive strength of concrete containing foundry sand. *Research in civil and environmental engineering*, Volume1, 149-168.

[11] Lewis, HW. (1997). *The foundations of fuzzy control*. New York: Plenum Publishing Corporation.

[12] Zadeh, LA. (1965). *Fuzzy Sets, Information and control*. California, Volume8 (3), 338-353.

[13] Effati, M., Rajabi, M.A., samadzadegan, F., Shabani, Sh. (2014). A geospatial neuro-fuzzy approach for identification of hazardous zones in regional transportation corridors. *Int. J. Civil Eng*., Volume12 (3), 289-302.

[۱۴] منهاج، م: مبانی شبکه‌های عصبی. انتشارات دانشگاه امیرکبیر، تهران،۱۳۷۹.

[15] Mohabbi Yadollahi, M., Benli, A., Demirboga, R. (2016). Application of adaptive neuro-fuzzy technique and regression models to predict the compressive strength of geopolymer composites. *Neural Comput. & Applic*, DOI 10.1007/s00521-015-2159-6.

[16] Behfarnia, K., Khademi, F. (2017). A comprehensive study on the concrete compressive strength estimation using artificial neural network and adaptive neuro-fuzzy inference system. *Int. J. Optim. Civil Eng*., Volume 7(1), 71-80.

[17]ASTM C143-78, *standard test method for slump of Portland cement concrete*.