

اندازه گیری pH محلول راکتور زیستی دارای شناساگر فنول رد با استفاده از پردازش تصویر و شبکه های عصبی RBF و ANFIS

علیرضا عابدینی مزرعه، علی رضا رضائی*، کوثر احمدی

دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده: در این پژوهش اندازه گیری pH محلول کشت در نظر گرفته شده و سامانه‌ی تعبیه شده‌ای طراحی شد تا به‌طور خودکار و بدون دخالت انسان بتواند pH را به صورت لحظه‌ای اندازه گیری کرده و به کنترل pH با سرعت بالاتر کمک کند. برای این منظور از پردازش رنگ محلول با دوربین و استفاده از الگوریتم‌های شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده و الگوریتم‌ها بر روی یک پردازنده پیاده‌سازی شد. شبکه توسط داده‌های آزمایشگاهی محلول مانند آموزش داده شد. تعداد لایه‌های شبکه RBF سه و ورودی‌ها در سه دسته RGB به شبکه داده شد و نسبت به محلول استاندارد خطای RBF در خطای آموزش به ۰٫۳۵ و خطای تست به ۰٫۱ رسید و در شبکه ANFIS مقدار خطای آموزش کم‌تر از ۰٫۰۶ و خطای آزمون به کم‌تر از ۰٫۰۱ رسید که نشان می‌دهد دقت بالاتری نسبت به شبکه RBF دارد. این درصد خطا با ۳۷ محلول گوناگون به دست آمد. با افزایش تعداد آن می‌توان این خطا را نیز کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: راکتور زیستی؛ شبکه عصبی؛ سامانه‌های Embedded، pH.

KEYWORDS: Bioreactor; Neural network; Embedded system; pH.

مقدمه

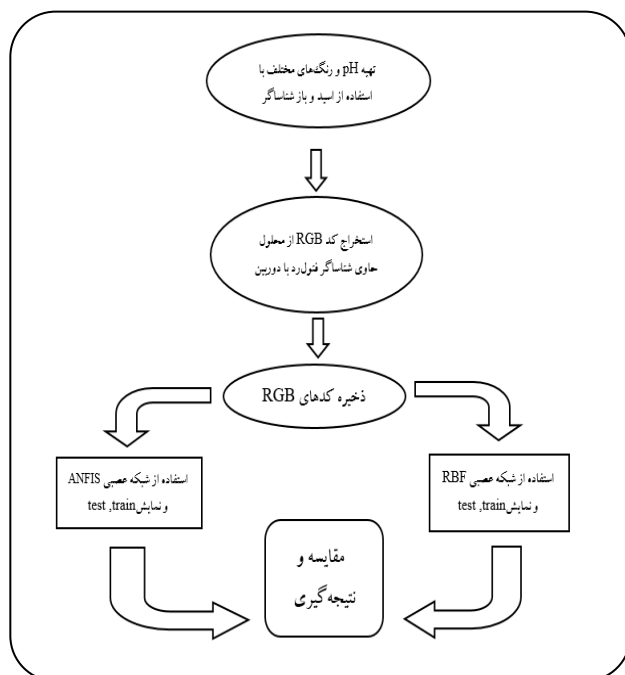
در این دستگاه برای اندازه گیری pH [۳]، برای ایزوله بودن ظرف دارای محلول داخل ظرف نمونه گرفته می‌شود و سپس مورد آزمایش قرار می‌گیرد. در [۴] یک حسگر pH مبتنی بر گوشی هوشمند که قادر به اندازه گیری سطح آب آبی رنگی است، پیشنهاد شده است. معیارهای عملکردی مورد بررسی برای حسگر طراحی شده نشان دهنده دقت، صحت، روشنی و رزولوشن بالا تا 0.12 pH و یا بیش‌تر است. در این مقاله توانایی حسگر pH گوشی هوشمند را برای اندازه گیری تغییرهای کوچک pH نمونه‌های گوناگون محلول با دقت و روشنی خوبی نشان داده شده است. به دلیل اندازه کوچک، حسگر طراحی شده را می‌توان برای انتقال اطلاعات pH از جسم آب در هر محیطی استفاده کرد.

فرمانتور یا راکتور زیستی دستگاهی است که شرایط بهینه را برای رشد میکروارگانیسم‌ها مانند قارچ و باکتری و مخمر فراهم می‌کند. میکروارگانیسم‌ها در این شرایط ویژه، بهتر و بیش‌تر رشد و فعالیت خواهند کرد. در [۱] از یک PID برای کنترل pH سامانه استفاده شده که نتیجه‌های نه چندان دلخواهی را به همراه داشته است. همچنین در این مطالعه برای بهبود کار از مخلوط کن دوگانه استفاده شده است.

استفاده از فرمانتور به میکروارگانیسم‌ها این اجازه را می‌دهد که پیش از انتقال به مرحله تولید بیش از ده نسل رشد کنند، با این دستگاه می‌توان پارامترهای دما و فوم، دور موتور، مقدار اکسیژن و pH [۲] را اندازه‌گیری و کنترل کرد، فرمانتور و راکتور زیستی برای کشت سلول‌های جانوری و گیاهی هم استفاده می‌شوند.

