

صلى الله عليه وسلم

<p>مشاور:</p> <p>دانشگاه لرستان</p>	<p>کار فرما:</p>  <p>وزارت نیرو</p> <p>شرکت سهامی آب منطقه ای استان لرستان</p>	
<p>گزارش نهایی طرح تحقیقاتی:</p> <p>پیش بینی خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از سیگنال‌های اقلیمی و شبکه عصبی مصنوعی در استان لرستان</p>		
<p>کد ملی تحقیقات:</p>		
<p>مجری:</p> <p>دکتر داریوش یاراحمدی</p> <p>استادیار گروه جغرافیای، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه لرستان</p>		
<p>همکاران طرح:</p>		
<p>دانشجوی دکتری آبخیزداری دانشگاه تهران</p>	<p>مهندس علیرضا سپه‌وند</p>	<p>همکار اصلی</p>
		<p>همکار</p>
<p>مشاور طرح:</p>		
<p>ناظر طرح:</p>		
<p>مرداد ماه ۱۳۹۳</p>		

چکیده

در اثر تغییرات آب و هوایی رخداد‌های ناگوار اقلیمی مانند خشکسالی در بسیاری از نقاط کره‌ی زمین تشدید شده است. در این تحقیق، از شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌عنوان ابزاری توانمند در مدل‌سازی فرآیندهای غیرخطی و نامعین، به‌منظور پیش‌بینی سیکل خشکسالی هیدرولوژیکی در ۸ ایستگاه سینوپتیک، کلیماتولوژی و هیدرومتری استان لرستان که دارای ۴۰ سال آمار ماهانه هستند، استفاده شد. جهت این امر ابتدا با استفاده از آمار دبی ماهانه ایستگاه‌های هیدرومتری، شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی SDI محاسبه شد. در این تحقیق جهت مدل‌سازی خشکسالی هیدرولوژیکی، سیگنال‌های اقلیمی بزرگ مقیاس به‌عنوان ورودی مدل و شاخص خشکسالی SDI به‌عنوان خروجی مدل در نظر گرفته شد. برای مدل‌سازی ۷۰ درصد داده‌ها به‌عنوان داده‌های مرحله آموزش، ۱۵ درصد به‌عنوان داده‌های آزمایش و ۱۵ درصد داده‌ها برای صحت‌سنجی مدل در نظر گرفته شد. شبکه‌های مورد استفاده از نوع پس انتشار و تابع فعال سیگموئیدی با الگوریتم پس انتشار خطا می‌باشند. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل شبکه عصبی مصنوعی با دقت خوبی قادر به پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیکی می‌باشد. مدل تهیه شده در ایستگاه‌های دره تخت و ونایی به ترتیب با ضریب تبیین ۶۸ و ۴۴/۶ درصد دارای بیشترین و کمترین ضریب تبیین بودند. علاوه بر این تحلیل حساسیت مدل‌های تهیه شده نشان داد که سیگنال اقلیمی TSA بیشترین تأثیر را در وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی استان لرستان دارد. مقایسه نتایج مدل شبکه‌ی عصبی و داده‌های مشاهداتی بر دقت و توانایی شبکه‌ی عصبی در پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیکی همه ایستگاه‌های مورد مطالعه در استان لرستان دلالت دارد.

واژگان کلیدی: استان لرستان، سیگنال‌های اقلیمی، شبکه عصبی مصنوعی، تحلیل حساسیت.

فهرست مطالب

صفحه	فهرست
۱	فصل اول
۱	کلیات و مقدمه
۲	۱-۱ تعریف موضوع و ضرورت انجام تحقیق
۴	۲-۱ اهداف تحقیق
۴	۳-۱ کلیات و مفاهیم
۴	۳-۱-۱ تعاریف و مفاهیم خشکسالی با توجه به اهمیت موضوع
۶	۳-۱-۲ تعریف مفهومی خشکسالی
۷	۳-۱-۳ انواع خشکسالی از دیدگاه‌های مختلف
۷	۳-۱-۳-۱ خشکسالی هوا و اقلیم شناسی
۸	۳-۱-۳-۲ خشکسالی هیدروژئولوژیکی و هیدرولوژیکی
۹	۳-۱-۳-۳ خشکسالی کشاورزی
۹	۳-۱-۳-۴ خشکسالی اقتصادی-اجتماعی
۱۰	۳-۱-۴ پیامد اثرات توأم خشکسالی‌های هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی
۱۱	۳-۱-۵ ویژگی‌های فضایی-زمانی خشکسالی
۱۱	۳-۱-۵-۱ آغاز، تداوم و پایان خشکسالی
۱۱	۳-۱-۵-۲ شدت خشکسالی
۱۲	۳-۱-۵-۳ وسعت منطقیهای خشکسالی
۱۲	۳-۱-۵-۴ فراوانی خشکسالی
۱۳	۳-۱-۵-۵ دوره تناوبی رخداد خشکسالی
۱۳	۳-۱-۶ نمایه‌های خشکسالی
۱۴	۳-۱-۷ تعریف و کاربرد نمایه‌های خشکسالی
۱۵	۳-۱-۸ بررسی چند نمایه خشکسالی مهم همراه با مزایا و معایب آنها
۱۵	۳-۱-۸-۱ نمایه‌های هواشناسی
۱۵	۳-۱-۸-۱-۱ نمایه بارش استاندارد
۱۷	۳-۱-۸-۱-۲ شاخص RDI
۱۸	۳-۱-۸-۱-۲ نمایه‌های هیدروژئولوژیکی و هیدرولوژیکی
۱۸	۳-۱-۸-۱-۲-۱ شاخص خشکسالی جریان سطحی (SDI)
۱۹	۳-۱-۸-۱-۲-۲ شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI)
۱۹	۳-۱-۸-۱-۲-۳ شاخص سطح آب استاندارد
۲۰	۳-۱-۹ مدل

- ۲۰ ۱۰-۳-۱ انواع مدل‌ها
- ۲۱ ۱-۱۰-۳-۱ مدل‌های عددی
- ۲۱ ۲-۱۰-۳-۱ شبکه عصبی مصنوعی
- ۲۱ ۱-۲-۱۰-۳-۱ تاریخچه شبکه عصبی مصنوعی
- ۲۳ ۲-۲-۱۰-۳-۱ تعریف و مزایای شبکه عصبی مصنوعی
- ۲۳ ۳-۲-۱۰-۳-۱ مبانی زیستی شبکه عصبی مصنوعی
- ۲۴ ۴-۲-۱۰-۳-۱ استفاده از شبکه عصبی مصنوعی
- ۲۴ ۵-۲-۱۰-۳-۱ مراحل ساخت شبکه عصبی
- ۲۴ ۱-۵-۲-۱۰-۳-۱ مشخص کردن توپولوژی مسئله
- ۲۴ ۲-۵-۲-۱۰-۳-۱ آموزش شبکه
- ۲۵ ۳-۵-۲-۱۰-۳-۱ الگوریتم پس انتشار خطا
- ۲۵ ۴-۵-۲-۱۰-۳-۱ تابع تبدیل
- ۲۶ ۵-۵-۲-۱۰-۳-۱ آزمایش شبکه
- ۲۶ ۶-۵-۲-۱۰-۳-۱ اجزاء شبکه عصبی مصنوعی
- ۲۷ ۶-۲-۱۰-۳-۱ معرفی چند نوع از شبکه‌های عصبی مصنوعی
- ۲۷ ۱-۶-۲-۱۰-۳-۱ شبکه عصبی مصنوعی پیش خور (MNN)
- ۲۷ ۲-۶-۲-۱۰-۳-۱ شبکه عصبی مصنوعی پس خور یا برگشتی (RNN)
- ۲۷ ۳-۶-۲-۱۰-۳-۱ شبکه عصبی پرسپترون چند لایه (MLP)
- ۲۸ ۴-۶-۲-۱۰-۳-۱ شبکه عصبی هاپفیلد
- ۲۸ ۵-۶-۲-۱۰-۳-۱ شبکه حافظه‌های خود انجمنی دو جهته
- ۲۸ ۶-۶-۲-۱۰-۳-۱ شبکه کوهنن
- ۲۸ ۷-۲-۱۰-۳-۱ کاربردهای شبکه‌های عصبی
- ۲۹ ۱۱-۳-۱ سیگنال‌های اقلیمی
- ۳۰ ۱-۱۱-۳-۱ آرام آمریکای شمالی (PNA)
- ۳۱ ۲-۱۱-۳-۱ نواحی حاره ای نیمکره شمالی (TNH)
- ۳۱ ۳-۱۱-۳-۱ نوسان قطب شمال (AO)
- ۳۲ ۴-۱۱-۳-۱ نوسان اطلس شمالی (NAO)
- ۳۶ ۵-۱۱-۳-۱ نوسانات دهه‌ای اقیانوس آرام (PDO)
- ۳۷ ۶-۱۱-۳-۱ پدیده نوسان شمالی (NOI)
- ۳۸ ۷-۱۱-۳-۱ انسو
- ۳۹ ۱-۷-۱۱-۳-۱ النینو
- ۴۲ ۲-۷-۱۱-۳-۱ لانینا

۴۵	..... ۳-۷-۱۱-۳-۱ تاثیر انسو بر بارش مناطق مختلف کره زمین
۵۰	..... ۸-۱۱-۳-۱ شاخص نوسان جنوبی (SOI)
۵۱	..... ۹-۱۱-۳-۱ شاخص چند متغیره انسو
۵۳	..... ۱۰-۱۱-۳-۱ شاخص انتقالی انسو (TNI)
۵۳	..... ۱۱-۱۱-۳-۱ شاخص نینو ۴/۳
۵۴	..... ۱۲-۱۱-۳-۱ شاخص مونسون های جنوب غرب (SW.MON)
۵۴	..... ۱۳-۱۱-۳-۱ شاخص اطلس جنوبی حارهای (TSA)
۵۴	..... ۱۴-۱۱-۳-۱ شاخص آرام غربی
۱۸	..... فصل دوم
۱۸	..... ۱-۲ سابقه تحقیق
۱۸	..... ۱-۱-۲ مطالعات انجام شده در خارج از کشور
۲۰	..... ۲-۱-۲ مطالعات انجام شده در کشور
۲۲	..... فصل سوم
۲۵	..... ۱-۳ موقعیت جغرافیای استان لرستان
۲۵	..... ۱-۱-۳ وضعیت منابع آب
۲۶	..... ۱-۱-۱-۳ آبهای سطحی
۲۶	..... ۲-۱-۱-۳ آب های زیر زمینی
۲۶	..... ۲-۱-۳ بررسی و تحلیل عناصر اقلیمی منطقه مورد مطالعه
۲۶	..... ۱-۲-۱-۳ تجزیه و تحلیل دمای دراز مدت استان لرستان
۲۷	..... ۲-۲-۱-۳ وضعیت بارش استان لرستان
۲۸	..... ۳-۲-۱-۳ رطوبت نسبی
۲۹	..... ۴-۲-۱-۳ تبخیر
۲۹	..... ۵-۲-۱-۳ تعداد روزهای یخبندان
۲۹	..... ۶-۲-۱-۳ ساعات آفتابی
۳۰	..... ۶-۱-۳ طبقه بندی اقلیمی
۳۲	..... ۲-۳ روش تحقیق
۳۲	..... ۱-۲-۳ جمع آوری و بازسازی داده ها
۳۳	..... ۲-۲-۳ انتخاب دوره آماری دبی
۳۴	..... ۳-۲-۳ بررسی اولیه سیگنال های اقلیمی
۳۴	..... ۴-۲-۳ انتخاب دوره آماری سیگنال های اقلیمی
۳۵	..... ۵-۲-۳ محاسبه شاخص های خشکسالی
۳۵	..... ۱-۵-۲-۳ شاخص خشکسالی جریان سطحی (SDI)

۳۶	۶-۲-۳ استفاده از شبکه عصبی مصنوعی
۳۶	۷-۲-۳ ساخت شبکه عصبی مصنوعی در این تحقیق
۳۷	۱-۷-۲-۳ تعداد نرونها در لایه ورودی و لایه خروجی
۳۷	۲-۷-۲-۳ تعداد داده ها جهت آموزش و آزمایش شبکه
۳۷	۳-۷-۲-۳ تعداد نرون در لایه پنهان
۳۷	۴-۷-۲-۳ نسبت یادگیری
۳۸	۵-۷-۲-۳ تعداد تکرار
۳۸	۶-۷-۲-۳ تابع فعال
۳۸	۷-۷-۲-۳ نرمالیزه کردن
۳۹	۸-۷-۲-۳ مراحل تعیین وزن در شبکه عصبی مصنوعی
۴۲	۸-۲-۳ ارزیابی روش شبکه عصبی مصنوعی برای انتخاب مدل بهینه
۲۶	فصل چهارم
۵۷	۴- نتایج و بحث
۵۷	۱-۴ خشکسالی هیدرولوژیکی سالانه
۵۷	۱-۱-۴ افرینه
۵۷	۲-۱-۴ ایستگاه بادآور
۵۸	۳-۱-۴ ایستگاه چم انجیر
۵۹	۴-۱-۴ ایستگاه چم چیت
۵۹	۵-۱-۴ ایستگاه کشکان
۶۰	۶-۱-۴ ایستگاه ونایی
۶۱	۷-۱-۴ ایستگاه سرخاب
۶۱	۸-۱-۴ ایستگاه دره تخت
۶۲	۲-۴ مدلسازی شبکه عصبی مصنوعی
۶۲	۱-۲-۴ ایستگاه افرینه
۶۲	۱-۱-۲-۴ تعیین تعداد تکرار بهینه در ایستگاه افرینه
۶۳	۲-۱-۲-۴ تعیین ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه افرینه
۶۵	۳-۱-۲-۴ ضریب تبیین در شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه افرینه
۶۵	۴-۱-۲-۴ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه افرینه
۶۷	۲-۲-۴ ایستگاه بادآور
۶۷	۱-۲-۲-۴ تعیین تعداد تکرار بهینه در ایستگاه بادآور
۶۷	۲-۲-۲-۴ تعیین ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه بادآور
۷۰	۳-۲-۲-۴ ضریب تبیین در شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه بادآور

- ۷۰ ۴-۲-۲-۴ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه بادآور
- ۷۱ ۴-۲-۳-۳ ایستگاه چم انجیر
- ۷۱ ۴-۲-۳-۱ تعیین تعداد تکرار بهینه در ایستگاه چم انجیر
- ۷۲ ۴-۲-۳-۲ تعیین ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه چم انجیر
- ۷۴ ۴-۲-۳-۳ ضریب تبیین در شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه چم انجیر
- ۷۴ ۴-۲-۳-۴ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه چم انجیر
- ۷۵ ۴-۲-۴ ایستگاه چم چیت
- ۷۵ ۴-۲-۴-۱ تعیین تعداد تکرار بهینه در ایستگاه چم چیت
- ۷۶ ۴-۲-۴-۲ تعیین ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه چم چیت
- ۷۸ ۴-۲-۴-۳ ضریب تبیین در شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه چم چیت
- ۷۹ ۴-۲-۴-۴ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه چم چیت
- ۸۰ ۴-۲-۵ ایستگاه دره تخت
- ۸۰ ۴-۲-۵-۱ تعیین تعداد تکرار بهینه در ایستگاه دره تخت
- ۸۰ ۴-۲-۵-۲ تعیین ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه دره تخت
- ۸۳ ۴-۲-۵-۳ ضریب تبیین در شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه دره تخت
- ۸۳ ۴-۲-۵-۴ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه دره تخت
- ۸۴ ۴-۲-۶ ایستگاه کشکان پل دختر
- ۸۴ ۴-۲-۶-۱ تعیین تعداد تکرار بهینه در ایستگاه کشکان پل دختر
- ۸۵ ۴-۲-۶-۲ تعیین ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه کشکان پل دختر
- ۸۷ ۴-۲-۶-۳ ضریب تبیین در شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه کشکان پل دختر
- ۸۷ ۴-۲-۶-۴ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه کشکان پل دختر
- ۸۹ ۴-۲-۷ ایستگاه کشور
- ۸۹ ۴-۲-۷-۱ تعیین تعداد تکرار بهینه در ایستگاه کشور
- ۸۹ ۴-۲-۷-۲ تعیین ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه کشور
- ۹۲ ۴-۲-۷-۳ ضریب تبیین در شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه کشور
- ۹۲ ۴-۲-۷-۴ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه چ کشور
- ۹۳ ۴-۲-۸ ایستگاه ونایی
- ۹۳ ۴-۲-۸-۱ تعیین تعداد تکرار بهینه در ایستگاه ونایی
- ۹۴ ۴-۲-۸-۲ تعیین ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه ونایی
- ۹۶ ۴-۲-۸-۳ ضریب تبیین در شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه ونایی
- ۹۶ ۴-۲-۸-۴ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه ونایی
- ۹۸ فصل پنجم

۹۸	نتیجه گیری و پیشنهادات
۹۶	۱-۵ نتیجه گیری
۹۶	۱-۱-۵ ایستگاه افرینه
۹۶	۲-۱-۵ ایستگاه بادآور
۹۷	۳-۱-۵ ایستگاه چم انجیر
۹۷	۴-۱-۵ ایستگاه چم چیت
۹۸	۵-۱-۵ ایستگاه دره تخت
۹۸	۶-۱-۵ ایستگاه کشکان پل دختر
۹۹	۷-۱-۵ ایستگاه کشور
۹۹	۸-۱-۵ ایستگاه ونایی
۱۰۰	۲-۵ پیشنهادات
۱۰۰	منابع

فهرست شکل‌ها

صفحه	فهرست
۲۶	شکل ۱-۱ ساختار شبکه عصبی مصنوعی
۲۵	شکل ۱-۳ موقعیت جغرافیایی استان لرستان
۲۸	شکل ۲-۳ نمودار تغییرات بارندگی استان لرستان
۲۹	شکل ۳-۳ نمودار تغییرات روزهای یخبندان استان لرستان
۳۰	شکل ۴-۳ نمودار تغییرات ساعات آفتابی استان لرستان
۳۴	شکل ۵-۳ موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه
۳۷	شکل ۶-۳ بخشی از برنامه نوشته شده در نرم افزار Matlab
۴۲	شکل ۷-۳ کاهش خطا در طول مرحله آموزش
۵۷	شکل ۱-۴ خشکسالی هیدرولوژیکی سالانه ایستگاه هیدرومتری افرینه
۵۸	شکل ۲-۴ خشکسالی هیدرولوژیکی سالانه ایستگاه هیدرومتری بادآور
۵۸	شکل ۳-۴ خشکسالی هیدرولوژیکی سالانه ایستگاه هیدرومتری چم انجیر
۵۹	شکل ۴-۴ خشکسالی هیدرولوژیکی سالانه ایستگاه هیدرومتری چم چیت
۶۰	شکل ۵-۴ خشکسالی هیدرولوژیکی سالانه ایستگاه هیدرومتری کشکان
۶۰	شکل ۶-۴ خشکسالی هیدرولوژیکی سالانه ایستگاه هیدرومتری ونایی
۶۱	شکل ۷-۴ خشکسالی هیدرولوژیکی سالانه ایستگاه هیدرومتری سرخاب
۶۲	شکل ۸-۴ خشکسالی هیدرولوژیکی سالانه ایستگاه هیدرومتری دره تخت
۶۳	شکل ۹-۴ نتایج آزمایش جهت انتخاب تعداد تکرار بهینه در ایستگاه افرینه
۶۴	شکل ۱۰-۴ منحنی کمترین خطای شبکه (RMSE) در تعداد نرونهاي میانی مختلف در ایستگاه افرینه
۶۵	شکل ۱۱-۴ نتایج پیش بینی با مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی برای خشکسالی هیدرولوژیکی (SDI) در ایستگاه افرینه
۶۶	شکل ۱۲-۴ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه افرینه
۶۷	شکل ۱۳-۴ نتایج آزمایش جهت انتخاب تعداد تکرار بهینه در ایستگاه بادآور
۶۹	شکل ۱۴-۴ منحنی کمترین خطای شبکه (RMSE) در تعداد نرونهاي میانی مختلف در ایستگاه بادآور
۷۰	شکل ۱۵-۴ نتایج پیش بینی با مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی برای خشکسالی هیدرولوژیکی (SDI) در ایستگاه بادآور
۷۱	شکل ۱۶-۴ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه بادآور
۷۲	شکل ۱۷-۴ نتایج آزمایش جهت انتخاب تعداد تکرار بهینه در ایستگاه چم انجیر
۷۳	شکل ۱۸-۴ منحنی کمترین خطای شبکه (RMSE) در تعداد نرونهاي میانی مختلف در ایستگاه چم انجیر

شکل ۴-۱۹ نتایج پیش بینی با مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی برای خشکسالی هیدرولوژیکی (SDI) در ایستگاه دره تخت	۷۴
شکل ۴-۲۰ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه چم انجیر	۷۵
شکل ۴-۲۱ نتایج آزمایش جهت انتخاب تعداد تکرار بهینه در ایستگاه چم چیت	۷۶
شکل ۴-۲۲ منحنی کمترین خطای شبکه (RMSE) در تعداد نرونهاى میانی مختلف در ایستگاه چم چیت	۷۷
شکل ۴-۲۳ نتایج پیش بینی با مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی برای خشکسالی هیدرولوژیکی (SDI) در ایستگاه چم چیت	۷۸
شکل ۴-۲۴ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه چم چیت	۷۹
شکل ۴-۲۵ نتایج آزمایش جهت انتخاب تعداد تکرار بهینه در ایستگاه دره تخت	۸۰
شکل ۴-۲۶ منحنی کمترین خطای شبکه (RMSE) در تعداد نرونهاى میانی مختلف در ایستگاه دره تخت	۸۲
شکل ۴-۲۷ نتایج پیش بینی با مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی برای خشکسالی هیدرولوژیکی (SDI) در ایستگاه دره تخت	۸۳
شکل ۴-۲۸ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه دره تخت	۸۳
شکل ۴-۲۹ نتایج آزمایش جهت انتخاب تعداد تکرار بهینه در ایستگاه کشکان پل دختر	۸۵
شکل ۴-۳۰ منحنی کمترین خطای شبکه (RMSE) در تعداد نرونهاى میانی مختلف در ایستگاه کشکان پل دختر	۸۶
شکل ۴-۳۱ نتایج پیش بینی با مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی برای خشکسالی هیدرولوژیکی (SDI) در ایستگاه کشکان پل دختر	۸۷
شکل ۴-۳۲ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه کشکان پل دختر	۸۸
شکل ۴-۳۳ نتایج آزمایش جهت انتخاب تعداد تکرار بهینه در ایستگاه کشور	۸۹
شکل ۴-۳۴ منحنی کمترین خطای شبکه (RMSE) در تعداد نرونهاى میانی مختلف در ایستگاه کشور	۹۱
شکل ۴-۳۵ نتایج پیش بینی با مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی برای خشکسالی هیدرولوژیکی (SDI) در ایستگاه کشور	۹۲
شکل ۴-۳۶ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه کشور	۹۳
شکل ۴-۳۷ نتایج آزمایش جهت انتخاب تعداد تکرار بهینه در ایستگاه ونایی	۹۴
شکل ۴-۳۸ منحنی کمترین خطای شبکه (RMSE) در تعداد نرونهاى میانی مختلف در ایستگاه ونایی	۹۵
شکل ۴-۳۹ نتایج پیش بینی با مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی برای خشکسالی هیدرولوژیکی (SDI) در ایستگاه ونایی	۹۶
شکل ۴-۴۰ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه ونایی	۹۷

فهرست جدول‌ها

فهرست	صفحه
جدول ۱-۱: تعیین خشکسالی و تر سالی با استفاده از نمایه بارش استاندارد شده SPI	۱۷
جدول ۱-۲: طبقه بندی خشکسالی و تر سالی با استفاده از نمایه RDI	۱۸
جدول ۱-۳: طبقه بندی شاخص‌های SPI و GRI	۱۹
جدول ۱-۴: طبقه بندی شدت شاخص‌های SWI	۲۰
جدول ۱-۳: خلاصه نتایج طبقه بندی اقلیمی استان لرستان به روش‌های مختلف	۳۲
ادامه جدول ۱-۳: خلاصه نتایج طبقه بندی اقلیمی استان لرستان به روش‌های مختلف	۳۲
جدول ۲-۳: فهرست ایستگاه‌های مورد استفاده در این تحقیق	۳۳
جدول ۳-۳: سیگنال‌های نهایی انتخاب شده برای پیش بینی بارش	۳۵
جدول ۱-۴: نتایج تکرارها جهت انتخاب ساختار بهینه شبکه در ایستگاه افرینه	۶۳
جدول ۲-۴: درصد میزان تأثیر هر نرون در لایه ورودی بر روی خروجی مدل (SDI) در ایستگاه افرینه	۶۶
جدول ۳-۴: نتایج تکرارها جهت انتخاب ساختار بهینه شبکه در ایستگاه بادآور	۶۸
جدول ۴-۴: درصد میزان تأثیر هر نرون در لایه ورودی بر روی خروجی مدل (SDI) در ایستگاه بادآور	۶۸
.....	۷۱
جدول ۵-۴: نتایج تکرارها جهت انتخاب ساختار بهینه شبکه در ایستگاه چم انجیر	۷۲
جدول ۶-۴: درصد میزان تأثیر هر نرون در لایه ورودی بر روی خروجی مدل (SDI) در ایستگاه چم انجیر	۷۵
.....	۷۵
جدول ۷-۴: نتایج تکرارها جهت انتخاب ساختار بهینه شبکه در ایستگاه چم چیت	۷۶
جدول ۸-۴: درصد میزان تأثیر هر نرون در لایه ورودی بر روی خروجی مدل (SDI) در ایستگاه چم چیت	۷۹
.....	۷۹
جدول ۹-۴: نتایج تکرارها جهت انتخاب ساختار بهینه شبکه در ایستگاه دره تخت	۸۱
جدول ۱۰-۴: درصد میزان تأثیر هر نرون در لایه ورودی بر روی خروجی مدل (SDI) در ایستگاه دره تخت	۸۴
.....	۸۴
جدول ۱۱-۴: نتایج تکرارها جهت انتخاب ساختار بهینه شبکه در ایستگاه کشکان پل دختر	۸۵
جدول ۱۲-۴: درصد میزان تأثیر هر نرون در لایه ورودی بر روی خروجی مدل (SDI) در ایستگاه کشکان پل دختر	۸۸
.....	۸۸
جدول ۱۳-۴: نتایج تکرارها جهت انتخاب ساختار بهینه شبکه در ایستگاه کشور	۹۰
جدول ۱۴-۴: درصد میزان تأثیر هر نرون در لایه ورودی بر روی خروجی مدل (SDI) در ایستگاه کشور	۹۳
.....	۹۳
جدول ۱۵-۴: نتایج تکرارها جهت انتخاب ساختار بهینه شبکه در ایستگاه ونایی	۹۴

جدول ۴-۱۶ درصد میزان تأثیر هر نرون در لایه ورودی بر روی خروجی مدل (SDI) در ایستگاه ونایی
۹۷

فصل اول

کلیات و مقدمه

۱-۱ تعریف موضوع و ضرورت انجام تحقیق

افزایش تقاضای آب و وقوع تغییر اقلیم، سال‌های اخیر را با حالات مختلفی از خشکسالی روبرو کرده است خشکسالی به عنوان یک فاجعه زیست‌محیطی به رسمیت شناخته شده و توجه زیست‌شناسان، بوم‌شناسان، هیدرولوژیست‌ها، هواشناسان، زمین‌شناسان و دانشمندان کشاورزی را جلب نموده است (سینگ و میشرا^۱، ۲۰۱۰).

خشکسالی از پدیده‌هایی است که بشر از قدیم‌الایام با آن روبرو بوده است به‌طوریکه زیان‌های سنگین به اقتصاد کشورها مخصوصاً مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران وارد می‌سازد. نمونه‌های بارز آن خسارات زیاد اقتصادی و اجتماعی خشکسالی‌های اخیر در کشور می‌باشد. بهترین راه مقابله با آن شناخت صحیح این پدیده است. با توجه به پیشرفت تکنولوژی و افزایش روزافزون تولید داده‌ها بایستی مدل‌های ایجاد کرد که بتواند این‌گونه پدیده‌ها را قبل از وقوع پیش‌بینی کند. در این صورت می‌توان خسارات ناشی از آن را به حداقل کاهش داد. پیش‌بینی طولانی مدت خشکسالی نیز از مواردی است که در مدیریت منابع آب از اهمیت خاصی برخوردار است که در این تحقیق به آن پرداخته می‌شود. یکی از مواردی که تاکنون باعث شده است تا نتوان مدیریت کارآمد در خشکسالی‌ها به‌کار گرفته شود عدم پیش‌بینی طولانی مدت خشکسالی بوده است، از آن‌جا که کشور از تنوع آب و هوایی متفاوتی برخوردار است وقوع خشکسالی‌ها نیز در هر منطقه متفاوت است.

آنچه کاملاً واضح به نظر می‌رسد، این است که سطح تحقیقات کاربردی در ایران در مقایسه با جهان در این خصوص بسیار کم بوده و قابل مقایسه نیست. به‌هر حال با توجه به اهمیت بالای تغییر اقلیم، بررسی و پیش‌بینی تأثیر سیگنال‌های بزرگ مقیاس بر اقلیم ایران بسیار حیاتی بوده و می‌تواند از بروز بحران‌های کم‌آبی جلوگیری نموده و قبل از بروز بحران کشور را آماده مقابله با آن نمود.

بر اساس عناصر به وجود آورنده خشکسالی، می‌توان پنج نوع خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیک، کشاورزی، اقتصادی و ادافیک^۲ را دسته‌بندی کرد (اسمیت، ۲۰۰۰). در این

^۱ Singh and Mishra

^۲ Edaphic

میان خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک حائز اهمیت می‌باشد. از عناصر اقلیمی تأثیر-گذار در بروز خشکسالی‌ها، بارش بیشترین نوسان را دارد. کشور ایران به علت قرار گرفتن در منطقه خشک و نیمه خشک و بارندگی معادل یک سوم میانگین بارندگی‌های جهان در مقابل سه برابر تبخیر جهانی از نظر منابع آب وضعیتی نامطلوب‌تر نسبت به متوسط دنیا دارد (صمدی بروجنی، ۱۳۸۹). این بی‌نظمی‌ها و نوسانات زیاد در بارش سالانه باعث وقوع خسارات زیادی می‌شود که هر ساله رخ می‌دهد. از جمله پیامدهای بسیار مهم خشکسالی، کاهش ذخایر آب سطحی شامل کاهش ذخایر مخازن سدها، خشک شدن چشمه‌ها و قنات‌ها، پیشروی بیابان، کاهش پوشش گیاهی، افت سطح آب زیرزمینی، خشک شدن مراتع، کاهش نفوذپذیری خاک، کاهش آب رودخانه‌ها، مشکلات اقتصادی-اجتماعی، مهاجرت کشاورزان و خالی شدن روستاها هستند. (کارآموز و عراقی نژاد، ۱۳۸۴).

در بسیاری از موارد خشکسالی‌های هواشناسی با خشکسالی‌های هیدرولوژیکی توأماً اتفاق می‌افتد (دراکاپ^۱ و همکاران، ۱۹۸۰). از خشکسالی هیدرولوژیکی به عنوان خشکسالی واقعی یاد می‌شود که جریان‌های سطحی، منابع آب زیرزمینی و ذخایر آبی دریاچه‌ها و سدها را تحت تأثیر قرار می‌دهد (کارآموز و عراقی نژاد، ۱۳۸۴).

بررسی خشکسالی‌های اقلیمی رخ داده در استان لرستان مؤید این مطلب است که احتمال وقوع خشکسالی‌های که بیش از ۸۰ درصد از سطح استان را در بر می‌گیرند در هر سال حدود ۳۷ درصد می‌باشد. به عبارتی طی هر سه سال ممکن است یک بار چنین خشکسالی در استان لرستان روی دهد. حال اگر احتمال وقوع خشکسالی‌های فراگیر (خشکسالی که تمامی استان لرستان را تحت تأثیر قرار دهد) را مورد توجه قرار دهیم، خواهیم دید که در کمتر از ۸ سال ممکن است چنین اتفاقی رخ دهد. بنابراین علیرغم این که استان لرستان از جمله مناطق پر بارش کشور محسوب می‌شود لیکن با عنایت به بررسی‌های انجام شده مشاهده می‌کنیم که وقوع خشکسالی در این استان نه تنها نادر و تصادفی نیست بلکه پدیده‌ای معمول و بازگشت کننده است.

^۱ Dracup

۱-۲ اهداف تحقیق

- بررسی خشکسالی هیدرولوژیکی و تعیین سال‌های تر و خشک ایستگاه‌های مورد بررسی.
- تعیین مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی جهت پیش بینی خشکسالی هیدرولوژیکی در هر ایستگاه.

