شبیه‌سازی واحد کک‌ساز تأخیری توسط شبکه عصبی مصنوعی

غلامرضا زاهدی*- زهره کرمی

کرمانشاه، دانشگاه رازی، گروه مهندسی شیمی، مرکز شبیه‌سازی و هوش مصنوعی

پیام‌نگار: **grzahedi@razi.ac.ir**

چکیده

در این مقاله، مدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی خروجی‌های واحد کک‌ساز تأخیری[1] معرفی شده است. در این روش پیش‌بینی، داده‌های مختلف صنعتی جهت شبیه‌سازی واحد کک‌ساز تأخیری جمع‌آوری شده‌اند. API و درصد CCR[2] به عنوان ورودی‌های شبکه و درصد وزنی کک، گازهای سبک، بنزین، گازوییل و درصد C_5^+ به عنوان خروجی شبکه در نظر گرفته شده‌اند. ۷۰ درصد داده‌ها جهت آموزش شبکه عصبی و تعیین بهترین ساختار و نوع شبکه برای مدلسازی واحد، مورد استفاده قرار گرفته است. از بین شبکه‌ها، شبکه عصبی چند لایه پیشرو بهترین شبکه با الگوریتم آموزش LM[3] با در نظر گرفتن ۳۱ نرون در لایه میانی بدست آمد. در ادامه تحقیق، شبکه‌های شعاعی نیز بررسی شدند و در نهایت در مقایسه با بهترین شبکه عصبی چند لایه، شبکه عصبی شعاعی میزان خطای کمتری در پیش‌بینی نتایج داشت و در نتیجه به عنوان شبیه‌ساز واحد تشکیل کک استفاده گردید. شبکه قدرت بسیار خوبی در پیش‌بینی نتایج واحد برای ٪ ۳۰ داده‌های مشاهده نشده را داشت. نتایج بدست آمده حاکی از این بود که شبکه عصبی شعاعی قادر است خروجی‌های واحد کک‌ساز تأخیری را با دقت بسیار بالایی پیش‌بینی نماید.

کلمات کلیدی: واحد کک‌ساز تأخیری، شبکه عصبی مصنوعی، شبیه‌سازی

۱ـ فرایند کک‌ساز تأخیری

در اوایل سال ۱۹۳۰ برای اولین بار فرایند کک‌ساز تأخیری به عنوان یک فرایند پالایشگاهی مطرح شد. در پالایشگاه‌ها از باقیمانده مواد کراکینگ شدید حرارتی، کک ناخواسته در گرمکن‌ها ته‌نشین می‌شد. بتدریج در پالایشگاه‌ها یاد گرفتند که گرمکن‌هایی را طراحی کنند تا بتوانند خوراک باقیمانده را تا دمای بالاتر از تشکیل کک گرم کنند بدون اینکه کک در گرمکن‌ها تشکیل شود که این عمل به سرعت بالا (کمترین زمان اقامت) در گرمکن نیاز دارد. تهیه یک درام عایق در گرمکن زمان کافی برای انجام تشکیل کک را قبل از انجام فرایند بعدی فراهم می‌کند این فرایند، *کک‌سازی تأخیری* نام دارد. واحد کک‌ساز تأخیری شامل قسمت‌های زیر است:

دو محفظه یا ستون کک، تفکیک‌کننده، کوره کک‌ساز، درام کندانس شدن، سیستم بازیافت گرما، برج عریان‌ساز برای نفت گاز سبک و تبادلات وابسته، پمپ‌ها و مخزن‌ها. محصولات واحد کک‌ساز تأخیری شامل گازهای سبک (بوتان و گازهای سبک‌تر از آن)، نفتا، نفت گاز سبک، نفت گاز سنگین و کک است.

1. Delayed Coking
2. Cat. Cracker
3. Levenberg Marquart

۲ـ شرح فرایند

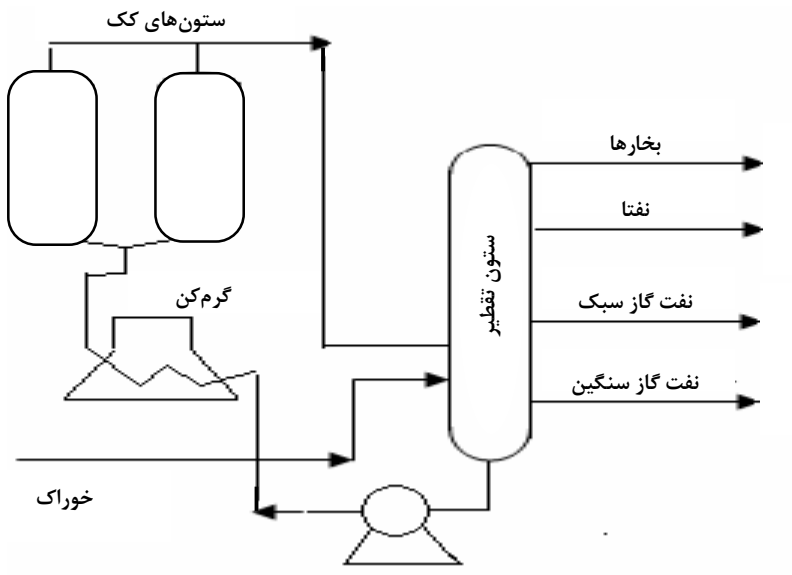
شکل (۱) شمایی از یک واحد کک‌ساز تأخیری را نشان می‌دهد. خوراک تازه مستقیماً وارد تفکیک‌کننده می‌شود. پمپی که در زیر تفکیک‌کننده قرار دارد خوراک تازه را با جریان برگشتی ترکیب کرده و به کوره می‌فرستد. نفت در کوره به سرعت تا دمای بالای ۹۰۰ درجه فارنهایت گرم می‌شود. طراحی گرمکن‌ها باید به دقت انجام شود تا مانع از تشکیل کک نابهنگام در لوله‌های گرمکن شود. مخلوط مایع و بخار، کوره را به سمت یکی از ستون‌های تشکیل کک ترک می‌کند و مایع محبوس شده در این ستون به کک و بخارات سبک هیدروکربن تبدیل می‌شود.

یک واحد کک‌ساز تأخیری دارای دو ستون یا درام تشکیل کک است در حالی که کک در یکی از ستون‌ها تشکیل می‌شود از دیگری کک گرفته می‌شود. اندازه ستون‌ها اغلب باید برای یک سیکل عملیاتی ۴۸ ساعته طراحی شوند. در طول دوره ۲۴ ساعته، کک در یکی از ستون‌ها ته‌نشین می‌شود و هنگامی که کک به سطح تعیین شده در ستون برسد جریان به ستون بعدی رفته و فرایند ادامه می‌یابد. گرفتن کک از ستون‌ها به روش هیدرولیکی یعنی با استفاده از پرتاب آب فشار بالا انجام می‌شود در طرح‌های جدید فشار آب از psig ۳۰۰۰ تجاوز می‌کند [۱]. بخارها از بالای ستون کک به سمت پایین تفکیک‌کننده می‌روند تا به نفتا، نفت گاز سبک و سنگین و جریان برگشتی تفکیک شود که این مسیر در زیر شرح داده شده است :

جریان مایع و بخاراز بالای تفکیک‌کننده خارج می‌شود. جریان مایع مستقیماً به بالای جاذب می‌رود و جریان بخار متراکم و سرد می‌شود، جریان مایع و بخار حاصله به ستون‌های عریان‌ساز جاذب فرستاده می‌شود. جریان بخار به انتهای جاذب و مایع به بالای عریان‌ساز می‌رود. محصولات پایینی عریان‌ساز شامل پروپان و مواد سنگین‌تر از آن است که در خوراک وجود داشته و جریان بالاسری جاذب شامل اتان و مواد سبک‌تر از آن می‌باشد. به همراه جریان بالاسری، مقداری هم پروپان و مواد سنگین‌تر از آن وجود دارد که تبدیل نشده‌اند و به تفکیک‌کننده برگشت داده می‌شوند. جریان پایین عریان‌ساز به برج جداسازی بوتان[1] فرستاده می‌شود. پروپان و بوتان به عنوان محصولات بالاسری و نفتا به عنوان محصول پایین برج از آن خارج می‌شوند.