*E-mail: arrezade@ut.ac.ir

*عهده دار مکاتبات



شکل ۱- فلوجارت کارهای انجام شده در این مقاله.

به 250 CC می‌رسانند. pHهای گوناگون را در شیشه‌های یک شکل مطابق شکل ۲ درست کرده و به مقدار مشخص، فنول رد را در شیشه‌ها ریخته و هم زده تا رنگ محلول ثابت شود سپس حسگر رنگ کد رنگ‌های به دست آمده را اندازه‌گیری می‌کند. در جدول ۱ رنگ مربوط به هر pH نشانگر میزان درصد رنگ‌های گوناگون در آن می‌باشد. این رنگ‌ها بین ۰ تا ۲۵۵ است.

استخراج کد RGB از محلول دارای شناساگر فنول رد

با استفاده از نرم‌افزار متلب و دوربین، برنامه متلب کد RGB را از محلول خوانده و به صورت جدول ۱ ذخیره می‌کند. در این روش دوربین بازه‌ی تعیین شده را برای پردازش به متلب فرستاده و نرم‌افزار با استفاده از میانگین‌گیری از بازه‌ی مشخص شده کد RGB را نمایش می‌دهد. با توجه به شکل (۲) که برای pHهای گوناگون به دست آمده، دوربین کد RGB را پس از فیلتر کردن خوانده و برای پردازش به نرم‌افزار متلب منتقل می‌کند. در پایان با استفاده از شبکه عصبی [۱۱] RBF و ANFIS داده‌ها را از دوربین گرفته و پردازش کرده و خروجی pH با استفاده از شبکه عصبی نمایش داده می‌شود. در پایان مقدار خطای خروجی بین هر دو شبکه مقایسه و نمایش داده می‌شود.

همچنین در [۴] دیده می‌شود که طبق [۵] بازه انتخابی محدود بوده و از دقت پایینی برخوردار می‌باشد.

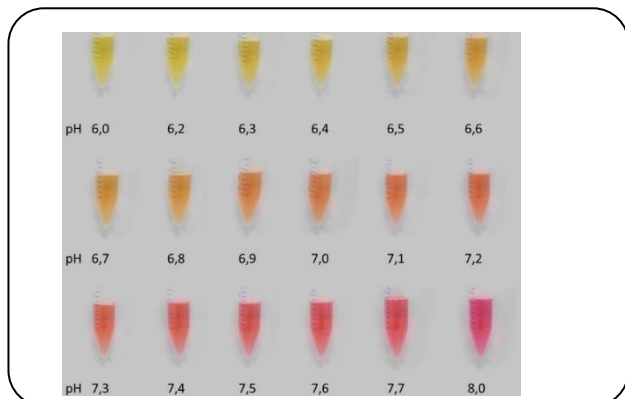
در این مطالعه اندازه‌گیری pH نسبت به ناظری که با دیدن تغییرهای رنگ شناساگر را می‌بیند، انجام گرفته شده است. این کار نسبت به کارهای پیشین با دقت و سرعت بالاتری انجام شده است [۶]. در این مقاله از داده‌های دریافت شده از دوربین [۷] استفاده شده و بر مبنای پردازش تصویر برای تشخیص رنگ محلول [۸، ۹] و استفاده از فیلترهای گوناگون کار انجام گرفته است. در پایان برای پردازش داده‌ها و تشخیص دقیق میزان pH از شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده شده و برای آموزش شبکه از داده‌های استاندارد استفاده شده و شبکه با داده‌های واقعی مورد آزمایش قرار گرفته است. در مقایسه با [۱۰] اندازه‌گیری به وسیله دوربین دقت بالاتری نسبت به حسگر داشته و استفاده از ANFIS میزان خطا را کاهش داده است. در پایان خطای RBF در خطای آموزش به ۰٫۳۵ و خطای تست به ۰٫۱ رسیده و در شبکه ANFIS مقدار خطای آموزش کمتر از ۰٫۰۶ و خطای تست به کمتر از ۰٫۱ رسیده که نشان می‌دهد دقت بالاتری نسبت به شبکه RBF دارد. شکل ۱ فلوجارت کارهای انجام شده در این مطالعه را نشان می‌دهد.

در بخش بعدی چگونگی اندازه‌گیری رنگ pHهای گوناگون مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس استخراج کد RGB از محلول دارای شناساگر فنول رد و عامل‌های تأثیرگذار بر روی اندازه‌گیری از جمله عامل‌های فیزیکی خارجی و عامل نویز داخلی مورد بررسی قرار گرفت. آنگاه ورودی‌های دوربین وارد برنامه متلب شده و با استفاده از شبکه عصبی RBF و ANFIS مقدار خطای اندازه‌گیری شده و در بخش بعد نتیجه‌های شبیه‌سازی و سرانجام نتیجه‌گیری و مقایسه آورده شده است.

تهیه pH و رنگ‌های گوناگون با استفاده از اسید و باز شناساگر

برای اندازه‌گیری pHهای گوناگون نخست از شناساگر مناسب با محیط راکتور زیستی استفاده کرده و بر این اساس اندازه‌گیری pH را انجام می‌دهند. یکی از شناساگرهای مورد استفاده در کشت سلولی "فنول رد" است. بازه تغییر رنگی فنول رد از بازه ۴ تا ۱۰ است؛ pH مناسبی که مورد نظر این مقاله است، ۶ تا ۸ می‌باشد، که در این بازه تغییرهای رنگ از زرد به ارغوانی تغییر می‌کند.