۱-۳ کلیات و مفاهیم

۱-۳-۱ تعاریف و مفاهیم خشکسالی با توجه به اهمیت موضوع

در دهه‌های اخیر در بین حوادث طبیعی که جمعیت‌های انسانی را تحت تأثیر قرار داده‌اند، فراوانی پدیده خشکسالی از نظر درجه شدت، تداوم، فضای تحت تأثیر، تلفات جانی، خسارات اقتصادی - اجتماعی و اکولوژیکی دراز مدت در جامعه، بیشتر از سایر بلایای طبیعی بوده است. همچنین تمایز این پدیده با سایر بلایای طبیعی در این است که بر خلاف سایر بلایا این پدیده به تدریج و در یک دوره زمانی نسبتاً طولانی عمل کرده و اثرات آن ممکن است پس از چند سال و با تأخیر بیشتری نسبت به سایر حوادث طبیعی ظاهر شود. بنابراین چون تعیین دقیق زمان شروع آن کار مشکلی است تا حدودی آن را یک پدیده و بلیه خزننده می‌دانند. از سویی چون خشکسالی بر خلاف سایر بلایای طبیعی کمتر منجر به خسارات ساختاری می‌شود، مدیریت بحران و کمک رسانی در هنگام وقوع این پدیده در مقایسه با سایر پدیده‌ها مثل سیل پیچیده تر و مشکل تر می‌باشد. در دهه‌های اخیر خشکسالی‌های محیطی به خاطر مداخله بیش از حد انسان در طبیعت، بدتر و وخیم‌تر نیز شده است (بانگلاپدیا، ۲۰۰۳). خشکسالی یکی از مزمن‌ترین و زیانبارترین بلایای طبیعی محسوب می‌شود که از دیر باز در پهنه وسیع کشورهای مختلف به خصوص کشورهای مستقر در مناطق گرم و خشک به کرات وقوع یافته و انسان‌ها اثرات قابل توجه آن را بر منابع آب، کشاورزی، محیط زیست و جنبه‌های اقتصادی - اجتماعی تجربه کرده‌اند (یاراحمدی و عزیز، ۱۳۸۶؛ سینگ و میشر، ۲۰۱۱).

خشکسالی بسط یک دوره زمانی است که طی آن آب قابل دسترس به طور قابل توجهی پایین تر از حد معمول است. این دوره زمانی ممکن است هفته‌ها، ماه‌ها و حتی سال‌ها (بسته به شرایط ویژه مکانی) به طول انجامد (لشنی‌زند و خرمیان، ۱۳۸۰؛ گالتسو^۱ و همکاران، ۲۰۱۲). تعیین زمان دقیق شروع و خاتمه خشکسالی امری دشوار است. خشکسالی می‌تواند کوتاه مدت باشد و فقط برای چند ماه به طول انجامد و یا چندین سال متوالی ادامه یابد که در این حالت اثرات زیان بخش آن تا سال‌ها بعد تداوم خواهد داشت (ویلپهت^۲، ۲۰۰۰). یک رخداد خشکسالی ممکن است تا موقعی که اتفاق نیفتاده، شناخته نشود. در بین سال‌های ۱۹۹۲-۱۹۶۷ از میان ۷/۲ میلیون افرادی که تحت تأثیر بلایای طبیعی بودند ۵۰٪ آنها تحت تأثیر خشکسالی قرار داشته و از بین ۵/۳ میلیون نفری که در نتیجه بلایای طبیعی جان سپردند حدود ۱/۳ میلیون نفر از آنها قربانی پدیده خشکسالی بودند (اباسی^۳، ۱۹۹۴). حدود ۵۰٪ از نواحی پر جمعیت جهان در برابر خشکسالی فوق‌العاده حساس و آسیب‌پذیر هستند و به طور عمده اغلب اراضی و نواحی کشاورزی در این مناطق واقع شده‌اند (یو اس دی آ^۴، ۱۹۹۴). خشکسالی یک اختلال موقتی در سیستم اقلیمی است و با خشکی تفاوت دارد چرا که خشکی صرفاً محدود به مناطقی با بارندگی اندک است و حالتی دائمی از اقلیم می‌باشد، به عبارت دیگر خشکی جزء ذات منطقه بوده و فطرت و هویت اقلیمی منطقه‌ای و بر همین اساس بخش‌هایی از زمین را بر اساس کلیه سیستم‌های طبقه‌بندی مناطق خشک نامیده‌اند ولی خشکسالی جزء ذات منطقه نیست و بنا به دلایلی از جمله کاهش بارندگی در تمام اقالیم جهان رخ می‌دهد (روسی^۵، ۲۰۰۰). به هر صورت با توجه به پیچیدگی همه جانبه موضوع، هنوز یک تعریف دقیق و جهانی از پدیده خشکسالی که مورد پذیرش همگان باشد ارائه نشده است. هر یک از رشته‌های علوم، پدیده خشکسالی را از دیدگاه خود تعریف نموده‌اند. تاکنون بیش از ۱۵۰ تعریف از خشکسالی ارائه شده است که در همه این تعاریف، خشکسالی یک دوره پیوسته و پایدار که در آن مقدار موجود در یک منطقه به طرز قابل توجهی کاهش می‌یابد، بیان می‌شود (ویلپهت و گلانتز^۶، ۱۹۸۵؛ سینگ و میشر، ۲۰۱۱).

^۱ Goltsev

^۱-Wilhite

^۲-Obasi

^۳-Usda

^۴-Rossi

^۵-Glantz

از نظر پالمر^۱ خشکسالی عبارت است از: کاهش رطوبت مستمر و غیر طبیعی، واژه مستمر به تداوم حالت کمبود و واژه غیر طبیعی به انحراف نمایه مورد نظر از شرایط طبیعی یا میانگین اطلاق می‌شود، به صورت دیگر و ساده‌تر خشکسالی را می‌توان دوره‌هایی دانست که در آن مقدار بارش نسبت به میزان دراز مدت آن کمتر باشد (هدینگاوس و سابل^۲، ۱۹۹۱). گاهی تعاریف واژه خشکسالی از طرف محققان مختلف مشخص می‌کند که آنها بر اساس تخصص و دیدگاه خود یا میزان توجه خود به متغیرهای آب و هوایی مانند بارش، دما، رطوبت نسبی، تبخیر و ... یا متغیرهای کشاورزی مانند رطوبت خاک و شرایط تطبیق گونه‌های گیاهی و یا متغیرهای هیدرولوژیک مانند جریان‌های سطحی و زیر زمینی یا متغیرهای اقتصادی مانند میزان محصولات کشاورزی و یا ترکیبی از این متغیرها، مسئله را بررسی و تعریف کرده‌اند (فرج زاده، ۱۳۷۸). به هر حال عدم وجود یک تعریف جامع و دقیق از خشکسالی و متفاوت بودن معنی آن از دیدگاه‌های مختلف مانع از درک مفهوم خشکسالی شده است. حال از آنجا که خشکسالی بر کلیه جنبه‌های زندگی و بخش‌های مختلف جامعه خصوصاً تغییر محیط طبیعی تأثیر مستقیم و غیر مستقیمی دارد، عدم درک مفهوم آن موجب تردید و رکود در بخش‌های مختلف اقتصادی، مدیریتی و سیاست-گذاری می‌شود. اما بر اساس بررسی منابع علمی به طور کلی می‌توان دو نوع تعریف عمومی از خشکسالی ارائه نمود: مفهومی و عملی^۳.

۱-۳-۲ تعریف مفهومی خشکسالی

تعاریف مفهومی که در قالب اصطلاحاتی کلی بیان می‌شود به افراد کمک می‌کند تا مفهوم خشکسالی را درک کنند. به عنوان مثال خشکسالی عبارت است از یک دوره ممتد کمبود بارش که منجر به صدمه زدن به محصولات زراعی و کاهش عملکرد، کاهش سریع جریان‌های سطحی و افت مخازن زیرزمینی می‌گردد (زارع ایبانه و محبوبی، ۱۳۸۳؛ شفیع زاده، ۱۳۸۹). تعاریف مفهومی در تبیین سیاست‌گذاری در زمینه خشکسالی نیز حائز اهمیت است. کشور استرالیا، کمک‌های مالی به زارعان را صرفاً در رخداد خشکسالی‌های استثنایی به خصوص زمانی

^۱-Palmer

^۲ Heddinghaus and sabol

^۳ Conceptual and Operational

که شرایط خشکسالی حاد تر از مواردی است که به عنوان جزئی از ریسک عادی مدیریت پروژه در نظر گرفته می‌شود، ارائه می‌کند (جیاسلان و چندراسکر^۱، ۲۰۰۲).

۳-۳-۱ انواع خشکسالی از دیدگاه‌های مختلف

تأثیر خشکسالی بر بخش‌های مختلف به طور یکسان نمی‌باشد. در شرایطی که منطقه‌ای با کاهش محسوس بارندگی مواجه شده باشد، این امکان وجود دارد که تأثیر آن بر منابع آب هنوز ملموس نشده و یا کاهش منابع آب سطحی تأثیری بر تولیدات کشاورزی نداشته باشد (تمپسون، ۱۹۹۹)، این وضعیت سبب می‌شود که سبب می‌شود که بسته به شرایط موجود هر بخش تعریف خاص خود را از خشکسالی داشته باشد. از این رو وجود نیازها و زمینه‌های کادری مختلف موجب شده است که هر یک از محققین از دیدگاه خاص خود مسئله‌ی خشکسالی را مورد مطالعه قرار دهند. این مطالعات را می‌توان در چهار طبقه عمده خشکسالی هوا و اقلیم شناسی، هیدرولوژی، کشاورزی و اقتصادی - اجتماعی تقسیم نمود (شفیع‌زاده، ۱۳۸۹؛ انجمن هواشناسی آمریکا^۲، ۲۰۰۴).

۱-۳-۳-۱ خشکسالی هوا و اقلیم شناسی^۳

تحلیل‌های آماری که امروزه در مورد خشکسالی به کار برده می‌شوند بر اساس تئوری یوجویچ^۴ (۱۹۶۷) استوار هستند (عرب و همکاران ۱۳۸۸). در این روش با تقسیم دوره آماری به دو دوره بیشتر و یا کمتر از میانگین، دوره‌هایی که بارندگی آن‌ها کمتر است به عنوان دوره‌های خشکسالی در نظر گرفته می‌شوند. خشکسالی هواشناسی کمبود مقدار بارندگی را نسبت به شرایط میانگین دراز مدت آن بررسی می‌نماید. عامل بارندگی به عنوان پارامتر مهم و اصلی در محاسبه بسیاری از نمایه‌های خشکسالی محسوب می‌شود. از طرفی به منظور حصول نتایجی دقیق و قابل اعتماد نیاز به آمار طولانی مدت بارندگی می‌باشد. این کمبود از طریق به‌کارگیری روش‌های تولید

^۱-Jeyaseelan and chandrasekar

^۲ American Meteorological Society

^۳ Meteorological and climatic drought

^۴-Yevjevich

مصنوعی اطلاعات با روش‌های دیگر داده کاوی مانند روش‌های سری‌های زمانی و یا شبکه عصبی در تولید داده‌های بارش مرتفع می‌شود (شفیع‌زاده، ۱۳۸۹).

از دیدگاه هوا و اقلیم شناسی خشکسالی عبارت است از، کاهش غیر منتظره بارش در مدتی معین در منطقه‌ای که لزوماً خشک نیست. میزان این کاهش آن قدر است که روند عادی رشد را در منطقه مختل می‌کند (علیجانی و کاویانی، ۱۳۸۸). خشکسالی اثرات بی‌درنگ و مضر بر کشاورزی و اثرات دراز مدت بر عرضه منابع آب به جا می‌گذارد. بنابراین خشکسالی ویژگی دائمی یک منطقه نیست و در هر رژیم آب و هوایی می‌تواند اتفاق بیافتد (کاویانی، ۱۳۸۰). اهمیت دیدگاه هوا و اقلیم شناسی در این است که اندازه‌گیری‌ها و ثبت داده‌های جوی اولین نشانه بروز خشکسالی می‌باشند. در مناطقی که وجود دوره‌هایی طولانی بدون بارندگی امری عادی است، تعریفی مبتنی بر تعداد روزهایی با بارش کمتر از یک حد آستانه خاص، غیر واقعی است. در سایر تعاریف رابطه‌ای بین میزان انحراف واقعی بارش و مقادیر متوسط ماهانه، فصلی یا سالانه برقرار می‌شود (مسعودیان، ۱۳۸۵).

۱-۳-۲ خشکسالی هیدروژئولوژیکی و هیدرولوژیکی^۱

خشکسالی هیدرولوژیکی با تأثیرات دوره‌هایی از کمبود ریزش‌های جوی (شامل برف) بر منابع تأمین آب‌های زیر زمینی یا سطحی همراه می‌شود (جریان رودخانه‌ها، مخازن، دریاچه‌ها و آب زیر زمینی) (سینگ و میسرا، ۲۰۱۰). از دیدگاه هیدرولوژیست‌ها خشکسالی زمانی اتفاق می‌افتد که سطح تراز ذخایر آب‌های سطحی و زیر زمینی از حد معمول خود پایین‌تر باشد. خشکسالی هیدرولوژیک اغلب در عرض‌های میانی بر اثر کمبود و فقدان بارش زمستانی اتفاق می‌افتد. علاوه بر بارش فاکتورهای اقلیمی دیگر مانند دماهای بالا، بادهای قوی و رطوبت قوی و رطوبت نسبی کم نیز به طور قابل ملاحظه‌ای بر روی خشکسالی هیدرولوژیک تأثیر دارند (ون لانن^۲، ۲۰۰۵؛ شفیع‌زاده، ۱۳۸۹).

^۱-Hydrological drought

^۲ Van Lanen

۱-۳-۳ خشکسالی کشاورزی^۱

این نوع خشکسالی زمانی به وقوع می‌پیوندد که مقدار رطوبت خاک برای محصول خاصی که در یک زمان معین و در شرایط نرمال کشت می‌گردد، کافی نباشد. خشکسالی کشاورزی از این حقیقت نشئت می‌گیرد که محصولات مختلف، نیازهای رطوبتی متفاوتی دارند. برخی از محصولات، نیاز زیادی به آب دارند در صورتی که، برخی دیگر مانند ارزن و ذرت خوشه‌ای به طور نسبی در برابر خشکسالی کشاورزی مطرح می‌گردد (کیانتش^۲ و دراکاپ، ۲۰۰۲؛ عرب و همکاران، ۱۳۸۹). از دیدگاه کشاورزی درجه خشکسالی به روش پنمن-مانتیش^۳ و روش بارش مؤثر انجام می‌شود. همچنین روش پنمن-مانتیش از طرف FAO به عنوان بهترین روش برای تعیین درجه خشکسالی کشاورزی معرفی شده است (مسعودیان، ۱۳۸۵؛ شفیع‌زاده، ۱۳۸۹).

۱-۳-۴ خشکسالی اقتصادی-اجتماعی^۴

تعاریف اقتصادی-اجتماعی خشکسالی تلفیقی است از عرضه و تقاضای کالاهای با اجزاء خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیکی و کشاورزی. این مورد با سایر انواع خشکسالی ذکر شده قبلی تفاوت دارد، زیرا وقوع آن بستگی به فرایندهای زمانی و مکانی عرضه و تقاضا برای تعریف یا تشخیص خشکسالی‌ها دارد. عرضه بسیاری از کالاهای اقتصادی مانند آب، علوفه، غلات، ماهی و نیروی برق آبی به وضعیت جوی وابسته است. از دیدگاه اجتماعی-اقتصادی، خشکسالی یعنی شرایطی که کمبود آب برای نیازهای بشر موجب نابهنجاری‌های اجتماعی و اقتصادی شود. گاه یک دوره‌ی کوتاه چند هفته‌ای خشکسالی موجب صدمات جدی می‌گردد و گاه یک دوره طولانی خشکسالی می‌تواند صدمات زیادی به همراه نداشته باشد. این مطلب بیانگر آن است که با برنامه‌ریزی صحیح برای مطالبات آب می‌توان ریسک خسارات خشکسالی را به صورت قابل توجهی کاهش داد. خشکسالی اقتصادی-اجتماعی هنگامی بروز می‌یابد که میزان تقاضای یک کالای اقتصادی بیشتر از عرضه آن باشد که این عدم تعادل میان عرضه و تقاضا می‌تواند ناشی از کمبود منابع آب در ارتباط با وضع هوا باشد (مرادی و همکاران، ۱۳۸۶؛ شفیع‌زاده، ۱۳۸۹).

^۱-Agricultural Drought

^۲ Keyantash

^۳-Penman- Monteith

^۴-Socio- Economical Drought

۱-۳-۴ پیامد اثرات توأم خشکسالی‌های هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی

خشکسالی در واقع بخشی از فرآیندهای جوی است و به وضعیت خشک و غیر نرمال جوی اطلاق می‌شود که به عدم توازن شرایط هیدرولوژیکی انجامیده و پیامدهای آن عمدتاً به صورت کاهش در محصولات زراعی و کمبود آب مورد نیاز مردم، گیاهان و حیوانات نمایان می‌گردد. تأثیر این پدیده بر یک جامعه خاص بستگی به این دارد که تا چه حد آن جامعه زندگی و معیشت خود را به شرایط اقلیم وابسته و متکی نموده‌اند. از این رو، جوامع ساده مانند عشایر در وهله بیشترین تأثیر را از آن پذیرفته و با استفاده از دانش بومی و تجارب سنتی تلاش می‌کنند با شرایط سخت ناشی از خشکسالی به نوعی سازش و مقابله نمایند (الکساندر^۱، ۱۹۹۳؛ شفیع‌زاده، ۱۳۸۹).

تشخیص و تفکیک بحث خشکسالی کشاورزی از خشکسالی هیدرولوژیکی بدین علت است که در مطالعه خشکسالی کشاورزی، باران مؤثر به عنوان بخشی از باران که بتواند در ناحیه ریشه نفوذ کند مورد نظر می‌باشد درحالی‌که در خشکسالی هیدرولوژیکی باران مؤثر بخشی از بارندگی است که به ناحیه ریشه در خاک نفوذ نمی‌کند بلکه در سطح زمین یا در زیر زمین جاری شده و به افزایش آب در چشمه‌ها، جویبارها، دریاچه‌ها و حوضچه‌ها می‌انجامد. زمانی که خشکسالی آغاز می‌شود، بخش کشاورزی به دلیل وابستگی بیش از حد به ذخیره رطوبتی خاک، معمولاً نخستین بخشی است که تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در طی دوره‌های ممتد خشکی، چنانچه کمبود بارش ادامه یابد، رطوبت خاک به سرعت تخلیه می‌شود در این صورت اتکا مردم به سایر منابع آبی بایستی تأثیرات این کمبود را مرتفع سازد. مثلاً آن‌هایی که متکی به منابع آب‌های سطحی (نظیر مخازن و دریاچه‌ها) و آب‌های زیر زمینی هستند معمولاً دیرتر از سایرین تحت تأثیر قرار می‌گیرند. یک خشکسالی کوتاه مدت که ۳ تا ۶ ماه به طول می‌انجامد، بسته به خصوصیات هیدرولوژیکی سیستم و نیازهای مصرف آب، احتمالاً تأثیرات اندکی بر این بخش‌ها به همراه دارد (شفیع‌زاده، ۱۳۸۹).

۱- Alexander

۱-۳-۵ ویژگی‌های فضایی- زمانی^۱ خشکسالی

۱-۳-۵-۱ آغاز، تداوم و پایان خشکسالی

به طور کلی تشخیص زمان آغاز و خاتمه خشکسالی مسئله بسیار مشکلی است. اصولاً زمان آغاز خشکسالی عمدتاً به تعریف مورد استفاده وابسته است. بدیهی است که این زمان با توقف آخرین بارش مفید آغاز نمی‌شود بلکه ممکن است تا زمان اتمام ذخیره رطوبت خاک به طول انجامد. در این حالت نیز بارش‌های هر چند اندک در زمان آغاز خشکسالی، پیچیدگی خاصی پیدا می‌کند. بنابراین در حالت کلی می‌توان گفت زمان آغاز خشکسالی، زمانی است که ذخیره رطوبتی چه در محیط خاک (خشکسالی کشاورزی) و چه در مخازن آبی (خشکسالی هیدرولوژیک) خاتمه یافته باشد. از طرف دیگر انتهای خشکسالی نیز مسئله قابل توجهی محسوب می‌شود. پایان خشکسالی نسبت به زمان آغاز محسوس‌تر است. در امر کشاورزی، پایان خشکسالی، زمانی است که نزول باران، رطوبت مورد نیاز خاک را تأمین نماید. در هیدرولوژی، زمانی که جریان رودخانه مجدداً برقرار شده و مخازن زیرزمینی تغذیه مجدد شوند زمان پایان خشکسالی در نظر گرفته می‌شود.

۱-۳-۵-۲ شدت خشکسالی^۲

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های خشکسالی شدت آن است و اهمیت آن به حدی است که پیش، ارزیابی و پیش بینی این پدیده بدون توجه به شدت آن چندان مفید نیست. بر اساس تعریف هر قدر میزان کمبود بارندگی نسبت به شرایط میانگین کمتر باشد، به همان اندازه تأثیر خشکسالی نمود عینی بیشتری پیدا می‌کند. علاوه بر این، میزان استمرار حالت خشکسالی تنها برای یک ماه استمرار داشته باشد احتمال دارد بارش ماه بعد، میزان کمبود ماه مزبور را جبران نماید، ولی اگر ماه بعدی نیز خود نسبت به شرایط طبیعی کمبود داشته باشد، به مراتب در شدت بخشیدن به حالت خشکسالی مؤثر خواهد بود. میزان کاستی در متغیر مورد مطالعه و همچنین زمان استمرار آن بیانگر شدت خشکسالی است. به همین منظور برای مشخص ساختن این عامل در مطالعه خشکسالی، محققان با استفاده از نمایه‌های مختلف سعی می‌کنند درجه ناهنجاری منفی متغیر مورد مطالعه را

^۱-Tempo- Spatial

^۲-Drought Severity

نیز مد نظر قرار دهند. انتخاب نمایه **SDI**^۱ در پژوهش حاضر عمدتاً به همین دلیل بوده است. زیرا در محاسبه آن فاکتورهای متعدد اقلیمی که هر یک به نوعی بیانگر شدت خشکسالی هستند استفاده می‌شوند.

۱-۳-۵-۳ وسعت منطقه‌ای خشکسالی^۲

این که خشکسالی در چه وسعتی روی دهد و اثرات آن تا چه حدی فراتر رود خود مسئله مهمی است. اصولاً رخداد خشکسالی می‌تواند در منطقه‌ای با وسعت چند صد کیلومتر مربع اتفاق افتد ولی ممکن است شدت و دوره تداوم آن در سراسر منطقه یکسان نباشد. خشکسالی قاره‌ای که خصوصاً در مناطق خشک اتفاق می‌افتد در ناحیه وسیعی که صدها، بلکه هزاران کیلومتر مربع را می‌پوشاند، گسترش پیدا می‌کند. در خصوص وسعت تحت شعاع پیامدهای ناشی از خشکسالی به نمونه‌های متعددی می‌توان اشاره نمود. به عنوان مثال در نتیجه شدت و تداوم خشکسالی‌ها، طوفان‌های گرد و غبار صحرای بزرگ آفریقا در دهه ۱۹۷۰ از چنان قدرت و سرعتی برخوردار شدند که ریز غبارهای ناشی از آن با طی هزاران کیلومتر مسیر به اروپای غربی و مرکزی رسیدند. ورود این ریز غبارها و گسترش آنها در این مناطق اثرات مهمی بر شرایط تابشی و تغییر در تابش خورشیدی دریافت شده به سطح زمین داشته است (وارنر^۳، ۲۰۰۴).

۱-۳-۵-۴ فراوانی خشکسالی^۴

فراوانی خشکسالی نیز از ویژگی‌های مهم مورد مطالعه در بررسی خشکسالی به شمار می‌آید که در مقیاس‌های مختلف زمانی (سالانه، ماهانه و فصلی) محاسبه می‌شود. با توجه به وجود شدت‌های مختلف خشکسالی، بررسی فراوانی می‌تواند برای هر یک از این شدت‌ها به طور جداگانه صورت گیرد. همچنین محاسبه توزیع فراوانی در شدت‌های مختلف می‌تواند در ارزیابی قابلیت منطقه مورد مطالعه نسبت به شدت‌های مختلف خشکسالی کاربرد داشته باشد. در سال‌های اخیر تعدادی

^۱ Stream-flow Drought Index (SDI)

^۲-Regional Extent Of Drought

^۳- Warner

^۴-Frequency Of Drought

از محققین روش‌هایی را برای محاسبه دوره بازگشت خشکسالی‌ها ارائه کرده‌اند (ژورنل^۱ و همکاران، ۲۰۰۳).

۱-۳-۵ دوره تناوبی رخداد خشکسالی^۲

بررسی‌های مربوط به احتمال تکرار خشکسالی‌ها و سایر پدیده‌های طبیعی به صورت رخداد های نامنظم، بخش زیادی از تحقیقات محققان را به خود اختصاص داده است، به طوری که بیش از ۱۰۰۰ مقاله در رابطه با ارتباط رخداد های آب و هوایی با سیکل یازده ساله کلف‌های خورشیدی^۳ تهیه شده است (بران و رادیر^۴، ۱۹۸۵). امروزه رابطه میان لکه های خورشید با برخی از پدیده های زمینی به اثبات رسیده است (جعفری بهی، ۱۳۸۷). در رابطه با تناوب رخداد های خشکسالی، برخی از محققان علاوه بر تناوب ۱۱ ساله به دوره ۲۲ ساله پی برده‌اند (بالم و مولی^۵، ۱۹۸۱). چرخه دوره‌ای ۴۴ ساله‌ای نیز به وسیله سانسون (۱۹۵۴) برای تغییرات بارندگی در فرانسه برای منطقه مدیترانه عنوان شده است (بران و رادیر، ۱۹۸۹). برخی محققان نیز به دوره تناوبی بیشتری اشاره کرده‌اند. با توجه به مطالعات زیادی که در این زمینه انجام شده است هنوز قانونمندی علمی که هنگام کاهش لکه های خورشیدی یا به دنبال آن، خشکسالی‌های شدیدی در این مناطق روی داده است.

۱-۳-۶ نمایه‌های خشکسالی^۶

با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان چنین بیان کرد که خشکسالی، کمبود آب ناشی از بارش کم، تبخیر و تعرق زیاد، افزایش بیش از حد برداشت از منابع آب و یا ترکیبی از این موارد می‌باشد. به کمک این تعریف، سه پارامتر اصلی خشکسالی‌ها محسوب می‌شوند، پدید آمده‌اند که هر یک پارامتر های مخصوص به خود را در نظر گرفته و طبقه‌بندی خاص خود را در خشکسالی ارائه می‌دهند. این روش‌ها و نمایه‌ها مواردی هستند که امروزه در سیستم‌های پایش خشکسالی به منظور تأمین کارکردهای این سیستم‌ها به کار برده می‌شوند. جهت مقایسه و مطالعه تطبیقی

^۱-Journal

^۲-Period of Drought Occurrence

^۳-Solar Calf

^۴-Beran and Rodier

^۵-Bhalme and Mooly

^۶-Drought Indices

ویژگی‌های خشکسالی از یک ناحیه به ناحیه دیگر و از زمانی به زمان دیگر، برخی از معیارهایی را مشکل می‌سازد، اما بر اساس نظر سازمان هواشناسی جهانی (WMO)^۱ در سال ۱۹۹۲ چنین معیارها یا شاخص‌هایی باید دارای حداقل ۴ خصوصیت زیر باشند (ویلهیت، ۲۰۰۱):

۱- نمایه مورد استفاده باید در چهارچوب مقیاس زمانی طولانی انتخاب شده از کارایی کافی برخوردار باشد.

۲- نمایه باید بیانی از شرایط خشکسالی در مقیاس زمانی طولانی و در ابعاد وسیع از ناحیه‌ای تا سیاره‌ای ارائه دهد.

۳- نمایه باید به گونه‌ای انتخاب شود که برای بررسی دقیق مسئله مورد مطالعه به خصوص از دیدگاه آمار و داده‌های مورد نیاز قابل استفاده باشد.

۴- نمایه مورد نظر باید قابلیت بررسی شرایط خشکسالی را حداقل از یکی از جهات پایش، ارزیابی و پیش‌بینی دارا باشد.

۱-۳-۷ تعریف و کاربرد نمایه‌های خشکسالی

نمایه‌های خشکسالی فهم ارتباط اطلاعات را درباره بی‌نظمی‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی برای کاربران گوناگون آسان‌تر می‌کند و به دانشمندان اجازه می‌دهد تا کمیت بی‌نظمی‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی را در روابط شدت، مدت، فراوانی و گسترش مکانی برآورد و مطالعه کنند (تساکیریس^۲ و همکاران، ۲۰۰۶). نمایه‌ها اطلاعات مهم و مفیدی را برای برنامه‌ریزی، طراحی و مدیریت استفاده از منابع آب در اختیار کاربران قرار می‌دهند.

خشکسالی یک پدیده متناوب طبیعی است که همراه با کمبود منابع آب در دسترس در یک منطقه جغرافیایی وسیع و در یک دوره زمانی قابل ملاحظه باشد. بر اساس این تعریف، خشکسالی یک پدیده مکانی است که با سه بعد شدت، مدت و وسعت مشخص می‌شود (روسی، ۲۰۰۰). بنابراین خشکسالی مانند سایر پدیده‌های اقلیمی تابع عوامل مختلفی بوده و آن را نمی‌توان محدود به یک پارامتر خاص کرد. از همین رو است که نمایه‌های مختلفی برای بیان وقوع این پدیده پیشنهاد شده است.

^۱-World Meteorological Organization

^۲-Tsakiris

۱-۳-۸ بررسی چند نمایه خشکسالی مهم همراه با مزایا و معایب آنها

در روند پیدایش و توسعه نمایه‌های پایش خشکسالی با توجه به هدف برنامه پایش در مناطق مختلف و همچنین خواص منحصر به فرد طبیعی هر منطقه، نمایه‌های متفاوت و در طبقه بندی‌های مختلفی پدیدار گشته‌اند. به عنوان مثال نمایه خشکسالی^۱ CSDI تنها به منظور پایش خشکسالی محصول ذرت (سال ۱۹۹۳) و محصول لوبیا (سال ۱۹۹۵) توسعه یافته است. نمایه‌های مختلف از روش‌های مختلفی که در بخش‌های قبل ذکر گردید استفاده نموده و به سه گروه تقسیم بندی می‌گردند. این گروه‌ها شامل نمایه‌های هواشناسی، نمایه‌های کشاورزی و نمایه‌های هیدرولوژیکی هستند. که در این بخش برخی از پرکاربردترین نمایه‌ها در گروه‌های یاد شده معرفی شده است. پایش خشکسالی اقتصادی اجتماعی، به دلیل وابستگی به پارامترهای اجتماعی، اقتصادی و فرهنگی دارای نمایه خاصی نبوده و معمولاً از طریق میزان اختلال به وجود آمده در ساختارهای اقتصادی و اجتماعی در اثر خشکسالی بیان می‌گردد.

۱-۳-۸-۱ نمایه‌های هواشناسی^۲

مبنای محاسبات در نمایه‌های هواشناسی بر اساس روش تحلیل داده‌های بارندگی بوده و از مهم‌ترین نمایه‌های هواشناسی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱-۳-۸-۱-۱ نمایه بارش استاندارد^۳

این نمایه در سال ۱۹۹۵ توسط مکی و همکارانش ارائه شد که بر اساس تفاوت بارش از میانگین برای یک مقیاس زمانی مشخص و سپس تقسیم آن بر انحراف معیار به دست می‌آید و تنها فاکتور مؤثر در محاسبه این نمایه عنصر بارندگی می‌باشد. این نمایه را می‌توان در مقیاس‌های زمانی ۲۴، ۱۲، ۶، ۳ و ۴۸ ماهه محاسبه کرد.

^۱ Crop Specific Drought Index (CSDI)

^۲ - Meteorological Drought

^۳ Standardized Precipitation Index (SPI)

این نمایه یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین نمایه‌های خشکسالی است و بسیاری از محققین به قابلیت انعطاف پذیری این روش اشاره داشته‌اند (هایس و همکاران، ۱۹۹۸). این نمایه به دلیل نرمال بودن نسبت به شرایط زمان و مکان به طور گسترده‌ای در جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد (هونگ وو و همکاران، ۲۰۰۷).

این نمایه بدون بعد بوده و از بی‌نظمی‌های داده‌های گسسته و تبدیل شده بارش که بر انحراف معیار بارندگی تقسیم شده است، محاسبه می‌شود (اگنیو، ۲۰۰۱؛ ادوارد و مکی، ۱۹۹۷). این نمایه به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$SPI = \frac{P_i - \bar{P}}{\sigma} \quad \text{رابطه (۱-۱)}$$

که در آن P_i مقدار بارندگی در زمان i ، \bar{P} متوسط بارندگی در دوره زمانی مورد مطالعه و σ انحراف استاندارد بارندگی در دوره زمانی مورد نظر است. کلاس‌های مختلف خشکسالی مربوط به این نمایه در جدول ۱-۱ نشان داده شده است.

