

## پیش‌بینی سیلاب در زمان واقعی با استفاده از مدل‌های رگرسیونی و شبکه‌های عصبی مصنوعی (مطالعه موردی)

سعید علی‌محمدی<sup>۱\*</sup>، امید بزرگ حداد<sup>۲</sup>، عباس افشار<sup>۳</sup>

۱- استادیار گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور

۲- استادیار گروه آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

\* تهران، صندوق پستی ۱۶۷۶۵-۱۷۱۹

Alimohammadi@iust.ac.ir

**چکیده** - آگاهی از زمان و شدت وقوع سیلاب، نقش به‌سزایی در کاهش خسارتهای جانی و مالی ناشی از آن دارد. روشهای مرسوم پیش‌بینی سیلاب، عمدتاً در قالب مدل‌های کلاسیک بارش-رواناب، روندیابی و رگرسیونی بوده‌اند. مسأله‌ای که امروز در کنار روشهای کلاسیک مطرح شده، استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی است. در این پژوهش توانایی شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی سیلاب کارگاهی در شرایط کمبود آمار و اطلاعات، در مقایسه با مدل‌های متداول پیشین مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور دو مدل تهیه شده است. مدل اول از نوع رگرسیونی چندگانه و مدل دوم از نوع شبکه عصبی مصنوعی است. در این تحقیق، مدلها با استفاده از آمار و اطلاعات ۱۰ سیلاب همزمان در محل ۴ ایستگاه هیدرومتری بالادست سایت مورد بررسی، تهیه شدند. ۷ سیلاب برای کالیبره کردن (آموزش) و ۳ سیلاب برای آزمایش مدلها در نظر گرفته شد. در هر یک از مدلها، گزینه‌های متعددی بررسی شد. مقایسه نتایج دو مدل در این مطالعه موردی نشان داد که مدل شبکه عصبی، عملکرد مناسبی در پیش‌بینی جریان داشته و پیش‌بینی‌های دقیقتری را در مقایسه با مدل دیگر ارائه می‌دهد.

**کلید واژگان:** پیش‌بینی زمان واقعی سیلاب، رگرسیون چندگانه، شبکه عصبی مصنوعی.

### ۱- مقدمه

داده‌اند. یکی از خصوصیات جذاب شبکه‌های عصبی، توانایی آنها در برقراری ارتباط میان ورودیها و خروجیهای فرایند، بدون آگاهی کامل از فیزیک مسأله است. توسعه شبکه‌های عصبی مصنوعی، توسط Warren McCulloch و Walter Pitts در سال ۱۹۴۳ آغاز شد. آنها شبکه‌ای با چند نرون ساده اما با قدرت محاسباتی قابل توجه را تهیه کردند و نشان دادند که شبکه‌های عصبی می‌توانند هر تابع حسابی و منطقی دلخواهی را محاسبه کنند. با رشد

یکی از مسائل مهمی که در برنامه‌ریزی و مدیریت طرحهای منابع آبی مطرح است، پیش‌بینی زمان واقعی سیلاب است. روشهای مرسوم گذشته برای پیش‌بینی سیلاب، عمدتاً در قالب مدل‌های کلاسیک رگرسیونی، بارش-رواناب و روندیابی بوده‌اند. به‌تازگی شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌طور وسیعی در زمینه‌های مختلف مهندسی مورد توجه قرار گرفته و نتایج مفیدی را به‌دست

به‌ندرت به‌طور همزمان در دست است. علاوه بر این، کار کردن با مدل‌های جدید ساده‌تر است. بر این اساس در این تحقیق مدل‌های پیش‌بینی سیلاب در محل یک کارگاه سدسازی تهیه شد تا میزان کارایی و صحت هر یک از مدل‌ها مطالعه شود. برای بررسی و ارزیابی مدل‌های موجود در پیش‌بینی بی‌درنگ سیلابها، از اطلاعات سیلابهای همزمان رودخانه کارون در محل ایستگاه کرستان که - در نزدیکی محور سد کارون ۴ قرار دارد - و نیز سه ایستگاه هیدرومتری بالادست آن (ارمند، مرغک و چم قلعه)، استفاده شده است.

## ۲- روش تحقیق

دو مدل رگرسیونی چندگانه و شبکه عصبی مصنوعی انتخاب و بر اساس سیلابهای همزمان ایستگاهها، کالیبره کردن مدل‌های فوق انجام و در نهایت با توجه به نتایج حاصل، مدل مناسب انتخاب شد.