برای تهیه فنول رد ۰٫۱ گرم پودر فنول رد را در 14.2 CC سدیم هیدروکسید ۰٫۰۲ مولار ترکیب کرده و حجم محلول را



شکل ۳- اندازه گیری RGB، pH های گوناگون با استفاده از دوربین.

با توجه به جدول ۱ دیده می شود که تغییرهای رنگ pH در بازه ۴٫۵ تا ۹٫۵ به صورت منظم تغییر می کند و با ذخیره کد RGB گرفته شده با دوربین می توان با استفاده از شبکه عصبی مقدار pH را اندازه گرفت.

استفاده از فیلترهای گوناگون برای حذف نویز تصویر

رفتار نویز در حس گرهای تصویربرداری دیجیتال، اطلاعات به دست آمده را به شدت تخریب می کند. نویز در حس گرهای تصویربرداری دیجیتال امری اجتناب ناپذیر است [۱۳] که منشأ آن هم از درون حس گر و هم از محیط اطراف آن است. در ضمن نویز غالب در همه حس گرها نویز گرمایی است که ناشی از حرکت الکترون ها بر اثر گرما است. این نویز در بیش تر قطعه های الکترونیک به وجود می آید و هر چه قطعه های بیش تر به صورت مداوم کار کنند و گرم تر شوند نویز غالب در این قطعه ها نویز گرمایی خواهند بود. در حس گرهای تصویربرداری این نویز را به صورت یک فرایند گوسی با میانگین صفر در نظر گرفته شده است. از نظر تئوری این نویزها همه به صورت یک فرایند جمع شونده با میانگین صفر با تصویر اصلی هستند. پس به دست آوردن انحراف معیار این نویزها بسیار دارای اهمیت است [۱۴]. در حالت کلی، مدلی که برای فرایند تخریب توسط نویز و تابع تخریب و بازسازی دوباره تصویر در نظر گرفته می شود، مطابق شکل ۴ است.

در روش ارایه شده در این مقاله ادعا می شود، میانگین تصویرهای ارایه شده، همان امید ریاضی $f(x,y)$ است. چنانچه $g(x,y)$ به دست آمده مخدوش شدن تصویر اولیه $f(x,y)$ توسط تابع نویز باشد یا به عبارت دیگر:



شکل ۲- نمونه های آزمایشگاهی در pH های متفاوت.

عامل هایی که باعث ایجاد اختلال در خواندن دوربین می شوند

عامل هایی که در اندازه گیری تأثیرگذار است، شامل نور محیط، ظرف دارای محلول و زاویه قرار گرفتن دوربین می باشد که با ثابت قرار دادن دوربین در محل مناسب پوشیده و قرار دادن آن در محفظه ای با نور ثابت، عامل های تأثیرگذار بر روی اندازه گیری دوربین به کمینه می شود.

دوربین در محل مناسب قرار گرفته و pH های گوناگون از بازه ۴٫۵ تا ۹٫۵ را اندازه می گیرد و با حس گر pH مقدار pH هر شیشه اندازه گرفته می شود. سپس مقادیرهای RGB هر pH را دوربین خوانده و به نرم افزار می فرستد و در پایان مقادیرهای به دست آمده ذخیره می شود.

اندازه گیری رنگ به وسیله دوربین

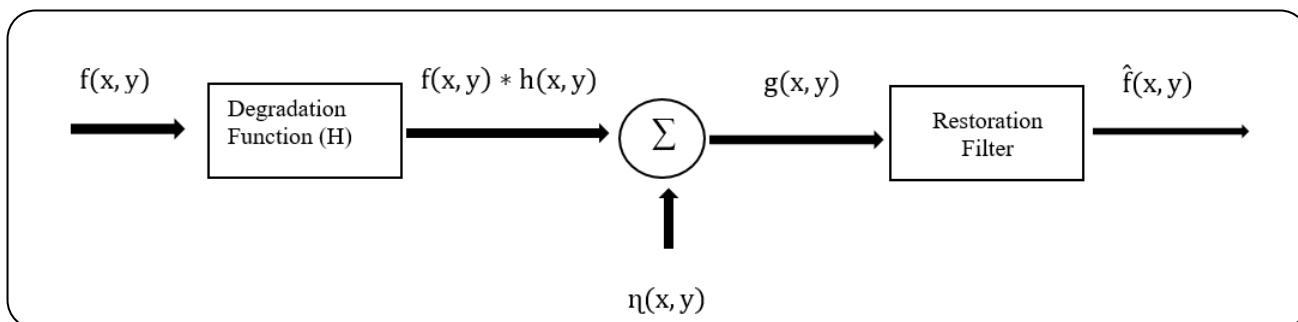
نخست با استفاده از نرم افزار متلب دوربین از جسم موردنظر عکس گرفته سپس بازه ی تصویر که ذخیره شده را انتخاب کرده تا بتوان رنگ موردنظر را اندازه گرفت [۱۲]. در این روش دوربین بازه ی تعیین شده را برای پردازش به متلب فرستاده و نرم افزار با استفاده از میانگین گیری از بازه ی مشخص شده کد RGB را نمایش می دهد. با توجه به شکل ۲ که برای pH های گوناگون به دست آمده با دوربین کد RGB را پس از فیلتر کردن خوانده و برای پردازش اطلاعات به دست آمده را به نرم افزار متلب منتقل می کند.