۳ـ شبکه عصبی مصنوعی

شبکه عصبی یک مدل القاکننده ساختار و توابع نورون‌ها است. یک شبکه مرکب از واحدها و گره‌ها که نمایش‌دهنده رشته‌های عصبی بدن است. واحدها، حلقه‌های به هم پیوسته‌ای هستند که در واقع شبیه اکسون‌ها و دندریتها عمل می‌کنند.



شکل ۱ـ شمایی از واحد ککساز تأخیری

1. De-Butanizer

شکل (۲) نوع خاصی از شبکه عصبی مصنوعی را نشان می‌دهد. در این شکل لایه ورودی، لایه میانی و لایه خروجی نشان داده شده است. در این شبکه هر زوج خط با یک وزن به هم متصل شده‌اند. دو توانایی مهم شبکه‌های عصبی، پاسخ‌دهی سریع به مسایل و توانایی عمومیت دادن این جواب‌ها به نمونه‌های مشاهده نشده در صورت پذیرفته شدن نتایج است. به همین دلیل، باید با مسایل و یادگیری عادی شبکه که تعلیم فرایندها نامیده می‌شود آشنایی پیدا کرد. یکی از نمونه‌های معروف شبکه‌های عصبی شبکه پیشرو[1] چند لایه‌ای است که برای رده‌بندی و تخمین زدن مشکلات شبکه استفاده می‌شود. یک مثال از شبکه‌های لایه‌دار در شکل (۲) نشان داده شده است.

در این ساختار L لایه ورودی، M لایه میانی و N لایه خروجی وجود دارد. خروجی j امین لایه میانی بوسیله ترکیب خطی از L لایه ورودی بصورت زیر به دست می‌آید:

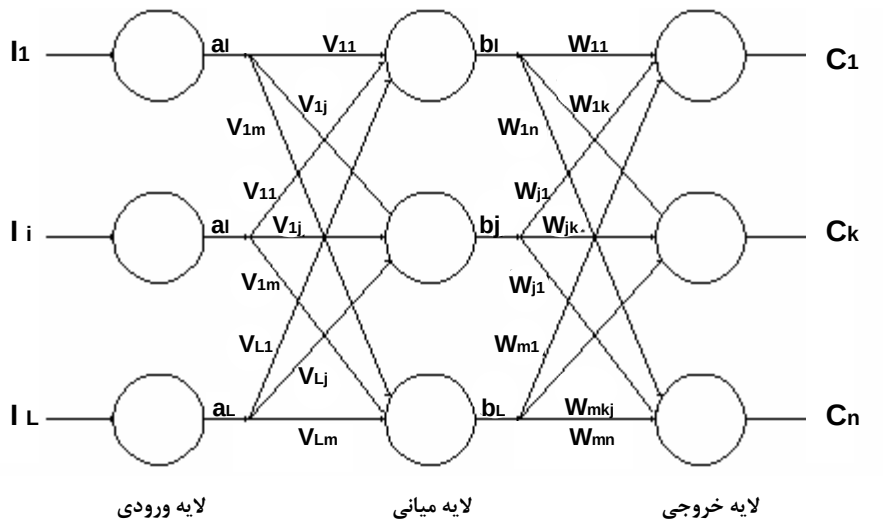
$$\sum \upsilon_{ij} a_j \qquad (۱)$$

که در آن V_{ij} وزن‌ها هستند، i اندیس لایه میانی و j اندیس لایه ورودی است. برای نرون j خروجی به صورت زیر با استفاده از تابع محرک f به دست می‌آید:

$$b_j = f(\sum_{i=0}^{L} \upsilon_{ij} a_j) \qquad (۲)$$

آموزش شبکه عصبی مصنوعی یک فرایند بهینه‌سازی است که درآن تابع خطا به وسیله مطابقت با وزن‌های شبکه می‌نیمم می‌شود. هنگامی که الگوی آموزش داده‌های ورودی در شبکه معرفی می‌شود، شبکه عصبی، خروجی را محاسبه می‌کند و آنها را با خروجی‌های واقعی مقایسه می‌کند. از این تفاوت‌ها به وسیله تکنیک بهینه‌سازی برای آموزش شبکه استفاده می‌شود. تابع خطا مورد مطالعه در اینجا میانگین مربع خطاها[2] (MSE) است که با Ej به صورت زیر نشان داده شده است:

$$E_j = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(C_i - C_{ir})^2 \qquad (۳)$$



شکل ۲ـ ساختار یک شبکه عصبی مصنوعی پیشرو

1. Feed Forward
2. Mean Square Error

که در آن C_{ir} خروجی واقعی و C_i خروجی متناظر شبکه برای j این ورودی است. فرایند آموزش شبکه، مسیری از لایه ورودی به لایه خروجی برای محاسبه خروجی‌ها و یک مسیر عقب گرد[1] برای تصحیح وزن‌ها می‌باشد. این فرایند تا زمانی که Ej می‌نیمم شود ادامه دارد و هنگامی که خطای مقادیر آزمایش شده به کمترین مقدار برسد آموزش متوقف می‌شود[۲].

در کنار شبکه‌های پیشرو دسته‌ای از شبکه‌های عصبی در سال‌های اخیر شناخته شده‌اند که شبکه شعاعی[2] (RBF) نامیده می‌شوند. شبکه RBF نیز دارای سه لایه؛ ورودی، میانی با تابع محرک گوسین[3] و خروجی است. وزن حلقه‌های بین لایه‌های ورودی و میانی یک دسته واحد است و ثابت باقی می‌ماند. در هنگام آموزش لایه میانی یک تبدیل غیر خطی ثابت را اجرا می‌کند که فضای ورودی را به سمت یک فضای جدید ترسیم می‌کند. لایه خروجی یک ترکیب خطی را در این فضای جدید پیاده می‌کند. محاسبه خطاهای بین داده‌های تجربی و خروجی شبکه فرایند تا زمانی که به حداقل خطای مورد نظر برسیم ادامه دارد.