بعضی از مزایا و محدودیت‌های SPI عبارتند از (آسیابی ۱۳۸۵) : - اولین مزیت SPI سادگی آن است، SPI بر پایه بارندگی می‌باشد، در حالی که محاسبه PSDI پیچیده می‌باشد و ۶۸ اصطلاح در آن باید تعریف شود.

- دومین مزیت SPI چند کاره بودن آن است. SPI می‌تواند برای هر مقیاس زمانی محاسبه شود
- سومین ویژگی SPI این است چون محاسبه SPI فقط بر پایه داده‌های بارندگی بوده و به شرایط رطوبت خاک بستگی ندارد بنابراین می‌توان از آن برای ماه‌های زمستان نیز استفاده کرد.
- SPI چند محدودیت نیز دارد که در هنگام استفاده از آن باید مورد توجه قرار بگیرد:
- صحت و اعتبار SPI به اندازه صحت و اعتبار داده‌های مورد استفاده است.
- قبل از استفاده از SPI برای یک ایستگاه اطلاع از اقلیم ناحیه مورد نظر نیاز می‌باشد (ویلهیت ۲۰۰۰).

^۱ - Agnew

-تنها از عامل بارندگی برای محاسبه خشکسالی استفاده می‌کند و از دیگر عوامل مؤثر دیگر همچون تبخیر و تعرق چشم پوشی می‌کند. (تساکیس و همکاران، ۲۰۰۶).

جدول ۱-۱: تعیین خشکسالی و تر سالی با استفاده از نمایه بارش استاندارد شده SPI

SPI مقدار شاخص	طبقه‌بندی خشکسالی
بزرگ‌تر یا مساوی از ۲	خیلی خیلی مرطوب
۱/۵ تا ۱/۹۹	خیلی مرطوب
۱ تا ۱/۵	کمی مرطوب
۰/۹۹- تا ۰/۹۹	نزدیک به نرمال
۱- تا ۱/۴۹-	کمی خشک
۱/۵- تا ۱/۹۹-	خشکی شدید
کوچک‌تر یا مساوی ۲-	بسیار زیاد خشک

۱-۳-۸-۱-۲ شاخص RDI

این نمایه در سال ۲۰۰۵ برای تعیین خشکسالی اقلیمی و بررسی شدت، فراوانی و دیگر جنبه‌های خشکسالی ارائه شده است (شفیع‌زاده، ۱۳۸۹؛ تی‌ساکیس و ونجلیس^۲، ۲۰۰۵). این شاخص برای تعیین وضعیت خشکسالی ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه کاربرد دارد (تی‌ساکیس و ونجلیس، ۲۰۰۵؛ آیجلیسیز^۳ و همکاران، ۲۰۰۹).

مهم‌ترین مزیت این شاخص نسبت به دیگر شاخص‌های بارشی خشکسالی (شاخص‌های که برای محاسبه فقط به پارامتر بارش نیاز دارند)، نیاز به تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه و سالانه ایستگاه‌های مطالعاتی برای محاسبه شاخص خشکسالی RDI است (شفیع‌زاده، ۱۳۸۹؛ تی‌ساکیس و همکاران، ۲۰۰۶).

^۱ Reconnaissance Drought Index (RDI)

^۲ Tsakiris and Vangelis

^۳ Iglesias

مقادیر این شاخص و تعیین شدت خشکسالی توسط آن شبیه به شاخص‌های SPI، PDSI^۱ و SWSI^۲ است (بداق جمالی و همکاران، ۱۳۸۴؛ اسدی و همکاران، ۱۳۸۸؛ آیجلیسیز و همکاران، ۲۰۰۹). جدول ۱-۲ این مقادیر را نشان می‌دهد (بداق جمالی و همکاران، ۱۳۸۴).

جدول ۱-۲: طبقه بندی خشکسالی و تر سالی با استفاده از نمایه RDI

طبقه بندی خشکسالی	RDI مقدار شاخص
خیلی خیلی مرطوب	بزرگ تر یا مساوی از ۲
خیلی مرطوب	۱/۵ تا ۱/۹۹
کمی مرطوب	۱ تا ۱/۵
نزدیک به نرمال	۰/۹۹- تا ۰/۹۹
کمی خشک	۱- تا -۱/۴۹
خشک شدید	-۱/۵ تا -۱/۹۹
بسیار زیاد خشک	کوچک تر یا مساوی -۲

۱-۳-۸-۲ نمایه های هیدروژئولوژیکی و هیدرولوژیکی

مبنای محاسبات در نمایه های هیدروژئولوژیکی و هیدرولوژیکی بر اساس روش تحلیل داده‌های سطح آب زیرزمینی و جریان سطحی بوده و از مهم‌ترین نمایه‌های هواشناسی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

۱-۳-۸-۲-۱ شاخص خشکسالی جریان سطحی (SDI)^۳

این شاخص وضعیت خشکسالی هیدرولوژیکی را بر اساس رابطه (۱-۲) مورد بررسی قرار می‌دهد.

$$SDI = \frac{V_k - \bar{V}_k}{s_k} \quad \text{رابطه (۱-۲)}$$

^۱ Palmer Drought Severity Index (PDSI)

^۲ Surface Water Supply Index (SWSI)

^۳ Streamflow Drought Index

V_K حجم تجمعی جریان رودخانه \bar{V}_K و S_K به ترتیب میانگین و انحراف از معیار داده‌های درازمدت جریان سطحی می‌باشند. طبقه‌بندی شاخص SDI در ۵ کلاس و مانند شاخص SPI است.

۱-۳-۸-۲-۲ شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI)^۱

مهندسینو^۲ و همکاران (۲۰۰۸) شاخص GRI را به عنوان شاخص مفید و قابل اعتماد برای پایش و پیش بینی وضعیت خشکسالی هیدروژئولوژیک برای منطقه مدیترانه پیشنهاد دادند. مقدار این شاخص از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$GRI = \frac{D_{y,m} - \mu_{D,m}}{\sigma_{D,m}} \quad \text{رابطه (۳-۱)}$$

در این رابطه $D_{y,m}$ ارتفاع سطح آب زیرزمینی چاه‌های پیژومتری در سال y و ماه m ، $\mu_{D,m}$ میانگین ماهانه آنها و $\sigma_{D,m}$ انحراف از معیار این مقادیر در ماه m می‌باشد. طبقات مختلف رطوبتی در شاخص GRI همانند شاخص SPI می‌باشند (جدول ۳-۱).

جدول ۳-۱ طبقه بندی شاخص‌های SPI و GRI

مقادیر GRI	مقادیر SPI	طبقات خشکسالی
> 0	> 0	بدون خشکسالی
۰ تا ۰/۹۹	۰ تا ۰/۹۹	خشکسالی ملایم
-۱ تا -۱/۴۹	-۱ تا -۱/۴۹	خشکسالی متوسط
-۱/۵ تا -۱/۹۹	-۱/۵ تا -۱/۹۹	خشکسالی شدید
-۲ و کمتر	-۲ و کمتر	خشکسالی بسیار شدید

۱-۳-۸-۳-۲ شاخص سطح آب استاندارد^۳ (SWI)

شاخص سطح آب استاندارد در سال ۲۰۰۴ توسط بویان جهت پایش نوسانات سطح سفره‌های آب زیرزمینی در بررسی خشکسالی‌های هیدرولوژیک ارائه شده است و با روش زیر محاسبه می‌شود:

$$SWI = \frac{W_{ij} - W_{im}}{\sigma} \quad \text{رابطه ۴-۱}$$

^۱ Groundwater Resource Index

^۲ Mendicino

^۳ Soil Water Index (SWI)

که در رابطه فوق wiz : سطح ایستابی چاه‌های پیزومتری i تا j ، wim میانگین ماهانه آنها و σ : انحراف از معیار می‌باشد. مقادیر مختلف SWI جهت تعیین شدت خشکسالی هیدرولوژیکی در جدول (۱-۴) آورده شده است. مقادیر مثبت SWI نشان دهنده خشکسالی و مقادیر منفی نشان دهنده عدم خشکسالی و شرایط نرمال می‌باشد.

جدول ۱-۴ طبقه بندی شدت شاخص‌های SWI

مقادیر SWI	طبقه خشکسالی
< 0	بدون خشکسالی
۰ تا ۰/۹۹	خشکسالی ملایم
۱/۴۹ تا ۱	خشکسالی متوسط
۱/۹۹ تا ۱/۵	خشکسالی شدید
۲ و بیشتر	خشکسالی بسیار شدید

۱-۳-۹ مدل

واژه مدل را می‌توان به هر نمایشی از یک سامانه اطلاق کرد. با این تعریف حتی تصویری از یک پدیده نیز مدلی از آن پدیده خواهد بود. اما آنچه امروزه از مفهوم مدل استنباط می‌شود یک سامانه انتزاعی است که رفتار یک سامانه واقعی را تقلید یا شبیه سازی می‌کند (فاتحی‌مرج، ۱۳۸۱). به عبارتی دیگر یک مدل، خواص مکانی و زمانی یک سامانه یا بخش‌هایی از آن را به صورت فیزیکی (واقعی) یا ریاضی (انتزاعی)^۱ شبیه‌سازی می‌کند (کرسیک^۲، ۲۰۰۹).

۱-۳-۱۰ انواع مدل‌ها

مدل‌های فراوانی برای شبیه سازی خشکسالی هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی وجود دارد. از جمله می‌توان به مدل‌های فیزیکی، مدل‌های قیاسی، مدل‌های الکتریکی، مدل هله شاو، مدل ریاضی، مدل تجربی، مدل‌های علت و معلولی، مدل‌های تحلیلی و مدل‌های فرآیند محور

۱-Abstract

۲ kresic

اشاره کرد. از میان این مدل‌ها، مدل‌های فرآیند محور که روش حل آن‌ها به صورت عددی است، از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردارند.

۱-۳-۱۰-۱ مدل‌های عددی

توصیف کننده تمام میدان جریان مورد نظر به طور هم‌زمان می‌باشند، به شرط آن که برای نقاط مشخص شده توسط کاربر، حل ریاضی وجود داشته باشد. مدل‌های عددی بر اساس روش‌های مختلف تقریب‌سازی^۱ معادلات دیفرانسیل جریان و روش‌های حل عددی به چند گروه تقسیم‌بندی می‌شوند که مدل شبکه عصبی مصنوعی یکی از آن‌هاست که به اختصار توضیح داده می‌شود (کرسیک، ۲۰۰۹).

۱-۳-۱۰-۲ شبکه عصبی مصنوعی^۲

۱-۳-۱۰-۲-۱ تاریخچه شبکه عصبی مصنوعی

بعضی از پیش زمینه‌های شبکه‌های عصبی را می‌توان به اوایل قرن بیستم و اواخر قرن نوزدهم بر-گرداند. در این دوره کارهای اساسی در فیزیک، روانشناسی و نروفیزیولوژی^۳ توسط علمایی چون هرمان فون هلمهلتز^۴، ارنست ماخ^۵ و ایوان پاولف^۶ صورت پذیرفت.

این کارهای اولیه عموماً بر تئوری‌های کلی، بینایی و شرطی تاکید داشته‌اند و اصلاً به مدل‌های مشخص ریاضی عملکرد نرون‌ها اشاره‌ای نداشته‌اند.

دیدگاه جدید شبکه‌های عصبی در دهه ۴۰ قرن بیستم آغاز شد زمانی که وارن مک کلوت^۷ و والتر پیتز^۸ نشان دادند که شبکه‌های عصبی می‌توانند هر تابع حسابی و منطقی^۹ را محاسبه نمایند. کار این افراد را می‌توان نقطه شروع حوزه علمی شبکه‌های عصبی مصنوعی نامید و این موضوع با دونالد هب^{۱۰} ادامه یافت. ایشان عمل شرط‌گذاری^{۱۱} کلاسیک را که توسط پاولف مطرح شده بود

^۱-Approximating

^۲Artificial Neural Network(ANN)

^۳Neuro-Physiology

^۴Hermann von Helmholtz

^۵Ernst Mach

^۶Ivan Pavlov

^۷Warren McCulloch

^۸Walter Pitts

^۹Logical Function

^{۱۰}Donald Hebb

^{۱۱}Conditioning

به عنوان خواص نرون‌ها معرفی نمود و سپس مکانیسمی را جهت یادگیری نرون‌های بیولوژیکی ارائه داد.

نخستین کاربرد شبکه‌های عصبی در اواخر دهه ۵۰ قرن بیستم مطرح شد، زمانی که فرانک روزنبلات^۱ در سال ۱۹۵۸ شبکه پرسپترون را معرفی کرد. روزنبلات و همکارانش شبکه‌ای ساختند که قادر بود الگوها را از هم شناسایی نماید. در همین زمان بود که برنارد ویدرو^۲ در سال ۱۹۶۰ شبکه عصبی تطبیقی خطی آدلاین^۳ را با قانون یادگیری جدید مطرح کرد که از لحاظ ساختار شبیه شبکه پرسپترون بود. هر دوی این شبکه‌ها (پرسپترون و آدلاین) دارای این محدودیت بودند که توانایی طبقه‌بندی الگوها را نداشتند، که به طور غیر خطی از هم متمایز می‌شدند. ویدرو و روزنبلات هر دو بر این امر آگاه بودند، چون آنها قانون یادگیری را برای شبکه‌های عصبی تک لایه مطرح نموده بودند؛ لذا توانایی محدودی برای تخمین توابع داشتند. هر چند آنها توانستند شبکه‌های چند لایه را مطرح کنند لکن نتوانستند الگوریتم‌های یادگیری شبکه‌های تک لایه را بهبود بخشند.

پیشرفت شبکه‌های عصبی تا دهه ۷۰ قرن بیستم ادامه یافت. در سال ۱۹۷۲ تئوکوهن^۴ و جیمز اندرسون^۵ به طور مستقل و بدون اطلاع از هم شبکه‌های عصبی جدیدی را معرفی نمودند که قادر بودند به عنوان عناصر ذخیره ساز عمل نمایند. استفان گراسبرگ^۶ در این دهه روی شبکه‌های خود سامانده^۷ فعالیت می‌کرد. فعالیت در زمینه شبکه‌های عصبی در دهه ۶۰ قرن بیستم در قیاس با دهه ۸۰ (به علت عدم بروز ایده‌های جدید و نبود رایانه‌های سریع جهت پیاده‌سازی) کم‌رنگ بود. لکن در خلال دهه ۸۰ رشد تکنولوژی میکروپروسورها روند صعودی داشت و تحقیقات روی شبکه‌های عصبی فزونی یافت و ایده‌های بسیار جدیدی مطرح شدند. ایده‌های جدید و تکنولوژی بالا برای تحول دوباره در شبکه‌های عصبی کافی به نظر می‌رسید. در این زایش دوباره شبکه‌های عصبی دو نگرش جدید قابل تأمل می‌باشد. استفاده از مکانیسم تصادفی جهت توضیح عملکرد یک طبقه وسیع از شبکه‌های برگشتی که می‌توان آنها را جهت ذخیره سازی اطلاعات استفاده

^۱Ferank Rosenblalt

^۲Bernurd Widrow

^۳ADaptive LINear Element

^۴Teo Kohonen

^۵James Anderson

^۶Stefan Grossberg

^۷Self-Organizing

نمود. این ایده توسط جان هاپفیلد^۱ فیزیکدان آمریکایی در سال ۱۹۸۲ مطرح شد. دومین ایده مهم که کلید توسعه شبکه‌های عصبی در دهه ۸۰ شد، الگوریتم پس انتشار خطا^۲ می‌باشد که توسط دیوید راملهارت^۳ و جیمز مککلند^۴ در سال ۱۹۸۶ مطرح گردید. با بروز این دو ایده، شبکه‌های عصبی متحول شدند. در ده سال اخیر هزاران مقاله در این باره نوشته شده است و شبکه‌های عصبی کاربردهای زیادی در رشته‌های مختلف علوم پیدا کرده‌اند. شبکه‌های عصبی در هر دو جهت توسعه تئوریک و علمی در حال رشد می‌باشند. اما این روند رشد آهسته و مطمئن نبوده، دوره‌های بسیار سریع همراه با دوره‌های کند مشاهده شده است. بیشتر پیشرفت‌ها در شبکه‌های عصبی به ساختارهای نوین و روش‌های یادگیری جدید مربوط می‌شود (منهاج، ۱۳۸۱).

۱-۳-۱۰-۲-۲ تعریف و مزایای شبکه عصبی مصنوعی

شبکه عصبی مصنوعی یک مکانیسم محاسباتی است که قادر است با گرفتن اطلاعات و محاسبه کردن آن‌ها یک سری اطلاعات جدید را ارائه دهد (منهاج، ۱۳۸۱). در این شبکه سعی بر این است که ساختاری مشابه ساختار بیولوژیکی مغز انسان و شبکه اعصاب بدن ساخته شود تا همانند مغز قدرت یادگیری، تعمیم‌دهی و تصمیم‌گیری داشته باشد (رحمانی و سدهی، ۱۳۸۳) و یک پهنه‌بندی از یک فضای چند متغیره با اطلاعات دریافتی را به وجود آورد (سرینواسلو و جین^۵، ۲۰۰۶). روش شبکه عصبی مصنوعی نسبت به روش‌های دیگر دارای مزیت‌هایی است. از آن جمله روش شبکه عصبی مصنوعی برای آنالیز صحت داده‌ها به بررسی‌های کمتری در قیاس با روش‌های آماری نیاز دارد (فاست، ۱۳۸۸). روش شبکه عصبی مصنوعی مسائل و مشکلاتی را مورد بررسی قرار می‌دهد که روش‌های آماری به دلیل محدودیت تئوری‌شان قادر به پاسخ‌گویی به آن‌ها نیستند (قربانی و همکاران، ۱۳۸۷). این مدل با بررسی سابقه و خصوصیات وقایع رخ داده در منطقه قادر است که احتمال وقوع رخدادهایی را در آینده نشان دهد (منهاج، ۱۳۸۱).

۱-۳-۱۰-۲-۳ مبانی زیستی شبکه عصبی مصنوعی

^۱John Hopfield

^۲Error Back-Propagation

^۳Daivid Rummelhart

^۴James Mcland

^۵Srinivasulua, Jain

شبکه‌های عصبی اغلب به نام رایانه‌های عصبی خوانده می‌شوند، ولی در واقع آن‌ها رایانه نیستند بلکه اساساً حافظه‌هایی هستند که نتایج را حفظ می‌کنند. درست همان‌طور که مغز انسان نتایج خاص را حفظ می‌کند. شبکه‌های عصبی مصنوعی اطلاعات را به روش مبتنی بر حافظه ذخیره می‌کنند که با ذخیره اطلاعات در یک جدول جستجو متفاوت بوده و از آن انعطاف‌پذیرتر می‌باشد. اصطلاح شبکه‌های عصبی در واقع به شبکه‌های زیستی بر می‌گردد. شبکه‌های عصبی مصنوعی از مدل نرون‌های زیستی الهام گرفته شده‌اند و بسیاری از ویژگی‌های نرون‌های زیستی از قبیل غیر خطی بودن، سادگی واحدهای محاسباتی و قابلیت یادگیری را دارند. تاکنون تلاش‌های زیادی صورت گرفته است تا مدل‌های رایانه‌ای از عملکرد مغز تقلید نمایند. هر چند این نتایج چشم‌گیر است ولی در مقایسه با عملکرد مغز انسان کاملاً کم‌رنگ است.

۱-۳-۱۰-۲-۴ استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

توانایی شبکه عصبی مصنوعی در حل معادلات چند متغیره به اثبات رسیده است (گومز و کازوگلو، ۲۰۰۵؛ لی و همکاران، ۲۰۰۶).

۱-۳-۱۰-۲-۵ مراحل ساخت شبکه عصبی

برای ساخت شبکه عصبی مصنوعی مراحل زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

۱-۳-۱۰-۲-۵-۱ مشخص کردن توپولوژی مسئله

در این مرحله تعداد نرون‌ها در لایه ورودی و تعداد نرون‌ها در هر لایه، نوع شبکه و توابع پایه و محرک انتخاب می‌شوند (احمدی و ابراهیم‌پور، ۱۳۸۷؛ محمدی و همکاران، ۱۳۸۷؛ لی، ۲۰۰۷).

۱-۳-۱۰-۲-۵-۲ آموزش شبکه

این مرحله شبیه به کالیبراسیون می‌باشد. منظور از آموزش شبکه، اصلاح مقادیر وزن‌های شبکه برای نمونه‌های متعدد است. اطلاعات مورد نظر به عنوان داده‌های آموزشی به شبکه معرفی می‌-

^۱ Gomez and Kavzoglu

^۲ Lee

شوند و شبکه در جریان فرآیند یادگیری، بر اساس اشتباه یا تفاوت بین خروجی شبکه و عکس‌العمل مورد انتظار، مقادیر وزن‌های خود را اصلاح می‌کند. پس از تکرار این کار برای دفعات زیاد وزن‌ها طوری به‌هنگام می‌شوند که با دیدن اطلاعات جدید جواب مناسبی ارائه می‌دهند (جکسون، ۱۳۸۳؛ ریورا^۱، ۲۰۰۸). اما به هر حال خطر آموزش بیش از حد شبکه وجود داشته و هنگامی اتفاق می‌افتد که پارامترهای شبکه برای گروه اطلاعات آموزشی خیلی هماهنگ نشده باشد. همچنین این حالت موقعی رخ می‌دهد که مناسب کردن اطلاعات در مرحله تلاش برای یادگیری شبکه صورت پذیرد (بنی‌مهد و یثربی، ۱۳۸۲).

۱-۳-۱۰-۲-۵-۳ الگوریتم پس انتشار خطا^۲

این الگوریتم جهت اصلاح وزن نرون‌ها و در نتیجه آن کاهش خطا در مرحله آموزش مورد استفاده قرار می‌گیرد. این الگوریتم شامل دو مرحله رفت و برگشت است. در مسیر رفت پارامترهای شبکه در خلال محاسبات رفت تغییر نکرده و توابع محرک روی تک تک نرون‌ها عمل می‌کند. اما در مسیر برگشت بردارهای حساسیت از لایه آخر به لایه اول برگشت داده می‌شوند. به عبارت دیگر در مسیر برگشت شروع کار از لایه آخر یعنی لایه خروجی است، جای که بردار خطا در اختیار است. سپس بردار خطا از لایه آخر به لایه اول توزیع می‌شود و گرادیان محلی، نرون به نرون با الگوریتم بازگشتی محاسبه می‌شود. بعد از این دو مرحله نهایتاً ماتریس‌های وزن و میزان خطا در شبکه تغییر می‌کند. محدودیت استفاده از این الگوریتم برای محاسبه حساسیت‌های نرون‌های لایه-های مختلف در شبکه به مشتق‌گیری از توابع تبدیل نرون‌ها احتیاج است؛ لذا بایستی توابعی استفاده شود که دارای مشتق باشد، به عبارت دیگر مشتق‌پذیری توابع تنها محدودیت این الگوریتم است (منهاج، ۱۳۸۱؛ جکسون، ۱۳۸۳).

۱-۳-۱۰-۲-۵-۴ تابع تبدیل

در قانون یادگیری دلتا لازم است که به‌منظور تنظیم پارامترهای شبکه (قرار دادن نتایج مرحله قبل در یک محدوده عددی خاص مثل ۱ و -۱) از توابع تبدیل نرون‌ها مشتق‌گیری به‌عمل می‌آید. از این رو می‌بایست توابعی مورد استفاده قرار گیرند که مشتق‌پذیر و غیر خطی باشند (بنی‌مهد و یثربی، ۱۳۸۲).

^۱Rivera

^۲Back Propagation

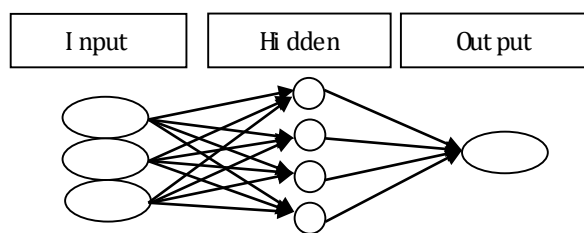
۱-۳-۱۰-۲-۵-۵ آزمایش شبکه

پس از این که مرحله آموزشی شبکه تکمیل شد شبکه برای سری اطلاعات معلوم امتحان می‌شود و نواقص احتمالی بر طرف می‌گردد. پس از تکمیل این مرحله شبکه آماده استفاده می‌شود. این مرحله شبیه مرحله معتبر سازی در روش‌های رگرسیون می‌باشد (بنی‌مهد و یثربی، ۱۳۸۲؛ احمدی و ابراهیم‌پور، ۱۳۸۷).

۱-۳-۱۰-۲-۵-۶ اجزاء شبکه عصبی مصنوعی

هر شبکه عصبی مصنوعی از سه نوع لایه به نام‌های لایه ورودی^۱، پنهان^۲ و خروجی^۳ تشکیل می‌شود و تعداد نرون‌های موجود در لایه ورودی و خروجی با توجه به مسئله مورد نظر مشخص می‌شود. البته تعداد لایه‌ها و تعداد نرون‌های موجود در لایه پنهان با نظر طراح و به وسیله سعی و خطا مشخص می‌شود (لی، ۲۰۰۷، منهاج، ۱۳۸۱).

در شبکه عصبی مصنوعی لایه ورودی متغیرهای مسئله مورد بررسی را دریافت می‌کند و لایه خروجی مقادیر تخمین زده شده را ارائه می‌نماید. پردازش اطلاعات در نرون‌ها (نرون‌ها کوچک‌ترین واحد پردازشگر اطلاعات در شبکه عصبی مصنوعی است که اساس عملکرد شبکه را تشکیل می‌دهد) صورت می‌گیرد. سیگنال‌های بین نرون‌ها در امتداد خطوط اتصال لایه‌های شبکه حرکت می‌کنند. شبکه عصبی به وسیله ساختار آن مشخص می‌گردد که نمایش دهنده الگوی اتصال نرون‌ها، روش تعیین وزن‌های اتصال و تابع محرک است (منهاج، ۱۳۸۱). شکل ۱-۱ ساختار شبکه عصبی مصنوعی را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱ ساختار شبکه عصبی مصنوعی

^۱Input layer
^۲Hidden layer
^۳Output layer

۱-۳-۱۰-۲-۶ معرفی چند نوع از شبکه‌های عصبی مصنوعی

۱-۳-۱۰-۲-۶-۱ شبکه عصبی مصنوعی پیش‌خور (MNN)^۱

در این شبکه هیچ نرونی از لایه پنهان یا لایه ورودی به نرون‌های هم سطح خودش و یا نرون‌های بالاتر متصل نمی‌باشد. در این شبکه خروجی هیچ کدام از نرون‌ها به‌طور مستقیم یا غیر مستقیم و یا از طریق نرون‌های دیگر به ورودی‌های همان نرون پس‌خورانیده نمی‌شوند. بیشترین استفاده شبکه عصبی، از شبکه پیش‌خور با الگوریتم پس‌انتشار خطا می‌باشد (منهاج، ۱۳۸۱).

۱-۳-۱۰-۲-۶-۲ شبکه عصبی مصنوعی پس‌خور یا برگشتی (RNN)^۲

در این نوع شبکه‌ها مسیرهای برگشتی از لایه جلویی به لایه‌های قبل‌تر و یا از هر لایه به همان لایه وجود دارد. در این شبکه، اطلاعات در سراسر گره‌ها در همه مسیرها از ورودی به خروجی و بالعکس جریان می‌یابد. شبکه عصبی بازگشتی دارای ارتباطات مجازی است. این نوع از شبکه معمولاً با دوباره طی کردن مسیر، خروجی شبکه پیش‌خور را به عنوان ورودی جدید مورد استفاده قرار می‌دهد (منهاج، ۱۳۸۱).

۱-۳-۱۰-۲-۶-۳ شبکه عصبی پرسپترون چند لایه (MLP)^۳

از جمله پراستفاده‌ترین شبکه‌های عصبی به خصوص در کاربردهای مدل‌سازی است که در دهه‌های اخیر و در زمینه‌های گوناگون علوم و مهندسی مورد استفاده قرار گرفته است (فاست، ۱۳۸۸). این شبکه‌ها قادرند با انتخاب مناسب تعداد لایه‌ها و نرون‌ها یک نگاشت غیر خطی را با دقت دلخواه انجام دهند و این همان چیزی است که در بسیاری از مسائل مهندسی به عنوان راه حل اصلی مطرح می‌شود. توپولوژی این شبکه‌ها با قانون یادگیری پس‌انتشار خطا روندی است که توسط آن ماتریس وزن‌ها و بردارهای بایاس شبکه تنظیم می‌شوند. الگوریتم پس‌انتشار خطا از دو مسیر تشکیل یافته است. مسیر اول مسیر رفت می‌باشد که در این مسیر بردار ورودی به شبکه اعمال می‌شود و تأثیراتش از طریق لایه پنهان به لایه خروجی انتشار می‌یابد و بردار خروجی تشکیل یافته در لایه خروجی پاسخ واقعی شبکه MLP را تشکیل می‌دهد. در این مسیر پارامترهای

^۱Multi layer Feed forward neural network

^۲-Recurrent or Feedback neural network

^۳-Multi layer perceptron neural network

شبکه که شامل ماتریس‌های وزن‌ها و بردار بایاس می‌باشند ثابت و بدون تغییر در نظر گرفته می‌شوند. مسیر دوم، مسیر برگشت می‌باشد که در این مسیر عکس مسیر رفت پارامترهای شبکه تغییر یافته و تنظیم می‌شوند (منهاج، ۱۳۸۱؛ جکسون، ۱۳۸۳؛ فاست، ۱۳۸۸).

۱-۳-۱۰-۲-۶-۴ شبکه عصبی هاپفیلد

این شبکه در سال ۱۹۸۲ توسط جان هاپفیلد معروف شد. این شبکه از مفهوم کمینه کردن سطح در فیزیک و یا مجموعه‌ای از گره‌های مرتبط با هم استفاده می‌کند. به طوری که هر گره از نوع داده‌های باینری است که متداولاً اعداد -1 ، $+1$ در نظر گرفته می‌شود. از جمله کاربردهای آن در مسائل ارتباطات است (فاست، ۱۳۸۸).

۱-۳-۱۰-۲-۶-۵ شبکه حافظه‌های خود انجمنی دو جهته^۱

این روش نیز به خانواده مدل‌های خود انجمنی تعلق دارند. این شبکه بین یک جفت بردار مانند a_1 ، b_1 ارتباط برقرار می‌کند. به طوری که وزن‌های قسمت برگشتی معکوس وزن‌های جلوسو هستند، در نتیجه یک شبکه متقارن ساخته می‌شود (فاست، ۱۳۸۸).

۱-۳-۱۰-۲-۶-۶ شبکه کوهنن

این شبکه جزء دسته شبکه‌های بی‌ناظر است. که هر گره در لایه ورودی با همه گره‌ها در لایه خروجی ارتباط دارد و با دادن ورودی جدید به شبکه، فاصله این ورودی با دسته‌های مختلف محاسبه و شبیه‌ترین طبقه به آن توسط شبکه پیدا و در نتیجه گره خارجی مربوط به آن طبقه به عنوان گره برنده نشان داده می‌شود (منهاج، ۱۳۸۱).

۱-۳-۱۰-۲-۷ کاربردهای شبکه‌های عصبی

با عنایت به اینکه شبکه‌های عصبی از دو ویژگی اساسی یادگیری یا نگاشت‌پذیری بر اساس ارائه داده‌های تجربی (قدرت و توانایی تعمیم‌پذیری) و ساختارپذیری موازی برخوردار می‌باشد این شبکه‌ها برای مسائل کنترل علی‌الخصوص سیستم‌های پیچیده که مدل‌سازی این سیستم‌ها یا میسر

^۱Bi-directional memory associative

نیست یا به سختی انجام می‌شود بسیار مناسب است. لازم به توضیح است که آنالیز همگرایی پارامترهای کنترل کننده سیستم‌های حلقه بسته هنوز بحث روز می‌باشد.