در شکل ۳ به وسیله دوربین رنگ pH های گوناگون اندازه گرفته شده و کد رنگ آن در متلب نمایش داده شده است. در این آزمایش pH های گوناگون از بازه ۴٫۵ تا ۹ با استفاده از شناساگر اندازه گیری شده و با دوربین کدهای RGB آن خوانده شده و در جدول ۱ مقادیرهای اندازه گرفته شده آورده شده است.

جدول ۱- داده‌هایی که توسط حس گر در pH های گوناگون گرفته شده است.

pH	۷.۳	۷.۴	۷.۵	۷.۶	۷.۷	۸	۸.۱	۸.۲	۸.۳	۸.۴	۸.۵	۸.۶	۸.۷	۸.۸	۸.۹	۹	۹.۵
R	۲۳۰	۲۳۵	۲۳۶	۲۳۷	۲۳۸	۲۴۰	۲۴۰	۲۴۱	۲۴۲	۲۴۳	۲۴۴	۲۴۴	۲۴۵	۲۴۶	۲۴۷	۲۴۸	۲۴۸
G	۱۶۴	۱۶۰	۱۵۹	۱۵۶	۱۵۵	۱۵۰	۱۴۸	۱۴۷	۱۴۵	۱۴۴	۱۴۳	۱۴۲	۱۴۰	۱۳۸	۱۳۶	۱۳۳	۱۳۱
B	۱۶۸	۱۶۸	۱۷۵	۱۷۶	۱۷۸	۱۸۰	۱۸۲	۱۸۳	۱۸۵	۱۸۷	۱۸۸	۱۸۹	۱۹۱	۱۹۳	۱۹۳	۱۹۵	۱۹۶

pH	۴.۵	۵	۵.۲	۵.۴	۵.۵	۵.۶	۵.۸	۵.۹	۶	۶.۲	۶.۳	۶.۴	۶.۵	۶.۶	۶.۷	۶.۸	۶.۹	۷	۷.۱	۷.۲
R	۲۱۰	۲۱۱	۲۱۲	۲۱۳	۲۱۴	۲۱۴	۲۱۵	۲۱۵	۲۱۶	۲۱۶	۲۱۶	۲۱۷	۲۱۸	۲۱۸	۲۲۲	۲۲۵	۲۲۵	۲۲۶	۲۲۷	۲۲۷
G	۲۰۷	۲۰۶	۲۰۵	۲۰۴	۲۰۳	۲۰۲	۲۰۲	۲۰۱	۲۰۱	۲۰۰	۱۹۸	۱۹۷	۱۹۵	۱۸۷	۱۸۵	۱۸۵	۱۸۰	۱۷۵	۱۷۱	۱۶۳
B	۱۳۴	۱۳۵	۱۳۶	۱۳۷	۱۳۸	۱۳۹	۱۳۹	۱۴۰	۱۴۱	۱۴۲	۱۴۳	۱۴۵	۱۴۸	۱۵۰	۱۵۳	۱۵۷	۱۶۰	۱۶۱	۱۶۲	۱۶۴



شکل ۴- مدلی برای فرایند تخریب نویز.

نویز میل می‌کند. با روش ارایه شده ثابت شد تصویر میانگین، تصویر ایده‌آل است.

استفاده از الگوهای گوناگون شبکه عصبی برای تخمین pH

شبکه‌های عصبی مصنوعی برگرفته شده از عملکرد عصب‌های مغز انسان هستند که توانایی یادگیری را به سامانه می‌دهند. هرچند کامپیوترهای امروزی بسیار توانمند هستند ولی بسیاری از مسئله‌ها با کمک شبکه‌های عصبی خیلی بهتر و سریع‌تر جواب می‌دهند.

استفاده از RBF

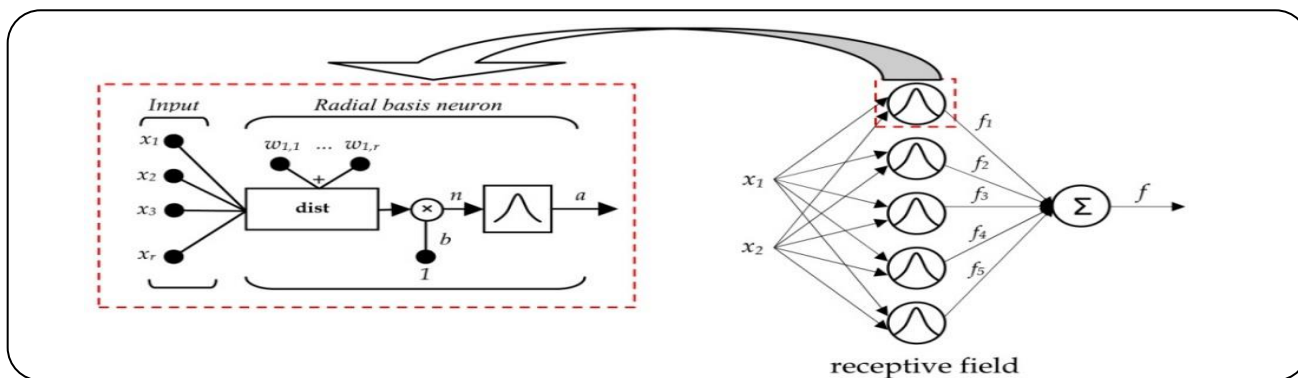
یکی از انواع شبکه‌های عصبی، شبکه RBF است این شبکه‌ها بیش‌تر دارای سه لایه مطابق با شکل ۵ هستند [۱۵].

