ارزیابی مدل استنتاج فازی و مدل فازی- عصبی در تخمین هیدروگراف سیل

مرتضی نبی‌زاده*[1]، علی کولائیان[2]، منصور رضایی‌کلانتری[1]،

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

Nabizade49@gmail.com

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

a.koolaian@sanru.ac.ir

چکیده

پیش‌بینی هیدروگراف سیل دارای اهمیت حیاتی به منظور هشدار سیل، مدیریت عملکرد سدهای مخزنی احداث شده به منظور کنترل سیل، تعیین پتانسیل جریان رودخانه، تولید انرژی برقابی و تخصیص آب برای آبیاری در فصول خشک سال می‌باشد. هدف از این تحقیق مدل‌سازی هوشمند هیدروگراف سیل ورودی به سد مخزنی شهید رجایی به منظور مدیریت مخزن آن و همچنین ارزیابی واکنش مدل‌های فازی به خصوصیات هیدرولوژیکی هیدروگراف سیل می‌باشد. بدین منظور حوزه آبریز سد شهید رجایی در استان مازندران به منظور انجام تحقیق انتخاب شد. در ادامه تمامی هیدروگراف‌های سیل ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری پروریج‌آباد گردآوری شد. سپس از این مجموعه تعداد ۱۱ هیدروگراف سیل به منظور آموزش و آزمون (۹ عدد برای آموزش و ۲ عدد برای آزمون) مدل فازی- عصبی تطبیقی انتخاب شد. سپس داده‌های مربوط به این هیدروگراف‌ها با استفاده از روابط مربوطه برای ورود به مدل استاندارد شد. در ادامه چهار مدل ورودی بر اساس دبی سیل در ۱، ۲، ۳ و ۴ ساعت قبل طراحی شد. در ادامه ساختارهای مختلفی از سیستم استنتاج فازی و مدل فازی- عصبی تطبیقی که ترکیبی از مدل شبکه عصبی مصنوعی و منطق فازی می‌باشد، در محیط نرم‌افزار متلب (Matlab) براساس الگوریتم آموزشی هیبرید و توابع عضویت مختلف برای هر مدل طراحی شده و مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور ارزیابی کارایی مدل‌ها، از معیارهای آماری نظیر معیار ناش- ساتکلیف استفاده شد. نتایج به دست آمده از محاسبه این معیارها حاکی از دقت و کارایی مدل فازی- عصبی تطبیقی در شبیه‌سازی هیدروگراف سیل در حوزه آبریز تجن بود.

واژه‌های کلیدی: سیستم استنتاج فازی، سد مخزنی شهید رجایی، مدل فازی- عصبی تطبیقی، الگوریتم هیبرید