شبکه عصبی شعاعی، در واقع داده‌های مشابه را حول یک مرکز خوشه دسته‌بندی می‌کند. با توجه به این خاصیت شبکه‌های عصبی شعاعی نسبت به داده‌های دارای خطا، مقاوم هستند. در مقایسه با شبکه‌های عصبی پیشرو، شبکه‌های عصبی شعاعی قابلیت آموزش با داده‌های کمتری را دارا هستند و عموماً آموزش آنها راحت‌تر از شبکه‌های عصبی پیشرو می‌باشد.

در زمینه شبیه‌سازی واحدهای پالایشگاهی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی تا به حال تحقیقاتی چند صورت گرفته است [۷-۳]. با جستجوهای انجام شده تا به حال هیچ کاری در زمینه شبیه‌سازی واحد کک‌ساز تأخیری با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی انجام نگرفته است. مقاله حاضر، امکان پیش‌بینی خروجی واحد کک‌ساز تأخیری را صرفنظر از جزییات و اجزای داخلی واحد و با داده‌های متنوع خوراک جستجو می‌نماید. در این زمینه، ابتدا آرایش‌های مختلف شبکه عصبی پیشرو مورد بررسی قرار گرفته و بهترین ساختار جهت تخمین، به دست آمده سپس شبکه عصبی شعاعی نیز جهت پیش‌بینی خروجی‌های واحد استفاده شده است. در نهایت، بهترین شبکه جهت شبیه‌سازی انتخاب شده و قدرت تعمیم شبکه با استفاده از داده‌های مشاهده نشده مورد تحقیق قرار گرفته است.

۴ـ دسته داده‌ها

داده‌ها برای ساختن شبکه عصبی مصنوعی برای شبیه‌سازی از مرجع [۸] بدست آمده‌اند. API و CCR داده‌های ورودی و درصدکک، گاز، بنزین، گازوییل و C_5^+ خروجی‌های شبکه عصبی می‌باشند. لذا شبکه عصبی شامل ۲ لایه ورودی و ۵ لایه خروجی خواهد بود. ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش شبکه و ۳۰ درصد داده‌های باقیمانده برای تست شبکه استفاده می‌شود. در جدول (۱)، متغیرها و محدوده تغییرات آنها جهت شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB 7.1 نشان داده شده است

جدول ۱ـ متغیرهای شبکه عصبی و محدوده آنها

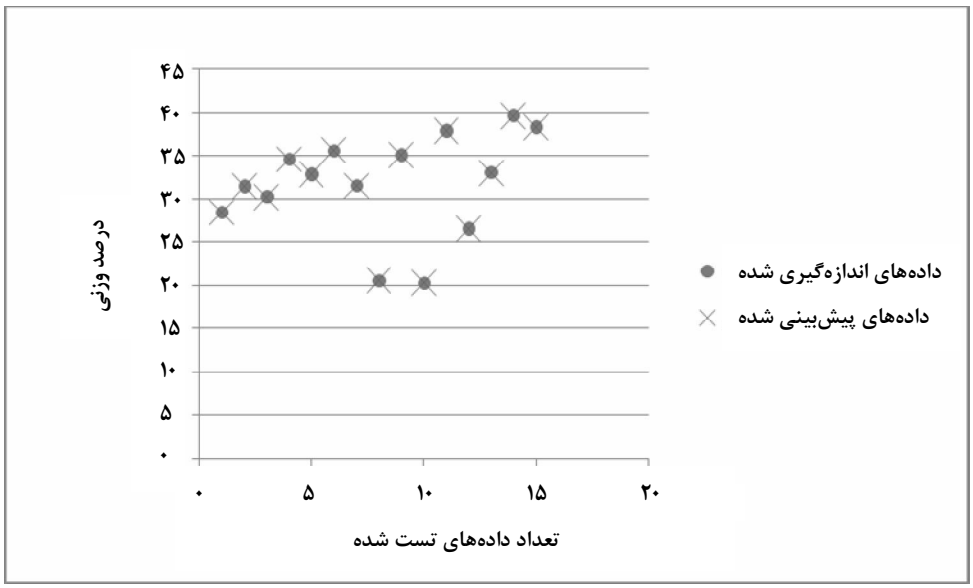
متغیرها	محدوده
API	۱/۴ – ۲۱/۵
درصد وزنی CCR	۲/۸۴ – ۲۵/۵
درصد وزنی کک	۴/۳۶ – ۳۹/۶
درصد وزنی گاز	۴/۰۴-۱۶/۷
درصد وزنی بنزین	۱۰/۳۵-۲۲/۲۸
درصد وزنی گازوییل	۲۸/۳-۶۹/۰۲
درصد وزنی C_5^+	۴۳/۷-۸۸/۱

۵ـ نتایج شبکه عصبی مصنوعی برای شبیه‌سازی واحد کک‌ساز تأخیری

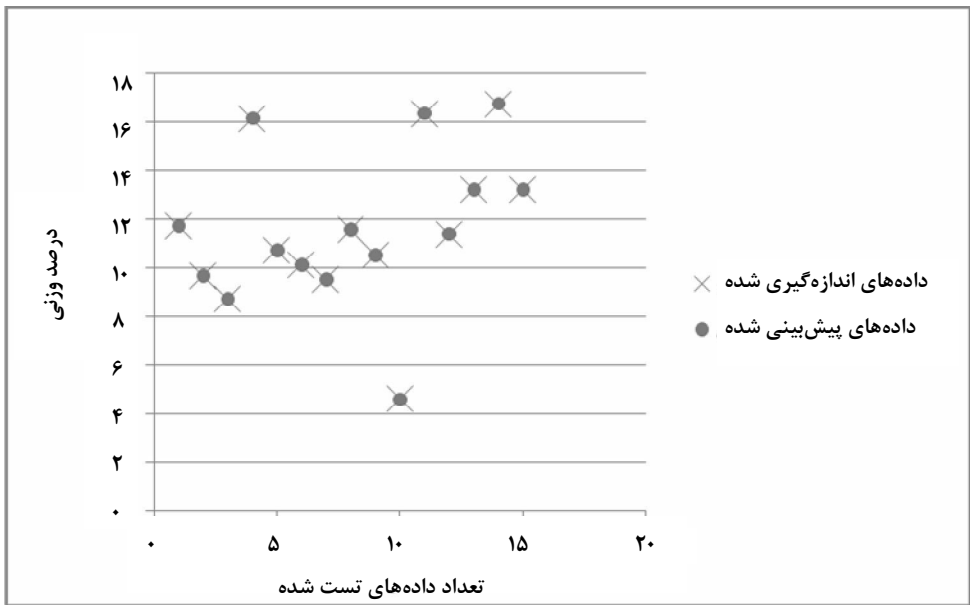
هدف در این قسمت پیدا کردن کارایی بهینه شبکه عصبی مصنوعی برای شبیه‌سازی واحد کک‌ساز تأخیری است؛ یعنی یافتن بهترین تعداد نرون در لایه میانی برای ارزیابی صحیح خروجی‌ها. برای تخمین خروجی‌های واحد تشکیل کک از دو شبکه پیشرو و شعاعی استفاده شده است. در روش اول؛ یعنی استفاده از شبکه پیشرو الگوریتم‌های مختلف آموزشی و همچنین تعداد مختلف نرون‌های میانی جهت آموزش بکار رفتند. در نهایت شبکه پیشرو با الگوریتم آموزشی LM [۹، ۲] با تعداد ۳۱ نرون در لایه میانی به عنوان بهترین شبکه به