$$g(x,y) = \eta(x,y) + f(x,y) \quad (1)$$

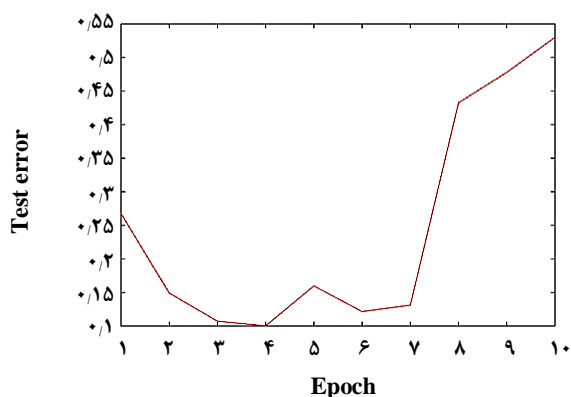
آنگاه، اگر نویز در هر مختصات از پیکسل‌های تصویر، ناهمبسته با میانگین صفر باشد، در این صورت با میانگین‌گیری از مجموعه تصاویر $g(x,y)$ که نسبت به هم دارای مختصات تثبیت شده هستند، معادله‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\begin{cases} \bar{g}(x,y) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k g_i(x,y) \\ E\{\bar{g}(x,y)\} = f(x,y) \\ \sigma^2 \bar{g}(x,y) = \frac{1}{k} \sigma^2 \eta(x,y) \end{cases} \quad (2)$$

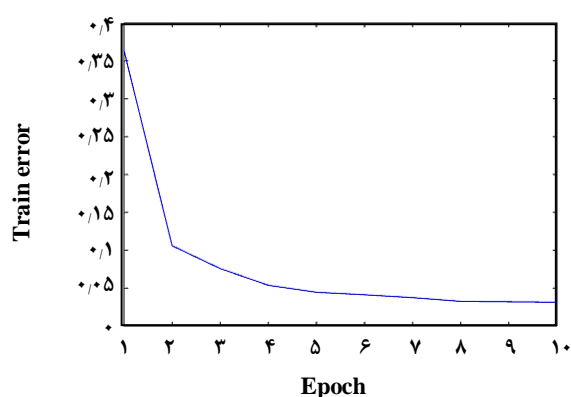
بدین ترتیب، چنان‌چه تعداد مجموعه تصاویر $g(x,y)$ یا k به سمت بی‌نهایت میل کند (در آمار این عدد به تقریب بالای ۳۰ است)، آنگاه امید ریاضی تصویر به دست آمده از میانگین‌گیری به تصویر بدون



شکل ۵- لایه‌های شبکه RBF [16].



شکل ۷- اختلاف خطای تست گرفته شده.



شکل ۶- اختلاف خطای آموزش گرفته شده.

در شکل ۸ دیده می‌شود که مقدار خروجی در آموزش با مقدار پیش‌بینی به تقریب یکسان بوده و نمودار رسم شده به صورت خطی با شیب یک هست.

در شکل ۹ دیده می‌شود که مقدار خروجی در تست با مقدار پیش‌بینی به تقریب یکسان بوده و نمودار رسم شده به صورت خطی با شیب یک هست.

شبکه‌های فازی - عصبی

یکی از معمول‌ترین شبکه‌های فازی عصبی که مورد استفاده پژوهشگران قرار می‌گیرد، شبکه فازی عصبی ANFIS که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. این شبکه توسط جانگ در ۱۹۹۳ معرفی شد که شامل پنج لایه است [۱۷].

لایه اول: این لایه شامل تابع‌های عضویت است و ورودی‌ها

از تابع‌های عضویت عبور می‌کنند و فرمول مطابق فرمول (۴) دارند.

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x) \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

که لایه مخفی آن تابعی مطابق فرمول (۳) دارد.

$$y(x) = \sum_i^N w_i \phi(\|X - X_i\|) \quad (3)$$

شبکه RBF استفاده شده در این مقاله طبق تعریف بالا ۳ لایه بوده که دارای یک لایه پنهان هست.