به منظور پیش‌بینی سیلابها، دو تأخیر زمانی<sup>۱</sup> ۲ و ۴ ساعت مد نظر قرار گرفت. لازم به توضیح است که انتخاب تأخیر زمانی ۲ و ۴ ساعت، صرفاً با توجه به نیاز کارگاهی و امکانات لازم برای برچیدن وسایل در معرض خطر موجود در کارگاه، در نظر گرفته شد.

### ۲-۱- مدل رگرسیون خطی چندگانه

یک مدل رگرسیون خطی مرکب یا چند متغیره را می‌توان به صورت زیر بیان کرد (Ang and Tang, 1975):

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_{p-1} x_{p-1} + \varepsilon \quad (1)$$

که  $y$  متغیر وابسته،  $x_1, x_2, \dots, x_{p-1}$  متغیرهای مستقل،  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{p-1}$  ضرایب رگرسیون و  $\varepsilon$  بیانگر خطا است. برآورد ضرایب رگرسیون با استفاده از روش حداقل مربعات انجام شده و باید مربع خطا کمینه شود. همچنین باید آزمون‌هایی بر روی پارامترهای به‌دست آمده انجام و

فناوری ریز پردازنده‌ها، در آغاز دهه ۸۰ میلادی، مطالعات در زمینه شبکه‌های عصبی، سیر صعودی به خود گرفت. در سال ۱۹۸۲، John Hopfield، فیزیکدان امریکایی، شبکه‌هایی را براساس وزن ثابت طراحی کرد که حافظه مشارکتی داشته و می‌توانستند مسائلی با قیده‌های اولیه را حل کنند. سپس David Rumelhart و Ames Mc Land، در سال ۱۹۸۶، الگوریتم پس انتشار خطا را ارائه کردند. این دو ایده، سبب تحول شگرفی در علم شبکه‌های عصبی شد.

از اوایل دهه ۹۰ نیز شبکه‌های عصبی به‌گونه‌ای موفقیت‌آمیز در مسائل مختلف هیدرولوژی مانند مدلسازی بارش-رواناب، کیفیت آب، مدیریت منابع آب، پیش‌بینی بارش، سریهای زمانی هیدرولوژیک و عملکرد مخزن به‌کار رفته‌اند (ASCE, 2000). در زمینه مدل‌های پیش‌بینی جریان و سیلاب می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: پیش‌بینی جریان سالیانه رودخانه (Lachtermacher and Fuller, 1994)، پیش‌بینی ترازهای سیلاب (Thirumalaiah and Deo, 1998)، پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن سد (Jain et al., 1999)، پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن سد (Coulibaly et al., 2000, 2001)، مقایسه روشهای قطعی، آماری و شبکه عصبی در مدلسازی بارش-رواناب (Jain and Indurthy, 2003)، بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها (Bozorg Haddad and Alimohammadi, 2005a)، پیش‌بینی جریان ماهیانه رودخانه (Bozorg Haddad et al., 2005) و تهیه منحنی فرمان بهره برداری از سدها (Bozorg Haddad and Alimohammadi, 2005b).

تهیه مدل پیش‌بینی سیلاب براساس روشهای مرسوم قبلی معمولاً به زمان زیادی نیاز دارد، به‌گونه‌ای که برای مثال در مدل‌های بارش-رواناب، به داده‌های بارندگی، برف، دما، فیزیوگرافی و سیلابهای همزمان نیاز است. در حالی‌که در حوضه‌های آبریز کشور، چنین داده‌هایی

1. Lead time

### ۳- کاربرد مدل‌های مورد بررسی

به منظور انجام مطالعات پیش‌بینی سیلاب، از سیلاب‌های همزمان چهار ایستگاه هیدرومتری کرستان (رودخانه کارون)، ارمند (رودخانه کارون)، مرغک (رودخانه بازفت) و چم قلعه (رودخانه بازفت) استفاده شد. با توجه به تنوع حالت‌های ممکن در این مطالعات، وضعیت‌های مختلفی به شرح زیر مدنظر قرار گرفت تا از بین آنها بهترین حالت انتخاب شود.