1. Backward
2. Radial Basis Function
3. Gaussian

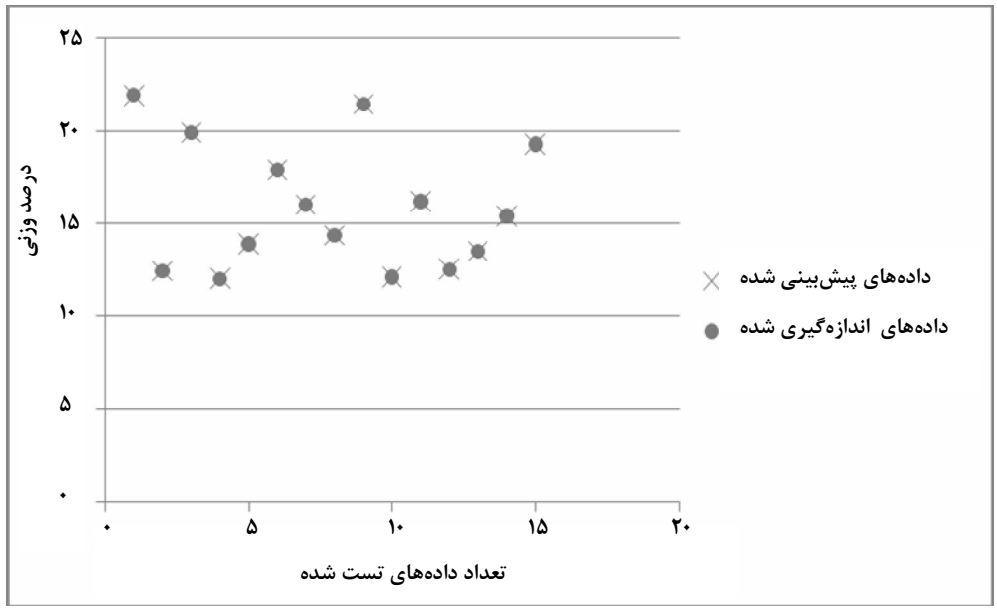
دست آمد. شکل (۳) تا (۷) قابلیت شبکه در تعمیم (پاسخ دقیق به ۳۰ درصد داده‌های مشاهده نشده) را نشان می‌دهد. برای هر خروجی داده‌های شبکه با داده‌های تجربی مشاهده نشده مقایسه شده است. داده‌ها همپوشانی و تطابق بسیار خوبی دارند. جهت آگاهی از مقدار دقیق خطا در شکل‌های فوق، مقدار خطا در شکل‌های (۸) تا (۱۳) رسم شده است. درصد خطا طبق این نمودارها عددی در حد 10^{-5} تا 10^{-3} است که بیانگر دقت بسیار بالای شبکه به دست آمده می‌باشد.



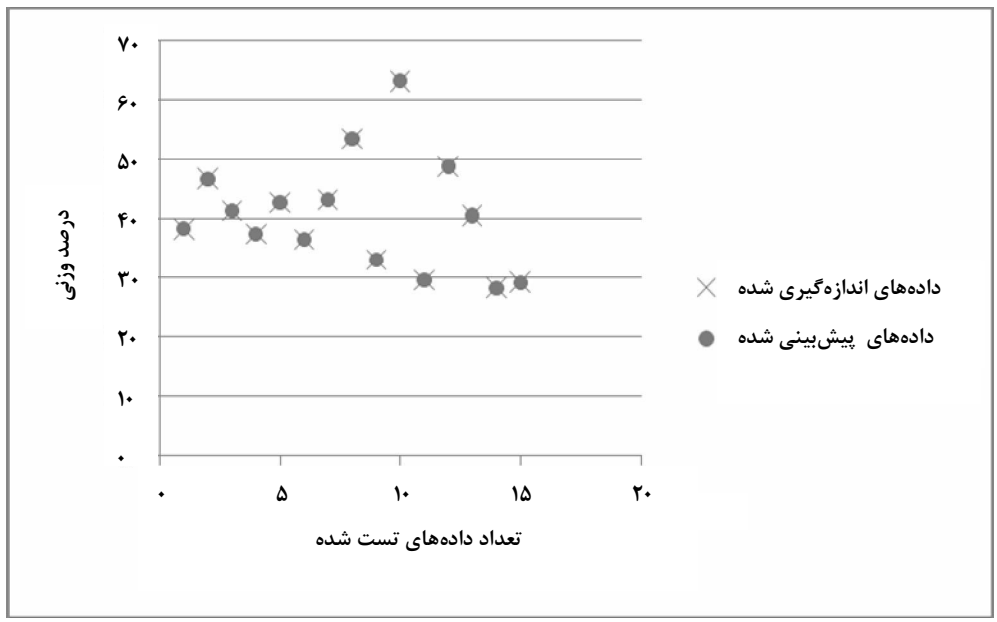
شکل ۳ـ مقایسه درصد وزنی کک اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی پیشرو



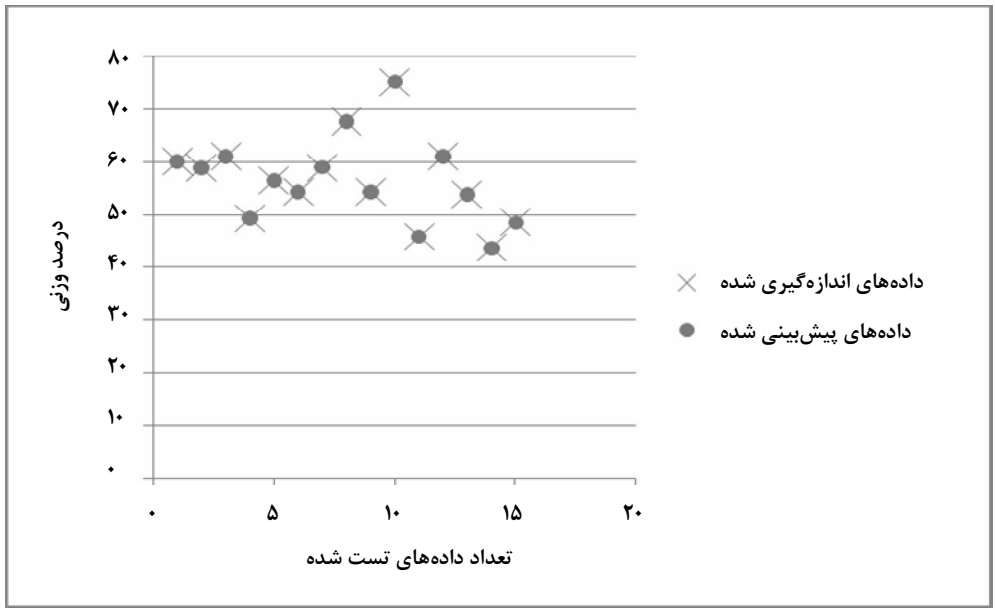
شکل ۴ـ مقایسه درصد وزنی گاز اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی پیشرو



شکل ۵ـ مقایسه درصد وزنی بنزین اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی پیشرو