نخستین کاربرد شبکه‌های عصبی در سیستم‌ها توسط ویدرو^۱ در سال ۱۹۶۳ ارائه شده است. یک شبکه عصبی ساده خطی آموزش می‌بیند آن گونه که یک پاندول معکوس را کنترل نماید. در خلال ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۰ شبکه‌های عصبی به نام CMAC^۲ توسط البوس^۳ برای کنترل بلادرنگ بازوهای ربات معرفی و مورد استفاده قرار گرفت. از شبکه‌های عصبی در مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌ها علی‌الخصوص سیستم‌های غیر خطی به کرات استفاده شده است. هر چند دوباره لازم به تذکر است که اگر چه از ساختن چیزی شبیه مغز انسان از دیدگاه مهندسی خیلی دور هستیم، با این حال شبکه‌های عصبی حقیقتاً راه حل‌های مناسبی را برای مسائل مختلف در حوزه‌های تحقیقاتی متنوع در دنیای علوم فنی مهندسی ارائه نموده است. به طور خلاصه می‌توان زمینه کاربردهای زیر را برای شبکه‌های عصبی ارائه نمود: طبقه بندی، شناسایی و تشخیص الگوها، پردازش سیگنال، پیش‌آگاهی سری‌های زمانی، مدل‌سازی و کنترل، بهینه‌سازی، سیستم‌های خبره و فازی، مسائل مالی، بیمه، امنیتی، بازار بورس و وسایل سرگرم کننده، ساخت وسایل صنعتی، پزشکی و امور حمل و نقل.

آنچه که شبکه‌های عصبی را در آینده محبوب‌تر خواهد نمود، سرعت بالای رایانه‌ها و الگوریتم‌های یادگیری سریع‌تر می‌باشد که استفاده از شبکه‌های عصبی را در مسائل صنعتی و فنی مهندسی با محاسبات زیاد یاری می‌نماید (منهاج، ۱۳۸۱).

۱-۳-۱۱ سیگنال‌های اقلیمی

محققین علم هواشناسی با استفاده تغییرات میدان‌های فشار در مناطق مختلف کره زمین سیگنال‌های متعددی را یافته‌اند که می‌توانند پراکندگی پاره‌ای از عناصر اقلیمی را در مناطق مختلف متأثر کند. از جمله این سیگنال‌های هواشناسی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

^۱ Widrow

^۲ Cerebellar Model Articulation Controller

^۳ Albus

۱-۳-۱۱-۱ آرام آمریکای شمالی (PNA)

. الگوی اقیانوس آرام آمریکای شمالی^۱ یکی از شاخص‌های برجسته تغییرات اقلیمی نیم‌کره شمالی، مخصوصاً در زمستان است. PNA ارتباط زیادی با درجه حرارت و بارندگی در شمال آمریکا دارد. الگوی PNA در خلال زمستان طولانی‌تر است. شاخص PNA با استفاده از متوسط ماهانه استاندارد شده فشار هوای سطح دریا در منطقه‌ی آلوسین^۲ (۴۷/۹N-۱۷۰W) و فشار راکی^۳ (۴۹N-۱۱۱W) و جنوب شرقی ایالات متحده (۲۹/۷N-۸۶/۳W) محاسبه می‌شود.

مشخصه فاز مثبت الگوی آرام آمریکای شمالی دمای بالاتر از میانگین دراز مدت در مجاورت هاوایی و در سرتاسر کوه‌های ناحیه آمریکای شمالی و دمای پایین‌تر از میانگین دراز مدت در جنوب ایسلند و جنوب شرقی ایالات متحده می‌باشد. الگوی آرام آمریکای شمالی با دوام موقعیت جت استریم‌های آسیای شرقی تخمین زده می‌شود. فاز مثبت مربوط به تقویت جت استریم‌های آسیای شرقی می‌باشد که آن‌ها را در جهت شرقی به طرف شرق ایالات متحده شیفت می‌کند. فاز منفی مربوط به عدم گسترش این جت استریم‌ها به سوی آسیای شرقی و مسدود کردن آن‌ها برای فعالیت در عرض‌های جغرافیایی بالاتر در اقیانوس منجمد شمالی و شکل‌بندی وزش‌های قوی در سرتاسر مرکز اقیانوس منجمد شمالی می‌باشد. فاز منفی آرام آمریکای شمالی به دمای بالای میانگین دراز مدت در کانادای غربی و بخش وسیعی از آمریکای غربی هم‌چنین دمای زیر میانگین دراز مدت در شمال شرقی آمریکا مربوط می‌شود. این پدیده به تغییرات کوچکی در دمای سطح دریا در سرتاسر شمال آمریکا در طول تابستان تمایل دارد. تا هنجاری‌های بارش بالاتر از میانگین دراز مدت را در خلیج آلاسکا و محدوده وسیعی از شمال شرقی ایالات متحده و زیر میانگین بلند مدت در میانه غربی ایالات متحده را به همراه می‌آورد. اگر چه الگوی آرام آمریکای شمالی ناشی از یک فرآیند طبیعی از تغییرات اقلیم می‌باشد، اما قویاً متأثر از پدیده نوسانات جنوبی/النینو (انسو) است. فاز مثبت روند الگوی آرام آمریکای شمالی تمایل دارد تا جریانات گرم اقیانوس اطلس (النینو) اتفاق بیفتند و فاز منفی آن تمایل دارد تا به جریانات سرد اقیانوس اطلس (لانینا) مربوط گردد.

^۱ Pacific North American Pattern

^۲ ALEUTIAN

^۳ ROOKIES

۱-۳-۱۱-۲ نواحی حاره ای نیم کره شمالی (TNH)

الگوی نواحی حاره ای نیم کره شمالی^۱ اولین بار توسط مو و لیوژی^۲ در سال ۱۹۸۶ شناسایی شد. به نظر می رسد این الگو در زمستان در ماه های دسامبر تا ژانویه برجسته می باشد. در فاز مثبت نواحی حاره ای نیم کره شمالی دمای سطح دریا در آمریکای شمالی و مرکزی کانادا به زیر میانگین بلندمدت می رسد. مقدار بارش در قسمت مرکزی و شرقی جنب حاره ای به زیر میانگین بلندمدت رسیده و بارش در آمریکای شرقی و قسمتی از کوبا و جزیره باهاما و قسمت عمده ای از مرکز اقیانوس اطلس شمالی به زیر میانگین بلند مدت تنزل پیدا می کند. فاز منفی الگوی نواحی حاره ای نیم کره شمالی اغلب در طول ماه های دسامبر و ژانویه، هنگامی که در اقیانوس اطلس فاز گرم (انسو) حاکم است مشاهده می شود به عنوان نمونه در سال ۱۹۹۴/۹۵ در فصل زمستان وقتی که اقیانوس اطلس در فاز گرم بود، جت استریم ها با میانگینی ضعیف تر از شرایط نرمال در جهت شمال شرقی به طرف لایرادور^۳ شیفت پیدا کردند. به علاوه جت استریم های اقیانوس اطلس قوی تر از نرمال شده و در جهت غربی به طرف مرکز کالیفرنیا شیفت پیدا می کنند. فاز منفی نواحی حاره ای نیم کره شمالی باعث افزایش دما به بالاتر از حد نرمال در مرکز آمریکای شمالی و بارش بالاتر از حد نرمال در جنوب غربی ایالات متحده می گردد.

۱-۳-۱۱-۳ نوسان قطب شمال (AO)

والاس^۴ (۲۰۰۴) یک الگوی پیوند از دور ۱۰۰۰ هکتوپاسکالی به نام نوسان قطب شمال^۵ را مطرح کرد که الگوی حاکم غیر فصلی تغییرات فشار سطح دریا در عرض جغرافیایی ۲۰ درجه شمالی می باشد. این نوسان رقیب اصلی نائو در شکل دهی ویژگی های اقلیمی فصل زمستان محسوب می گردد. با توجه به محدوده فعالیت و اثرات مشابه دو پدیده نائو و نوسان اقیانوس منجمد شمالی گاهی هر دو پدیده را یکی دانسته و یا نوسان اقیانوس منجمد شمالی را بخشی از الگوی نائو محسوب می کنند. نوسان شمالگان در برخی سالها در یک فاز مثبت قوی قرار می گیرد و مجال انتقال به عرض های پایین تر جغرافیایی را می یابد، در چنین وضعیتی سامانه های پرفشار و آنتی

^۱- Tropical Northern Hemisphere(TNH)

^۲- Mo& Livezey

^۳- Labrador

^۴- Wallace

^۵- Arctic Oscillation(AO)

سیکلون‌های بسیار قوی حاکم بر شمالگان امکان انتقال به محدوده عرض‌های پایین‌تر به‌ویژه ناحیه اطلس و حتی ایران را پیدا کرده و شرایط سرد و خشکی را با خود به‌همراه می‌آورند. اگر در چنین شرایطی پدیده نائو در فاز منفی قرار گرفته باشد، نوسانات شمالگان با ایجاد پدیده بلوکینگ مانع جابجایی نصف‌النهاری جریان‌ات جت‌استریم‌های اطلس شمالی شده و در نتیجه مانع انتقال سیکلون‌های بارش‌زا و مرطوب به سمت شرق می‌شوند و به این علت است که در برخی سال‌ها علیرغم قرار گرفتن نائو در یک فاز منفی، بارش در ایران افزایش نمی‌یابد. اگر هر دو پدیده نائو و نوسان اقیانوس منجمد شمالی در فاز منفی قرار گیرند، می‌توان بارش زمستانی یا احتمالاً سالانه خوبی را در ایران انتظار داشت. بر اساس میزان و نوع بارش (باران یا برف) در یافتی منطقه مورد مطالعه در مقاطع سالانه و زمستانی تا حدود زیادی بستگی به موقعیت و شرایط (شدت و ضعف) زمستانی دو پدیده نائو و نوسان اقیانوس منجمد شمالی نسبت به هم دارد. بنابراین دیده می‌شود در سال‌هایی که حتی نائو به شدت وارد فاز منفی شده است، باز هم بارش (برف یا باران) حتی در فصل زمستان در کشورمان دیده نمی‌شود. نوسان منجمد شمالی دارای دو فاز قوی و ضعیف می‌باشد. فاز قوی آن دوره‌ای است که فشار در زیر فشار نرمال در اقیانوس منجمد شمالی قرار دارد. در این هنگام به وزش بادهای در سطح اقیانوس اطلس افزوده می‌شود و شرایط گرم‌تر و مرطوب‌تری را برای اروپای شمالی ایجاد می‌کند. این حالت فاز گرم نوسان منجمد شمالی نامیده می‌شود.

۱-۳-۱۱-۴ نوسان اطلس شمالی (NAO)

نوسان اطلس شمالی^۱ (نائو) به تغییرات جرم اتمسفر بیت مناطق برون حاره و جنب قطبی اقیانوس اطلس اطلاق می‌شود. این سیگنال اولین بار توسط سرگیلبرت واکر در سال‌های ۱۹۲۰ تا ۱۹۳۰ ارائه شد. این پدیده نوسانی نصف‌النهاری در جرم جو است که مرکز اثر آن از سواحل شرقی ایالات متحده تا سیبری و از بخش شمالگان اقیانوس اطلس تا بخش استوایی آن می‌باشد. نوسان اطلس شمالی از اختلاف فشار بین ایسلند^۲ و ایستگاهی در منطقه استوایی اقیانوس اطلس شمالی در نزدیکی سواحل اروپای جنوب غربی (معمولاً یکی از ایستگاه‌های جبل الطارق، لیسبون^۳ و یا

^۱ - North Atlantic Oscillation

^۲ -Iceland

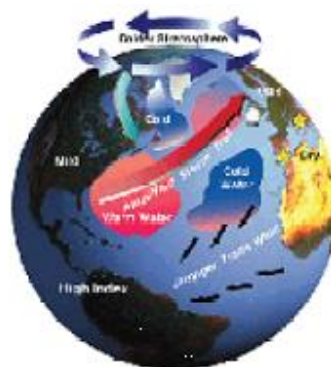
^۳ - Lisbon

آزرا^۱) ایجاد می‌شود. کم فشار ایسلند دارای محور شرقی-غربی بوده و سراسر اروپای شمالی و غربی را قرار می‌گیرد. در فصل زمستان و با گسترش پر فشار سیبری به سمت غرب، وسعت این سامانه به سمت غرب کاهش یافته و مجدداً از اواخر بهار تقویت می‌شود. میدان پرفشار آزر در منطقه جنب حاره در بین مدار ۲۰ تا ۵۰ درجه و در جنوب اقیانوس اطلس شمالی قرار دارد. این الگوی فشار در مواردی تا مناطق شرق اروپا، روی مدیترانه و یا به سمت شمال اقیانوس اطلس نیز گسترش می‌یابد (واکر، ۱۹۲۴).

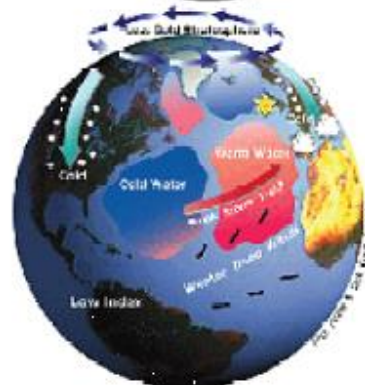
شاخص نائو را می‌توان همانند انسو با تغییرات فشار در مناطق مورد اشاره تعیین کرد. در حقیقت معیاری که نمایانگر فاز نائو است بر اساس اختلاف فشار سطح دریا^۲ بین مناطق جنب حاره‌ای و جنب قطبی به‌دست می‌آید. قرائت فشار این دو ایستگاه دو بار در روز صورت گرفته و سپس میانگین گیری بین این دو قرائت صورت می‌گیرد. همان‌طور که در شکل ۱-۲ (الف) دیده می‌شود فاز مثبت نائو هنگامی رخ می‌دهد که به هنگام کاهش ناهنجاری‌های کم‌فشار ایسلند و سراسر شمالگان، پرفشار قوی‌تر از حد معمول در آزر ایجاد شود. در چنین وضعیتی افزایش اختلاف فشار، جریانات شدید جنوبی را به طرف شمال اطلس می‌راند و موجب ظهور زمستانی گرم و مرطوب در اروپا (به‌ویژه در اروپای شمالی) و شرایط سرد و خشک در شمال کانادا و گرینلند می‌شود (شهابار، ۲۰۰۱). در فاز منفی نائو، که در شکل ۱-۲ (ب) مشاهده می‌شود، مرکز پرفشار جنب حاره‌ای ضعیف‌تر از حد معمول و مرکز کم‌فشار ایسلند نیز ضعیف‌تر از حد معمول می‌شود. کاهش گرادیان فشار به دنبال خود، جریانات ضعیف‌تری را همراه خواهد داشت. در این وضعیت، هوای مرطوب به‌سوی مدیترانه و هوای سرد به سمت شمال اروپا منتقل می‌شود. (سانتوز، ۲۰۰۵). شکل ۱-۳ موقعیت شکل‌گیری فاز مثبت و منفی نائو، شکل ۱-۴ میانگین فصلی استاندارد شده شاخص NAO و شکل ۱-۵ میانگین استاندارد شده ۳ ماه متوالی شاخص NAO تا سپتامبر ۲۰۱۰ را نشان می‌دهند.

^۱- Azores
^۲- SLP

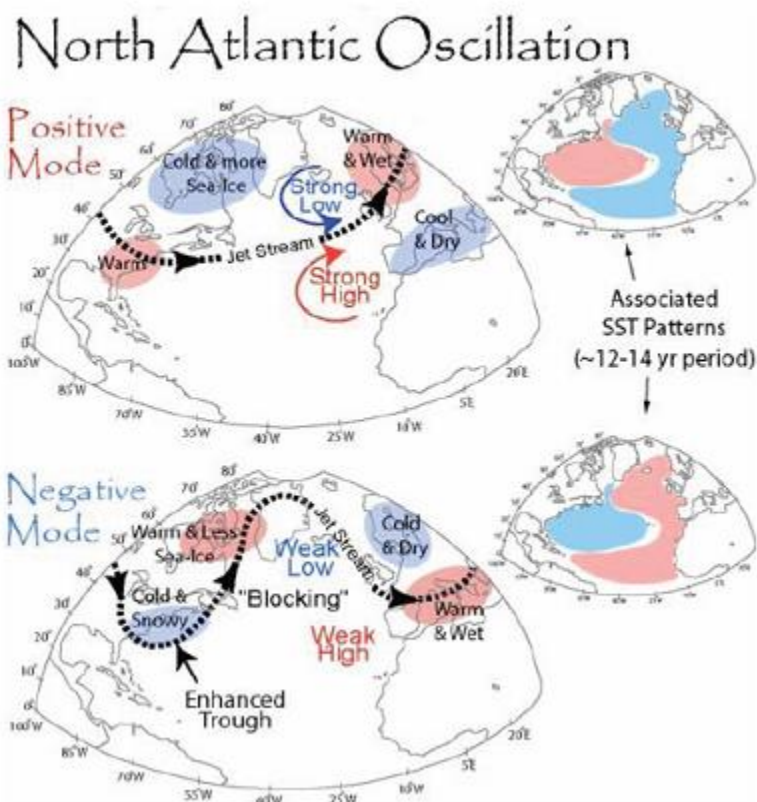
(الف) فاز مثبت شاخص نائو



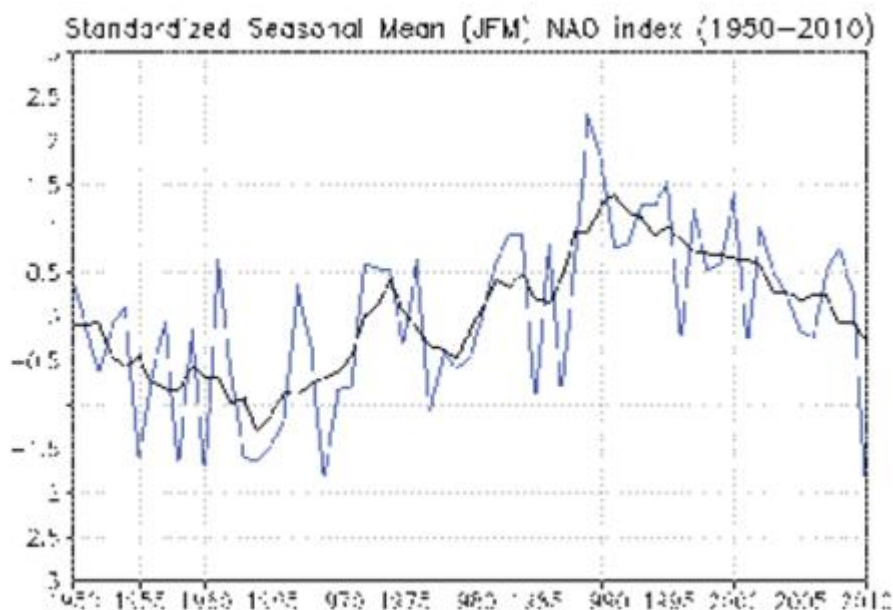
(ب) فاز منفی شاخص نائو



شکل ۱-۲ فاز مثبت و منفی شاخص نائو (CDC، ۲۰۱۰)

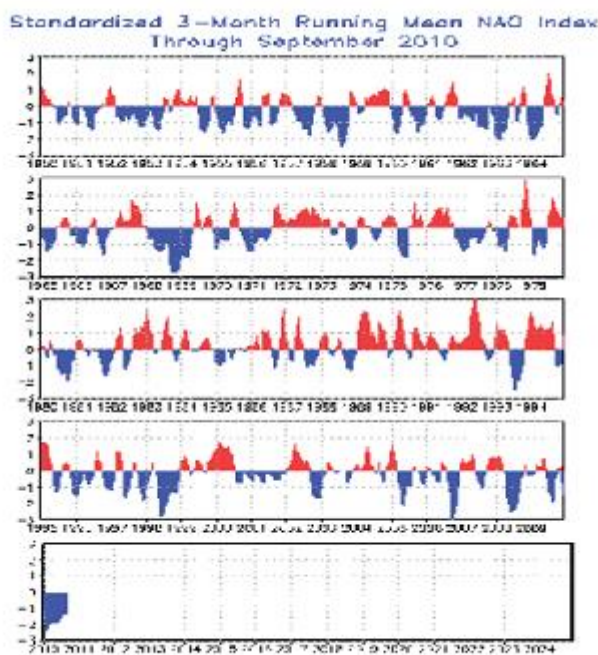


شکل ۱-۳ فاز مثبت و منفی شاخص نائو در یک نگاه (CDC، ۲۰۱۰)



شکل ۱-۴ میانگین فصلی استاندارد شده شاخص NAO

میانگین فصلی استاندارد شده شاخص NAO در خلال فصل سرد (خط آبی) توسط میانگین روزانه شاخص NAO در ژانویه، فوریه و مارچ هر سال بدست می‌آید. خط سیاه میانگین استاندارد شده ۵ یال متوالی شاخص NAO می‌باشد. هر دو منحنی بر مبنای دوره آماری ۱۹۵۰-۲۰۰۰ استاندارد شده‌اند.



شکل ۱-۵ میانگین استاندارد شده ۳ ماه متوالی شاخص NAO تا سپتامبر ۲۰۱۰ (CDC, ۲۰۱۰)

۱-۳-۱۱-۵ نوسانات دهه‌ای اقیانوس آرام (PDO)

نوسانات دهه‌ای اقیانوس آرام^۱ الگوی نوسانی تغییرات اقلیمی مانند النینو است که مرکز تغییرات آن روی اقیانوس آرام و شمال آمریکا است. در شمال آمریکا، تغییرات نوسانات دهه‌ای اقیانوس آرام در زمستان و بهار از انرژی بیشتری برخوردار است. نوسانات دهه‌ای اقیانوس آرام به‌طور قابل توجهی بر روی منابع آب مانند پوشش برف و آب شرب مناطقی مانند شمال آمریکا و ساحل شمال کالیفرنیا تا خلیج آلاسکا تأثیر دارد. اصطلاح نوسانات دهه‌ای اقیانوس آرام اولین بار در سال ۱۹۹۶ توسط استون هیر^۲ استفاده شد. تغییرات نوسانات دهه‌ای اقیانوس آرام شمال آمریکا در زمستان و بهار شدید است. پدیده‌ی مشابه ENSO است، اما سه ویژگی عمده نسبت به ENSO دارد (مانتوا^۳، ۲۰۰۲):

۱- PDO در یک دوره‌ی ۲۰ تا ۳۰ ساله دوام داشته در حالی که انسو ۶ تا ۱۸ ماه دوام دارد.

۲- اثر PDO در شمال اقیانوس آرام و شمال آمریکا به خوبی قابل مشاهده است و علایم ثانویه در مناطق حاره‌ای وجود دارد، اما عکس آن در مورد انسو صادق است.

۳. مکانیسم علت پدیده PDO تاکنون شناخته نشده در حالی که علل انسو به‌طور نسبی خوب شناخته شده است.

مقادیر دمای سطح دریا^۴ (SST) و فشار سطح دریا^۵ (SLP) در اقیانوس آرام شمالی در موقعیت ۲۰°N، در شمال ایالات متحده آمریکا اندازه‌گیری می‌شود و سپس استاندارد شده و با استفاده از آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA)^۶ به صورت شاخص PDO معرفی می‌شود. در فاز گرم PDO، درجه حرارت سطح دریا در مرکز اقیانوس آرام شمالی شروع به سرد شدن می‌کند و همزمان با آن در غرب ساحل آمریکای جنوبی گرم می‌شود. روند تغییرات PDO اساساً با استفاده از شاخص‌های تهیه شده از SLP و SST انجام می‌شود شکل ۱-۶ نوسانات شاخص PDO را در سال‌های ۱۹۰۰ تا ۲۰۱۱ را نمایش می‌دهد.

^۱- Pasific Decadal Oscillation

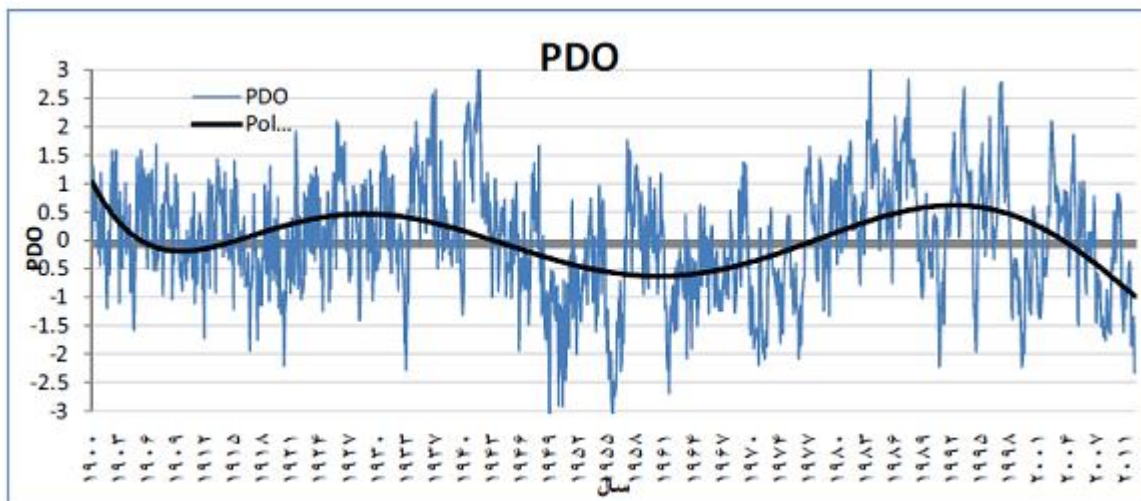
^۲- Stoven Hare.

^۳ Mantua

^۴ Sea surface Temperature

^۵ Sea Level Pressure

^۶ - Principal Component Analysis(PNA)



شکل ۱-۶ نوسانات شاخص PDO را در سال‌های ۱۹۰۰ تا ۲۰۱۱

۱-۱۱-۳-۶ پدیده نوسان شمالی (NOI)

پدیده نوسان شمالی^۱ در اثر اختلاف فشار هوا در شمال اقیانوس آرام و منطقه‌ی داروین استرالیا به وجود می‌آید. این پدیده به صورت متغیر NOI که از تفاوت بین فشار هوا در پر فشار شمال اقیانوس آرام واقع در شمال شرق آن و داروین استرالیا محاسبه می‌شود. این متغیر نظر SOI دارای فاز مثبت و منفی می‌باشد. NOI یک شاخص جدید از تغییرات اقلیم در عرض میانی نیم‌کره شمالی است که روابط قابل استفاده‌ای با اکوسیستم دریایی دارد. این شاخص در استرالیا و مناطق حاره‌ای بازتاب می‌کند و دامنه‌ی وسیعی از سیگنال‌های محلی را نشان می‌دهد. وزش بادهای گرم از پرفشار شمال و جنوب اقیانوس آرام به سمت کم فشار در غرب اقیانوس باعث می‌شود تا دما و رطوبت هوا افزایش یابد و سیستم هدلی-واکر به وجود آید. این هوای گرم به تدریج سرد می‌شود و به سمت شمال شرق و جنوب شرق حرکت می‌کند و توده‌ی هوای پر فشار را تقویت می‌کند.

این توده هوا منبع اصلی بادهای تجاری می‌باشد. در زمان لانینا این چرخش قوی و بر عکس در زمان النینو ضعیف است. یک منطقه وسیع کم فشار اندونزی با دو منطقه پر فشار حاره‌ای در شمال و جنوب شرق اقیانوس آرام ترکیب می‌شود. در مقیاس درون سالی، ناهنجاری پرفشار شمال و پرفشار جنوب در مقابل هم قرار می‌گیرند. NOI با استفاده از ناهنجاری فشار هوا سطح دریا در

^۱ Northern Oscillation Index (NOI)

پرفشار شمال اقیانوس آرام (NPH) در موقعیت ۳۵ شمال و ۱۳۰ غرب و داروین استرالیا در موقعیت ۱۳۰ شرق و ۱۰ جنوب مطابق معادله (۱-۵) محاسبه می‌شود.

$$\text{NOI} = \text{SLP(H)} - \text{SLP(L)} \quad \text{معادله (۱-۵)}$$

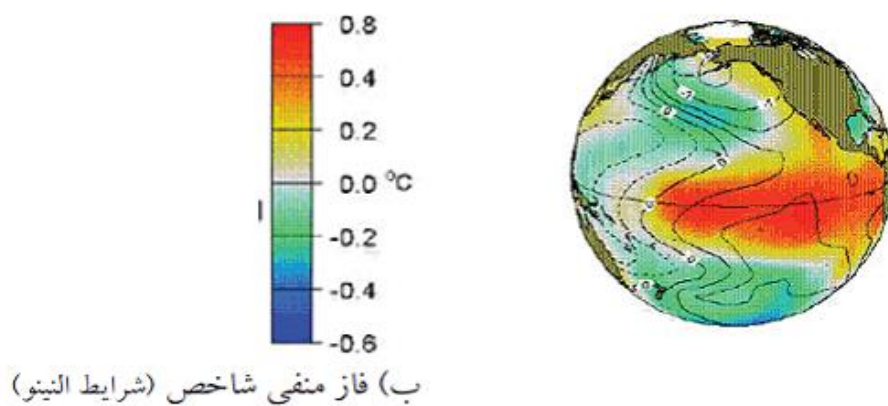
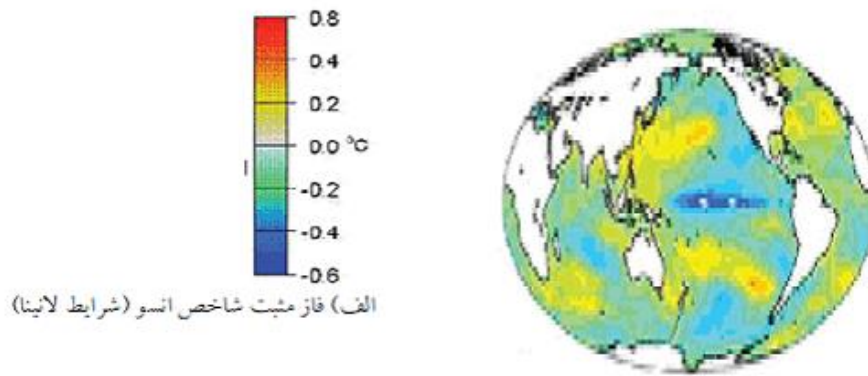
که در آن SLP(H)، فشار هوا در پرفشار شمال اقیانوس آرام و SLP(L) فشار هوا در کم فشار داروین است.

۱-۳-۱۱-۷ انسو (ENSO)

واژه انسو^۱ از ترکیب دو واژه نوسان جنوبی و النینو گرفته شده که النینو مولفه اقیانوسی و نوسان جنوبی مولفه جوی این پدیده می باشد. این پدیده که با ایجاد ناهنجاری های دمایی و فشار مناطق حاره ای اقیانوس آرام شروع می شود می تواند با ایجاد ناهنجاری در چرخش واکر از طریق فرایند های ارتباط از دور بر سامانه های جریان هوا در نقاط حارهای و ورای حاره ای تاثیر بگذارد. پدیده انسو دارای دو مرحله گرم و سرد است، که مرحله گرم آن بیانگر النینو و مرحله سرد آن بیانگر لانینا می باشد که معمولاً اثرات متفاوتی را بر شرایط اقلیمی و اقیانوسی نواحی مختلف کره زمین باقی می گذارد. پدیده انسو دارای یک الگوی ارتباط از دور در مقیاس جهانی است که بر روی نیمکره جنوبی و بخش وسیعی از نیمکره شمالی گسترده شده است؛ این الگو بیشتر در نوسانات سالیانه فشار سطح دریا، دما و بارش مشخص می شود.

انسو نشانگر یک ساز و کار جهانی بوده و لذا تأثیرات آن فراتر از یک قاره یا یک کشور است. با جابجایی و تغییر جهت جریان های هوا در آغاز و اثنای دوره النینو (شاخص پایین) و لانینا (شاخص بالا) مناطق مختلف تحت تأثیر دگرگونی قرار می گیرند. در شکل ۱-۹ چرخه وقوع فازهای گرم و سرد پدیده نوسان اطلس شمالی مشاهده می شود.

^۱ - El Niño Southern Oscillation (ENSO)



شکل ۱-۸ فاز مثبت و منفی شاخص انسو (CDC، ۲۰۱۰)

۱-۳-۱۱-۷-۱ النینو (El Niño)

النینو جریان آب گرمی است که در زمان تضعیف بادهای تجارتی جنوب شرقی در نیمکره جنوبی به سمت جنوب و در طول ساحل جنوبی اکوادور و ساحل شمالی پرو در طی تابستان نیمکره جنوبی جریان می یابد. این جریان توسط ماهیگیران و بومیان النینو (پسربچه) نامیده شده و علت این نامگذاری بخاطر اعتقادات ساکنین می باشد زیرا معمولا این رویداد در اندک زمانی بعد از کریسمس اتفاق می افتد (ترنبرث، ۱۹۹۷).

رویداد النینو شارشی اقیانوسی و سالیانه به سمت جنوب می باشد که سکنه ساحل نشین بنا بر عقاید سنتی و موروثی خویش نام (آی کورن دل نینوا) را بر آن نهاده اند این رویداد گاهی سبب

^۱ -Ia Corren Del Nino

بارش های سنگین روی بیابان مجاور یعنی سچورا^۱ و زمینهای مرتفع آندین^۲ می شود و به دنبال این بارش ها محصولات کشاورزی ناحیه لطمات جبران ناپذیری متحمل می شود ضمن اینکه در صنعت ماهیگیری منطقه نیز خلل بسیار به وجود می آورد.