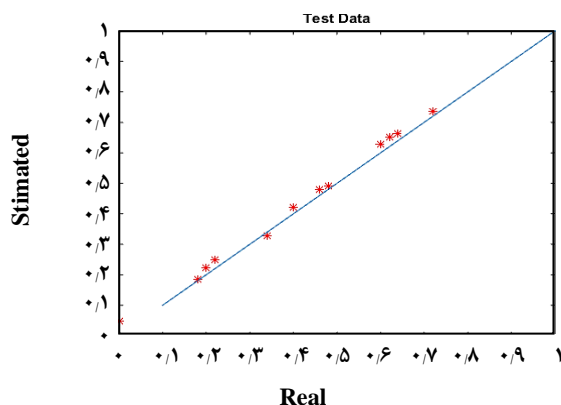
با استفاده از برنامه شبکه عصبی RBF در متلب ورودی‌های حس‌گر و دوربین را داده و با استفاده از کد دستوری متلب خطای آموزش (Train) و آزمایش (Test) گرفته شده و نتیجه‌های به دست آمده در نمودار ۶ نمایش داده می‌شود.

طبق شکل ۶ دیده می‌شود که خطای یادگیری با افزایش هر دوره کاهش پیدا می‌کند و شبکه RBF توانست خطا را کاهش داده و مقدار pH را تخمین زند.

شکل ۷ مقدار خطای آزمون را نمایش می‌دهد.

شکل ۷ نشان می‌دهد که شبکه RBF توانسته آموزش ببیند

و در تعداد چهار نرون به کم‌ترین مقدار خطا رسیده است.



شکل ۹- ارتباط مقدار خروجی پیش‌بینی شده با مقدار واقعی در تست.

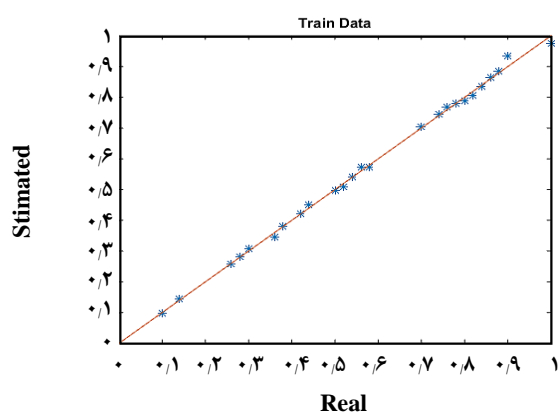
به تقریب این روش توانسته تخمین خوبی از pH بدهد (مطابق شکل ۱۲) و برتری خاصی نسبت به روش RBF دارد. به عنوان نمونه با پارامترهای $R=138$ ، $G=203$ و $B=214$ نتیجه نهایی مقدار pH با استفاده از الگوریتم ANFIS برابر 5.5786 است که مقدار با استفاده از حسگر pH متر برابر 5.5 می باشد. در شکل ۱۳ خطای آزمایش و آموزش نمایش داده شده است (نمودار آبی رنگ با ۲۵ داده آموزش و قرمز رنگ با ۱۲ داده آزمایش است).

نتیجه‌های شبیه سازی

تعداد لایه‌های شبکه RBF سه و ورودی‌ها در سه دسته RGB به شبکه داده شد و نسبت به محلول استاندارد خطای RBF در خطای آموزش به 0.35 و خطای آزمون به 0.1 رسیده و در شبکه ANFIS مقدار خطای آموزش کمتر از 0.06 و خطای تست به کمتر از 0.01 رسیده که نشان می‌دهد دقت بالاتری نسبت به شبکه RBF دارد. این درصد خطا با 37 محلول گوناگون به دست آمده و با افزایش تعداد آن می‌توان این خطا را نیز کاهش داد.

نتیجه گیری

در این مطالعه روشی ایزوله برای تشخیص میزان PH محلول راکتور زیستی بر اساس رنگ آن و بهره‌گیری از شبکه عصبی ارائه شده است. نخست شناساگر وارد محلول شده و با استفاده از دوربین کدهای RGB آن اندازه‌گیری شد. سپس کدها وارد شبکه عصبی شده و با استفاده از شبکه عصبی ANFIS، RBF پردازش شده و خروجی به صورت نمودار نمایش داده شده که با توجه به نمودار خروجی‌های خطای هر دو دیده می‌شود در شبکه عصبی RBF خطای آموزش



شکل ۸- ارتباط مقدار خروجی پیش‌بینی شده با مقدار واقعی در آموزش.

μ_{A_i} تابع عضویت نورون لایه اول است.

لایه دوم: خروجی لایه دوم، ضرب سیگنال‌های ورودی به آن است.

$$O_{2,i} = \mu_{B_i}(x) \quad i = 3, 4 \quad (5)$$

μ_{B_i} تابع عضویت نورون لایه دوم است.

لایه سوم: خروجی این لایه نرمالیزه شده، لایه قبلی است.

$$O_{3,i} = \bar{W}_i = \frac{W_i}{W_1 + W_2} \quad i = 1, 2 \quad (6)$$

لایه چهارم: براساس مقاله جانگ [۱۷] سه روش در اینجا قابل استفاده است. که بیشتر از روش Sugeno استفاده می‌شود. این روش فرمول زیر را روی ورودی‌ها اعمال می‌کند که پارامترهای آن به عنوان پارامترهای تالی هستند که با روش‌هایی که در ادامه توضیح داده می‌شود، به دست می‌آیند (فرمول ۷).