#### ۳-۱- مدل رگرسیونی

سیلاب ایستگاه کرستان به صورت تابعی از سیلاب سه ایستگاه بالا دست در نظر گرفته شده و معادلات مربوط به دست آمد. همچنین در ادامه، از آمار زمان‌های قبل ایستگاه کرستان برای پیش‌بینی استفاده شد. افزودن آمار ایستگاه کرستان به عنوان ورودی، باعث بهبود چشمگیر ضرایب همبستگی می‌شود. در این حالت نیز زمان‌های تأخیر مختلفی مد نظر قرار گرفت و در نهایت روابط همبستگی نهایی زیر برای پیش‌بینی سیلاب‌ها به دست آمد:

برای زمان پیش آگاهی ۲ ساعت:

$$Q_t (\text{کرستان}) = 20.353 + 0.685Q_{t-2} (\text{کرستان}) + 0.097Q_{t-2} (\text{ارمند}) + 0.134Q_{t-2} (\text{مرغک}) + 0.327Q_{t-8} (\text{چم قلعه}) \quad (2)$$

و برای زمان پیش آگاهی ۴ ساعت:

$$Q_t (\text{کرستان}) = 34.628 + 0.460Q_{t-4} (\text{کرستان}) + 0.164Q_{t-4} (\text{ارمند}) + 0.270Q_{t-4} (\text{مرغک}) + 0.525Q_{t-8} (\text{چم قلعه}) \quad (3)$$

نمونه‌ای از پیش‌بینی سیلاب به این روش برای زمان پیش هشدار ۲ و ۴ ساعت در شکل ۱ ارائه شده است.

هم‌چنان که انتظار می‌رود با افزایش زمان پیش هشدار، خطای پیش‌بینی افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که ضریب همبستگی مدل رگرسیونی برای زمان پیش هشدار ۲ ساعت، برابر ۰/۹۸ و برای ۴ ساعت، برابر ۰/۹۶ حاصل شد.

کفایت مدل با استفاده از ضریب همبستگی مرکب  $R^2$  ( $0 \leq R^2 \leq 1$ ) بررسی شود.

#### ۲-۲- شبکه‌های عصبی مصنوعی

شبکه پرسپترون چند لایه (MLP) یکی از متداول‌ترین آرایش‌های شبکه‌های عصبی است. در این شبکه هر نرون در هر لایه، به تمامی نرون‌های لایه قبلی متصل است (شبکه کاملاً مرتبط) و خروجی‌های هر لایه، بردار ورودی لایه بعدی را تشکیل می‌دهند. در شبکه‌های MLP، معمولاً از توابع تحریک سیگموئید یا تانژانت هیپرولولیک استفاده شده و برای آموزش آنها، قانون یادگیری پس انتشار خطا (BP) بکار می‌رود. آموزش شبکه عصبی فرایندی است که به وسیله آن وزن‌های ارتباطی، در فرایندی پیوسته بهینه می‌شوند تا شبکه همگرا شود.

بررسی میزان یادگیری و عملکرد شبکه و اینکه شبکه تا چه حد قادر است به ورودی‌هایی که توسط آنها تربیت شده و نیز به ورودی‌های جدیدی که جزو دسته آموزشی نیستند، جواب قابل قبول ارائه دهد، مشخص کننده اعتبار مدل است. در کاربرد شبکه‌های عصبی، روش معمول آن است که از اطلاعات و داده‌های موجود، دسته‌ای برای آموزش و دسته‌ای نیز برای ارزیابی و آزمایش شبکه ساخته شده، استفاده شود. عملکرد شبکه از طریق پارامترهای مختلفی سنجیده می‌شود مانند: (۱) جذر میانگین مربع خطا<sup>۱</sup> (RMSE)، (۲) ضریب همبستگی بین خروجی‌های مشاهداتی و محاسباتی ( $R^2$ )، و (۳) میانگین خطای نسبی بین خروجی‌های مشاهداتی و محاسباتی (E). در این مطالعه از تابع سیگموئید به عنوان تابع انتقال شبکه استفاده شده و با استفاده از روش سعی و خطا، تعیین تعداد گره‌ها و لایه‌های پنهان و تعداد پارامترهای ورودی انجام شده است.