دانشمندان پرویی عبارت(ال فنومنو دل نینو^۳) را عطف به استمرار و گرمایش غیر معمول آبهای ساحلی که همراه با جریان نابهنجار است را به کار برده اند.

در سالهای عادی که هوا صاف و آفتابی منطقه پر فشار شرق اقیانوس آرام سواحل کشورهای پرو و اکوادور در غرب آمریکای جنوبی را در بر گرفته، آبهای سرد مملو از مواد مغذی برای ماهیان کولی^۴ که در آبهای ساحل به وفور وجود دارند از اعماق اقیانوس به طرف بالا در سواحل دو کشور فوق جریان پیدا می کند. مردم پرو و اکوادور با صید عظیم ماهی کولی و استفاده از فضولات پرندگان بیشماری که در سطح اقیانوس به شکار ماهی مشغولند، با تولید خوراک دام و کود برای کشاورزی و صادرات انبوه این مواد به خارج از کشور، درآمد سرانه بسیار خوبی کسب می کنند و به همین دلیل شغل اصلی مردم ساکن در این نواحی صیادی و اشتغال در صنایع کود سازی و ماهی گیری است.

در رویداد النینو آبهای گرم نواحی مرکزی اقیانوس آرام از نزدیک استوا به طرف سواحل غربی آمریکای جنوبی رانده شده و بالآ آمدن آبهای سرد از اعماق اقیانوس متوقف می شود. آبهای گرم انباشته شده در سواحل پرو و اکوادور هنگام وقوع النینو باعث دور شدن ماهیها از منطقه ساحلی و پناه بردن آنها به اعماق اقیانوس که سرد تر است، می شوند. در بعضی از سالهای هجوم آبهای گرم به طرف سواحل همراه با ناپایداری شدید هوا، رعد و برق و طوفان دریایی است که علاوه بر دور کردن ماهیها از منطقه ساحلی باعث خسارات جانی و مالی بسیاری نیز در این دو کشور می شود. در حقیقت گرم شدن فصلی آبهای سواحل پرو و اکوادور که هر چند سال یک مرتبه با شدت بیشتری اتفاق می افتد واکنش طبیعی جو در برابر اقیانوس است. از نظر اقلیم شناسان اثرات النینو تنها به مسائل اقتصادی دو کشور فوق محدود نیست بلکه بازتاب این رویداد به صورت دگرگونی

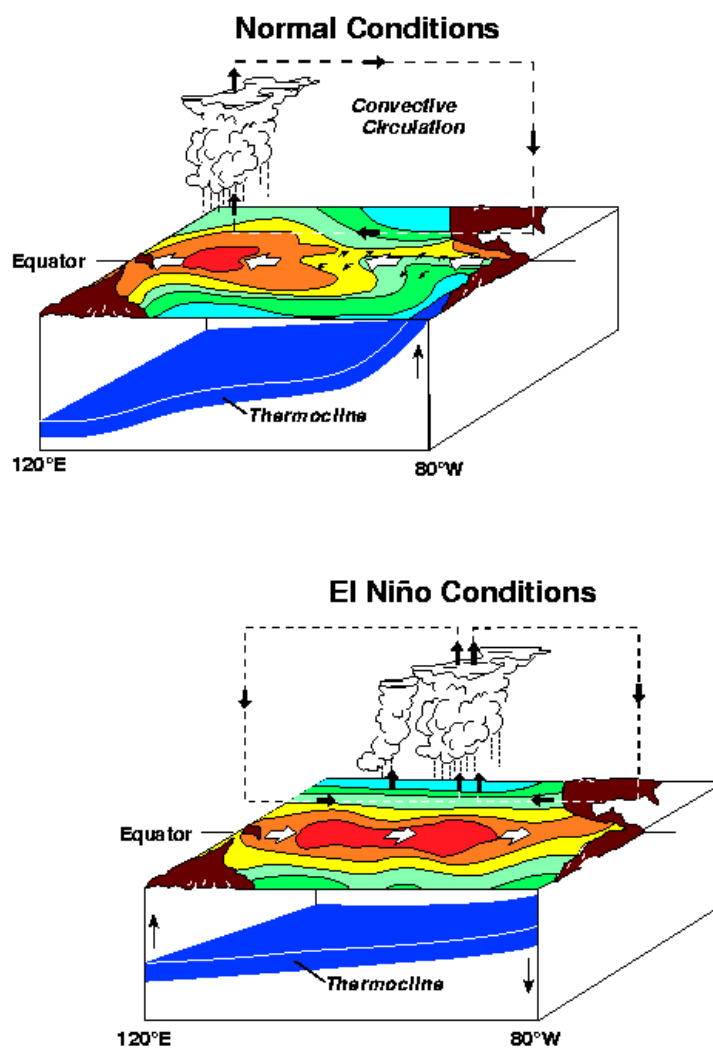
^۱ -Sechura

^۲ -Andean

^۳ -el fenomeno del Nino

^۴ -Anchorites

های اقلیمی در سرتاسر جهان بویژه نواحی استرالیا، هندوستان، آفریقا، اندونزی و آمریکا نیز ظاهر می شود شکل (۱-۹). در طول رویداد النینو تغییر سمت و سرعت باد در سطح دریا و تغییر دمای آب در سطح اقیانوس آرام که همراه با تغییرات فشار در سطح دریا است به صورت دینامیکی وضعیت کلی جو را متاثر کرده و اثرات آن در بیشتر نقاط دنیا به صورت نابهنجاری دما و بارش ظاهری می شود (فیلندر، ۱۹۹۸).



شکل ۱-۹- وضعیت دمای سطح دریا، عمق ترموکلاين و گردش عمومی جو در شرایط عادی و النینو در اقیانوس آرام (www.pmel.noaa.gov/tao/proj_over/diagrams/)

- نشانه های فیزیکی ظهور النینو

- افزایش ناهنجاری مثبت در دمای سطح دریا در شرق اقیانوس آرام حاره ای در امتداد سواحل آمریکای جنوبی از استوا تا ۱۲ درجه جنوبی با حداکثر ناهنجاری در دو دوره آوریل تا ژوئن و دسامبر
- گسترش ضعیف سطح آب گرم اقیانوس آرام حاره ای به سمت غرب تا خط زمان (نصف النهار ۱۸۰ درجه) با حداکثر گسترش در ماه دسامبر
- تمایل شیب فشار شرقی-غربی اقیانوس آرام حاره‌های از نرمال به منفی شدن با حداکثر شاخص نوسان جنوبی منفی در ماه سپتامبر
- جابجایی در امتداد شرق کمربند بارش (که به طور نرمال در اندونزی قرار دارد) به طرف مرکز اقیانوس آرام که به صورت عادی کم باران می باشد. این جابجایی از ماه آوریل _ مه شروع می شود و در ماه دسامبر به حداکثر می رسد (شکل ۳-۴).
- افزایش ناهنجاری های بادهای غربی سطحی در غرب اقیانوس آرام حاره ای بر روی حاشیه پرباران اقیانوس آرام (گلنتز، ۲۰۰۲).

۱-۳-۱۱-۷-۲ لاینینا (La Niña)

به شرایطی که دمای سطح آب در نواحی شرقی اقیانوس آرام تا اندازه ای سردتر از معمول و فشار هوا نیز به میزان زیادی بیشتر از میانگین دراز مدت می گردد، فاز سرد انسو یا لاینینا گفته می شود. در وضعیت لاینینا دمای آبهای شرقی اقیانوس حاره‌های سردتر از میانگین دراز مدت شده و بنابراین حرکت توده های هوا از شرق این اقیانوس به سوی سواحل شرقی اندونزی و استرالیا تقویت شده و موجب بوجود آمدن استخر عظیمی از آب گرم در مجاورت این سواحل میگردد.

حوادث سرد انسو در اقیانوس آرام حاره ای به چندین نام معرفی شده است: یکی از معروفترین این عناوین لاینینا است. نامهای دیگر عبارتند از: فاز سرد، ال ویجو، منطقه سرد انسو، شریک سرد النینو، معکوس النینو، خواهر النینو، دختر بیچه.

تجمع بیش از حد معمول آبهای گرم در نواحی غرب اقیانوس آرام که به طور تدریجی انجام می گیرد در اثر پدیده لاینینا تشدید می شود، ولی این شرایط همیشه ادامه نداشته و طی فرایندهای پیچیده ای آبهای ذخیره شده در این استخر عظیم شروع به تخلیه شدن می نماید. فرایند تخلیه با

^۱ -Glantz

^۲ -El Viejo

ایجاد یک جریان موجی شکل ضعیف از آبهای این ناحیه به سمت نواحی شرقی آغاز می گردد. این امواج رو به شرق آب اصطلاحاً جریان معکوس^۱ نامیده میشوند. جریان معکوس با به حرکت درآوردن آبهای گرم مناطق غربی به سمت سواحل شرقی، در واقع جریانی بر خلاف حرکت رو به غرب آبهای سطحی را بوجود می آورند. تقویت جریان معکوس، که به موجهای کلوین^۲ نیز معروف است، موجب می گردد تا حرکت آبهای گرم از غرب به شرق اقیانوس از شدت زیادی برخوردار گردیده و شرایط لازم برای تضعیف لانینا و شروع النینو فراهم گردد. با تضعیف جریان بادهای شرقی، امواج کلوین از شدت بیشتری برخوردار شده و در حرکت رو به شرق خود ضمن گرم نمودن آبهای سطحی، عمق تر موکلاین^۳ در نواحی شرقی اقیانوس آرام را افزایش میدهند. در شرایط لانینا، معمولاً حوضچه آب گرمی در غرب اقیانوس آرام حاره ای مستقر می شود. این حوضچه آب گرم رطوبت مورد نیاز جو را از طریق فرایند تبخیر فراهم می کند، که منجر به تشکیل ابرهای همرفتی و تولید باران در منطقه می شود. این بارش سنگین که برای این منطقه نسبتاً معمولی محسوب می شود منابع آب مورد نیاز کشورهای شرقی، جنوب و جنوب شرقی آسیا و جزایر اقیانوس آرام برای کشاورزی، نیروی آب، منابع آب و حمل و نقل را فراهم می کند (شکل ۱۰-۱). شرایط مذکور در حالی است که جریان بالایی آب خیلی سرد در امتداد سواحل شرقی اقیانوس آرام حاره ای (ساحل پرو) فرونشینی چوی را ایجاد می کند (گلنتز، ۲۰۰۲).

- نشانه های فیزیکی ظهور لانینا:

- دمای سرد غیر معمول در مرکز اقیانوس آرام حاره ای

- فشارهای پایین غیر معمول در غرب خط زمان و فشار زیاد در شرق خط مذکور در عرضهای

جنب استوایی پایین اقیانوس آرام جنوبی

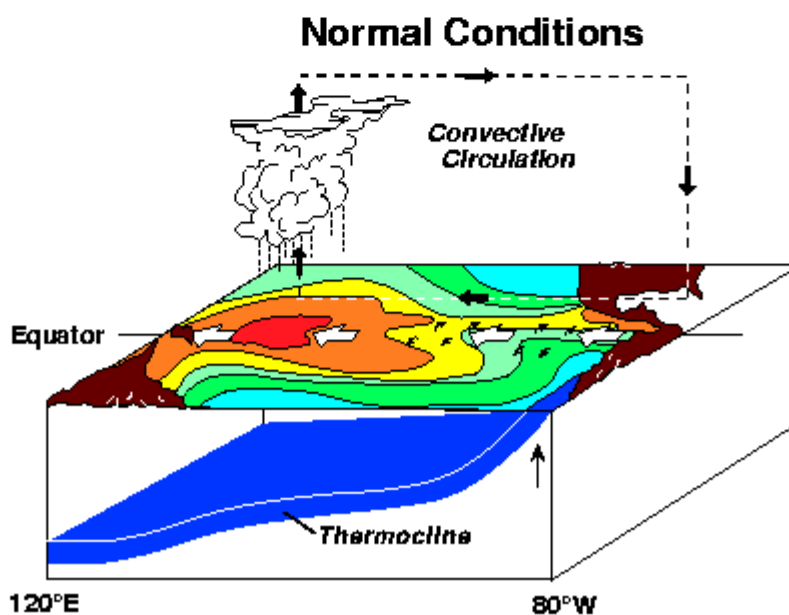
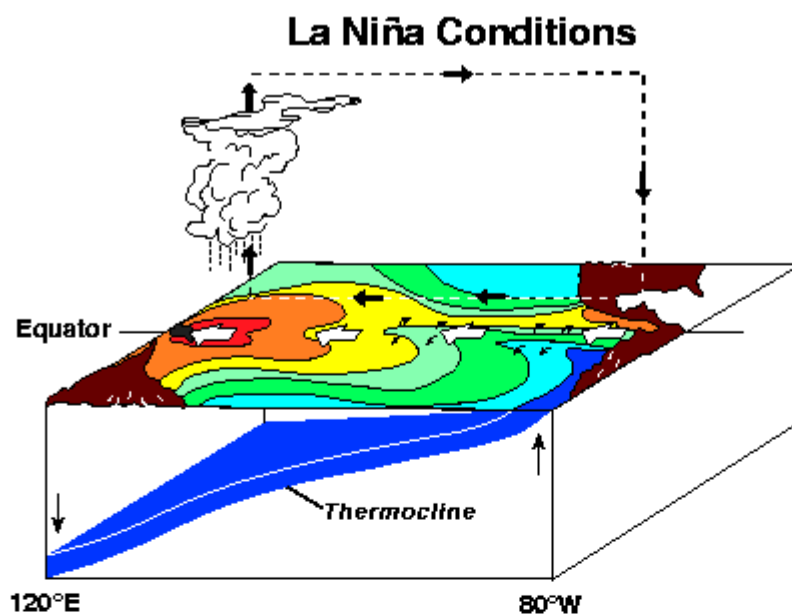
- شاخص نوسان جنوبی مثبت

- بادهای شرقی قویتر از نرمال

^۱-Counter Current

^۲-kelvin wave

^۳- به محدوده کوچکی از پروفیل قائم آب دریا گفته می شود که گرادیان شدید حرارتی وجود داشته و دما از بالا به پائین با آهنگ زیادی سرد می گردد



شکل ۱-۱-۱۰- وضعیت دمای سطح دریا، تغییرات عمق ترموکلاين و گردش عمومی جو در شرایط

عادی و لانینا در اقیانوس آرام (www.pmel.noaa.gov/tao/proj_over/diagrams/)

- بالایی آبهای عمیق سرد به سطح اقیانوس در امتداد سواحل پرو و استوا در مرکز و شرق

اقیانوس آرام حاره ای

- بارش سنگین بر روی آبهای گرم غرب اقیانوس آرام حاره ای

- افزایش ارتفاع سطح دریا در اقیانوس آرام غربی و کاهش آن در شرق اقیانوس آرام

- ترموکلاين عميق در غرب اقيانوس آرام حاره ای (شکل ۳-۵)

- کوچکتر شدن منطقه همرفت در نواحی غرب اقيانوس آرام

- انتقال مقادير بزرگی از آبهای گرم سطحی به طرف غرب اقيانوس آرام توسط بادهای قوی سطحی (گلنتز، ۲۰۰۲).

۱-۳-۱۱-۷-۳ تاثیر انسو بر بارش مناطق مختلف کره زمین

پیش از آنکه به بررسی تاثیرات پدیده انسو در مناطق مختلف کره زمین پردازیم باید به این نکته توجه کرد که هرگونه تغییر در موازنه انرژی بین اجزا تشکیل دهنده سامانه اقلیم منجر به واکنش سامانه شده و تغییراتی را در جهت رسیدن به یک نقطه توازن دیگر ادامه خواهد داد. بخش بسیار عظیمی از کل انرژی رسیده به سطح زمین در اقیانوس‌ها و بویژه در اقیانوس آرام حاره ای جذب شده و به صورت گرمای نهان وارد جو می‌گردد. این انرژی بسیار زیاد به عنوان موتور حرکت جو زمین و اقیانوس‌های آن محسوب می‌گردد. چون وقوع پدیده انسو، برهم خوردن تراز معمولی انرژی بین جو، خشکی و اقیانوس‌های جهان را در پی دارد باعث تغییر در توازن انرژی در این منطقه و سبب ایجاد برهمکنش‌های زیادی در جو- اقیانوس می‌گردد.

تغییر در تراز انرژی مناطق مختلف زمین موجب نوسان زیاد در ویژگی امواج بلند راسبی شده و اغتشاشاتی در انتقال ماده و انرژی در جو زمین را به وجود می‌آورد. با توجه به این خصوصیات، جریان عمومی جو و شرایط اقلیمی نقاط مختلف جهان با شدت و ضعف متفاوت متأثر از شرایط جوی و آب و هوایی اقیانوس آرام حاره ای می‌باشد. بنابراین رخداد انسومی تواند با تحت تاثیر قرار دادن امواج بلند راسبی، سامانه موسمی‌ها، جریانات اقیانوسی و رودبادهای بر میزان بارش در مناطق مختلف تاثیر گذار باشد.

اثرات رخداد فازهای مختلف انسو (الینو ولانینا) بر آب و هوای کره زمین در مواردی که در حالت اوج یا نه‌ای خود قرار دارند بسیار مشخص و واضح تر می‌باشد. در شرایط حداکثری پدیده انسو ناهنجاریهای آب و هوایی حوزه اقیانوس‌های آرام و هند به میزان بیشتری به دیگر سیستم‌های اقلیمی جهان نفوذ می‌نماید.

اثرات انسو گاه بلافاصله پس از شروع آن قابل رؤیت است و گاه با تاخیر چند هفته یا چند ماه پس از وقوع مشاهده می شود. گاه نیز اثرات انسو در طول چند سال یا چند دهه به وقوع می پیوندد و به کنشهای متقابل محیطی در دوره ای طولانی که در نهایت موجب انهدام و تخریب محیط فیزیکی و زیستگاه انسانی می شود منتهی خواهد شد.

مهمترین مناطق تحت تاثیر انسو سواحل کشورهای واقع در ناحیه حاره ای اقیانوس آرام و جزایر نزدیک به محدوده وقوع انسو است. در حالی که فاز گرم در بیشتر کشورها از جمله اندونزی، شمال استرالیا، هند و آفریقا خشکسالی ایجاد میکند (شکل ۱-۱۱) همزمان یا با تاخیر زمانی معینی در نقاط دیگر بارشهای استثنایی، رطوبت زیاد و سیل و طوفان جاری میسازد (شکل های ۱-۱۱ و ۱-۱۲). اثرات النینو روی کشور های مختلف متفاوت بوده و بعضی از کشورهای جهان از وقوع النینو بوفور بهره مند شده اند.

جدول ۱-۴- جدول اثرات جهانی پنج رخداد بزرگ النینو (دیویس، ۲۰۰۱)

مناطق	۱۸۷۷-۱۸۷۸	۱۸۹۹-۱۹۰۰	۱۹۷۲-۱۹۷۳	۱۹۸۲-۱۹۸۳	۱۹۹۷-۱۹۹۸
هندوستان	خشکسالی شدید (شدیدترین خشکسالی قرن)	خشکسالی شدید (دومین خشکسالی شدید قرن)	خشکسالی شدید (دومین خشکسالی شدید قرن)	خشکسالی متوسط	عدم وجود حوادث اقلیمی خاص از قبیل خشکسالی یا سیل
فیلیپین	خشکسالی متوسط	خشکسالی شدید	خشکسالی متوسط	خشکسالی شدید (شدیدترین خشکسالی قرن)	خشکسالی متوسط
استرالیا	خشکسالی شدید	خشکسالی شدید (شدیدترین خشکسالی قرن)	خشکسالی شدید	خشکسالی شدید	خشکسالی شدید
شمال چین	خشکسالی شدید (شدیدترین خشکسالی قرن)	خشکسالی شدید (دومین خشکسالی شدید قرن)	خشکسالی شدید	خشکسالی متوسط	خشکسالی متوسط
چین (حوضه رودخانه یانگزی) ^۱	سیلاب شدید	عدم وجود حوادث اقلیمی خاص از قبیل خشکسالی یا سیل	عدم وجود حوادث اقلیمی خاص از قبیل خشکسالی یا سیل	سیلاب شدید	سیلاب شدید

^۱ -Yangzi

خشکسالی شدید	خشکسالی شدید	خشکسالی شدید	خشکسالی متوسط	خشکسالی شدید	جنوب آفریقا
خشکسالی شدید	خشکسالی شدید	خشکسالی شدید	خشکسالی متوسط	خشکسالی متوسط	شرق آفریقا
عدم وجود حوادث اقلیمی خاص از قبیل خشکسالی یا سیل	خشکسالی شدید	خشکسالی شدید (شدیدترین خشکسالی قرن)	خشکسالی شدید	خشکسالی متوسط	مناطق صحرا
خشکسالی شدید	خشکسالی شدید	خشکسالی شدید	خشکسالی متوسط	خشکسالی شدید	شمال شرق برزیل
عدم وجود حوادث اقلیمی خاص از قبیل خشکسالی یا سیل	سیلاب شدید	عدم وجود حوادث اقلیمی خاص از قبیل خشکسالی یا سیل	فقدان آمار	فقدان آمار	جنوب برزیل

ضعیف شدن موسمی تابستانی در آسیا و اقیانوسیه که با خشکسالی منجر می شود با رخداد فاز گرم انسو همزمان می باشد. در هند بیش از ۸۰ درصد از رویداد خشکسالی در سالهای ۱۸۷۷ تا ۱۹۸۲ با وقوع النینو تقارن زمانی دارد. شدیدترین خشکسالی های قرون ۱۸ و ۱۹ شبه قاره هند با النینوهای ۱۸۷۸-۱۹۷۳، ۱۸۷۷-۱۹۷۲ و دومین خشکسالی شدید قرن ۱۹ نیز با النینوی ۱۹۰۰-۱۸۹۹ همزمان بوده است.

تقریباً تمامی خشکسالی های فیلیپین نیز مصادف با وقوع النینو همراه بوده است. شدیدترین خشکسالی قرن ۱۹ فیلیپین با النینوی ۱۹۸۳-۱۹۸۲ همزمان بوده است. به طور کلی وقوع فاز گرم انسو همراه با خشکسالی فرا گیر در نواحی وسیعی از استرالیا، جنوب آفریقا، شمال هند، اندونزی و جنوب شرقی آسیا می باشد (جدول ۱-۴).

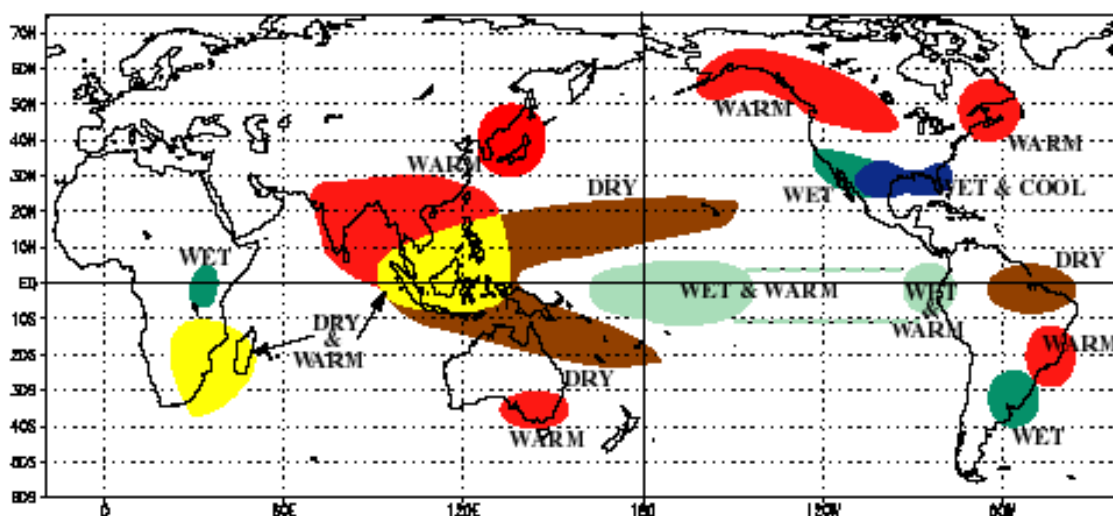
در استرالیا بیش از ۸۵٪ رویدادهای النینو با خشکسالی همراه است و همچنان که از جدول (۱-۱) مشخص می باشد، شدیدترین خشکسالی قرن در استرالیا با النینوی ۱۹۰۰-۱۸۹۹ همراه بوده است.

در شمال چین نیز همچنان که جدول (۱-۴) نشان می دهد در بیشتر دوره های همراه با النینو خشکسالی های شدید اتفاق افتاده است بطوریکه شدیدترین خشکسالی های قرون ۱۸ شمال چین با النینوهای ۱۸۷۸-۱۸۷۷ و دومین خشکسالی شدید قرن ۱۸ نیز با النینوی ۱۹۰۰-۱۸۹۹ همراه بوده است. النینوهای ۱۹۸۳-۱۹۸۲ و ۱۹۹۸-۱۹۹۷ در شمال چین با خشکسالی های متوسط همراه بوده است. برخلاف شرایط آب و هوایی در شمال چین که در بیشتر دوره های همزمان با النینو،

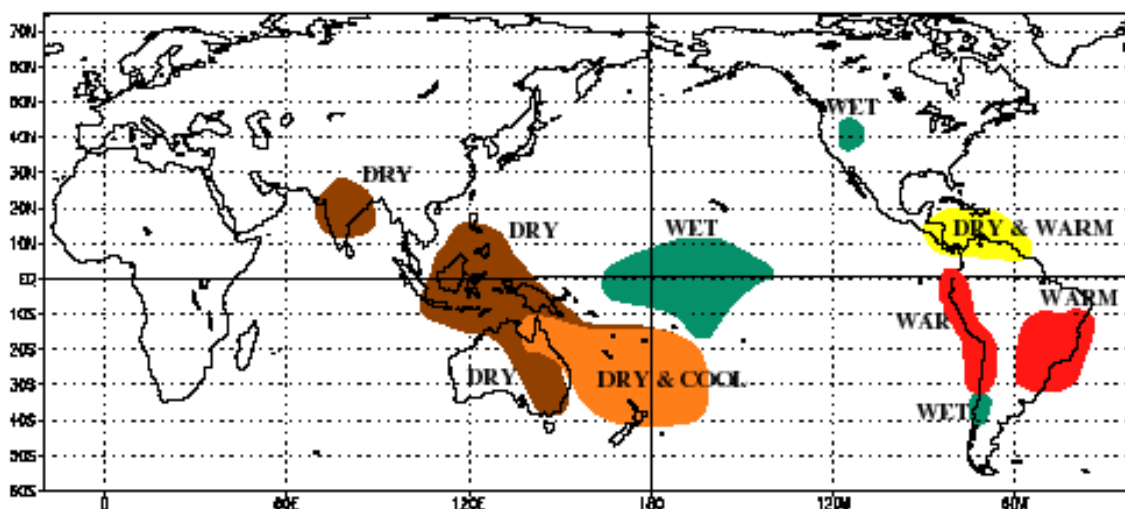
خشکسالی های شدید بر منطقه حاکم شده در حوضه رودخانه یانگزی چین دوره های النینو با سیلاب های شدید همراه بوده است.

همزمان با فاز گرم انسو در قاره آفریقا بطور کلی شرایط خشکسالی حاکم می شود و همچنان که از جدول (۱-۴) مشخص می باشد در بیشتر دوره های همراه با النینو خشکسالی های شدیدی در مناطق مختلف قاره آفریقا اتفاق افتاده است. شدیدترین خشکسالی قرن اخیر قاره آفریقا در منطقه صحرا با النینوی ۱۹۷۳-۱۹۷۲ مصادف بوده است.

WARM EPISODE RELATIONSHIPS DECEMBER - FEBRUARY



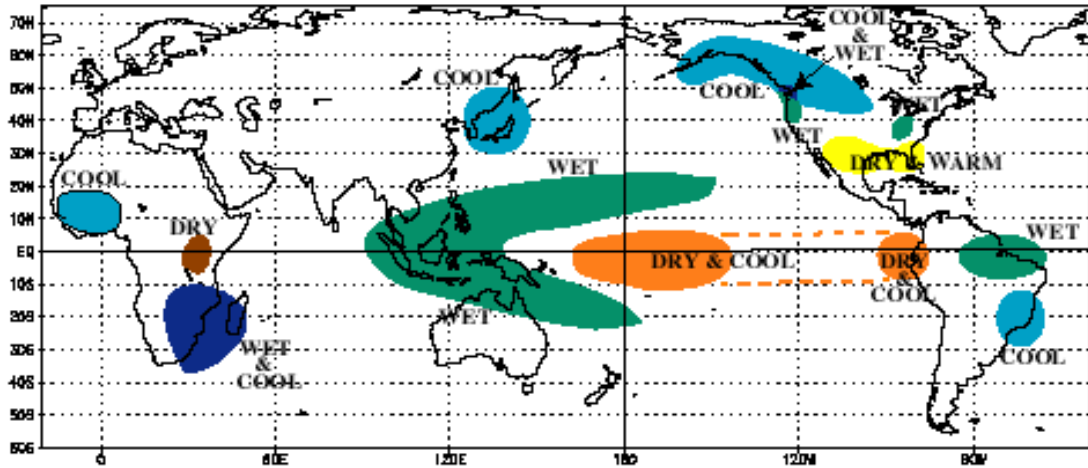
WARM EPISODE RELATIONSHIPS JUNE - AUGUST



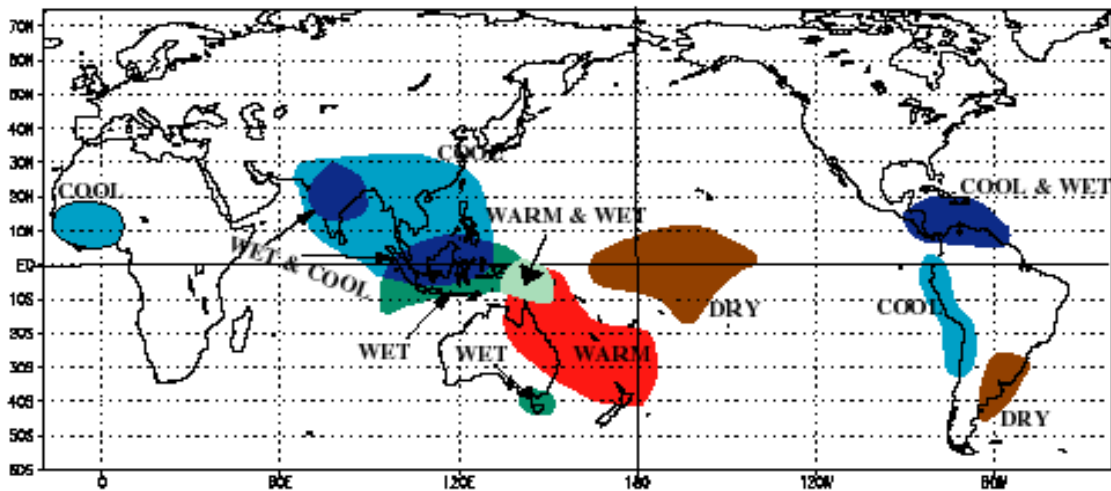
شکل ۱-۱۱- وضعیت بارش در مناطق مختلف کره زمین در فاز گرم انسو(النینو)

(www.coaps.fsu.edu/lib/booklet/)

COLD EPISODE RELATIONSHIPS DECEMBER - FEBRUARY



COLD EPISODE RELATIONSHIPS JUNE - AUGUST



شکل ۱-۱۲- وضعیت بارش در مناطق مختلف کره زمین در فاز سرد انسو(لاینا)

(www.coaps.fsu.edu/lib/booklet/)

در شمال شرق برزیل نیز در بیشتر دوره های همراه با النینو خشکسالی های شدید اتفاق افتاده است. در فصل پاییز، به دنبال رویداد النینو بارشهای بسیار شدید و توفانی در مرکز آرژانتین، اروگوئه، پاراگوئه و جنوب برزیل رخ می دهد. ایستگاههای واقع در امتداد سواحل کارائیب،

ونزوئلا و کلمبیا هم با النینو کاهش بارش را نشان می دهند. وقوع هاریکن همزمان با النینو در این نواحی به حداقل می رسد. میزان بارش در جنوب شرق ایالات متحده و خلیج مکزیک افزایش می یابد. آمریکای شمالی از ابتدای پاییز و سرتاسر زمستان مرطوبتر از نرمال است.

در فاز سرد انسو شرایط آب و هوایی عموماً متضاد با وضعیتی است که در فاز گرم انسو مشاهده می گردد. شرایط کاملاً مرطوب در نواحی شرق استرالیا، جنوب آفریقا شمال هند و جنوب شرقی آسیا و شرایط خشک در سطح وسیعی از نواحی مرکزی تا سواحل شرقی اقیانوس آرام از ویژگی های فاز سرد انسو می باشد (گلنتز، ۲۰۰۲).