۱- مقدمه

پیش‌بینی سیل یک اقدام مهم به منظور حفظ زندگی انسان، اراضی و تأسیسات اطراف رودخانه می باشد. مهندسین برای پیش‌بینی سیل، مدل‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی زیادی را تا به حال توسعه داده‌اند. تکنیک‌های مدل‌سازی در فرآیندهای هیدرولوژیکی به منظور فراهم کردن صحت و استفاده پایدار از منابع آب دارای اهمیت زیادی هستند. در مدل‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی در وهله اول اندازه‌گیری پدیده طبیعی لازم است. به عبارت دیگر برآورد فرآیندهای هیدرولوژیکی همچون بارندگی، رواناب و تغییرات سطح آب و همچنین اندازه‌گیری پاره‌ای از خصوصیات فیزیکی حوزه آبریز با استفاده از روش‌های موجود از ارکان لازم در مدلسازی است (عقیل و همکاران[1] ۲۰۰۷). نبی‌زاده و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از سیستم استنتاج فازی و مدل فازی- عصبی به پیش‌بینی دبی روزانه رودخانه لیقوان‌چای پرداختند. نتایج نشان داد که پیش‌بینی مدل فازی- عصبی به داده‌های مشاهداتی نزدیک‌تر می‌باشد. انوری (۱۳۸۷) نیز از مدل‌های هوشمند مانند سیستم‌های فازی، مدل‌های شبکه عصبی- مصنوعی و فازی- عصبی برای ساختن مدل پیش‌بینی جریان رودخانه استفاده نمود. وی همچنین در بخشی از تحقیق خود، داده‌های ENSO را برای مدل‌سازی مورد توجه قرار داد. نورانی و صالحی (۱۳۸۷) در تحقیق خود، مدل بارش- رواناب حوضه لیقوان‌چای واقع در استان آذربایجان شرقی را با استفاده از سه روش شبکه عصبی، استنتاج فازی و شبکه فازی- عصبی تطبیقی ارائه نمودند. نتیجه اینکه شبکه عصبی با مدل‌سازی غیرخطی و همچنین منطق فازی با ارائه توابع عضویت، هرکدام به تنهایی تا حدودی قادر به بیان مدل یک حوضه هیدرولوژیکی نمی‌باشد، ولی در صورت تلفیق این دو روش می‌توان گفت که نتیجه مطلوب جهت مدل‌سازی می‌تواند حاصل شود. یو[2] و چن[3] (۲۰۰۵) یک مدل پیش‌بینی سیلاب در بازه زمانی یک تا چهار ساعت زودتر، با استفاده از روش فازی ارائه کردند. آنالیز و بررسی‌ها، مدل پیشنهادی فوق را تأیید می‌کند و نتایج حاصل دلالت بر توانایی مدل جهت کاهش مشکل تأخیر فازی در هیدروگراف‌های پیش‌بینی با دوره زمانی طولانی‌تر دارد. عقیل و همکاران (۲۰۰۵) برای مدل‌سازی رفتار ساعتی و روزانه رواناب یک مطالعه مقایسه‌ای بین مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و مدل‌های عصبی- فازی انجام دادند. مقایسه نتایج سه مدل نشان داد که مدل عصبی- فازی عملکرد بهتری در مدل‌سازی رواناب نسبت به دو مدل دیگر دارد. فیرت[4] و همکاران (۲۰۰۶) مدل عصبی- فازی را برای پیش‌بینی جریان رودخانه بزرگ مئاندر در ترکیه مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل عصبی- فازی می‌تواند با صحت و قابلیت اطمینان بالا برای پیش‌بینی جریان رودخانه به کار رود. هدف از این پژوهش مدل‌سازی هوشمند هیدروگراف سیل وروردی به سد مخزنی شهید رجایی به منظور مدیریت مخزن آن و همچنین ارزیابی واکنش مدل‌های فازی به خصوصیات هیدرولوژیکی هیدروگراف سیل می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- استنتاج فازی (FIS)

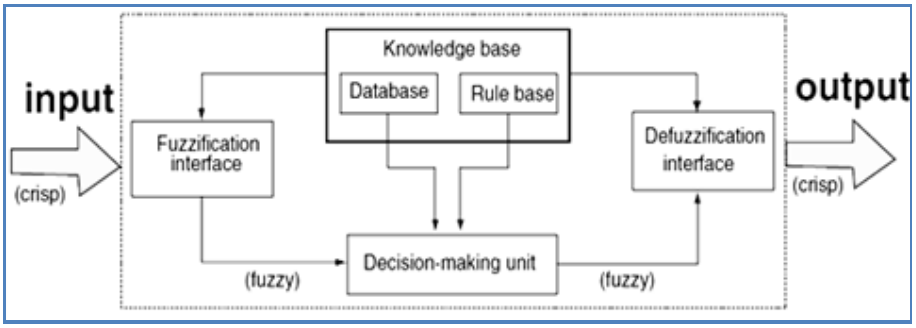
تئوری مجموعه فازی، اولین بار در سال ۱۹۶۵ توسط پروفسور لطفی عسگرزاده مشهور به زاده مطرح و پایه‌گذاری شد. سیستم استنتاج فازی که از آن با عناوینی چون سیستم‌های قاعده- بنیاد فازی، مدل فازی و سیستم خبره فازی نیز یاد می‌شود، واحد اصلی یک سیستم منطق فازی می‌باشد. تصمیم‌گیری یک بخش مهم در تمام سیستم‌ها می‌باشد. FIS، قوانین مناسب را تنظیم کرده و تصمیمات را برپایه این قوانین اخذ می‌نماید. این عمل بر اساس مفاهیمی چون تئوری مجموعه‌های فازی، قوانین "اگر- آنگاه" فازی و استدلال[5] فازی انجام می‌گیرد.