1. Root Mean Square Error

## ۳-۲- مدل شبکه عصبی مصنوعی

## - مدل ۱

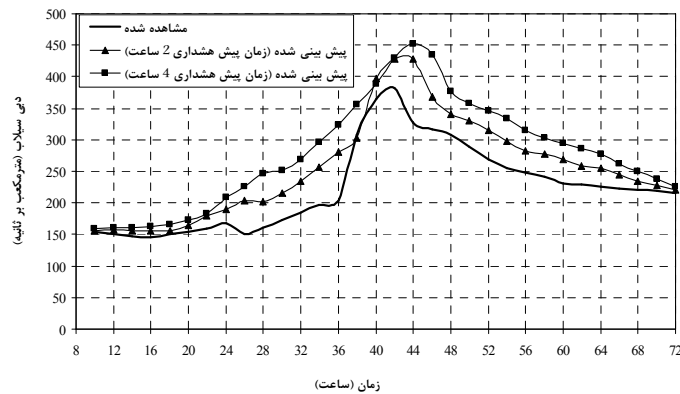
در این حالت  $Q_t$  در ایستگاه کرستان تابعی از: (۱)  
 $Q_{t-2}$  ایستگاه های ارمند، چم قلعه، مرغک و کرستان، (۲)  
 $Q_{t-4}$  ایستگاه های ارمند، چم قلعه، مرغک و کرستان و  
 $Q_{t-6}$  (۳) ایستگاه های ارمند، چم قلعه، مرغک و کرستان  
 در نظر گرفته شد. جدول ۱ همبستگی مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد.  
 در این مدل در مواردی، اوج سیلاب به خوبی مدلسازی نشد،  
 لذا باید افزایش تعداد ورودیها به دنبال مدل مناسبتر بود.

جدول ۱ همبستگی مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده

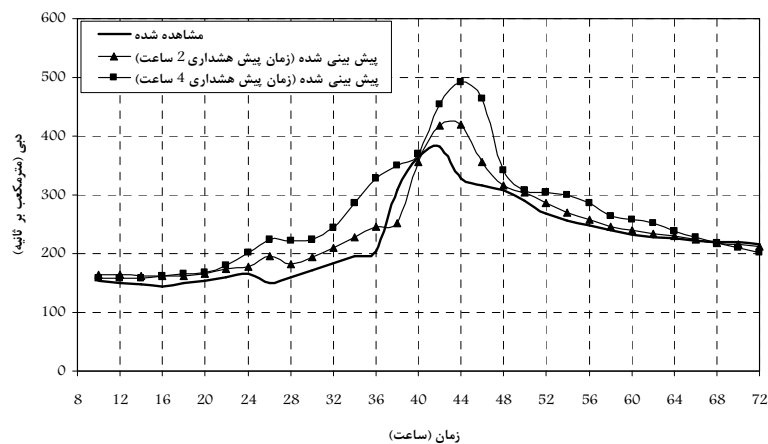
ضریب همبستگی		مدل
آموزش	آزمایش	
۰/۹۶۹۵	۰/۸۱۷۱	۱
۰/۹۶۶۲	۰/۸۹۸۲	۲
۰/۹۳۸۰	۰/۹۶۳۱	۳

## ۴- پیش‌بینی سیلابها به کمک مدل‌های نهایی

شکل ۲ پیش‌بینی سیلاب اسفند ۷۹ ایستگاه کرستان را با ۲ ساعت (مدل ۲) و ۴ ساعت (مدل ۳) پیش‌هشداری نشان می‌دهد.



شکل ۱ هیدروگرافهای مشاهده شده و پیش‌بینی شده در ایستگاه کرستان در سیلاب مورخ ۷۹/۱۲/۱۹، ۷۹/۱۲/۲۰ و ۷۹/۱۲/۲۱ با زمان پیش‌هشدار ۲ و ۴ ساعت با استفاده از مدل رگرسیونی



شکل ۲ هیدروگرافهای مشاهده شده و پیش‌بینی شده ایستگاه کرستان در سیلاب تاریخ ۷۹/۱۲/۱۹، ۷۹/۱۲/۲۰ و ۷۹/۱۲/۲۱ با زمان پیش‌هشدار ۲ و ۴ ساعت

### مدل ۳ -

در این حالت  $Q_t$  در ایستگاه کرستان تابعی از:  $(1) Q_{t-4}$  ایستگاههای ارمند، چم قلعه، مرغک و کرستان،  $(2) Q_{t-6}$  ایستگاه های ارمند، چم قلعه، مرغک و کرستان، و  $(3) Q_{t-8}$  ایستگاه های ارمند، چم قلعه، مرغک و کرستان است. نتایج مدل ۳ در جدول ۱ و شکل ۳ آورده شده است. این مدل نیز به عنوان مدل مناسب شبکه عصبی برای زمان پیش هشداری ۴ ساعت در نظر گرفته شد. این فرایند (تخمین نامناسب اوج جریان) ناشی از ماهیت عملکردی شبکه عصبی مصنوعی است، زیرا در صورتی که این مدلها در مرحله آزمایش یا پیش بینی، با داده هایی در خارج از محدوده داده های آموزشی مواجه شوند، پیش بینی ها دارای تقریب زیادی خواهند بود که مقادیر اوج سیلاب نیز از این دسته است.