در اروپا نظرات پژوهشگران بسیار متفاوت است. مطالعات فردریچ و همکاران (۱۹۹۲) نابهنجاری مثبت دما و بارش را در زمستان بخش غربی و مرکزی اروپا نشان می دهد. بعضی از محققین ادعا می کنند النینو اثر خاصی روی آب و هوای اروپا ندارد.

بر اساس پژوهش های انجام شده توسط مدرس پور (۱۳۷۶) خوش اخلاق (۱۳۷۷) ناظم السادات (۱۳۷۸) عزیز (۱۳۷۹) و یاراحمدی (۱۳۸۶) درباره ارتباط بارش های ایران با پدیده انسو، در فاز های گرم انسو بارش های ایران بیشتر و در فاز سرد انسو کمتر از حالت نرمال است.

۱-۳-۱۱-۸ شاخص نوسان جنوبی (SOI)

گیلبرت واکر دانشمند انگلیسی در سال ۱۹۲۴ برای اولین بار طی پژوهشی نشان داد که فشار هوا بین نواحی شرقی و غربی اقیانوس آرام به صورت آله کلنگی نوسان می نماید. او توضیح داد که در زمانهایی که فشار هوای سطح آب در نواحی شرقی اقیانوس آرام حاره ای بیشتر (کمتر) از معمول می گردد، در نواحی غربی این اقیانوس، واقع در سواحل استرالیا، این فشار کمتر (بیشتر) از میانگین دراز مدت می باشد. چنین پدیده ای را واکر در گستره نواحی حاره ای اقیانوس هند نیز مشاهده و گزارش کرده است. او نوسان فشار بین نواحی شرقی و غربی اقیانوس آرام جنوبی را پدیده نوسان جنوبی^۱ نامید تا با نوسان فشار در حوزه اقیانوس اطلس شمالی^۲ که خود او به وجود آن پی برده بود اشتباه نشود.

برای سنجش نوسان جنوبی از شاخص نوسان جنوبی^۳ (SOI) استفاده می شود که توسط واکر به شرح معادله (۱-۷) محاسبه شده است:

^۱ - The Southern Oscillation (SO)

^۲ -North Atlantic Oscillation (NAO)

^۳ -Sorthen Ocsillation Index

که در آن pt نشانگر فشار سطح دریا در تاهیتی و pd فشار سطح دریا در داروین است. مقادیر مثبت SOI که بیانگر فاز سرد انسو است نشان وجود شیب فشار هوا از شرق به غرب اقیانوس می باشد. در این وضعیت بادهای شرقی تشدید شده و هوای حاوی رطوبت از شرق اقیانوس آرام به سمت غرب به حرکت در می آید. بارش های بیش از حد معمول در شرق استرالیا و اندونزی مربوط به دورانهایی است که مقدار عددی SOI مثبت بوده و عموماً از ۵ هکتوپاسکال تجاوز نماید. هر چه مقدار ماهیانه این شاخص بزرگتر شود، احتمال وقوع بارش در نواحی شرقی و شمال شرقی استرالیا زیادتر می گردد.

فاز گرم انسو مربوط به دورانهایی است که SOI منفی است. در این زمانها بر حسب شدت پدیده النینو، دمای سطح آب در نواحی شرقی اقیانوس آرام در خط جنوب خط استوا بیشتر از حد معمول گردیده و بدین سبب مقدار SOI منفی می گردد. در این شرایط، شیب طبیعی شرقی - غربی فشار هوا تضعیف شده و حتی ممکن است معکوس گردد. بدین ترتیب حرکت به سمت غرب هوا در منطقه از شدت کافی برخوردار نبوده و به این دلیل بارش در مناطق شرقی استرالیا و اندونزی کاهش یافته و خطر وقوع خشکسالی افزایش می یابد. در مقابل فاز سرد، وقوع فاز گرم انسو موجب می گردد که مقدار بارش در سواحل آمریکا مخصوصاً آمریکای جنوبی و جزایر مرکزی اقیانوس آرام افزایش یافته و خطر وقوع سیلابهای شدید، افزایش می یابد. بنابراین شاخص مثبت انسو نشانگر شدت جریان واکر و شاخص منفی معرف ضعیف شدن جریان واکر است. به عنوان نمونه در طول سال ۱۹۸۳-۱۹۸۲ که شدیدترین رویداد النینو در قرن گذشته می باشد شاخص SOI به ۳۰- رسیده بود. همچنین در دوره فوق در نقاطی از شرق اقیانوس آرام دمای سطح آب (SST) به بیش از ۵ درجه سلسیوس نسبت به حالت نرمال رسید.

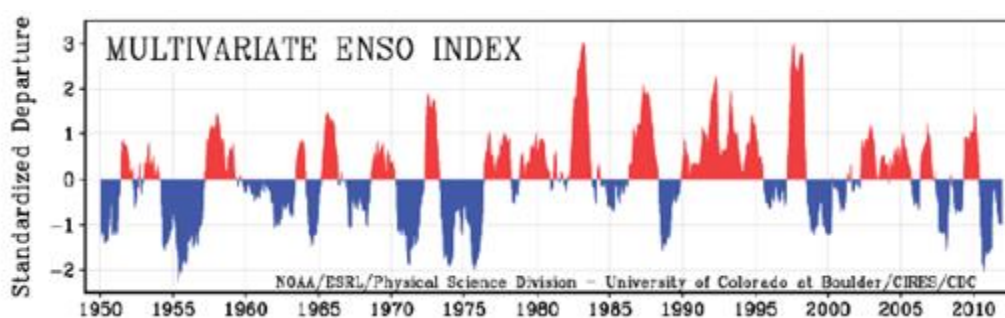
۱-۳-۱۱-۹ شاخص چند متغیره انسو (MEI)

داده‌های مربوط به شاخص چند متغیره انسو^۱ که اصولاً به صورت دو ماهه (دسامبر-ژانویه) تنظیم شده است از طریق اینترنت و از وب سایت مرکز (تشخیص اقلیمی) ناسا اخذ و در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است. شاخص MEI معتبرترین نمایه پدیده انسو محسوب گردیده و مزیت این شاخص‌های انسو (شاخص نوسانات جنوبی، نینو ۱+۲، نینو ۳، نینو ۳،۴ و نینو ۴) را می‌توان در کثرت عناصر به کار گرفته شده در ساختار شاخص و در نتیجه دقیق‌تر بودن آن جستجو نمود. این عوامل شش گانه که شاخص MEI انسو تابعی از آن‌ها محسوب می‌گردد عبارتند از:

- ۱- فشار سطح دریا (P)، ۲- مؤلفه باد سطحی (U)، ۳- مؤلفه نصف‌النهاری بادی سطحی، ۴- دمای سطح دریا (s)، ۵- دمای هوای سطحی (a)، ۶- اصطکاک در میزان ابرناکی کلی آسمان (c) هستند. با توجه به مطالب فوق می‌توان معادله تابعی شاخص MEI را به صورت معادله (۱-۶) نوشت:

$$MEI = f(p+u+v+s+a+c) \quad \text{معادله (۱-۶)}$$

به دلیل کثرت عناصر مورد استفاده در ساختار MEI، شاخص مذکور ماهیت به هم پیوسته و پیچیده سامانه جوی-اقیانوس انسو را، بهتر از دیگر شاخص‌ها نمایان می‌سازد. اشکالات وارده به سنجدهای پیوند از دور به ویژه در هنگام اضافه کردن داده‌های جدید و یا به هنگام کردن شاخص و مورد داده‌های اتفاقی در خصوص شاخص MEI کمتر صادق است. در این شاخص مقدار منفی معرف پدیده لانینا و مقادیر مثبت بیانگر حالت النینو می‌باشند. شکل ۱-۱۳ نوسانات MEI از سال ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۰ را نمایش می‌دهد.



شکل ۱-۱۳ نوسانات MEI از سال ۱۹۵۰ تا ۲۰۱۰

^۱ Multivariate ENSO Index (MEI)

۱-۳-۱۱-۱۰ شاخص انتقالی انسو (TNI)

شاخصی انتقالی انسو^۱ که توسط ترنبرث ارائه گردید و به صورت TNI نشان داده می شود شاخص جدیدی است که برای نمایش فازهای سرد و گرم انسو به کار گرفته می شود. این شاخص از اختلاف ناهنجاری های استاندارد شده دمای سطح دریا در منطقه نینو ۱+۲ و منطقه نینو ۴ بدست می آید. مقادیر مثبت آن فاز گرم (النینو) و مقادیر منفی آن فاز سرد (لانینا) را نشان می دهد. منطقه نینو ۱+۲ از ۸۰ درجه غربی تا ۱۵۰ درجه غربی و از ۱۰ درجه جنوبی تا استوا را شامل می شود و منطقه نینو ۴ از ۱۵۰ درجه شرقی تا ۹۰ درجه غربی و از ۵ درجه جنوبی تا ۵ درجه شمالی است (ترنبرث، ۲۰۰۱). این شاخص با استفاده از داده های سری زمانی آن و از رابطه (۸-۱) محاسبه می شود:

$$TNI = NINO_{1,2} - NINO_4$$

رابطه (۸-۱)

۱-۳-۱۱-۱۱ شاخص نینو ۳/۴ (NINO_{3/4})

شاخص نینو^۲ ۳/۴ از جمله شاخص های است که برای مشخص کردن فازهای انسو استفاده می شود. این شاخص از اندازگیری دمای سطح اقیانوس در منطقه نینو ۳/۴ بدست می آید. منطقه نینو ۳/۴ از ۱۷۰ درجه غربی تا ۱۲۰ درجه شرقی و از ۵ درجه جنوبی تا ۵ درجه شمالی را شامل می شود. در این شاخص فازهای گرم انسو با مقادیر مثبت و فازهای سرد با مقادیر منفی مشخص می گردند. (ترنبرث، ۲۰۰۱).

برای مشخص کردن رخداد النینو و لانینا از دمای سطح آب در مناطقی از اقیانوس آرام حاره ای نیز استفاده می شود که به مناطق نینو معروف هستند. موقعیت جغرافیایی این مناطق در جدول ۵-۱ آورده شده است.

جدول ۵-۱- موقعیت ریاضی مناطق مختلف نینو در مناطق حاره

مناطق نینو	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
------------	---------------	---------------

^۱ Trans-Nino Index

^۲ Nino

منطقه نینو ۱	۱۰°S - ۰°	۹۰°W - ۸۰°W
منطقه نینو ۲	۵°S - ۰°	۱۵۰°W - ۹۰°W
منطقه نینو ۳	۵°S - ۵°N	۱۵۰°W - ۹۰°W
منطقه نینو ۳/۴	۵°S - ۵°N	۱۷۰°W - ۱۲۰°W
منطقه نینو ۳/۵	۱۰°S - ۵°N	۱۸۰°W - ۱۲۰°W
منطقه نینو ۴	۵°S - ۵°N	۱۵۰°E - ۹۰°W

۱-۳-۱۱-۱۲ شاخص مونسون های جنوب غرب (SW.MON)

مونسون های جنوب غرب ایالات متحده که توسط پایگاه اطلاعات آب و هوایی NCDC محاسبه می شوند. در واقع این پایگاه میزان بارندگی ماهانه منتج از این بادهای را برای مناطق آریزونا و نیومکزیکو محاسبه کرده و طی شاخصی به نام شاخص مونسون های جنوب غرب^۱ (SW.MON) ارائه می دهد.

۱-۳-۱۱-۱۳ شاخص اطلس جنوبی حاره ای (TSA)

شاخص اطلس جنوبی حاره ای^۲ (TSA) این شاخص بر اساس سنجش دمای سطح دریا در بین عرض های جغرافیایی استوا تا ۲۰ درجه جنوبی و طول جغرافیایی ۱۰ درجه شرقی تا ۳۰ درجه غربی محاسبه می شود.

۱-۳-۱۱-۱۴ شاخص آرام غربی (WP)

الگوی آرام غربی^۳ (WP) حالت اولیه ای از تغییر پذیری کم بر فراز اقیانوس آرام شمالی در تمامی ماه های سال است. این الگو قبلاً توسط برانستون و لیوزی^۴ (۱۹۸۷) و والس و گالتزار^۵ (۱۹۸۱) شرح داده شده است. در طول زمستان و بهار، این الگو از ناهنجاری دو قطبی شمالی - جنوبی

^۱ -SW.Monsoon region rainfall

^۲ Tropical Southern Atlantic Index

^۳ West Pacific (WP)

^۴ Barnston and Livezey

^۵ Wallace and Gutzler

تشکیل می‌شود که یک مرکز آن بر روی شبه جزیره کامچاتکا قرار دارد و مرکز گسترده دیگر آن با علامت مخالف بخش‌هایی از آسیای جنوب شرقی و مناطق جنب حاره غرب اقیانوس آرام شمالی را تحت پوشش قرار می‌دهد. فازهای مثبت یا منفی قوی این الگو بازتاب‌کننده تغییرات مداری و نصف‌النهاری شدیدی در مکان و شدت منطقه ورودی جت استریم از اقیانوس آرام (یا شرق آسیا) است. این ناهنجاری‌ها باعث جابجایی شدید شمال سوی در گذر زمستان به تابستان می‌شود که با جابجایی شمال سوی مشاهده شده در جریان جت استریم آسیای شرقی، هماهنگ است. مرکز ناهنجاری سومی نیز بر روی شمال شرقی اقیانوس آرام و جنوب غربی ایالات متحده در تمام فصول سال دیده می‌شود.

فاز مثبت الگوی آرام غربی با دمای بیش از میانگین بر روی عرض‌های پایینی شمال غربی اقیانوس آرام در هر دو فصل زمستان و بهار و با دمای کمتر از میانگین بر روی سبیری شرقی در تمام فصول سال همراه است. این الگو همچنین با بارش بالاتر از متوسط در تمام فصول سال بر روی عرض‌های جغرافیایی بالای اقیانوس آرام شمالی و بارش کمتر از متوسط در سراسر مرکز اقیانوس آرام شمالی به ویژه در طول زمستان و بهار همراه است.

فصل دوم

مروری بر تحقیقات گذشته

۲-۱ سابقه تحقیق

بررسی سوابق تحقیقات انجام شده، تسریع بخش و تکمیل‌کننده مطالعات مختلف، در ادامه سیر تحقیقی موضوعات مختلف محسوب می‌گردد؛ لذا حسب نوع تحقیق استفاده از منابع معتبر، راه-گشای انجام مطالعات بعدی می‌باشد.

۲-۱-۱ مطالعات انجام شده در خارج از کشور

هملت و لترن مایر (۱۹۹۹) در این تحقیق از شاخص‌های اقلیمی PDO, ENSO و با استفاده از یک مدل ساده جریان رودخانه کلمبیا را پیش بینی کردند. برای شاخص انسو سه حالت سرد و گرم و نرمال و برای PDO دو حالت سرد و گرم را در نظر گرفتند. به این ترتیب شش اقلیم از ترکیب حالت‌های این دو شاخص در منطقه مورد نظر قرار گرفتند و برای هر اقلیم جریان رودخانه به طور مجزا شبیه سازی و پیش بینی شد.

کنلی (۲۰۰۱) جریان رودخانه‌های وینتر پارک، فریزر، لویس فورک، دایلون و سات پلینت^۱ را با استفاده از شاخص‌های اقلیمی بررسی کرد. در این تحقیق همبستگی بین شاخص‌های NAO, PDO, NINO^۳ و SST با جریان رودخانه‌ها در ماه‌های آوریل تا جولای بررسی شد. نتیجه اینکه همبستگی بین شاخص SST و جریان رودخانه‌ها در این ماه‌ها بیشتر از سایر شاخص‌ها می‌باشد.

هسیه و جینگ یانگ (۲۰۰۲) برای پیش بینی جریان رودخانه کلمبیا از همبستگی چند متغیره خطی و شبکه‌های عصبی استفاده کردند. متغیرهای مورد استفاده در این تحقیق PDO, PNA, SSt و بارندگی محلی بود. از بین سه شاخص اقلیمی که استفاده شد اثر PDO از همه بیشتر و نقش SSt از بقیه روی جریان رودخانه کمتر بوده است.

برادباری و همکاران (۲۰۰۲) رابطه خشکسالی و الگوهای چرخشی اتمسفر را در نیوانگلند بررسی کردند. در این تحقیق از شاخص‌های اقلیمی باران محلی، SOI, PNA, NAO و درجه حرارت برای پیش بینی جریان رودخانه استفاده شد.

^۱ Dillon, Lius Fork, Fraser, Winter Park, South Platte

هیستال و تالاکسن (۲۰۰۳) به تخمین خصوصیات خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در دانمارک پرداختند. آن‌ها در این تحقیق به تعیین احتمال وقوع خشکسالی در مناطق مختلف پرداختند و خصوصیات هر دو خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی را در این مناطق مشخص کردند. مقایسه خصوصیات خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی نشان داد که فراوانی وقوع، مدت زمان و مساحت در بر گیرنده خشکسالی هیدرولوژیکی نسبت به خشکسالی هواشناسی کمتر بوده است.

اسماختین و هیوس (۲۰۰۷) به بررسی و تخمین خصوصیات خشکسالی هواشناسی با استفاده از داده‌های ماهانه بارندگی پرداختند. آن‌ها برای انجام این تحقیق از شاخص توزیع دهگانه (DI)، شاخص خشکسالی مؤثر^۱ (EDI) و شاخص استاندارد بارش (SPI) استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از روش‌های فوق خصوصیات و احتمال وقوع خشکسالی هواشناسی را پیش بینی کردند.

کالانکا (۲۰۰۷) به تغییر اقلیم و وقوع خشکسالی در منطقه آلپ پرداختند. در این تحقیق از روش ساده‌ای برای تعیین وقوع و شدت آستانه خشکسالی استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که فراوانی روزهای مرطوب (در تابستان) حدود ۲۰ درصد کاهش یافته و وقوع خشکسالی در منطقه آلپ در آینده ۱۵ تا ۵۰ درصد بیشتر خواهد بود.

ریورا (۲۰۰۸) به پیش بینی خشکسالی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پرداخت. برای انجام این تحقیق یک مدل تجمعی غیر خطی مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی تهیه شد. کالیبره کردن مدل با استفاده از داده‌های جریان ماهانه در مرحله آموزش با الگوریتم پس انتشار خطا صورت گرفت. اعتبار سنجی شبکه با استفاده از جریان ماهانه رودخانه انجام شد. با استفاده از مدل تهیه شده جریان ماهانه رودخانه پیش بینی و در نهایت خشکسالی سالانه پیش بینی شد.

کیم و همکاران (۲۰۰۹) به بررسی، اصلاح و کاربرد شاخص خشکسالی مؤثر (EDI) برای ۲۰۰ سال خشکسالی اقلیمی در سئول پرداختند. در این تحقیق از شاخص خشکسالی مؤثر (EDI) و شاخص بارش استاندارد (SPI) ۱، ۲، ۳، ۶، ۹، ۱۲ ماهه استفاده شد. مقایسه این دو روش در طول ۲۰۰ سال (۱۸۰۷-۲۰۰۶) صورت گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که شاخص خشکسالی

^۱ Effective Drought Index

مؤثر (EDI) نسبت به شاخص بارش استاندارد (SPI) در هر دو دوره کوتاه و بلند مدت نتایج بهتری ارائه می‌دهد.

۲-۱-۲ مطالعات انجام شده در کشور

فاتحی مرج و همکاران (۱۳۸۲) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی دبی رودخانه دز را پیش بینی کردند. در این تحقیق از شبکه پرسپترون چند لایه و شبکه آدالین استفاده گردید و مشخص گردید شبکه آدالین برای پیش بینی دبی رودخانه مناسب‌تر است. همچنین رابطه بارش، جریان رودخانه‌ها و پوشش گیاهی با بعضی از پدیده‌های اقلیمی در حوضه دریاچه ارومیه به اثبات رسیده است.

بذر افشان (۱۳۸۴) به مقایسه هفت شاخص خشکسالی هواشناسی در نمونه‌های هواشناسی ایران پرداخت و به این نتیجه رسید که در مقیاس‌های ماهانه شاخص SPI و در مقیاس سالانه شاخص معیار بارندگی سالانه، بهترین کاربرد را برای ارزیابی خشکسالی‌های هواشناسی اقلیم‌های مختلف ایران دارد.

کارآموز و همکاران (۱۳۸۵) با استفاده از شبکه عصبی انواع خشکسالی‌های کشاورزی، هیدرولوژی و زراعی را در حوضه گاوخونی در استان اصفهان پیش بینی کردند. کارآموز و همکاران (۱۳۸۵) بارش بلند مدت را با استفاده از سیگنال‌های هواشناسی و شبکه عصبی در جنوب شرقی ایران پیش بینی نمودند. این پیش بینی نشان می‌دهد در ۷۰ درصد از سال‌ها پیش بینی در دامنه تعریف شده قرار دارد.

انصافی مقدم (۱۳۸۶) طی ارزیابی چند شاخص هواشناسی و تعیین مناسب‌ترین شاخص در حوضه دریاچه نمک به این نتیجه رسید که در پهنه‌بندی و تحلیل وضعیت خشکسالی در یک دوره طولانی مدت، به ترتیب شاخص دهک‌ها و SPI، مقارن با سال وقوع کمینه بارندگی، رخداد خشکسالی شدید و بسیار شدیدی را در تمام ایستگاه‌های تحت مطالعه نشان داده و کارایی بیشتری نسبت به سایر شاخص‌ها از جنبه نمایش خشکسالی‌های شدید را دارند.

پیره (۱۳۸۸) شبیه‌سازی و پیش‌بینی بارش غرب و شمال غرب کشور ایران تحت تأثیر سیگنال‌های بزرگ مقیاس اقلیمی توسط شبکه‌های عصبی را به انجام رساند. در این تحقیق برای

اولین بار شبیه سازی بارش به طور گسترده تحت تأثیر سیگنال‌های بزرگ مقیاس در کشور ایران بررسی شد.

ملکی‌نژاد و سلیمانی مطلق (۱۳۹۰) در بررسی شدت خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک در حوزه‌ی چغلوندی با استفاده از شاخص‌های SWI و SPI و استفاده از آزمون من کندال به منظور بررسی روند خشکسالی، به این نتیجه رسیدند که در این منطقه بین خشکسالی هواشناسی یک تأخیر زمانی یکساله وجود دارد.

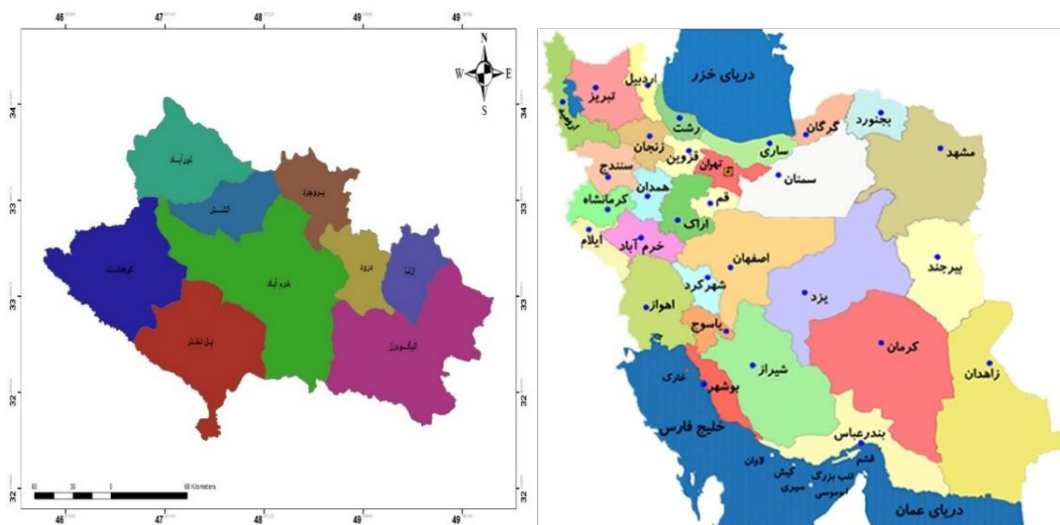
ایمانی (۱۳۹۰) در تحقیق خود اثرات خشکسالی بر نوسانات سطح آب زیرزمینی دشت بهاباد با استفاده از شاخص SPI و GRI پرداخت نتایج نشان داد: (۱) رفتار SPI در بخش‌های مختلف منطقه مورد مطالعه به دلیل یکسان بودن الگوی بارش منطقه مشابه می‌باشد. (۲) با افزایش تأخیر میزان همبستگی هر شاخص نسبت به خودش کاهش می‌یابد. (۳) رفتار شاخص GRI در هر یک از بخش‌های منطقه مورد مطالعه با ساختار زمین شناسی و سنگ شناسی مختلف، متفاوت است (۴) بیشترین همبستگی بین دو شاخص SPI و GRI در مقیاس زمانی ۴۸ ماهه مشاهده می‌شود و در ده سال اخیر افت شدید سفره آب زیرزمینی در منطقه مشاهده شده است.

لشنی زند و همکاران (۱۳۹۱) به پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از سیگنال‌های اقلیمی و شبکه عصبی مصنوعی در جنوب غرب ایران اقدام نمودند. در این تحقیق ابتدا مؤثرترین سیگنال‌های بزرگ مقیاس انتخاب و سیگنال‌های با ضریب همبستگی پایین حذف شدند. در ادامه از روش شبکه عصبی مصنوعی برای شبیه‌سازی استفاده شد. نتایج حاصل حاکی از آن است که بارش شش ماهه اول سال آبی ۹۰-۸۹ نسبت به میانگین ۵۰ ساله شش ماهه اول ۲۰ درصد کاهش و نسبت به شش ماهه مشابه سال قبل ۴ درصد کاهش نشان می‌دهد. نتیجه نهایی این تحقیق منجر به تولید مدل شبکه عصبی با توان بسیار بالا در شبیه سازی بارش و جریان رودخانه‌ها با نتایج بسیار مطلوب در جنوب غرب کشور از نظر اقلیمی شده است.

فصل سوم
مواد و روش کار

۱-۳ موقعیت جغرافیای استان لرستان

لرستان با مساحتی حدود ۲۸۱۵۷ کیلومتر مربع در ناحیه جنوب غربی ایران بین $۴۶^{\circ} ۵۰''$ تا $۵۰^{\circ} ۱''$ طول شرقی و $۳۲^{\circ} ۴۰''$ تا $۳۴^{\circ} ۳۲''$ عرض شمالی مطابق شکل ۱-۳ واقع شده و ۱/۷ درصد مساحت کشور را به خود اختصاص داده است. میانگین ارتفاع آن بیش از ۲۲۰۰ متر از سطح دریا است. پست‌ترین نقطه استان با ارتفاع ۲۳۹ متر در دشت‌های استان و بلندترین قله آن اشترانکوه با ارتفاع ۴۰۸۰ متر از سطح دریا در میان رشته کوه زاگرس قرار دارد.



شکل ۱-۳ موقعیت جغرافیایی استان لرستان

۱-۱-۳ وضعیت منابع آب

منابع آب موجود در منطقه به دو دسته کلی آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی تقسیم می‌شوند. که آب‌های سطحی شامل رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، کانون‌های آبگیر می‌باشند و آب‌های زیرزمینی که همان سفره‌های آب زیرزمینی هستند و در اشکال چشمه‌ها، چاه‌ها، قنات با غنای قابل ملاحظه‌ای مورد بهره‌برداری کشاورزی، شرب و سایر مصارف قرار می‌گیرند (یاراحمدی، ۱۳۸۹). کل آب‌های سطحی و زیر زمینی کشور به ترتیب ۱۰۵ و ۲۵ میلیارد متر مکعب می‌باشد که از کل آب‌های سطحی کشور ۱۳/۵ میلیارد متر مکعب در استان لرستان جریان دارد و در بخش آب زیرزمینی هم ۱/۵ میلیارد متر مکعب آن متعلق به استان لرستان می‌باشد. در مجموع استان لرستان ۱۱/۵ درصد از آب‌های سطحی و زیر زمینی کشور را در بر می‌گیرد. از کل آب‌های سطحی کشور ۷۳ میلیارد متر

مکعب قابل استحصال می‌باشد که از این مقدار $\frac{2}{8}$ میلیارد متر مکعب به استان لرستان تعلق دارد (سایت شرکت آب منطقه‌ای استان لرستان، ۱۳۸۹).

۳-۱-۱-۱ آب‌های سطحی

ظرفیت بالقوه آب‌های سطحی استان لرستان در سال ۱۳۸۲ برابر با ۷۶۸۵ میلیون متر مکعب برآورد شده است.

۳-۱-۱-۲ آب‌های زیر زمینی

بر اساس آمار شرکت آب منطقه‌ای استان لرستان ظرفیت بالقوه آب‌های زیر زمینی استان لرستان در سال ۱۳۸۲ برابر با ۵۰۶۶ میلیون متر مکعب می‌باشد. منابع آب زیر زمینی یا سفره‌های آب زیرزمینی در استان به دو دسته تقسیم می‌شوند، منابع آب زیرزمینی که در رسوبات آبرفتی نفوذ پذیر دوران چهارم قرار دارند و منابع آبی که در مخازن آهکی به خصوص سنگ‌های آهکی کرتاسه و آسماری قرار دارند که بر اثر انحلال سنگ آهک غارها و مجاری‌هایی ایجاد شده و می‌توانند مقدار قابل توجهی آب در خود ذخیره کنند (اداره کل امور آب استان، ۱۳۸۲).

۳-۱-۲ بررسی و تحلیل عناصر اقلیمی منطقه مورد مطالعه

۳-۱-۲-۱ تجزیه و تحلیل دمای دراز مدت استان لرستان

به منظور تحلیل دمای استان لرستان از آمار ۱۲ ساله ۱۰ ایستگاه سینوپتیک، (۱۳۹۱-۱۳۷۳) استفاده گردید. در تحلیل دمای ایستگاه‌های سینوپتیک استان لرستان پارامترهای دمای حداقل، حداکثر، متوسط روزانه، حداقل مطلق و حداکثر مطلق به صورت ماهانه و فصلی و سالانه بحث گردید است.

در بررسی آماری در ایستگاه‌های سینوپتیک خرم آباد، بروجرد، الیگودرز، دورود، ازنا، کوه‌دشت، نورآباد، الشتر، سیلاخور و پل دختر بیشترین میانگین حداکثر دمای دوره آماری مربوط به میزان ۲۹ درجه سلسیوس بوده است. بالاترین میانگین حداکثر دمای دوره آماری مربوط به ازنا به میزان ۱۸/۹ درجه سلسیوس بوده است. بالاترین میانگین حداکثر دمای استان لرستان در مرداد ماه ۳۷/۱ درجه سلسیوس می‌باشد. در بررسی حداکثر مطلق دما نیز که در ایستگاه‌های سینوپتیک استان

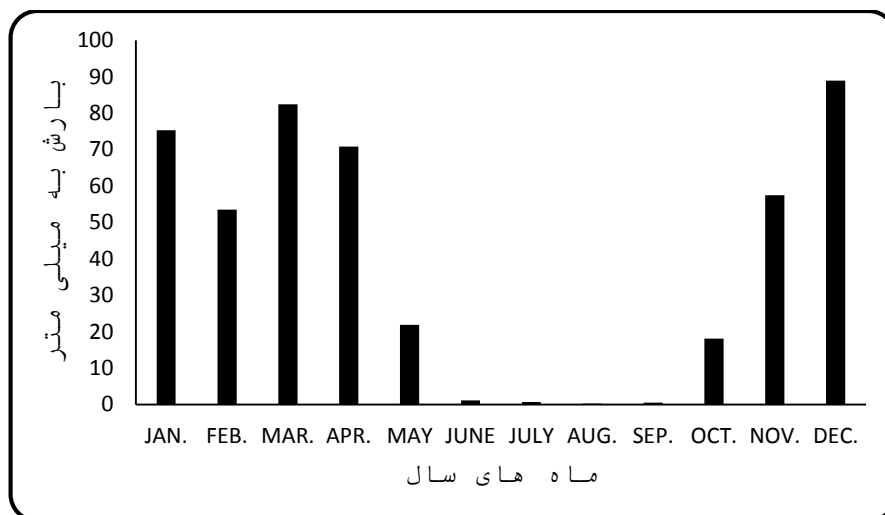
انجام شده در مرداد ماه در ایستگاه پل دختر دما به ۴۸-۴۷ درجه سلسیوس رسیده است. در میانگین دراز مدت دمای حداقل ایستگاه‌های مذکور، پل دختر با میانگین حداقل دمای دراز مدت ۱۶/۸ درجه سلسیوس بالاترین میانگین حداقل دما و هم‌چنین الشتر با میانگین حداقل دراز مدت ۳/۶ درجه سلسیوس کمترین دما را دارا بوده است که دامنه تغییرات میانگین حداقل دمای نرمال در بین ایستگاه‌های ذکر شده ۱۳/۲ درجه سلسیوس می‌باشد. به‌طور کلی در استان لرستان بهمن ماه با میانگین حداقل ۲/۳ درجه سلسیوس سردترین ماه سال محسوب می‌شود (سالنامه‌های هواشناسی). در بررسی حداقل مطلق دما نیز که در ایستگاه‌های سینوپتیک استان انجام شده در دی‌ماه دما در ایستگاه‌های الیگودرز و ازنا به ۳۱- درجه سلسیوس رسیده است. در میانگین متوسط دمای دراز مدت نیز پل دختر با میانگین سالیانه ۲۲/۹ درجه سلسیوس بالاترین و هم‌چنین نورآباد با متوسط دمای دراز مدت ۱۱/۹ درجه سلسیوس پایین‌ترین مقدار را در ایستگاه‌های فوق‌الذکر دارا می‌باشد. تغییرات دامنه نوسانات میانگین متوسط دمای دراز مدت نیز ۱۱ درجه سلسیوس می‌باشد که حاکی از تأثیرات میکروکلیمای استان و هم‌چنین توپوگرافی خاص استان لرستان می‌باشد. با افزایش ارتفاع دمای هوا کاهش پیدا می‌کند. با توجه به این که ایستگاه‌های هواشناسی در سطح استان در مناطق دشتی وجود دارند، برای پیدا کردن دمای ارتفاعات، بین دمای ایستگاه‌ها و ارتفاع آن‌ها می‌بایست معادله گرادیان دما استفاده شود و سپس معادله مذکور در نقشه ارتفاعی استان ضرب شود. بررسی همه نقشه‌های حالت‌های پنج‌گانه دما به‌صورت سالیانه و فصلی حاکی از اختلاف دمای نسبتاً چشم‌گیر بین شمال و شرق استان با جنوب غرب استان می‌باشد، به‌طوری‌که این اختلاف بعضاً به بیش از ۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. این اختلاف دمای شدید نشان دهنده تنوع اقلیمی بین این مناطق می‌باشد. در شرایطی که شمال و شرق استان اقلیم نسبتاً سردی را دارا می‌باشد، غرب و جنوب غرب استان دارای اقلیم معتدل تا گرمی می‌باشد. این تنوع اقلیمی در صورت استفاده از پتانسیل‌های آن می‌تواند کاربردهای خوبی را برای کشاورزی استان فراهم کند (سالنامه‌های هواشناسی).