شکل (۱) یک FIS با پنج بلوک اصلی را نشان می‌دهد. کاربرد هرکدام از بلوک‌ها به شرح ذیل است:

۱- پایگاه قانون[6] شامل تعدادی قانون اگر- آنگاه فازی.

1- Aqil et al
2. Shan Yu
3. Tsung Chen
4- Firat et al
5. Reasoning
6. Rule Base

۲- پایگاه داده[1] که توابع عضویت مجموعه‌های فازی به‌کار رفته در قوانین فازی را تعریف می‌کند.
۳- واحد تصمیم‌گیری[2] که عملگرهای استنتاج را بر روی قوانین اعمال می‌کند.
۴- رابط فازی‌ساز[3] که ورودی‌های ترد[4] را به درجه‌های مطابق با مقادیر زبانی تبدیل می‌کند.
۵- رابط غیرفازی‌ساز[5] که نتایج فازی استنتاج را به یک خروجی ترد تبدیل می‌کند (حسین‌پور، ۱۳۸۸).



شکل (۱) بخش‌های اصلی یک سیستم استنتاج فازی

۲-۲- سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی (ANFIS)

در سال ۱۹۹۳، جانگ[6] برای اولین بار با مد نظر قرار دادن توانایی‌های تئوری فازی که مبتنی بر قواعد منطقی بوده و همچنین روش شبکه عصبی مصنوعی که توانایی استخراج دانش از اطلاعات عددی را دارند، سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی (ANFIS) را ارائه نمود [۸]. ساختار شبکه ANFIS از ترکیب دو ساختار شبکه عصبی و سیستم فازی تشکیل شده است. به این معنی که از خصوصیت آموزش‌پذیری شبکه عصبی و توانایی مدل‌سازی سیستم استنتاج فازی که باعث افزایش دقت می‌شود، در ساختار آن استفاده شده است. ساختار مناسب آن متناسب با داده‌های ورودی، نوع تابع عضویت ورودی و خروجی، قوانین فازی و تعداد تابع عضویت انتخاب می‌گردد [۲]. به منظور ساده‌سازی، فرض می‌شود که سیستم استنتاجی مورد نظر دو ورودی x و y و یک خروجی z دارد. برای یک مدل فازی تاکاگی- سوگنو درجه اول، می‌توان یک مجموعه قانون نمونه را با دو قانون اگر- آنگاه فازی به صورت زیر بیان کرد:

قانون اول: اگر x برابر A_1 و y برابر B_1 باشد آنگاه $z_1 = p_1 x + q_1 y + r_1$

قانون دوم: : اگر x برابر A_2 و y برابر B_2 باشد آنگاه $z_2 = p_2 x + q_2 y + r_2$

که p_i ، q_i و r_i (i=1,2) پارامترهای خطی تالی مدل فازی تاکاگی- سوگنو درجه اول هستند.

۲-۳- مشخصات عمومی منطقه مطالعاتی

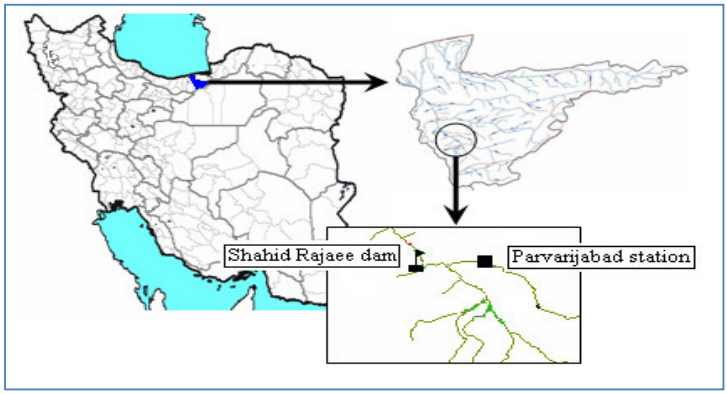
در این تحقیق داده‌های مربوط به دبی ساعتی ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری پروریج‌آباد واقع در بالادست سد شهید رجایی از سال آبی ۸۲-۱۳۸۱ تا سال آبی ۸۸-۱۳۸۷ از طریق شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران جمع‌آوری گردید. این ایستگاه از سال ۱۳۸۱ به بهره‌برداری رسیده‌است و بهمین علت از سال ۱۳۸۱ به بعد در این ایستگاه اطلاعات ثبت شده است و

---
1. Data Base
2. Decision-Making Unit
3. Fuzzification Interface
4. Crisp
5. Defuzzification Interface
6. Jang

اطلاعات دیگری قبل از این سال در سازمان موجود نیست. مشخصات این ایستگاه در جدول ۱ قابل مشاهده است. همچنین موقعیت این ایستگاه در منطقه و کشور در شکل ۲ ارائه شده است.