### ۵- مقایسه نتایج مدل های رگرسیونی و شبکه

#### عصبی مصنوعی

جدول ۲ ضریب همبستگی و خطای متوسط پیش بینی مدل های رگرسیونی و شبکه عصبی را برای زمان های پیش هشداری ۲ و ۴ ساعت نشان می دهد. برای محاسبه خطای پیش بینی از رابطه زیر استفاده شد:

$$E = \sum_i \frac{(O_i - P_i)^2}{O_i} \quad (4)$$

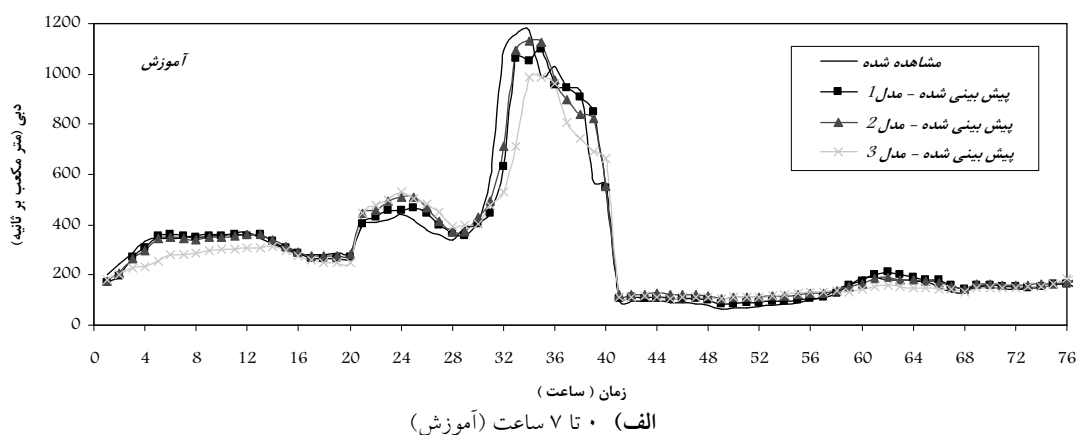
مشابه مدل رگرسیونی، در اینجا نیز با افزایش زمان پیش هشداری، خطای پیش بینی افزایش می یابد، به گونه ای که ضریب همبستگی در زمان پیش هشداری ۲ ساعت، برابر ۰/۹۹ و در زمان پیش هشداری ۴ ساعت، برابر ۰/۹۷ است.