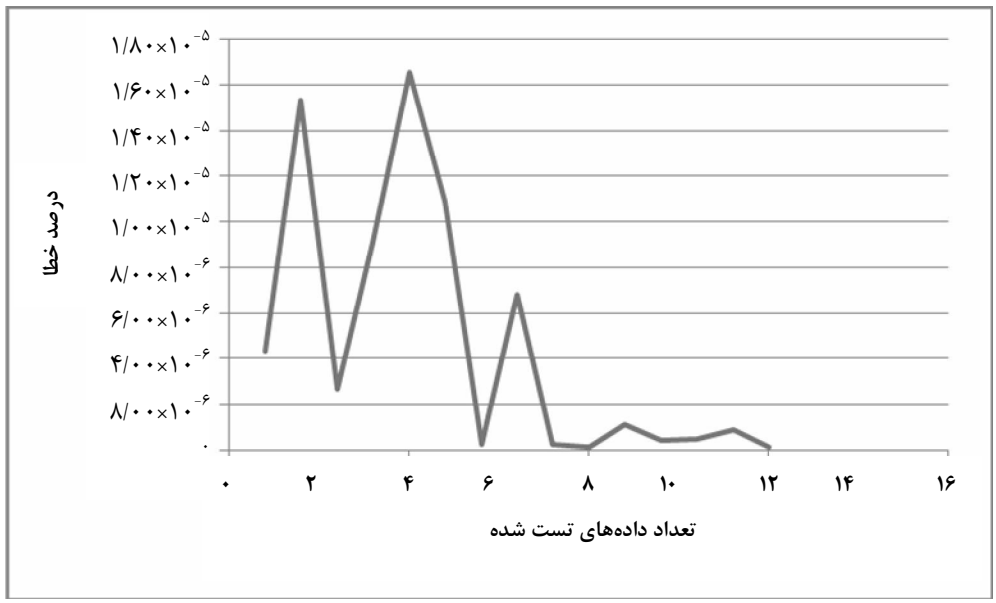


شکل ۶ـ مقایسه درصد وزنی گازوییل اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی پیشرو

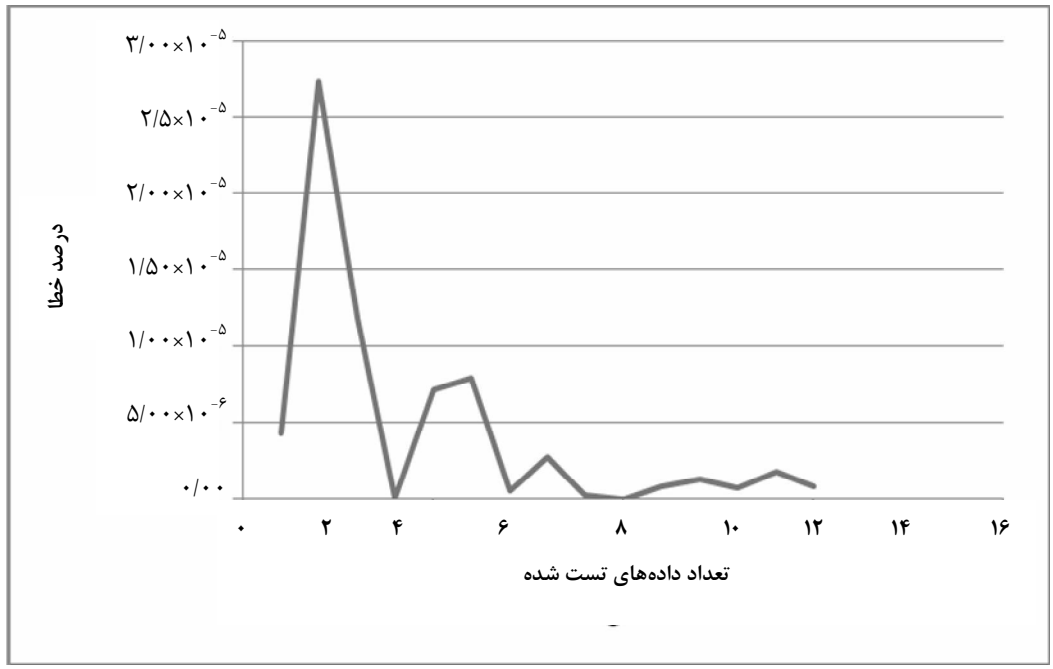


شکل ۷ـ مقایسه درصد وزنی C_5^+ اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی پیشرو

شکل‌های (۱۲–۸) درصد خطا برای خروجی‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط شبکه پیشرو را نشان می‌دهند.