جدول (۱) مشخصات ایستگاه هیدرومتری پروریج‌آباد

مساحت زیرحوزه (km^2)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (m)	فاصله تقریبی تا سد (km)
۷۹۹	۵۳-۱۹-۰۹	۳۶-۱۴-۴۵	۴۹۱	۱۰



شکل (۲) موقعیت ایستگاه مطالعاتی در منطقه و کشور

هدف از این تحقیق شبیه‌سازی هیدروگراف سیل ورودی به سد مخزنی شهید رجایی واقع در حوزه آبریز تجن به کمک مدل فازی- عصبی تطبیقی با استفاده از دبی ساعت‌های قبل می‌باشد. در واقع هر نقطه از هیدروگراف با استفاده از دبی سیل در ۱، ۲، ۳ و ۴ ساعت قبل شبیه‌سازی شده‌است. بدین منظور آمار سیلاب‌های ثبت شده توسط ایستگاه هیدرومتری پروریج‌آباد گردآوری و از این آمار تعداد ۱۱ هیدروگراف سیل انتخاب شد. از ۱۱ هیدروگراف انتخابی، ۹ عدد برای آموزش و ۲ عدد برای آزمون مدل انتخاب شد. قبل از اینکه مقادیرعددی مربوط به دبی هیدروگراف‌های سیل وارد مدل شوند، بایستی این مقادیر توسط روابط مربوطه نرمال شوند. درادامه از رابطه ۱ برای نرمال‌سازی داده‌ها استفاده شد.

$$X_{norm} = 0.5 + 0.5\left(\frac{X - \overline{X}}{X_{max} - X_{min}}\right) \qquad (۲)$$

X_{norm}: مقدار استاندارد شده شده ورودی، $\overline{X}$: میانگین داده‌ها، X_{max} و X_{min}: به ترتیب مقدار حداکثر و حداقل داده‌ها می‌باشد (نبی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۹). ساختار ریاضی مدل‌های طراحی‌شده در جدول ۲ ذکر شده است.

جدول (۲) ساختار ریاضی مدل‌های طراحی شده

مدل‌ها	ساختار ریاضی مدل‌های ورودی و تعداد متغیرها	خروجی مدل
مدل۱	$Q(t) = f(Q_{t-1}, Q_{t-2}, Q_{t-3})$	Q(t)
مدل۲	$Q(t) = f(Q_{t-2}, Q_{t-3}, Q_{t-4})$	Q(t)
مدل۳	$Q(t) = f(Q_{t-3}, Q_{t-4}, Q_{t-5})$	Q(t)
مدل۴	$Q(t) = f(Q_{t-4}, Q_{t-5}, Q_{t-6})$	Q(t)

ابتدا داده‌های آموزش، آزمون و داده‌های ورودی برای هر گام زمانی مشخص شد. بدین منظور در محیط نرم‌افزار متلب (Matlab) ساختارهای متفاوتی از مدل فازی- عصبی تطبیقی بر اساس انواع تابع عضویت طراحی، و با سیکل محاسباتی مختلف اجرا شد و تابع عضویت مناسب انتخاب شد. در نهایت مدل با تابع عضویت انتخاب شده، الگوریتم آموزشی هیبرید و با تعداد تکرار بهینه به‌دست آمده در مرحله قبل اجرا شده و نتایج به‌دست آمده در هر سیکل محاسباتی مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور بررسی عملکرد مدل فازی- عصبی تطبیقی در شبیه‌سازی هیدروگراف سیل، در هر سیگنال و در هر الگوی ورودی شاخص‌های نظیر ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب ناش- ساتکلیف برای هر مدل به طور جداگانه محاسبه شد. در نهایت بهترین مدل بر مبنای شاخص‌های محاسبه شده فوق به ویژه ضریب ناش- ساتکلیف انتخاب شد.

$$C_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_s - Q_o)^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_o - \bar{Q}_o)^2} \quad (۲)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_s - Q_o)^2}{n}} \quad (۳)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n} | Q_i^o - Q_i^s |}{n} \quad (۴)$$

در روابط فوق، n تعداد داده‌ها، Q_o دبی مشاهداتی، Q_s دبی شبیه‌سازی شده، C_{NS} معیار ناش- ساتکلیف و RMSE ریشه دوم میانگین مربعات خطا و MAE میانگین قدر مطلق خطا می‌باشند.