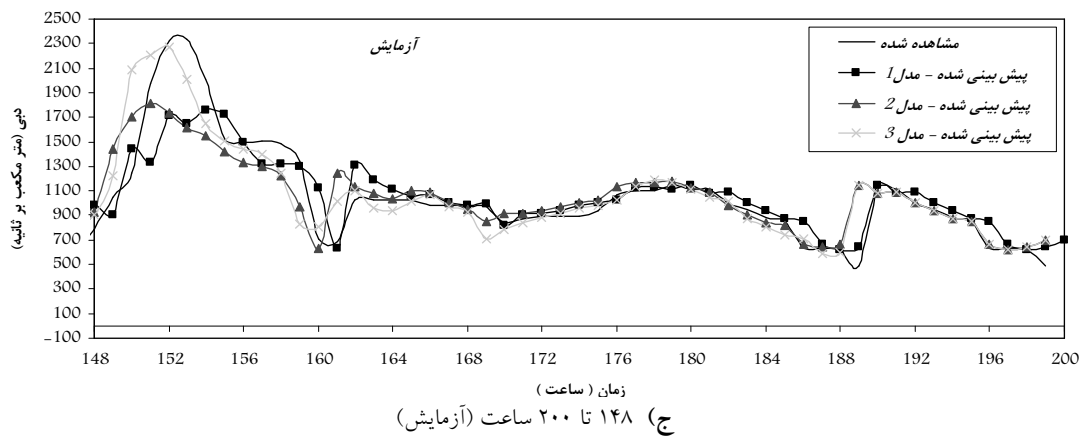
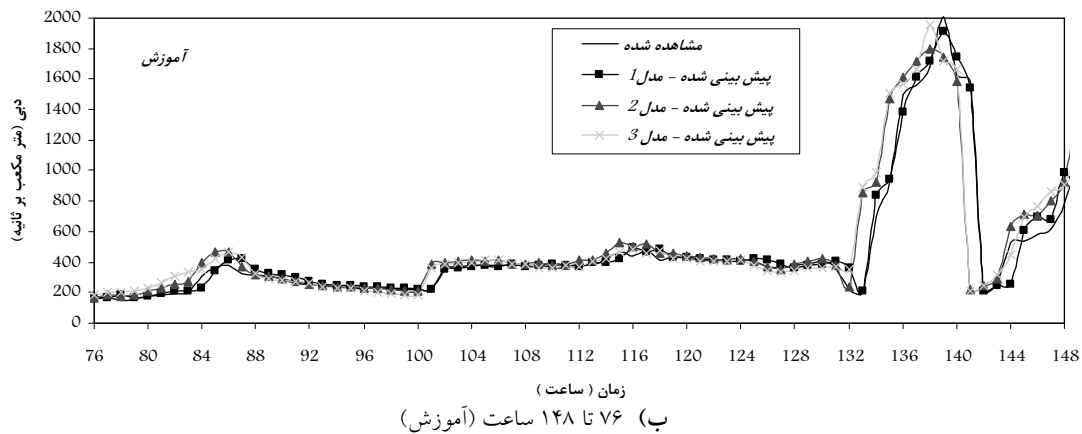
همان گونه که ملاحظه می شود، مدل فوق تخمین مناسبی را از مقدار حداکثر سیلاب گزارش نمی دهد، هر چند در تخمین مقادیر غیر حداکثر سیلاب مناسب به نظر می رسد.

### مدل ۲ -

در این حالت  $Q_t$  در ایستگاه کرستان تابعی از:  $(1) Q_{t-2}$  ایستگاههای ارمند، چم قلعه، مرغک و کرستان،  $(2) Q_{t-4}$  ایستگاههای ارمند، چم قلعه، مرغک و کرستان،  $(3) Q_{t-6}$  ایستگاههای ارمند، چم قلعه، مرغک و کرستان، و  $(4) Q_{t-8}$  ایستگاههای ارمند، چم قلعه، مرغک و کرستان در نظر گرفته شد. جدول ۱ نتایج این مدل را نمایش می دهد.

ملاحظه می شود که در مقایسه با مدل قبل (مدل ۱)، نتایج بهتری حاصل گردید. لذا این مدل به عنوان مدل مناسب شبکه عصبی برای زمان پیش هشداری ۲ ساعت در نظر گرفته شده است. مقادیر مشاهده شده و پیش بینی شده این مدل برای مراحل آموزش و آزمایش در شکل ۳ و ضرایب همبستگی بین این مقادیر در جدول ۱ ارائه شده است.





شکل ۳ مقایسه مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده در آموزش و آزمایش مدل‌های ۱، ۲ و ۳

جدول ۲ خلاصه نتایج مقایسه دو مدل رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی

جذر میانگین مربع خطا ( $RMSE$ ) (مترمکعب بر ثانیه)		خطای پیش‌بینی ( $E$ ) (مترمکعب بر ثانیه)		ضریب همبستگی ( $R^2$ )		زمان پیش‌هشدار (ساعت)
۴	۲	۴	۲	۴	۲	
۱۲۹	۶۱	۳۳۹۷	۱۱۴۹	۰/۹۶	۰/۹۸	مدل رگرسیونی
۱۲۴	۸۵	۳۱۰۸	۱۵۶۰	۰/۹۷	۰/۹۹	مدل شبکه عصبی مصنوعی

این مقادیر نشان می‌دهد که هر دو مدل در پیش‌بینی‌ها در حد قابل قبولی عمل کردند. اما عملکرد مدل شبکه عصبی مصنوعی بهتر از مدل رگرسیونی بود.

## ۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق از دو مدل رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی در زمان واقعی سیلاب‌های

که در آن مقدار مشاهده شده در هر دوره زمانی،  $P_i$  مقدار پیش‌بینی شده در هر دوره زمانی و  $E$  خطای پیش‌بینی است.