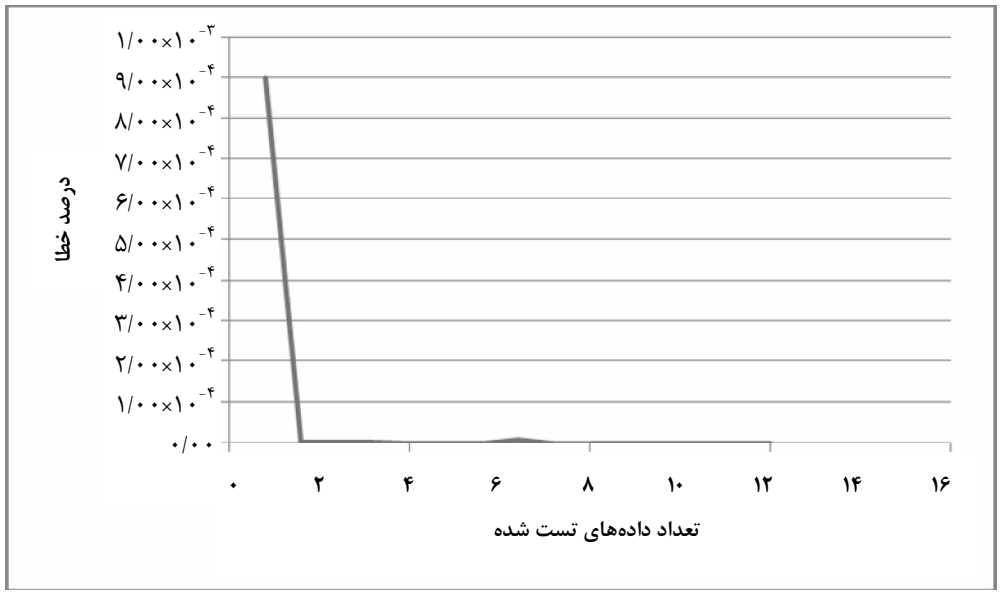


شکل ۸ـ درصد خطا بر حسب داده‌های تست شده برای کک خروجی در شبکه پیشرو

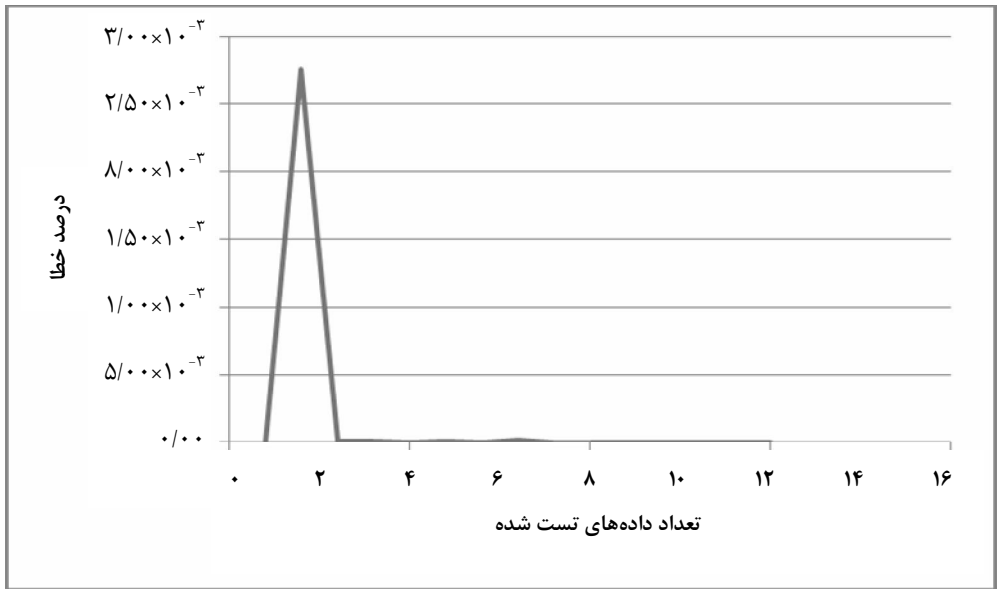


شکل ۹ـ درصد خطا بر حسب داده‌های تست شده برای گاز خروجی در شبکه پیشرو

شکل ۱۰ـ درصد خطا بر حسب داده‌های تست شده برای بنزین خروجی در شبکه پیشرو

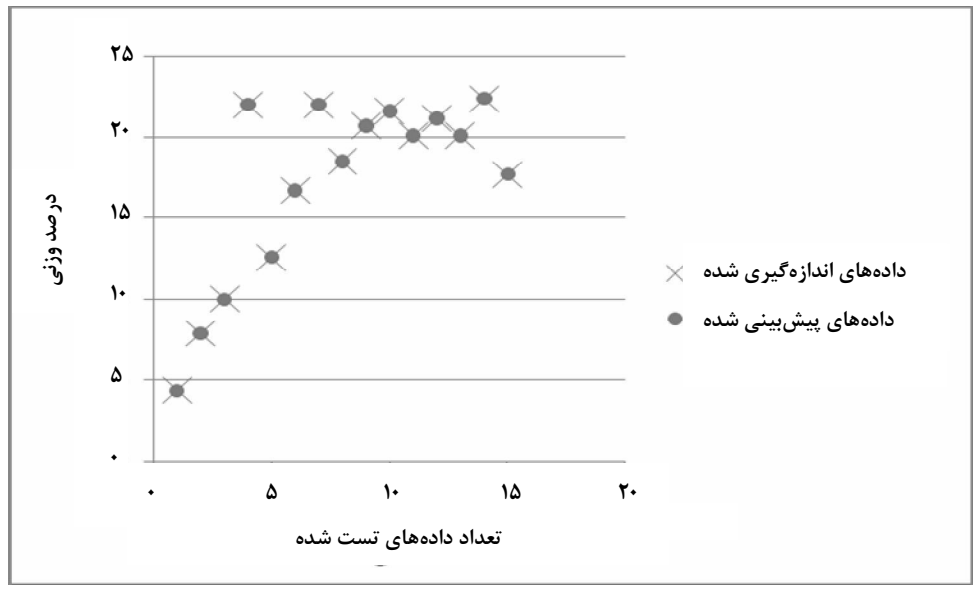


شکل ۱۱ـ درصد خطا بر حسب داده‌های تست شده برای گازوییل خروجی در شبکه پیشرو.

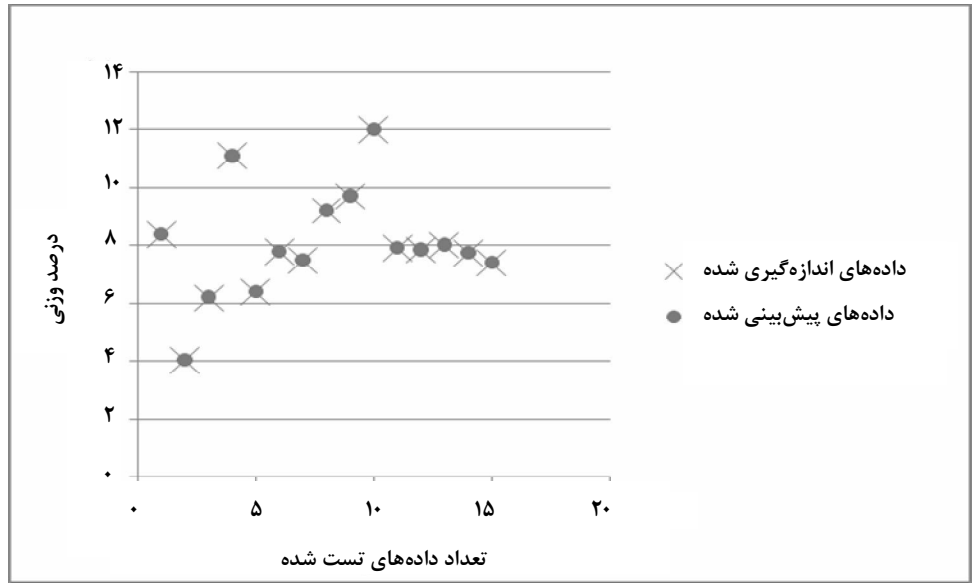


شکل ۱۲ـ درصد خطا بر حسب داده‌های تست شده برای C_5^+ خروجی در شبکه پیشرو.

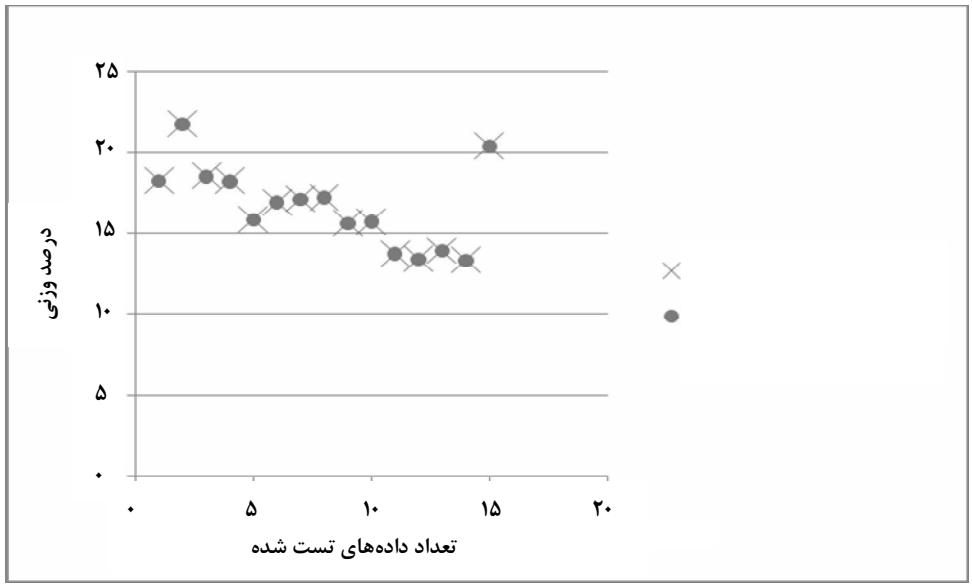
روش دوم؛ استفاده از شبکه عصبی شعاعی است. در این روش، در تعداد spreadهای مختلف شبکه آموزش داده شد و نهایتاً با ۲۰ spread بهترین شبکه به دست آمد. نتایج تعمیم شبکه حاصل برای پیش‌بینی داده‌های خروجی واحد برای داده‌های از قبل مشاهده نشده در شکل (۱۳) تا (۱۷) نشان داده شده‌اند. نتایج حاکی از تطابق بسیار عالی داده‌ها با پیش‌بینی شبکه می‌باشد.