۳- نتایج

پس از طراحی اجزای مختلف مدل‌های استنتاج فازی و مدل تلفیقی عصبی- فازی، به روش سعی و خطا و تعیین توابع و تکرارهای بهینه برای هر مدل، خروجی این مدل‌ها دریافت شد و با شاخص‌های ذکرشده در بخش قبل مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج هر یک از مدل‌های طراحی‌شده در جدول ۳ و ۴ نشان داده شده‌است.

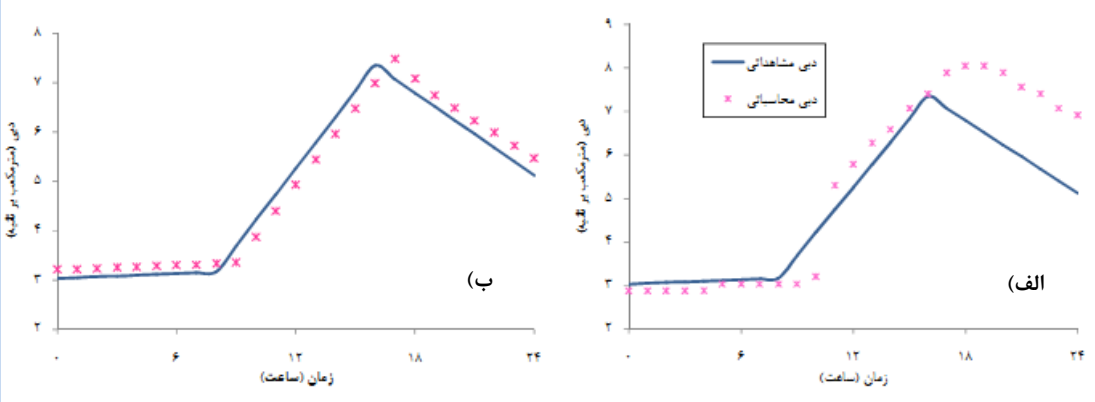
جدول (۳) نتایج حاصل از شبیه‌سازی هیدروگراف‌های سیل با روش FIS

مدل	تابع عضویت	C_{NS}		RMSE		MAE	
		آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون
مدل ۱	trim	۰/۹۶۴۳	۰/۹۵۵۶	۲/۰۹۲۱	۲/۴۵۱۱	۱/۶۰۹۹	۱/۷۲۵۲
مدل ۲	trim	۰/۹۳۲۵	۰/۹۰۵۹	۲/۸۳۰۱	۳/۵۱۴۲	۲/۰۵۰۰	۲/۲۹۴۴
مدل ۳	trim	۰/۸۹۱۸	۰/۸۴۰۱	۳/۵۸۳۸	۴/۵۶۷۱	۲/۵۰۶۹	۲/۹۲۱۹
مدل ۴	trim	۰/۸۴۶۰	۰/۷۶۵۸	۴/۲۹۴۰	۵/۵۲۵۶	۲/۹۲۸۲	۳/۴۹۱۷

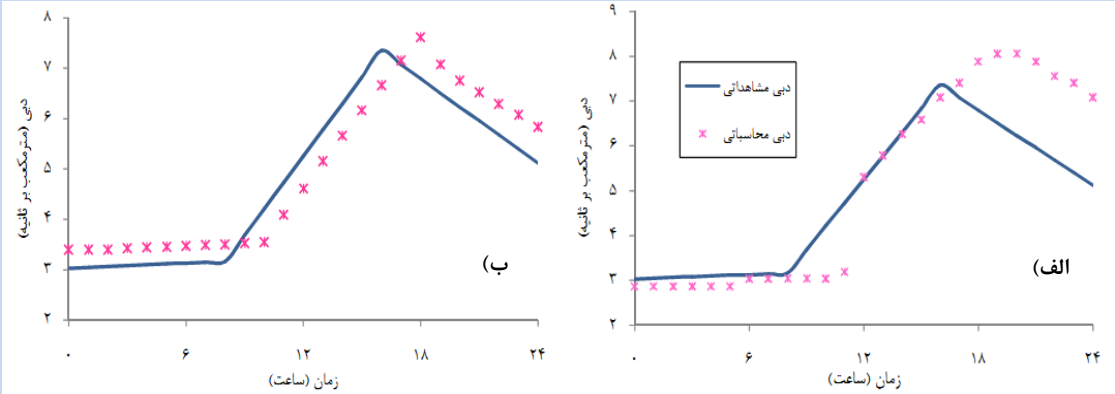
جدول (۴) نتایج حاصل از شبیه‌سازی هیدروگراف‌های سیل با روش ANFIS