ملاحظه می‌شود که ضرایب همبستگی مدل شبکه عصبی مصنوعی همواره بیشتر از مدل رگرسیونی است. همچنین خطای پیش‌بینی و جذر میانگین مربع خطای ( $RMSE$ ) مدل شبکه مصنوعی با زمان پیش‌هشدار ۲ ساعت، کمی بیشتر از زمان پیش‌هشدار ۴ ساعت است. بررسی

[5] Bozorg Haddad O., Alimohammadi S. (2005b), "Optimization of Hydropower Reservoir Operation Using Artificial Neural Networks", Proceeding of 73<sup>rd</sup> International Annual Conference on Large Dams (ICOLD), Tehran, Iran, 1-6 May 2005.

[6] Bozorg Hadad O., Sharifi F., Alimohammadi, S. (2005), "Steam Flow Forecasting Using ANN", Proceeding of 73<sup>rd</sup> International Annual Conference on Large Dams (LCOLD), Tehran, Iran, 1-6 May 2005.

[7] Coulibaly P., Anctil F. and Bobee B. (2000), "Daily reservoir inflow forecasting using artificial neural networks with stopped training", Journal of Hydrology, 230(3), pp. 244-257.

[8] Coulibaly P., Anctil F. and Bobee B. (2001), "Multivariate Reservoir Inflow Forecasting Using Temporal Neural Networks", Journal of Hydrologic Engineering, ASCE, 6(5), pp. 367-376.

[9] Jain A. and Indurthy P. (2003), "Comparative Analysis of Event-based Rainfall-Runoff Modeling Techniques-Deterministic, Statistical, and Artificial Neural Networks", Journal of Hydrologic Engineering, ASCE, 8(2), pp. 93-96.

[10] Jain S. K., Das D. and Srivastava D.K. (1999), "Application of ANN for reservoir inflow prediction and operation", Water Resources Research, 31(10), pp. 2517-2530.

[11] Lachtermacher G. and Full J.D. (1994), "Back propagation in hydrological time series forecasting", Stochastic and statistical methods in hydrology and environmental engineering, Vol. 3 K.W.Hipel, et al Kluwer, Dordrecht, The Netherland, pp. 229-242.

[12] Thirumalaiah K. and Des M.C. (1998). "River stage forecasting using artificial neural networks", Journal of Hydrologic Engineering, ASCE, 3(1), pp. 26-35.

رودخانه کارون در محل ایستگاه کرستان با استفاده از داده های سیلابهای همزمان ایستگاه های مجاور استفاده شد. نتایج نشان می دهد که ضرایب همبستگی مدل شبکه عصبی بیشتر از مدل رگرسیونی است. اما از نظر خطای پیش بینی مدل رگرسیونی برای زمان پیش هشدار ۲ ساعت، بهتر از مدل شبکه عصبی بوده و برای زمان تأخیر ۴ ساعت، مدل شبکه عصبی بهتر بوده است. همچنین مقادیر جذر میانگین مربع خطای مدل رگرسیونی برای زمان پیش هشدار ۲ ساعت، بهتر از مدل شبکه عصبی بوده و برای زمان تأخیر ۴ ساعت، مدل شبکه عصبی بهتر بود. نتایج دو مدل تقریباً به هم نزدیک است، اما می توان گفت که مدل شبکه عصبی مصنوعی تا حدودی بهتر از مدل رگرسیونی عمل کرده است.

## ۷- منابع

[1] بزرگ حداد، ا. (۱۳۸۳). "کاربرد شبکه های عصبی مصنوعی در بهینه سازی عملکرد مخازن". مجموعه مقالات اولین کنفرانس سالانه مدیریت منابع آب ایران، تهران، ایران، آذر ۱۳۸۳.

[2] Ang A. H. S, and Tang W. H. (1975), "Probability Concept in Engineering Planning and Design", John Wiley and Sons.

[3]. ASCE Task Committee on Application of Artificial Neural Networks in Hydrology, (2000), "Artificial Neural Networks in Hydrology", parts I and II, Journal of Hydrologic Engineering, ASCE, 5(2), pp. 115-137

[4] Bozorg Haddad O., Alimohammadi S. (2005a), "Evaluation of Artificial Neural Network in Optimization Models of Hydropower Reservoir Operation", Proceeding of Ninth International Water Technology Conference, IWTC9 2005, Sharm El-Sheikh, Egypt, 17-20 Mar. 2005, pp. 985-998.