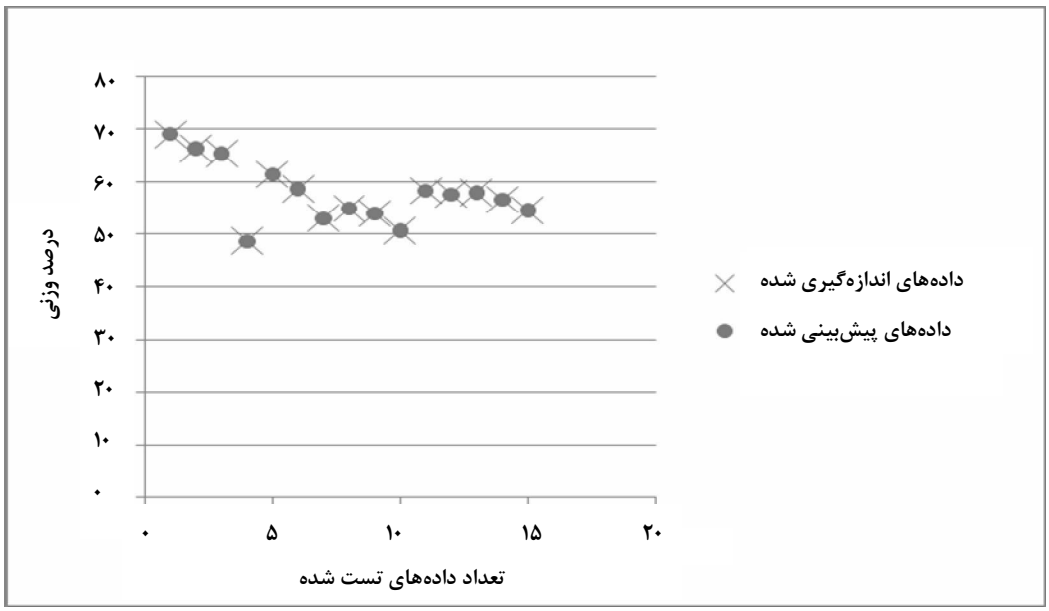
شکل ۱۳ـ مقایسه درصد وزنی کک اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط شبکه شعاعی



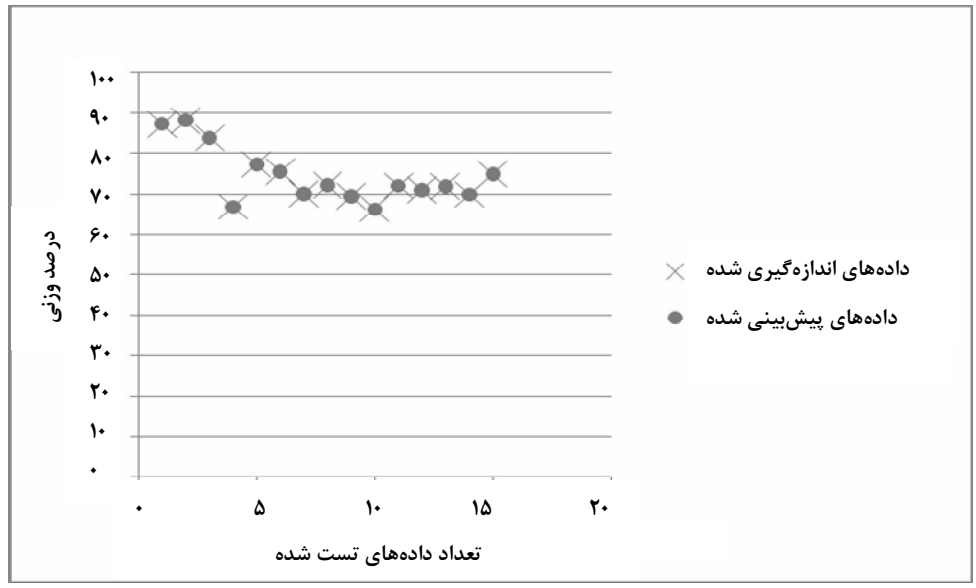
شکل ۱۴ـ مقایسه درصد وزنی گاز اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط شبکه شعاعی.



شکل ۱۵ـ مقایسه درصد وزنی بنزین اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط شبکه شعاعی.

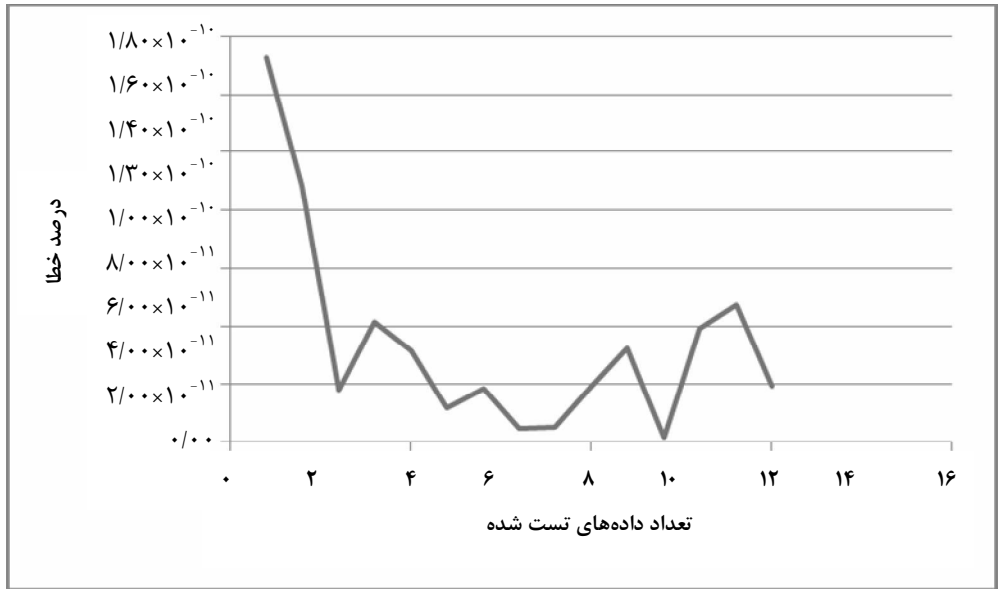


شکل ۱۶ـ مقایسه درصد وزنی گازوییل اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط شبکه شعاعی.