مدل	تابع عضویت	تعداد تکرار	C_{NS}		RMSE		MAE	
			آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون
مدل ۱	trim	۱۴	۰/۹۹۷۰	۰/۹۹۱۱	۰/۴۰۵۷	۰/۷۲۲۵	۰/۰۱۲۶	۰/۰۱۶۶
مدل ۲	trim	۱۶	۰/۹۸۸۱	۰/۹۶۲۶	۰/۸۰۶۳	۱/۴۶۲۵	۰/۰۱۱۱	۰/۰۱۳۸
مدل ۳	trim	۱۰	۰/۹۷۰۰	۰/۹۲۳۸	۱/۲۸۷۳	۲/۰۴۰۰	۰/۰۱۶۳	۰/۰۲۰۹
مدل ۴	trim	۱۱	۰/۹۴۴۸	۰/۸۶۴۱	۱/۷۵۱۴	۲/۶۲۵۱	۰/۰۲۱	۰/۰۲۹۷

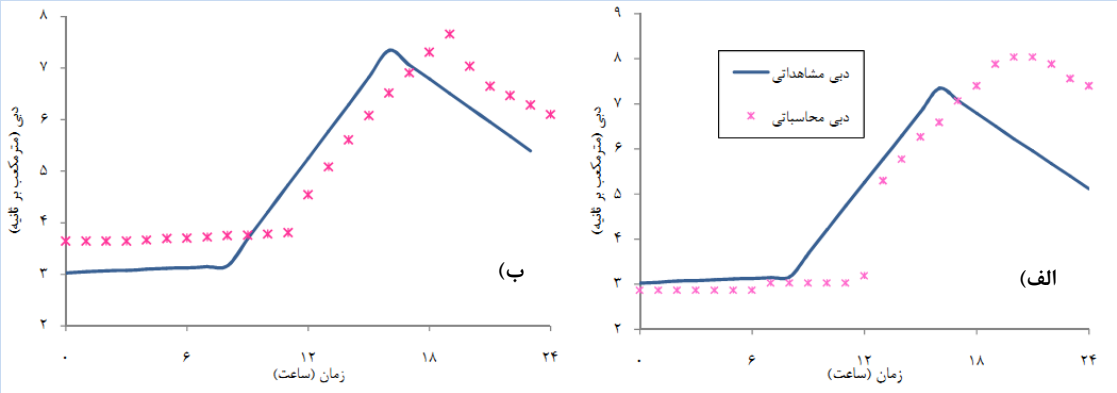
با توجه به نتایج جداول ۳ و ۴ مشاهده می‌شود که مدل ۱، بهترین نتیجه را در پیش‌بینی هیدروگراف سیلاب ارائه داده است. در ادامه نتایج پیش‌بینی مدل‌ها با استفاده از روش‌های FIS و ANFIS، در شکل‌های ۳، ۴، ۵ و۶ آورده شده است.