۳-۱-۲-۲ وضعیت بارش استان لرستان

در فصل زمستان در استان لرستان به علت وجود هر دو عامل هوای مرطوب و عامل صعود بارش را مشاهده می‌کنیم حال آن‌که در فصل تابستان به‌علت استقرار مراکز پر فشار جنب حاره عامل

صعود وجود نداشته، در ضمن رطوبت کافی نیز موجود نمی‌باشد لذا در تابستان بارندگی رخ نمی‌دهد.

زمان بارش به طور کلی در زمستان و اوایل بهار و همچنین در پاییز است که بیشتر نامنظم و دارای تغییرپذیری بوده و همچنین بیشتر ریزش‌ها در فصل زمستان به صورت برف بوده که اغلب در دامنه‌ها و تا اواسط بهار باقی می‌ماند و با گرم شدن هوا ذوب گشته و باعث پر آب شدن رودها و در پاره‌ای مواقع طغیان آن‌ها می‌گردد (شکل ۳-۲).



شکل ۳-۲ نمودار تغییرات بارندگی استان لرستان

۳-۲-۱-۳ رطوبت نسبی

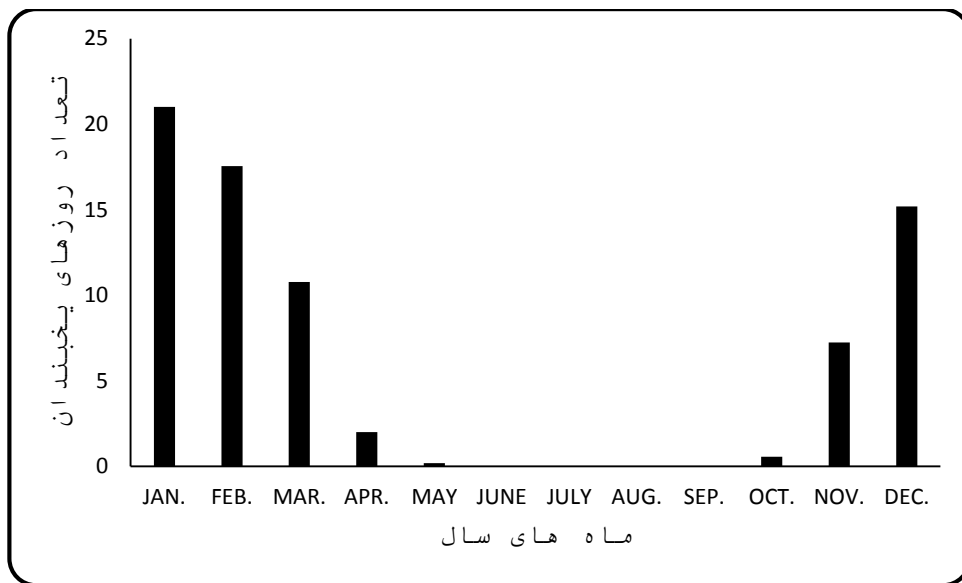
به منظور بررسی و مطالعه متوسط درصد رطوبت نسبی از داده‌های ۱۲ ساله ۱۰ ایستگاه سینوپتیک در استان لرستان استفاده شده است. بر این اساس و طبق بررسی‌های صورت گرفته از داده‌های رطوبتی استان لرستان هرچه از قسمت غرب و جنوب غرب استان به سمت شرق، شمال و شمال شرق می‌رویم به مقدار رطوبت نسبی افزوده می‌شود. یکی از دلایلی که منجر شده، غرب و جنوب غرب استان لرستان رطوبت کمتری نسبت به شرق و شمال داشته باشد، ارتفاع کمتر و دمای بالای این مناطق است. در قسمت‌های شرق، شمال شرق و شمالی استان به دلیل وجود ارتفاعات و پایین بودن دما مقدار رطوبت نسبی نیز افزایش می‌کند. براساس داده‌ها و آمار مورد بررسی در ماه‌های مختلف سال در استان لرستان دی‌ماه مرطوب‌ترین و مرداد ماه خشک‌ترین ماه سال محسوب می‌گردد (سالنامه‌های هواشناسی).

۳-۱-۲-۴ تبخیر

طبق بررسی‌های صورت گرفته از داده‌های تبخیر استان لرستان بیشترین مقدار ماهانه تبخیر در مرداد ماه با ۳۸۳ میلی‌متر و کمترین آن بهمن ماه با ۰/۴ میلی‌متر می‌باشد. لازم به یادآوری است که در زمستان در ایستگاه‌های هواشناسی مقدار تبخیر اندازه‌گیری نمی‌شود.

۳-۱-۲-۵ تعداد روزهای یخبندان

طبق بررسی‌های صورت گرفته، ایستگاه نورآباد با ۱۰۶ روز بیشترین روزهای یخبندان و ایستگاه پلدختر با ۱ روز کمترین روزهای یخبندان را در استان دارا می‌باشند. ماه‌های دی و بهمن هر کدام با ۱۹ روز یخبندان بیشترین فراوانی و اردیبهشت، خرداد، تیر، مرداد، شهریور و مهر بدون یخبندان می‌باشند (شکل ۳-۳).

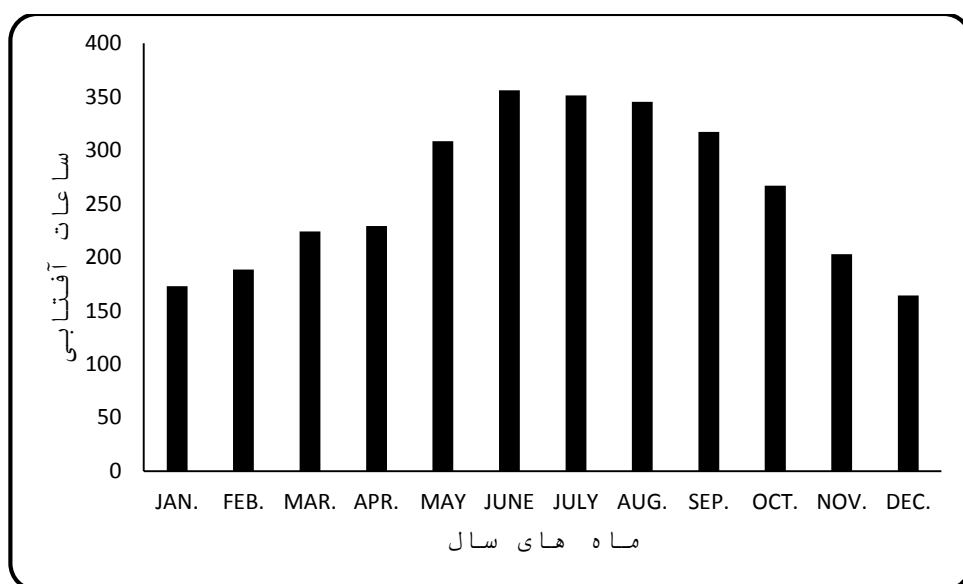


شکل ۳-۳ نمودار تغییرات روزهای یخبندان استان لرستان

۳-۱-۲-۶ ساعات آفتابی

در بررسی آماری تعداد ساعات آفتابی ایستگاه‌های سینوپتیک استان لرستان مشخص شد (شکل ۳-۴) که کوهدشت با متوسط سالانه ۳۲۳۲/۱ ساعت و بروجرد با ۲۸۱۵ ساعت به ترتیب دارای بیشترین و کمترین ساعات آفتابی در سطح استان هستند. هم‌چنین متوسط سالانه استان برابر با

۳۰۸۳/۲ ساعت می‌باشد. که تیرماه با ۳۶۴/۴ ساعت بیشترین و آذر ماه با ۱۶۵/۲ کمترین ساعات آفتابی را داشته‌اند (سالنامه‌های هواشناسی).



شکل ۳-۴ نمودار تغییرات ساعات آفتابی استان لرستان

۳-۱-۶ طبقه بندی اقلیمی

استان لرستان به‌طور کلی تحت تأثیر سیستم‌های هواشناسی غرب و جنوب‌غربی که به این منطقه وارد می‌شوند، قرار دارد. ارتفاعات منطقه مورد مطالعه به گونه‌ای واقع شده‌اند که از سیستم‌های باران زای وارده به منطقه به‌نحو قابل توجهی در جهت ریزش‌های جوی استفاده به‌عمل می‌آورند و به این لحاظ اکثر قسمت‌های منطقه مورد مطالعه دارای اقلیمی با باران نسبتاً مناسب می‌باشند. نقاط مرتفع و کوهستانی، قسمت‌های سرد منطقه محسوب می‌شوند. این مناطق پرفشار در فصل زمستان با پرفشار سیبری ادغام شده و تشکیل یک منطقه وسیع پرفشار می‌دهد. اما در مناطق هم‌مرز با استان خوزستان تغییرات محسوسی در رژیم‌های دمایی و بارندگی آن‌ها نسبت به نقاط مرتفع و سردتر مشاهده می‌گردد، استان لرستان تقریباً در تمام صفحات جنوبی خود با استان خوزستان هم‌مرز است و این امر موجب می‌گردد تا در ماه‌های گرم سال بخش‌های جنوبی استان لرستان تحت تأثیر هوای گرم خوزستان قرار گیرد. علاوه بر آن کم فشارهای حرارتی که در فصل گرم بر روی صحراهای عربستان و آفریقا و حتی کویرهای ایران تشکیل می‌شود، به‌صورت هوای گرم و

خشک، بخش‌های جنوبی استان لرستان را در ماه‌های گرم سال تحت تأثیر قرار می‌دهند و موجب گرمی و خشکی این نواحی از استان می‌گردند.

به‌طور کلی می‌توان گفت که مناطق وسیعی از لرستان متأثر از سلسله جبال زاگرس بوده که در این مناطق ریزش‌های جوی قابل ملاحظه، پوشش جنگلی و گیاهی مناسبی وجود دارد. بخشی از بارندگی‌های استان لرستان از سیکلون‌های برآمده از منطقه فشار مدیترانه‌ای است و بخش‌هایی از این منطقه در معرض تخلیه اولیه این سیستم‌ها قرار می‌گیرد. مرکز کم فشار سودان نیز در فصول سرد سال بر این منطقه مؤثر واقع شده و بخشی از بارندگی‌های آن را به وجود می‌آورند اما کم فشار موسمی نمی‌تواند در این منطقه تأثیر چندانی داشته باشد مراکز پر فشار شمال و شمال غربی نیز گاهی اوقات فصل سرد و بخش‌هایی از منطقه را مورد تأثیر قرار می‌دهند (اطلس اقلیمی لرستان، سازمان هواشناسی استان لرستان، ۱۳۸۸).

به‌طور کلی در لرستان سه ناحیه‌ی آب و هوایی دیده می‌شود:

۱- ناحیه‌ی نیمه خشک و سرد کوهستانی: بروجرد - نورآباد - الشتر - الیگودرز و ازنا در این قلمرو قرار می‌گیرند.

۲- ناحیه‌ی نیمه خشک و معتدل مرکزی: شهر کوهدشت خرم‌آباد و حوالی آن در این قلمرو قرار می‌گیرند.

۳- ناحیه‌ی نیمه گرم و خشک جنوبی: پل دختر و پاپی و نواحی مجاور آن دارای این نوع آب و هوا هستند (اطلس اقلیمی لرستان، سازمان هواشناسی استان لرستان، ۱۳۸۸).

در ایران با توجه به عناصر مورد اندازه‌گیری در ایستگاه‌های هواشناسی و طول دوره آماری ایستگاه‌ها برخی از طبقه‌بندی‌های اقلیمی مرسوم شده و مورد استفاده قرار گرفته است. عمده این طبقه‌بندی‌های اقلیمی تجربی بوده و طبقه‌بندی‌های ژنتیکی به دلیل تنوع عناصر مورد استفاده در طبقه‌بندی و فقدان اطلاعات مورد اندازه‌گیری در ایستگاه‌های هواشناسی چندان رایج نبوده‌اند. طبقه‌بندی‌های رایج در ایران عبارتند از طبقه‌بندی کوپن، دمارتن، آمبرژه، سلیمانینوف، ایوانف، بلور، دکتر کریمی و ... که در ذیل نتایج حاصل از این طبقه‌بندی‌ها در جدول ۳-۱ و ۳-۲ بر روی ایستگاه‌های سینوپتیک استان آورده شده است (اطلس اقلیمی لرستان، ۱۳۸۸).

جدول ۳-۱ خلاصه نتایج طبقه‌بندی اقلیمی استان لرستان به روش‌های مختلف

نام ایستگاه	بلور	دومارتن	گورزنسکی	سلینانینوف
خرم آباد	نیمه مرطوب	نیمه خشک	بحری با زمستان ملایم و نیمه مرطوب	خشک
بروجرد	نیمه خشک	نیمه خشک	بحری با زمستان نسبتاً سرد و نیمه خشک	نیمه خشک سرد
الیگودرز	نیمه خشک	نیمه خشک	بحری با زمستان نسبتاً سرد و نیمه خشک	فرا خشک
کوه‌دشت	نیمه خشک	نیمه خشک	بحری شدید با زمستان ملایم و نیمه خشک	خشک
پل‌دختر	نیمه خشک	نیمه خشک	بحری با زمستان گرم و نیمه خشک	خشک
الشتر	نیمه خشک	مدیترانه ای	بحری شدید با زمستان نسبتاً سرد و نیمه خشک	نیمه خشک سرد
دورود	نیمه مرطوب	نیمه مرطوب	بحری با زمستان ملایم و نیمه مرطوب	نیمه خشک سرد
نورآباد	نیمه مرطوب	نیمه مرطوب	بحری با زمستان نسبتاً سرد و نیمه مرطوب	فرا خشک
ازنا	نیمه خشک	مدیترانه ای	بحری با زمستان سرد و نیمه خشک	خشک
سیلاخور	نیمه خشک	نیمه خشک	بحری با زمستان نسبتاً سرد و نیمه خشک	خشک

ادامه جدول ۳-۱ خلاصه نتایج طبقه‌بندی اقلیمی استان لرستان به روش‌های مختلف

نام ایستگاه	دکتر کریمی	آمبرژه	کوپن	ایوانف
خرم آباد	نیمه مرطوب با تابستان گرم و زمستان نسبتاً سرد	نیمه خشک سرد	Csa معتدل با تابستان خشک	بیابانی
بروجرد	نیمه مرطوب با تابستان گرم و زمستان نسبتاً سرد	نیمه خشک سرد	Csa معتدل با تابستان خشک	استپی
الیگودرز	نیمه مرطوب با تابستان معتدل و زمستان بسیار سرد	خشک سرد	Csa معتدل با تابستان خشک	استپی
کوه‌دشت	نیمه مرطوب با تابستان گرم و زمستان سرد	خشک سرد	Csa معتدل با تابستان خشک	بیابانی
پل‌دختر	نیمه خشک با تابستان بسیار گرم و زمستان کمی سرد	خشک سرد	Csa معتدل با تابستان خشک	بیابانی
الشتر	نیمه مرطوب با تابستان معتدل و زمستان سرد	نیمه خشک سرد	Csa معتدل با تابستان خشک	استپی
دورود	نیمه مرطوب با تابستان گرم و زمستان سرد	اقلیم ارتفاعات	Csa معتدل با تابستان خشک	استپی جنگلی
نورآباد	نیمه مرطوب با تابستان معتدل و زمستان بسیار سرد	نیمه خشک سرد	Csa معتدل با تابستان خشک	استپی
ازنا	نیمه مرطوب با تابستان معتدل و زمستان بسیار سرد	نیمه خشک سرد	Csa معتدل با تابستان خشک	استپی
سیلاخور	نیمه مرطوب با تابستان گرم و زمستان سرد	خشک سرد	Csa معتدل با تابستان خشک	بیابانی

۳-۲ روش تحقیق

۳-۲-۱ جمع‌آوری و بازسازی داده‌ها

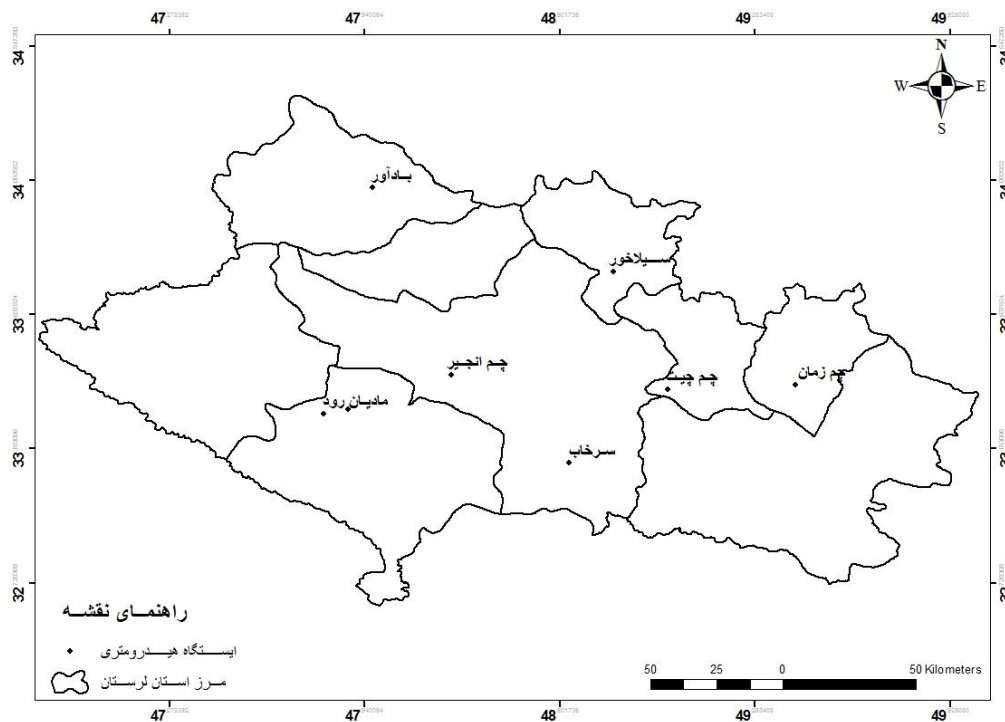
داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز تحقیق داده‌های آمار اشل - دبی رودخانه در ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه از سازمان‌های منابع آب و مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی جمع‌آوری گردید.

۲-۲-۳ انتخاب دوره آماری دبی

در پژوهش حاضر ابتدا با استفاده از اطلاعات سایت‌های اینترنتی، سازمان هواشناسی و وزارت نیرو به ترتیب داده‌های سیگنال‌ها و دبی ایستگاه‌های هیدرومتری جمع‌آوری گردید. چون، هدف از تهیه این آمار، پیش بینی خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از سیگنال‌های اقلیمی و شبکه عصبی مصنوعی در استان لرستان بود لذا لازم بود از میان ایستگاه‌های موجود در استان، تنها ایستگاه‌هایی انتخاب شوند که دارای آماری کامل در طول دوره‌های طولانی باشند، در نتیجه از بین ایستگاه‌های موجود در استان، ۸ ایستگاه مطابق جدول ۲-۳ و شکل ۳-۵ انتخاب شدند.

جدول ۲-۳ فهرست ایستگاه‌های مورد استفاده در این تحقیق

ارتفاع	جغرافیایی عرض	طول جغرافیایی	نام ایستگاه
۱۸۰۰	۳۴٫۱	۴۸	بادآور
۱۱۴۰	۳۳/۴	۴۸/۲	چم انجیر
۸۲۰	۳۳/۳	۴۷/۹	کشکان افرینه
۷۸۰	۳۳/۳	۴۷/۸	مادیان رود
۱۴۹۰	۳۳/۸	۴۸/۸	سیلانخور
۱۸۴۰	۳۳/۴	۴۹/۴	چم زمان
۱۲۹۰	۳۳/۴	۴۹/۰	چم چیت
۷۷۰	۳۳/۱	۴۸/۶	سرخاب



شکل ۳-۵ موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه

با توجه به مطالب گفته شده، سال‌های آماری مورد نظر برای استان لرستان با توجه به سال‌های آماری موجود تعیین شد. محدوده زمانی بارش برای شبیه سازی از سال ۱۹۶۶ تا سال ۲۰۱۰ در نظر گرفته شد.

۳-۲-۳ بررسی اولیه سیگنال‌های اقلیمی

در بررسی اولیه سیگنال‌ها، فقط سیگنال‌های که دارای داده‌های دوره ۴۰ ساله (۱۹۷۰/۰۱/۰۱ تا ۲۰۱۲/۰۱/۰۱) بودند برای انجام تحلیل در نرم افزار شبکه عصبی مصنوعی انتخاب شدند.

۳-۲-۴ انتخاب دوره آماری سیگنال‌های اقلیمی

سیگنال‌های بزرگ مقیاس اقلیمی مورد نظر برای شبیه سازی اولیه ۳۲ سیگنال در نظر گرفته شد. بر اساس معیار تکمیل بودن آمار و بر پایه تحقیقات انجام شده (لشنی زند، ۱۳۹۰) از سال ۱۹۷۰ تا سال ۲۰۱۲ میلادی، ۹ سیگنال مطابق جدول (۳-۳) برای شبیه سازی نهایی انتخاب شد.

جدول ۳-۳ سیگنال‌های نهایی انتخاب شده برای پیش بینی بارش

ردیف	نام سیگنال‌های نهایی	ردیف	نام سیگنال‌های نهایی
۱	TSA	۶	NINO _۴
۲	SW.MONSOON	۷	WP
۳	AO	۸	NINO _۱
۴	NINA _{۳-۴}	۹	PNA
۵		NINO _۳	

در نهایت می‌توان گفت که در این تحقیق هر سیگنال بزرگ مقیاس اقلیمی که می‌توانست کوچک‌ترین تأثیری روی شبیه سازی و پیش بینی داشته باشد انتخاب شد منبع آمار و اطلاعات داده‌های اقلیمی سایت (<http://www.noaa.gov/>) می‌باشد.

۳-۲-۵ محاسبه شاخص‌های خشکسالی

برای تحلیل خشکسالی هیدرولوژیکی در استان لرستان در این تحقیق از شاخص جریان سطحی استفاده شد.

۳-۲-۵-۱ شاخص خشکسالی جریان سطحی (SDI)^۱

این شاخص وضعیت خشکسالی هیدرولوژیکی را بر اساس رابطه (۳) مورد بررسی قرار می‌دهد.

$$SDI = \frac{V_k - \bar{V}_k}{s_k} \quad \text{رابطه ۳-۱}$$

V_k حجم تجمعی جریان رودخانه \bar{V}_k و S_k به ترتیب میانگین و انحراف از معیار داده‌های درازمدت جریان سطحی می‌باشند. طبقه‌بندی شاخص SDI در ۵ کلاس و مانند شاخص SPI است.

^۱. Streamflow Drought Index

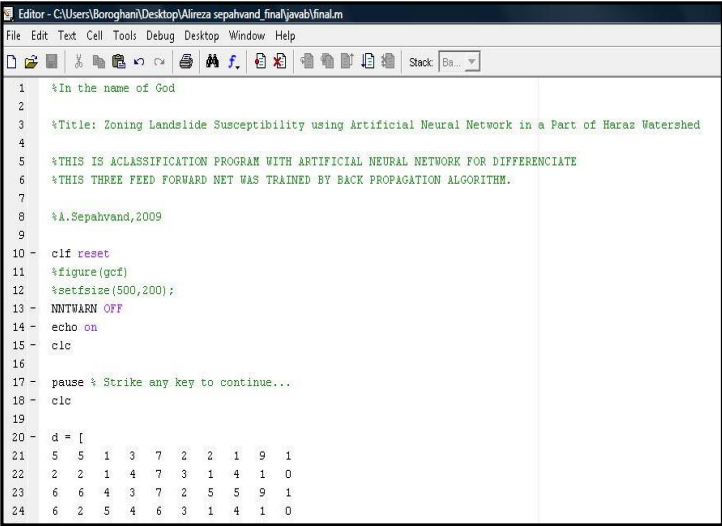
۳-۲-۶ استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

توانایی شبکه عصبی مصنوعی در حل معادلات چند متغیره به اثبات رسیده است (فاست، ۱۳۸۸)؛ لذا در این تحقیق از شبکه عصبی مصنوعی برای ارائه مدل بهینه پیش بینی خشکسالی در منطقه مورد مطالعه استفاده شد.

۳-۲-۷ ساخت شبکه عصبی مصنوعی در این تحقیق

در ساخت شبکه عصبی مصنوعی اولین کار تعیین نوع شبکه است. در این تحقیق از شبکه عصبی مصنوعی با ساختار پرسپترون چند لایه به دلیل کارایی بهتر نسبت به دیگر انواع شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم یادگیری انتشار به عقب^۱ (لی، ۲۰۰۷؛ گالتسو و همکاران، ۲۰۱۲) استفاده شد. طبق قضیه کولموگوروف، یعنی سه لایه برای تفکیک هر نوع فضایی مناسب است و هرگز نیازی به استفاده از لایه‌های بیشتر نیست (منهاج، ۱۳۸۱)، در این تحقیق از ۳ لایه مطابق شکل ۱-۱ استفاده شد.

ابتدا در محیط نرم افزار متلب^۲ ۱۰ برنامه‌ای مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی مطابق شکل ۳-۶ نوشته شد. ساختار شبکه عصبی مصنوعی در این برنامه پرسپترون چند لایه با الگوریتم یادگیری انتشار به عقب بود که در آن تعداد نرون در لایه ورودی، تعداد نرون در لایه خروجی، تعداد داده‌ها برای آموزش و آزمایش شبکه، تعداد نرون در لایه پنهان، نسبت یادگیری، تعداد تکرار و خطای هدف قابلیت تغییر داشتند.



```
1 %In the name of God
2
3 %Title: Zoning Landslide Susceptibility using Artificial Neural Network in a Part of Haraz Watershed
4
5 %THIS IS A CLASSIFICATION PROGRAM WITH ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR DIFFERENTIATE
6 %THIS THREE FEED FORWARD NET WAS TRAINED BY BACK PROPAGATION ALGORITHM.
7
8 %A.Sepahvand,2009
9
10 - clf reset
11 %figure(gcf)
12 %setsize(500,200);
13 - NNTWARN OFF
14 - echo on
15 - clc
16
17 - pause % Strike any key to continue...
18 - clc
19
20 - d = [
21 5 5 1 3 7 2 2 1 9 1
22 2 2 1 4 7 3 1 4 1 0
23 6 6 4 3 7 2 5 5 9 1
24 6 2 5 4 6 3 1 4 1 0
```

^۱ Backpropagation

^۲ MATLAB

شکل ۳-۶ بخشی از برنامه نوشته شده در نرم افزار متلب

۳-۲-۷-۱ تعداد نرون‌ها در لایه ورودی و لایه خروجی

در این تحقیق ۹ سیگنال انتخاب شده (جدول ۴-۳) به عنوان نرون لایه ورودی و مقادیر SPI به عنوان نرون لایه خروجی تعیین شدند.

۳-۲-۷-۲ تعداد داده‌ها جهت آموزش و آزمایش شبکه

در این تحقیق برای آموزش، صحت سنجی و آزمایش شبکه بایستی به‌طور تصادفی و به‌ترتیب از ۷۰، ۱۵ و ۱۵ درصد داده‌ها استفاده شد.

۳-۲-۷-۳ تعداد نرون در لایه پنهان

با توجه به مسائل مختلف تعداد نرون در لایه پنهان متفاوت می‌باشد (منهاج، ۱۳۸۱). روش‌ها و فرمول‌های زیادی برای تعیین آن وجود دارد ولی یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای تعیین تعداد نرون لایه پنهان برای داشتن کمترین مقدار خطا، استفاده از روش سعی و خطا است (جکسون، ۱۳۸۳). در این تحقیق از روش سعی و خطا برای تعیین تعداد نرون در لایه پنهان برای تعیین ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی با کمترین خطا استفاده شد. در تحقیق حاضر تعداد نرون در لایه پنهان بین ۱ تا ۱۵ تغییر داده شد.

۳-۲-۷-۴ نسبت یادگیری^۱

نسبت یادگیری از صفر تا یک متغیر است و تغییرات وزن‌ها را تحت کنترل دارد و هر چه بزرگ‌تر باشد تغییرات وزن‌ها با شتاب بیشتری صورت می‌گیرد. مقدار کم نسبت یادگیری موجب کاهش در میزان تغییرات وزن‌ها و در نتیجه کاهش سرعت همگرایی می‌شود. در این تحقیق مقدار نسبت یادگیری ۰/۱ در نظر گرفته شد.

^۱Learning Rate

۳-۲-۷-۵ تعداد تکرار

در برنامه‌ای که برای انجام این تحقیق نوشته شده بود می‌بایست تعداد تکرار ۱ به شبکه معرفی شود. در شبکه عصبی مصنوعی با زیاد کردن تعداد تکرار خطای مرحله آموزش کم می‌شود ولی این امکان وجود دارد با افزایش تعداد تکرار به جای کاهش خطای مرحله آزمایش، خطا افزایش یابد (منهاج، ۱۳۸۱). در این تحقیق تعداد تکرار در مرحله آموزش ۱ تا ۴۰۰۰ تکرار در نظر گرفته شد.

۳-۲-۷-۶ تابع فعال^۲

در برنامه‌ای که برای انجام این تحقیق نوشته شده طبق معادله ۳-۲، از تابع غیرخطی سیگموئید^۳ (f) به دلیل مشتق‌پذیر بودن، سادگی و کاربرد آن در بیشتر تحقیقات مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد.

$$f(\text{net}_{pi}) = \frac{1}{1 + e^{-\text{net}_{pi}}} \quad \text{رابطه (۳-۲)}$$

دلیل استفاده از تابع فعال‌سازی، قرار دادن خروجی هر نرون در یک محدوده خاص است (Lee، ۲۰۰۷).

۳-۲-۷-۷ نرمالیزه کردن^۴

قبل از ارائه داده‌ها به شبکه باید آن‌ها نرمال شوند. زیرا وارد کردن داده‌ها به صورت خام باعث کاهش سرعت و دقت شبکه می‌شود؛ لذا برای یکسان کردن دامنه تغییرات آن‌ها عمل نرمال‌سازی داده‌ها صورت می‌گیرد (قربانی و همکاران، ۱۳۸۷). در برنامه نوشته شده در نرم‌افزار متلب ۱۰ برای انجام این تحقیق دستوری نوشته شد که داده‌ها را بین ۰/۱ تا ۰/۹ نرمال کند. در این تحقیق برای عمل نرمال‌سازی از رابطه ۳-۳ استفاده شد:

^۱Epoch

^۲Activation Function

^۳Sigmoid Function

^۴Normalization

$$x_i = \frac{z_i - z_{i(\min)}}{z_{i(\max)} - z_{i(\min)}} \quad \text{رابطه (۳-۳)}$$

که در آن z_i برابر با وزن پیکسل مورد نظر، $z_{i(\min)}$ برابر با کمترین وزن فاکتور مورد نظر، $z_{i(\max)}$ برابر با بیشترین وزن فاکتور مورد نظر و x_i برابر با وزن نرمال شده فاکتور مورد نظر است (یلمز^۱، ۲۰۰۹).