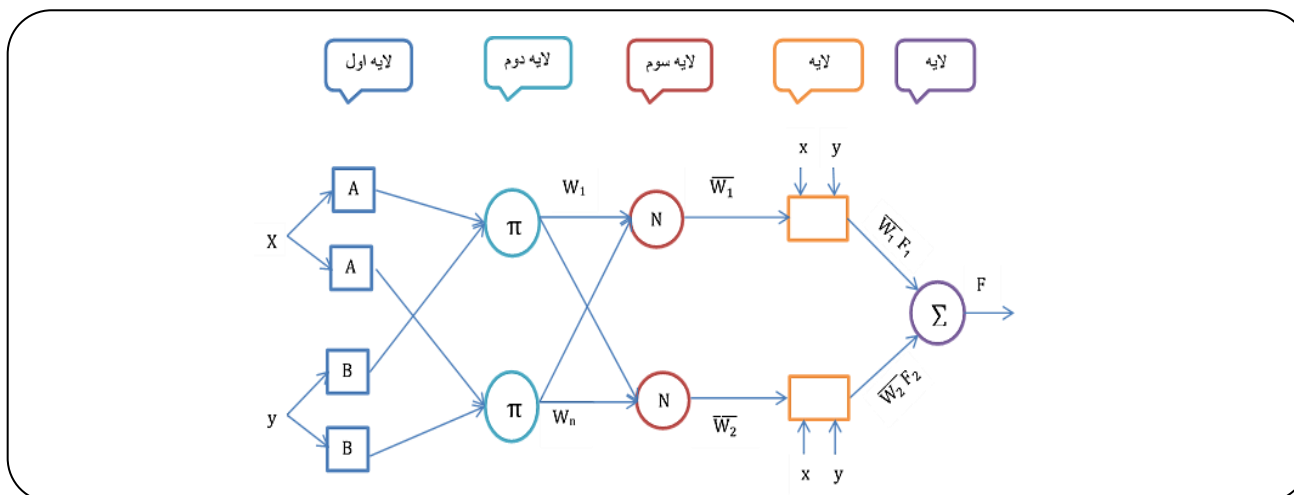
$$O_{4,i} = \bar{W}_i F_i = \bar{W}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (7)$$

لایه پنجم: خروجی این لایه خروجی کلی سامانه است؛ که مجموع ورودی‌هایش است.

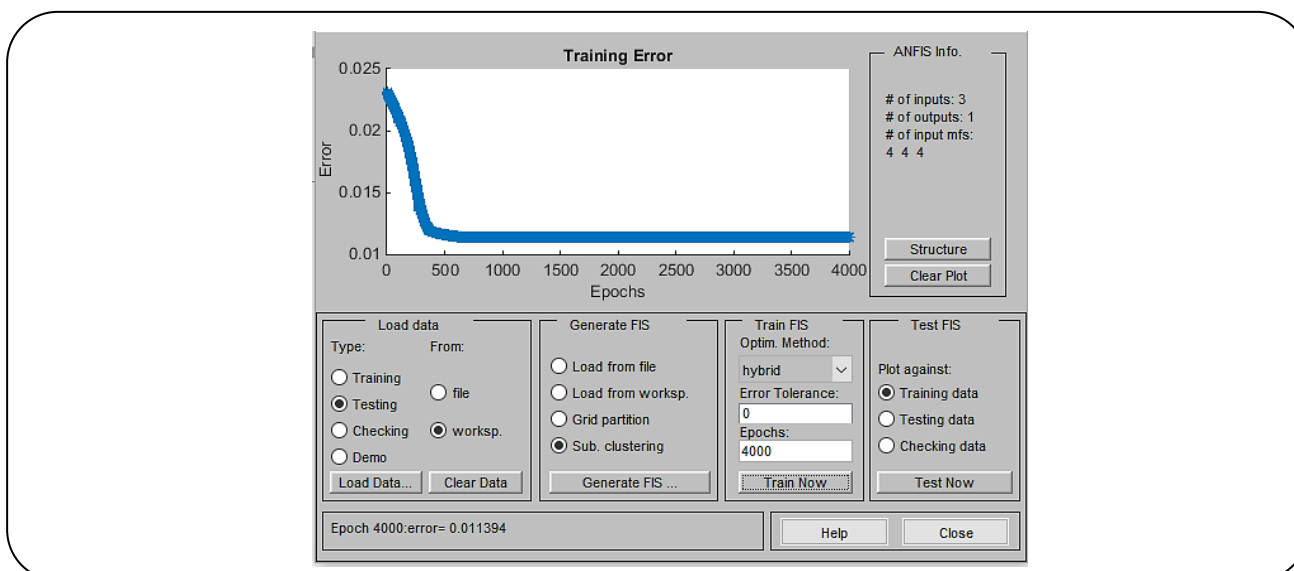
$$O_{5,i} = \sum_i \bar{W}_i F_i = \frac{\sum_i W_i F_i}{\sum_i W_i} \quad (8)$$

در شکل ۱۱ دیده می‌شود که با استفاده از GUI متلب برای آزمون شبکه عصبی فازی کمتر از 500 دوره توانست درصد خطا را به حدود 0.01 برساند.