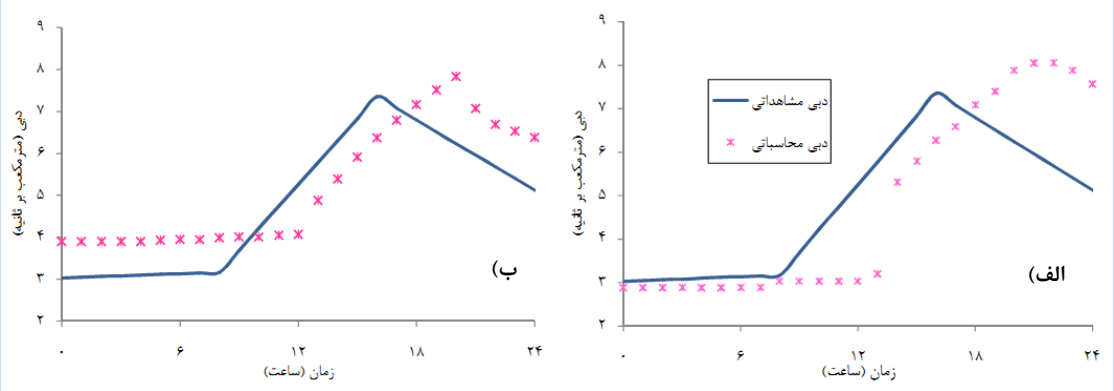
شکل (۳) مقادیر دبی مشاهداتی و محاسباتی برای مدل اول : الف) روش FIS ب) روش ANFIS



شکل (۴) مقادیر دبی مشاهداتی و محاسباتی برای مدل دوم : الف) روش FIS ب) روش ANFIS



شکل (۵) مقادیر دبی مشاهداتی و محاسباتی برای مدل سوم : الف) روش FIS ب) روش ANFIS



شکل (۶) مقادیر دبی مشاهداتی و محاسباتی برای مدل چهارم : الف) روش FIS ب) روش ANFIS

۴- نتیجه‌گیری

ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌های فازی و عصبی- فازی و همچنین شاخص‌های آماری محاسبه شده (جدول ۳و ۴) نشـان داد، مدل‌های هوش مصنوعی توانایی خوبی در شبیه‌سازی هیدروگراف سیل دارد. بررسی شکل‌های ۳ تا ۶ مبین این واقعیت بود که مدل فازی- عصبی تطبیقی دبی اوج را برای مدل ۱ به‌خوبی شبیه‌سازی کرده که البته مقداری بیشتر از مقدار واقعی می‌باشد و هرچه تعداد تاخیرها بیشتر می‌شود (به استثنای مدل ۲)، این اختلاف در دبی اوج واقعی و شبیه‌سازی شده افزایش مـی‌یابـد و این در حالی است که مدل مقادیر دبی متوسط و کم را نزدیک به مقدار مشاهده‌ای دبی شبیه‌سازی کـرده اسـت کـه مطالعـات عقیل و همکاران نیز تأیید کننده این موضوع می‌باشد. نتایج حاصل از این تحقیق نشـان داد کـه هـر چـه پراکنـدگی داده‌هـای ورودی مدل بیشتر باشد، مدل فازی- عصبی دارای توانایی بیشتری در شبیه‌سازی ایـن نـوع از داده‌هـا مـی‌باشـد کـه نـورانی و همکاران در تحقیقات خود به این نکته اشاره کرده‌اند. نکته دیگر در بحث مدل‌سازی با مدل فازی- عصبی تطبیقی، بحث زمـان مورد نیاز برای محاسبات برای شبیه‌سازی در مدل مذکور است. بطوریکه یکی از معایب سیستم استنتاج فازی، وقت‌گیـر بـودن آموزش آن می‌باشد. این در حالیست که مدل فازی- عصبی به وقت کمتری بـرای آمـوزش احتیـاج دارد و از ایـن نظـر روشـی مناسب می‌باشد، بطوریکه می‌توان چندین تابع عضویت را برای این مدل مورد آزمـایش قـرار داد. مطالعـات نایـاک و همکـاران (۲۰۰۳)، فیرت و همکاران (۲۰۰۶) و پهلوانی (۱۳۸۸) نیز گواه بر این موضوع می‌باشد. مدل فـازی- عصـبی تطبیقـی بلافاصـله خروجی را شبیه‌سازی می‌کند و نیازی به سیکل محاسباتی ندارد که این یک مزیت خوب نسـبت بـه مـدل‌هـای مشـابه اسـت. مقایسهٔ نتایج مدل سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی با داده‌های اندازه گیری‌شده دقت بالای این سیستم را نشان می‌دهد. به هرحال همواره باید توجه کرد که هر چند مدل‌های داده‌محور، نیازی به معادلات با پایه‌های فیزیکی- کـه بیشـتر بـه صـورت غیرخطی و پیچیده‌اند ندارند، ولی درک فرآیندها و تأثیر عوامل مورد نظر در داده‌های ورودی روی تولید خروجـی از آن بسـیار مهم است و در صورت عدم این درک، نمی‌توان انتظار نتایج مطلوبی را داشت. در پایان پیشنهاد می‌شود که: ۱- با انجـام آنـالیز منطقه‌ای سیلاب تأثیر مکانی و زمانی خصوصیات فیزیوگرافی حوزه آبخیز بر دقت پیش‌بینی مدل در شـبیه‌سـازی هیـدروگراف سیل مورد مطالعه و ارزیابی قرار گیرد. ۲- با توجه به استفاده روزافزون از رویکرد تئوری موجک (Wavelet) در بحث مدلسـازی مسائل مربوط به مهندسی هیدرولوژی لذا پیشنهاد می‌شود، از مدل ترکیبی شبکه عصبی مصـنوعی- تئـوری موجـک (Neuro-wavelet network) برای شبیه‌سازی هیدروگراف سیل استفاده شود و نتایج حاصل از آن با نتایج این تحقیق مورد مقایسـه قـرار گیرد.