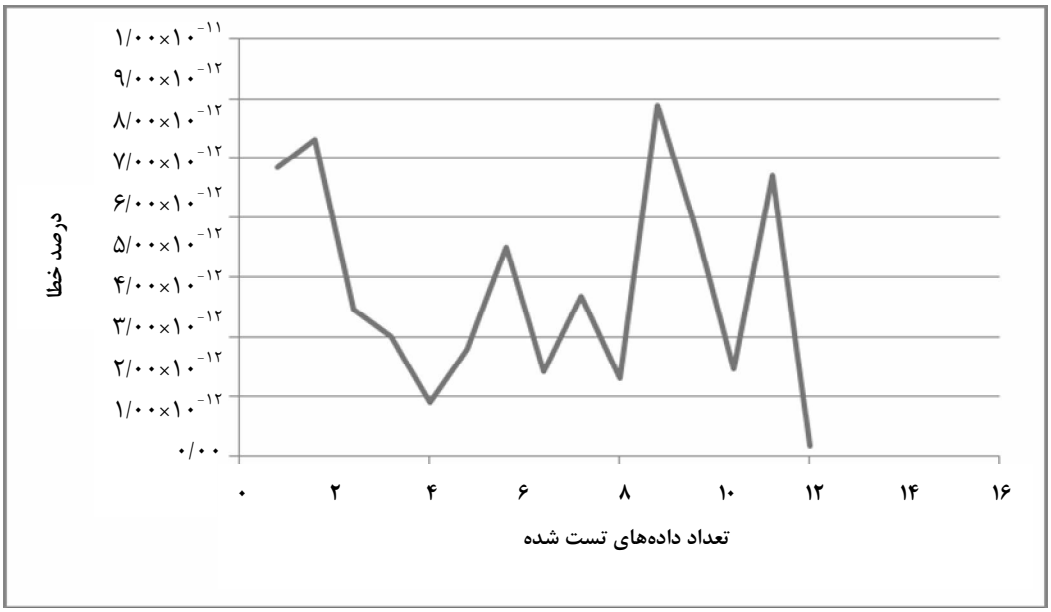


شکل ۱۷ـ مقایسه درصد وزنی C_5^+ اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط شبکه شعاعی.

جهت مقایسه دقیق خطا شکل ۱۸-۲۲ درصد خطا برای خروجی‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط شبکه شعاعی را نشان می‌دهند. با توجه به نتایج فوق درصد خطای پیش‌بینی برای شبکه عصبی شعاعی در حدود 10^{-10} تا 10^{-9} است که دقت بالاتری نسبت به شبکه پیشرو بوده و شبیه‌سازی بسیار مناسبی برای واحد کک‌ساز تأخیری می‌باشد.



شکل ۱۸ـ درصد خطا بر حسب داده‌های تست شده برای کک خروجی در شبکه شعاعی.



شکل ۱۹ـ درصد خطا بر حسب داده‌های تست شده برای گاز خروجی در شبکه شعاعی.

شکل ۲۰ـ درصد خطا بر حسب داده‌های تست شده برای بنزین خروجی در شبکه شعاعی.

شکل ۲۱ـ درصد خطا بر حسب داده‌های تست شده برای گازوییل خروجی در شبکه شعاعی.

شکل ۲۲ـ درصد خطا بر حسب داده‌های تست شده برای C_5^+ خروجی در شبکه شعاعی.

شکل‌های (۷-۳) و (۱۷-۱۳) مقایسه خروجی‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط شبکه را برای داده‌های تست شده نشان می‌دهد با توجه به منطبق بودن داده‌ها در همه شکل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که هر دو شبکه برای پیش‌بینی خروجی‌ها مناسب هستند. اما شکل‌های (۱۲-۸) و (۲۲-۱۸) که درصد خطا را برای هر دو شبکه نشان می‌دهد بیانگر این است که شبکه شعاعی برای پیش‌بینی خروجی‌ها دارای حدود خطای $۱۰^{-۱۰}$ و شبکه پیشرو دارای خطای $۱۰^{-۵}$است که نمایانگر دقت دو برابر شبکه شعاعی در مقایسه با شبکه پیشرو می‌باشد. در نتیجه درصد خطای خروجی‌های شبکه شعاعی کمتر است. علاوه بر آن، جهت مقایسه دقیق‌تر متوسط مقدار خطاها برای کل خروجی‌ها برای شبکه عصبی پیشرو و شبکه شعاعی در جدول (۲) نشان داده شده است. با توجه به داده‌های جدول، دو برابر بودن دقت شبکه عصبی شعاعی تأیید می‌شود.

جدول ۲ـ مقایسه MSE برای شبکه‌های عصبی شعاعی و شبکه پیشرو

شبکه عصبی	شبکه پیشرو	شبکه عصبی شعاعی
متوسط مقدار خطاها	$۱/۱۱۹۶ \times ۱۰^{-۱۱}$	$۷/۸۲۵۶ \times ۱۰^{-۲۲}$

در نتیجه می‌توان گفت با توجه به شکل‌ها و جدول‌های ارائه شده، دو شبکه پیشرو و شعاعی مدل‌های پیشرفته‌ای برای تخمین خروجی‌های واحد تشکیل کک تأخیری هستند؛ اما شبکه شعاعی برای پیش‌بینی خروجی‌های واحد تشکیل کک کارایی بهتری نسبت به شبکه پیشرو دارد. شبکه شعاعی تقریباً برای همه داده‌ها عمومیت دارد و تفاوت بین مقادیر موجود و پیش‌بینی شده در آن بسیار کم است که نشان‌دهنده توانایی شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی صحیح داده‌های مشاهده نشده است.

مراجع

[1] Campbell, D., M.T. Klein, "Stochastic approach for molecular modeling or delayed coker chemistry", AIChE meeting, paper 133e, Spring (1997).

[2] Blusari, A.B, Neural Networks for Chemical Engineers. Elsevier science Press, Amesterdam, (1995).

[3] ZAHEDI, G., "Identification of typical refinery hydrockracker unit with artificial neural network" University Teknologi MARA Pulau, Pinang, Malaysia, Dec, (2006).

[4] ZAHEDI, G., H. Fgaier, A.JAHANMIRI and G.Al-Enezi " Identification and evaluation of hydrotreater plant", Pet. Sci. and Tech., 24:1447–1456, (2006).

[5] Ramasamy, S., P.B. Desphande, G.E. Daxten, and R.P. Hajare, "Consider neural network for process identification", Hydrocarbon Processing, 59-62, (1995).

[6] Michalopoulos, J., S. Papadokenstadakis, G. Arampatzis, and A. Lygeres, "Modeling of an industrial fluid catalytic cracking unit using neural networks", Trans. IChemE, (2001).

[7] Al-Enezi G. and A. Elkamel, "Predicting the effect of feedstock on product yields and properties of the FCC process", Petroleum Science and Technology, 18 (3&4), PP. 407-428, (2000).

[8] Mapales, R.E., Petroleum refinery process economics", Penn Well Publication Company, Tulsa, Oklahoma, (1993).

[9] Joseph, B., F. H.wang, and P. S. Shieh, "Exploratory data analysis A comparision of Statistical methods with artificial Neural Network", Comp Chem. Eng., 16, 413, (1992).