داده‌های ورودی حسگر رنگ نیز به مانند دوربین بوده و نتیجه‌های همانند حالت پیشین می باشد. در روش ANFIS دیده می‌شود که

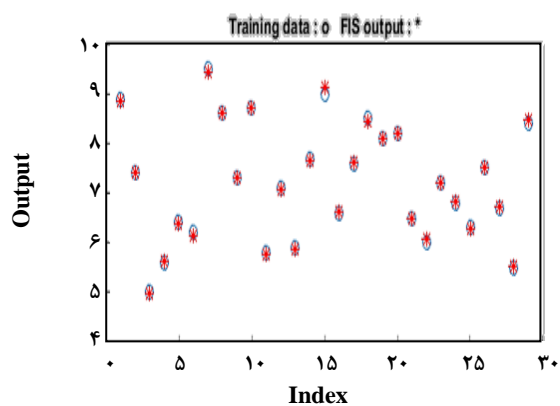


شکل ۱۰- ساختار شبکه فازی-عصبی ANFIS



شکل ۱۱- نمایش خطا GUI فازی عصبی

به ۰,۳۵ و خطای تست به ۰,۱ رسیده و در شبکه ANFIS مقدار خطای آموزش کمتر از ۰,۰۶ و خطای تست به کمتر از ۰,۰۱ رسیده است که نشان می‌دهد دقت بالاتری نسبت به شبکه RBF دارد. در نتیجه این روش، یک روش بهینه برای تشخیص PH محلول راکتور زیستی است.



شکل ۱۲- پیش‌بینی pH های گوناگون

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۵/۶ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۹/۱۲

مراجع

- [1] Lu A.E., Paulson J.A., Braatz, R.D., "pH and Conductivity Control in an Integrated Biomanufacturing Plant", in *American Control Conference (ACC)*, pp. 1741-1746 (2016).
- [2] Bhadra S., Dynowski C., Blunt W., McDonald M., Thomson D.J., Freund M., et al., "Wireless Passive Sensor for pH Monitoring Inside a Small Bioreactor", in *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, pp. 276-279 (2013).
- [3] Bhadra S., Blunt W., Dynowski C., McDonald M., Thomson D.J., Freund M.S., et al., "Fluid Embeddable Coupled Coil Sensor for Wireless pH Monitoring in a Bioreactor", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **63**: 1337-1346 (2014).
- [4] Dutta S., Sarma D., Patel A., Nath P., "Dye-Assisted pH Sensing Using a Smartphone", *IEEE Photonics Technology Letters*, **27**: 2363-2366 (2015).
- [5] Schaefer S., "Colorimetric Water Quality Sensing with Mobile Smart Phones" (2014).
- [6] Schaefer S., "Colorimetric Water Quality Sensing with Mobile Smart Phones", University of British Columbia, (2014).
- [7] Chen C., Tsou C., "Silicon-Based White LED Packaging Module with an Integrated RGB Color Sensor", *IEEE Photonics Technology Letters*, **27**: 553-556, (2015).
- [8] Vuong N., Chan S., Lau C., "Classification of pH Levels Using a Mobile Phone," in *2009 IEEE 13th International Symposium on Consumer Electronics*, (2009).
- [9] Rezaee A., Khalil Golpayegan M.i, "Intelligent Control of Cooling-Heating Systems by Using Emotional Learning", *Elektronika ir Elektrotechnika*, **120**: 26-30 (2012).
- [۱۰] رضایی، علیرضا؛ عابدینی مزرعه، علیرضا؛ پاکنژاد، دود، "طراحی و توسعه سیستم توکار (Embedded) برای اندازه‌گیری pH با استفاده از پردازش رنگ محلول و مبنای حس گر رنگ و با کمک شبکه های عصبی مصنوعی"، سومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و مکاترونیک، تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۴.
- [11] Zhong X., Peng X., Zhong X., Dong X., "Multi-Channel with RBF Neural Network Aggregation Based on Disparity Space for Color Image Stereo Matching", in *Advanced Computational Intelligence (ICACI), 2012 IEEE Fifth International Conference*, pp. 620-625 (2012).
- [12] Vuong N. K., Chan S., Lau C. T., "pH Levels Classification by Color Quantization on a Camera Phone", in *International Conference on Communications and Mobile Computing*, (2010).
- [13] Batistell G., Sturm J., "Filter-Less Color Sensor in Standard CMOS Technology", in *Proceedings of the European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC)*, pp. 123-126 (2013).
- [14] Chang C.-C., Chuang C.-J., Chuang Y.-C., Choi B.I., Lee K., Woo S., "Monitor Color Sensing Using Low-Cost Filter Array Spectrum Sensor", in *SENSORS, IEEE*, pp. 1-4 (2013).
- [15] H.-t. Li, A.-s. Shi, and B.-s. Zhang, "A Dyeing Color Matching Method Combining RBF Neural Networks with Genetic Algorithms", in *Software Engineering, Artificial Intelligence*,

- Networking, and Parallel/Distributed Computing, SNPD. Eighth ACIS International Conference*, pp. 701-706 (2007).
- [16] L. Zhang and Y. Zhang, "[A new Color Image Restoration Algorithm Based on LAB and RBF Neural Network](#)," in *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 2248-2253 (2012).
- [17] Rezaee A., Pajohesh M., [Suspension System Control with Fuzzy Logic](#), *Journal of Communications Technology, Electronics and Computer Science*, **6**: 1-5 (2016).