مراجع

۱- پهلوانی، ح. (۱۳۸۸). *" ارزیابی کارایی مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی در تخمین هوشمند هیدروگراف سیل ورودی به سد مخزنی شیرین‌دره در مقایسه با مدل‌های تطبیقی عصبی- فازی "*، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ۱۲۳ ص.

۲- تاناکا، ک. (۱۳۸۳). *" مقدمه‌ای بر منطق فازی برای کاربردهای عملی آن "*، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، (مترجم: وحیدیان کامیاد، ع. و طارقیان، ح.)، چاپ دوم.

۳- حسین‌پور، ح. (۱۳۸۸). *" استفاده از مدل فازی- عصبی و شاخص‌های اقلیمی جهت پیش‌بینی خشکسالی: مطالعه موردی زاهدان "*، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، ۱۳۷ص.

۴- جورابیان، م. و هوشمند، ر. (۱۳۸۱)*." منطق فازی و شبکه‌های عصبی (مفاهیم و کاربردها) "*، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، چاپ اول.

۵- دهقانی، ا. ا.، عسگری، م. و مساعدی، ا. (۱۳۸۸)*." مقایسه سه روش شبکه عصبی مصنوعی، سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی و زمین آمار در میان‌یابی سطح آب زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت قزوین) "*، مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، جلد ۱۶.

٦- نبی‌زاده، م.، مساعدی ا.، حسام، م.، دهقانی، ا.، مفتاح، م. و ذاکری‌نیا، م. (۱۳۸۹)*." پیش‌بینی جریان رودخانه با استفاده از سیستم استنتاج فازی و سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی "*، ششمین همایش ملّی علوم و مهندسی آبخیزداری و چهارمین همایش ملّی فرسایش و رسوب، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرّس.

۷- نورانی، و. و صالحی، ک. (۱۳۸۷). *" مدل‌سازی بارش- رواناب با استفاده از روش شبکه عصبی- فازی تطبیقی و مقایسه آن با روش شبکه عصبی و استنتاج فازی "*، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.

۸- نظام خیاوی، خ.، نظام‌خیاوی، س. و نظام‌خیاوی، ک. (۱۳۸۹)*." استفاده از سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی (ANFIS) در برآورد بار معلق رسوب رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه قره‌سو واقع در استان اردبیل) "*، نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه تربیت مدرس.

9- Aqil, M., Kita, I., Yano A and Nishiyama, S. (2005). *"Analysis and forecasting of flow from local source in a river basin using a neuro–fuzzy modeling tool"*. Journal of Environmental Management. 85 215 – 223.

10- Aqil. M, Yano, K, and Nishiyama .(2007).*"A comparative study of artificial neural network and neuro–fuzzy in continuous modeling of the daily and hourly behavior of runoff"* .J. hydrology 337, 22-34 Pp.

11- Firat, M. and Gungor, M. (2006). "*River flow estimation using adaptive neuro–fuzzy inference system"*. Mathematics and Computes in Simulation 75, 87.

12- Nayak, P.C., Sudheer, K.P., Ranagan, D.M. and Ramasastri, k.S. (2003). *"A neuro-fuzzy computing technique for modeling hydrological time series, Journal of Hydrology"* , Vol.52, Issue 2, Pp: 1-14.