۳-۲-۷-۸ مراحل تعیین وزن در شبکه عصبی مصنوعی

تعیین وزن در شبکه عصبی مصنوعی شامل دو مرحله است. در مرحله اول وزن‌ها به صورت تصادفی تعیین می‌شوند (سرینواسلو و جین، ۲۰۰۶). در این تحقیق در مرحله اول وزن‌ها به صورت تصادفی و با استفاده از رابطه ۳-۴ بین -0.7 و 0.7 با توابع توزیع گوسین انتخاب شدند.

$$w_1 = (\text{rand}(s19) - 0.7/0.7); \quad \text{رابطه (۴-۳)}$$

مرحله دوم، مرحله تعیین وزن نهایی است. در مرحله یادگیری شبکه در هر تکرار با استفاده از رابطه ۳-۵ مقادیر وزن را تغییر داده تا به مقادیر وزن مطلوب برسد. جهت تعیین وزن نهایی در شبکه عصبی مصنوعی از روابط ذیل در نرم‌افزار استفاده می‌شود (Lee, ۲۰۰۷).

$$\text{net} = \sum_i w_{ij} o_i \quad \text{رابطه (۵-۳)}$$

در معادله بالا w_{ij} وزن بین واحد پردازشگر i و j و o_i خروجی واحد پردازشگر i است که از رابطه ۳-۶ به دست می‌آید.

$$o_j = f(\text{net}_j) \quad \text{رابطه (۶-۳)}$$

در رابطه بالا f تابع فعال است که معمولاً یک تابع غیر خطی که برای قرار دادن مجموع وزن‌های خروجی از هر لایه به لایه بعدی استفاده می‌شود به این منظور معمولاً از تابع سیگموئیدی^۲ استفاده می‌شود. یکی از مزیت‌های این تابع آن است که مطابق رابطه ۳-۷ قابلیت مشتق پذیری دارد.

$$f'(\text{net}_j) = f(\text{net}_j)(1 - f(\text{net}_j)) \quad \text{رابطه (۷-۳)}$$

^۱ Yilmaz

^۲ Sigmoid function

شبکه ای که در این رابطه استفاده شده است شامل سه لایه می باشد که اولین لایه آن، لایه ورودی است. دومین لایه، لایه پنهان و سومین لایه شبکه، لایه خروجی نام دارد. هر واحد پردازشگر از لایه پنهان به لایه قبلی و بعدی به وسیله ارتباطات وزنی متصل شده است. میزان خطای شبکه برای یک الگوی مشخص ورودی تابعی از بردار مطلوب خروجی (d) و بردار خروجی واقعی است که به وسیله رابطه ۳-۸ به دست می آید.

$$E = \frac{1}{2} \sum_k (d_k - o_k) \quad \text{رابطه (۳-۸)}$$

در این رابطه E خطای کل شبکه، d_k مقادیر پیش بینی شده و o_k مقادیر مشاهده شده می باشند. خطا در جهت برگشت در سراسر شبکه پس انتشار خطا می یابد و به وسیله فرآیند تنظیم وزن های بین لایه ها به حداقل می رسد. تنظیم وزن ها به صورت رابطه ۳-۹ بیان می شود.

$$w_{ij}(n+1) = \eta(\delta_j o_i) + \alpha \Delta w_{ij} \quad \text{رابطه (۳-۹)}$$

در این رابطه η ضریب یادگیری δ_j شاخص نسبت تغییرات خطا و α پارامتر متمم (گشتاور) است. δ_j به نوع لایه ها وابسته است (روابط ۳-۱۰ و ۳-۱۱)، برای مثال:

$$\delta_j = (d_k - o_k) f'(net_k) \quad \text{رابطه (۳-۱۰)}$$

$$\delta_j = \left(\sum_k \delta_k w_{jk} \right) f'(net_j) \quad \text{رابطه (۳-۱۱)}$$

فرآیند پیشرو و پس انتشار خطا به طور زیادی تا موقعی که خطای کل شبکه حداقل شده یا به مقدار مورد نظر برسد تکرار می شود. الگوریتم پس انتشار خطا برای تعیین کردن وزن های هر فاکتور و استفاده از این داده ها برای طبقه بندی استفاده می شود.

اهمیت خروجی (o_j) که خروجی از هر نود لایه خروجی می باشد توسط رابطه ۳-۱۲ به دست می آید

$$\frac{\delta o_k}{\delta o_j} = f'(net_k) \times \frac{\delta(net_k)}{\delta o_j} = f'(net_k) \times w_{jk} \quad \text{رابطه (۳-۱۲)}$$

رابطه ۳-۱۲ هم مقادیر مثبت و هم مقادیر منفی تولید می کند. اگر اندازه اثرات دلخواه باشد، آنگاه اهمیت (وزن) واحد پردازشگر j متناسب با واحد پردازشگر دیگر o_j در لایه پنهان ممکن است به عنوان نسبتی از قدر مطلق مشتق رابطه ۳-۱۳ محاسبه شود.

$$\frac{|\delta o_k|}{|\delta o_j|} = \frac{|f'(net_k) w_{jk}|}{|f'(net_k) w_{jo_k}|} = \frac{|w_{jk}|}{|w_{jo_k}|} \quad \text{رابطه (۳-۱۳)}$$

برای یک واحد پردازشگر مشخص در لایه خروجی نتایج رابطه ۳-۱۳ نشان می دهد که وزن نسبی یک واحد پردازشگر در لایه پنهان نسبتی از قدر مطلق وزن ارتباط بین واحد پردازشگر لایه

مخفی و لایه خروجی است. هنگامی که شبکه شامل لایه‌های خروجی با بیش از یک واحد پردازشگر باشد آن گاه رابطه ۳-۱۳ نمی‌تواند برای مقایسه دو واحد پردازشگر در لایه پنهان استفاده شود. در صورتی چند واحد پردازشگر در لایه خروجی داشته باشیم از روابط ۴-۱۴ و ۴-۱۵ استفاده می‌شود.

$$w_{j0k} = \frac{1}{j} \sum_{j=1}^J |w_{jk}| \quad \text{رابطه (۴-۱۴)}$$

$$t_{jk} = \frac{|w_{jk}|}{\sum_{j=1}^J |w_{jk}|} = \frac{J|w_{jk}|}{\sum_{j=1}^J |w_{jk}|} \quad \text{رابطه (۴-۱۵)}$$

بنابراین با توجه به واحد پردازشگر k ، هر واحد پردازشگر در لایه پنهان دارای ارزشی بزرگ‌تر یا کوچک‌تر از یک می‌باشد. بسته به اینکه آیا ارزش آن بیشتر یا کمتر از ارزش میانگین باشد، تمام واحدهای پردازشگر مشابه در لایه پنهان یک ارزش کل دریافت می‌کنند، که به وسیله رابطه ۳-۱۶ محاسبه می‌شود.

$$\sum_{j=1}^J t_{jk} = J \quad \text{رابطه (۳-۱۶)}$$

در نتیجه اهمیت J با توجه به تمام واحدهای پردازشگر در لایه خروجی، به وسیله رابطه ۳-۱۷ به دست می‌آید.

$$t_j = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K t_{jk} \quad \text{رابطه (۳-۱۷)}$$

به روش مشابه، با توجه به واحد پردازشگر j در لایه پنهان درجه اهمیت نرمالیزه شده واحد پردازشگر j در لایه ورودی می‌تواند به وسیله رابطه ۳-۱۸ بدست آید.

$$s_{ij} = \frac{|\omega_{ij}|}{\sum_{i=1}^I |\omega_{ij}|} = \frac{I|\omega_{ij}|}{\sum_{i=1}^I |\omega_{ij}|} \quad \text{رابطه (۳-۱۸)}$$

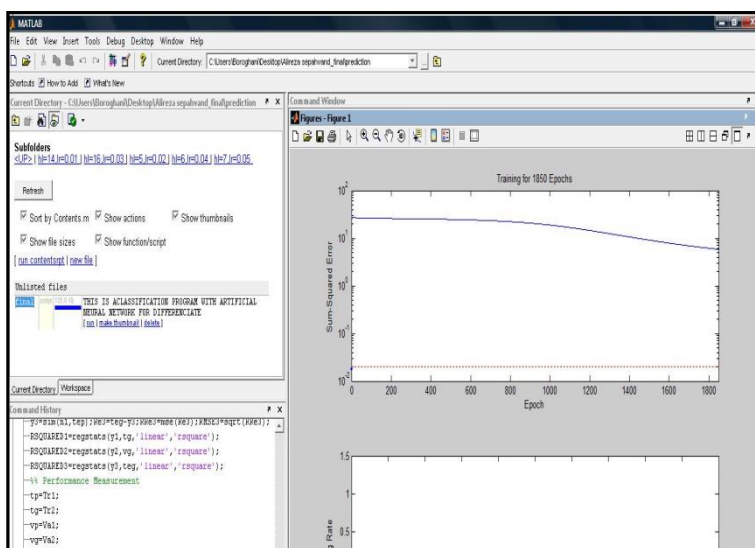
اهمیت نهایی واحد پردازشگر j با توجه به لایه مخفی از رابطه ۳-۱۹ به دست می‌آید.

$$s_i = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J s_{ij} \quad \text{رابطه (۳-۱۹)}$$

درجه اهمیت ورودی واحد پردازشگر j با توجه به واحد پردازشگر خروجی k به وسیله رابطه ۳-۲۰ به دست می‌آید.

$$st_j = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J s_{ij} t_j \quad \text{رابطه (۳-۲۰)}$$

در طی هر تکرار با انجام روابط فوق مطابق شکل ۳-۷ خطا کم شده و هر طبقه از عوامل ورودی دارای وزن نهایی جهت پیش آگاهی می‌شود.



شکل ۳-۷ کاهش خطا در طول مرحله آموزش

۳-۲-۸ ارزیابی روش شبکه عصبی مصنوعی برای انتخاب مدل بهینه

دقت مدل شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) مطابق رابطه ۴-۲۰ مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ریشه میانگین مربعات خطا مبین اختلاف کلی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر تخمینی است. (سپهوند و همکاران، ۱۳۹۰). از بین مدل‌های مذکور مدلی که از ریشه میانگین مربعات خطا نزدیک به صفر برخوردار باشد به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برای پیش‌بینی خشکسالی در منطقه مورد مطالعه انتخاب شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \quad \text{رابطه (۴-۲۰)}$$

در روابط فوق، P_i مقدار برآورد شده، O_i مقدار مشاهده شده، \bar{O} میانگین مقادیر مشاهده شده و N تعداد داده‌های اندازه‌گیری نفوذ است.

فصل چهارم

نتایج و بحث

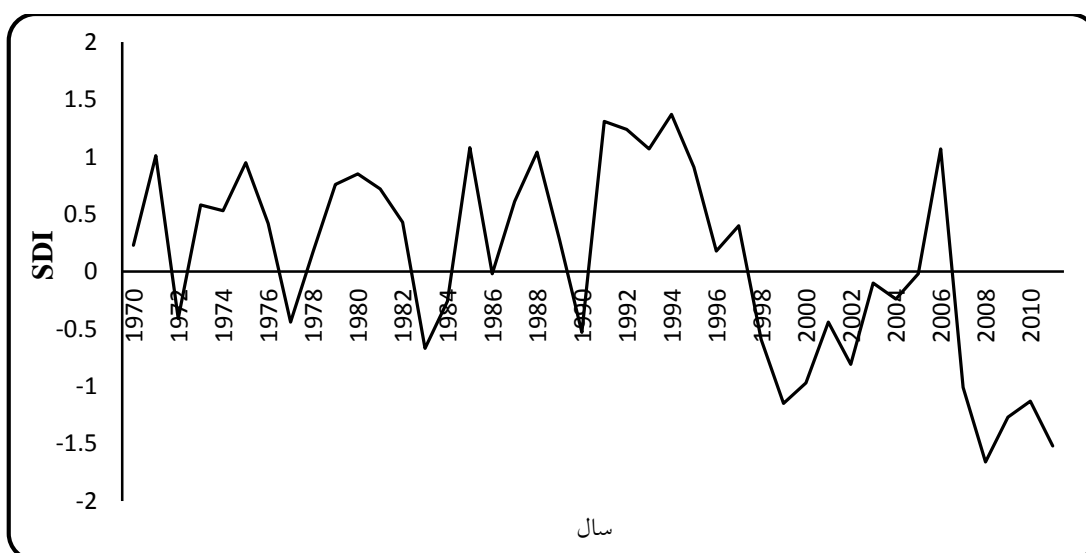
۴- نتایج و بحث

۴-۱ خشکسالی هیدرولوژیکی سالانه

در هر ایستگاه خشکسالی هیدرولوژیکی سالانه با استفاده از شاخص SDI محاسبه شد که در زیر بر اساس هر ایستگاه هیدرومتری آورده شده است.

۴-۱-۱ افرینه

شکل ۴-۱ خشکسالی هیدرولوژیکی سالانه ایستگاه هیدرومتری افرینه را نشان می‌دهد.

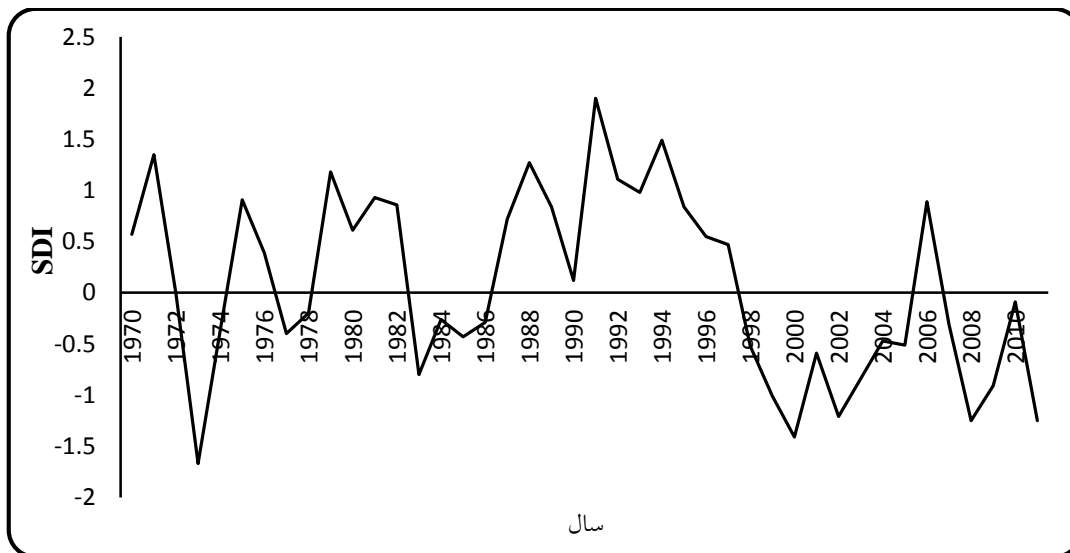


شکل ۴-۱ خشکسالی هیدرولوژیکی سالانه ایستگاه هیدرومتری افرینه

نتایج شکل ۴-۱ نشان می‌دهد که در طول دوره مورد مطالعه در ایستگاه افرینه، سال‌های ۲۰۰۸ و ۱۹۹۴ به ترتیب به عنوان خشک‌ترین و مرطوب‌ترین سال شناخته شده‌اند.

۴-۱-۲ ایستگاه بادآور

شکل ۴-۲ خشکسالی هیدرولوژیکی سالانه ایستگاه هیدرومتری بادآور را نشان می‌دهد.

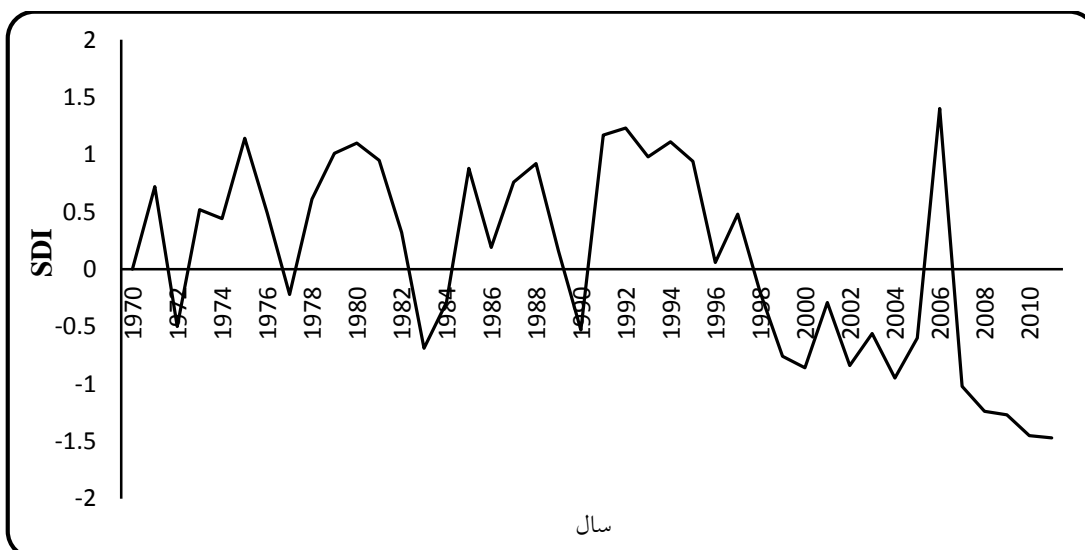


شکل ۲-۴ خشکسالی هیدرولوژیکی سالانه ایستگاه هیدرومتری بادآور

نتایج شکل ۲-۴ نشان می‌دهد که در طول دوره مورد مطالعه در ایستگاه بادآور، سال‌های ۱۹۷۳ و ۱۹۹۱ به ترتیب به عنوان خشک‌ترین و مرطوب‌ترین سال شناخته شده‌اند.

۳-۱-۴ ایستگاه چمانجیر

شکل ۳-۴ خشکسالی هیدرولوژیکی سالانه ایستگاه هیدرومتری چمانجیر را نشان می‌دهد.

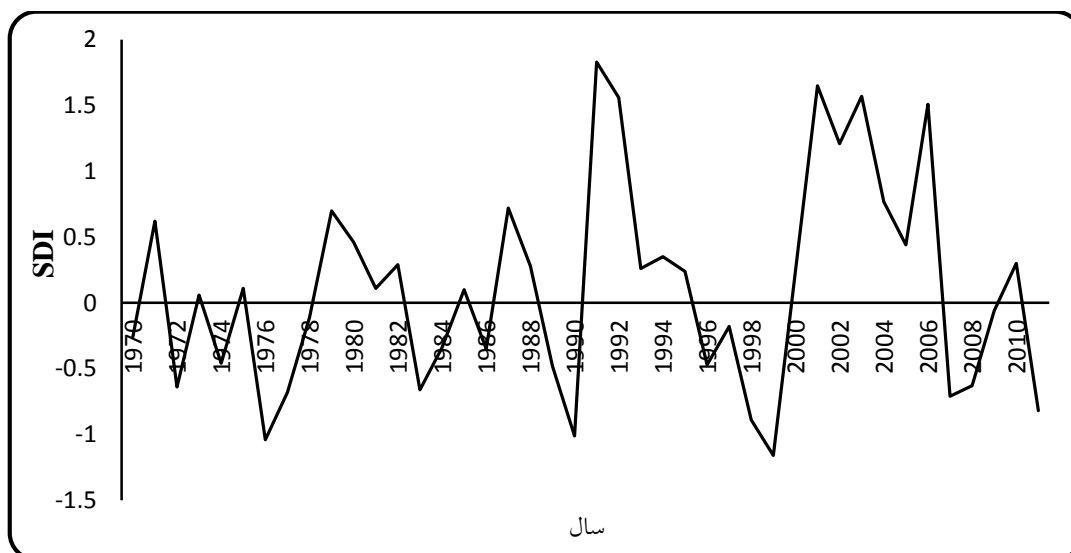


شکل ۳-۴ خشکسالی هیدرولوژیکی سالانه ایستگاه هیدرومتری چمانجیر

نتایج شکل ۳-۴ نشان می‌دهد که در طول دوره مورد مطالعه در ایستگاه چمانجیر، سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۰۶ به ترتیب به عنوان خشک‌ترین و مرطوب‌ترین سال شناخته شده‌اند.

۴-۱-۴ ایستگاه چم چیت

شکل ۴-۴ خشکسالی هیدرولوژیکی سالانه ایستگاه هیدرومتری چم چیت را نشان می دهد.

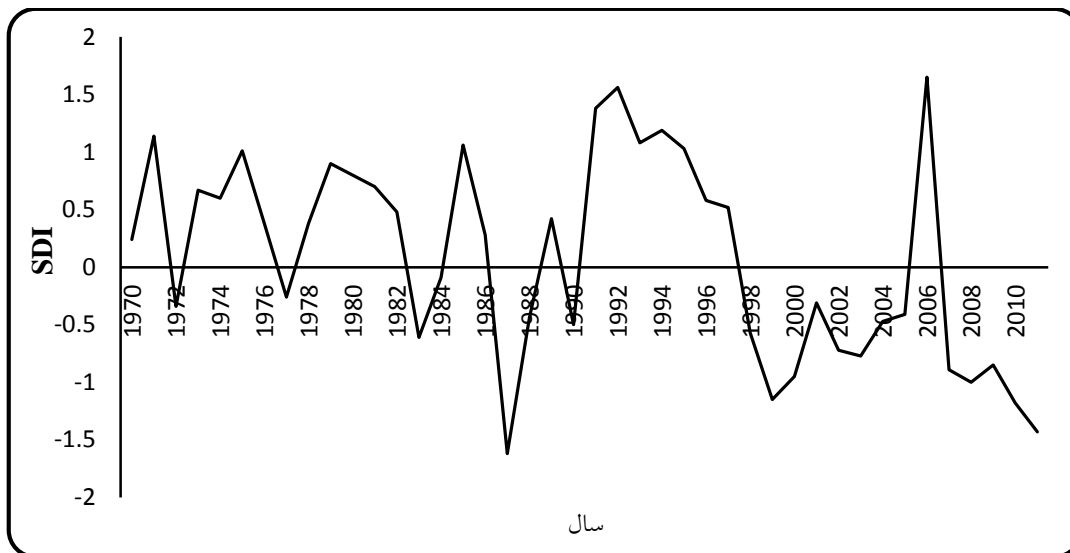


شکل ۴-۴ خشکسالی هیدرولوژیکی سالانه ایستگاه هیدرومتری چم چیت

نتایج شکل ۴-۴ نشان می دهد که در طول دوره مورد مطالعه در ایستگاه چم چیت، سال های ۱۹۹۹ و ۱۹۹۱ به ترتیب به عنوان خشک ترین و مرطوب ترین سال شناخته شده اند.

۴-۱-۵ ایستگاه کشکان

شکل ۴-۵ خشکسالی هیدرولوژیکی سالانه ایستگاه هیدرومتری کشکان را نشان می دهد.

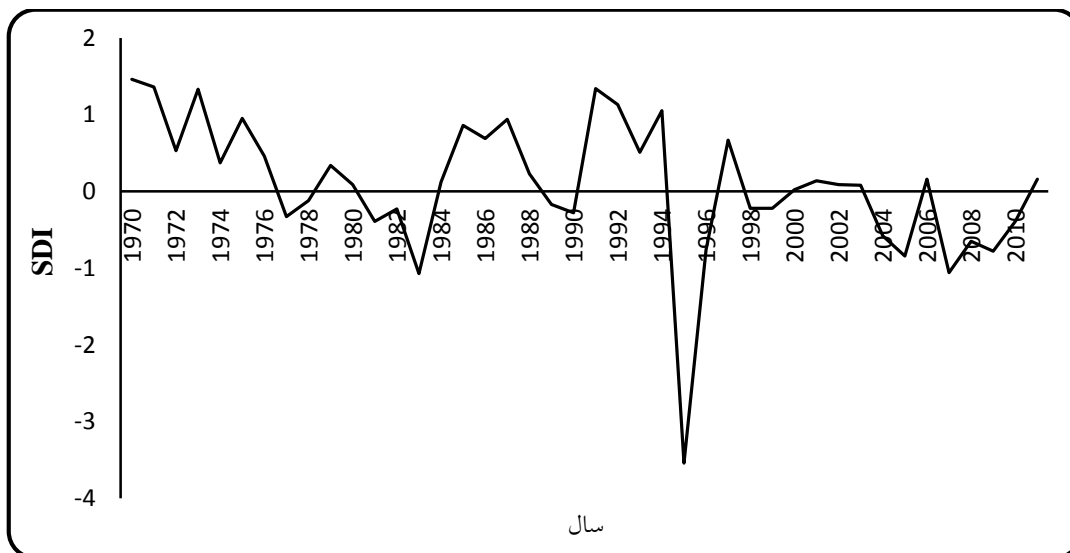


شکل ۴-۵ خشکسالی هیدرولوژیکی سالانه ایستگاه هیدرومتری کشکان

نتایج شکل ۴-۵ نشان می‌دهد که در طول دوره مورد مطالعه در ایستگاه کشکان، سال‌های ۱۹۸۷ و ۲۰۰۶ به ترتیب به عنوان خشک‌ترین و مرطوب‌ترین سال شناخته شده‌اند.

۴-۱-۶ ایستگاه ونایی

شکل ۴-۶ خشکسالی هیدرولوژیکی سالانه ایستگاه هیدرومتری ونایی را نشان می‌دهد.

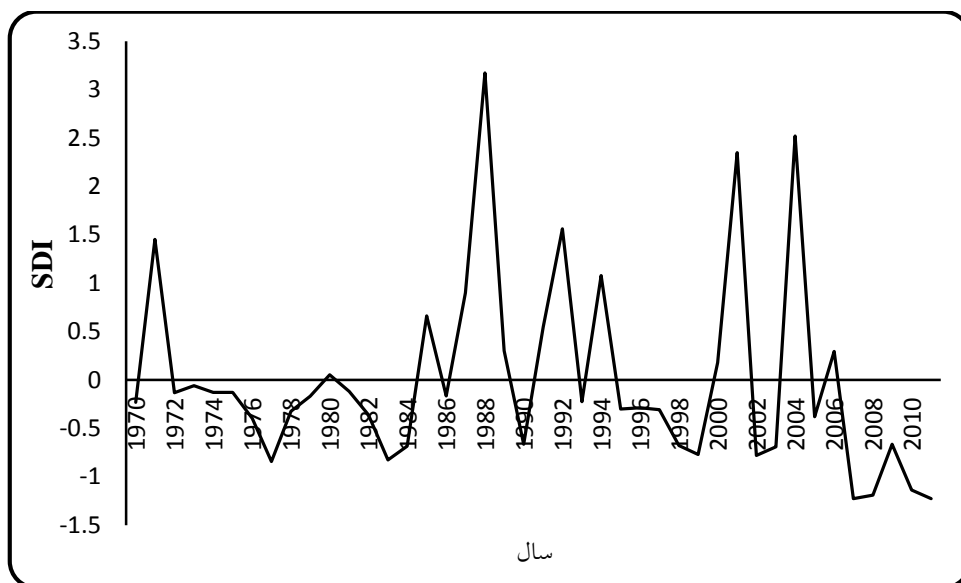


شکل ۴-۶ خشکسالی هیدرولوژیکی سالانه ایستگاه هیدرومتری ونایی

نتایج شکل ۴-۶ نشان می‌دهد که در طول دوره مورد مطالعه در ونایی، سال‌های ۱۹۹۵ و ۱۹۷۰ به ترتیب به عنوان خشک‌ترین و مرطوب‌ترین سال شناخته شده‌اند.

۷-۱-۴ ایستگاه سرخاب

شکل ۷-۴ خشکسالی هیدرولوژیکی سالانه ایستگاه هیدرومتری سرخاب را نشان می‌دهد.

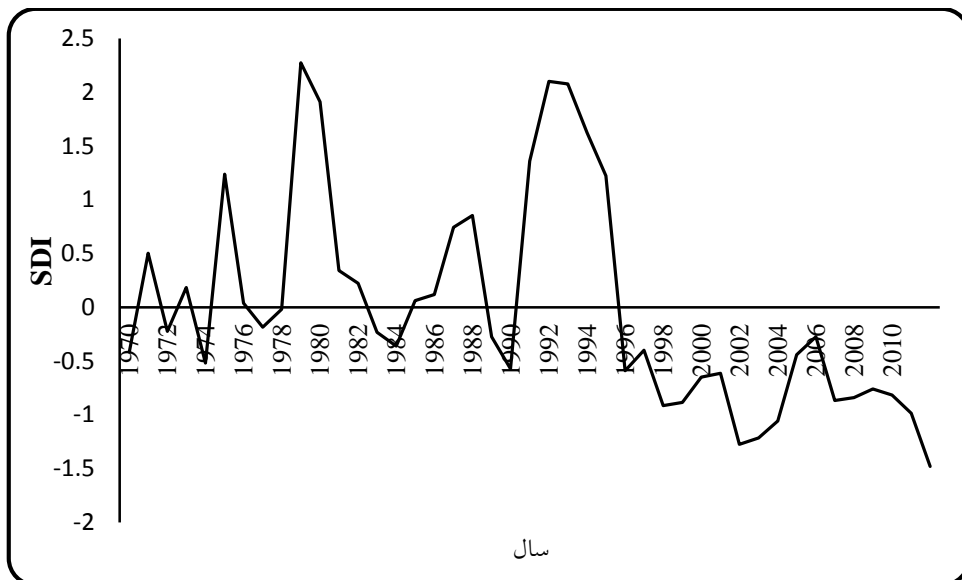


شکل ۷-۴ خشکسالی هیدرولوژیکی سالانه ایستگاه هیدرومتری سرخاب

نتایج شکل ۷-۴ نشان می‌دهد که در طول دوره مورد مطالعه در سرخاب، سال‌های ۲۰۱۱ و ۱۹۹۸ به ترتیب به عنوان خشک‌ترین و مرطوب‌ترین سال شناخته شده‌اند.

۸-۱-۴ ایستگاه دره تخت

شکل ۸-۴ خشکسالی هیدرولوژیکی سالانه ایستگاه هیدرومتری دره تخت را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۸ خشکسالی هیدرولوژیکی سالانه ایستگاه هیدرومتری دره تخت

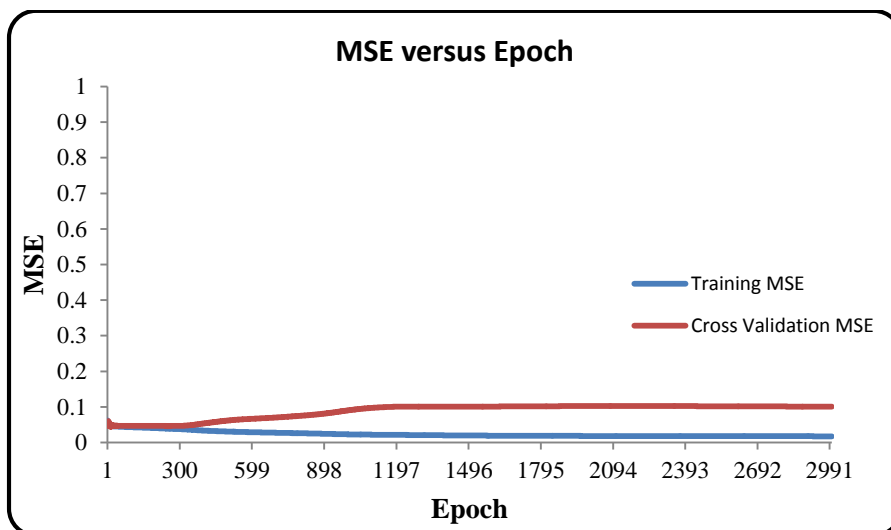
نتایج شکل ۴-۸ نشان می‌دهد که در طول دوره مورد مطالعه در دره تخت، سال‌های ۲۰۱۱ و ۱۹۷۹ به ترتیب به عنوان خشک‌ترین و مرطوب‌ترین سال شناخته شده‌اند.

۴-۲ مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی

۴-۲-۱ ایستگاه افرینه

۴-۲-۱-۱ تعیین تعداد تکرار بهینه در ایستگاه افرینه

جهت جلوگیری از یادگیری بیش از حد شبکه و افزایش خطا در شبکه می‌بایست تعداد تکرار بهینه در شبکه تعیین گردد. جهت انجام این کار تعداد تکرار از ۱ تا ۳۰۰۰ تغییر داده شد و در پایان هر مرحله خطای آموزش و صحت سنجی ثبت گردید. به‌طور معمول با افزایش تعداد تکرار، خطای مرحله آموزش کم می‌شود. ولی خطای صحت سنجی ابتدا تا تعداد حدود ۲۵۲ تکرار کاهش یافت ولی بعد از آن خطا شروع به افزایش گذاشت. نتایج این مرحله را می‌توان در شکل ۴-۹ مشاهده کرد. در نتیجه تعداد تکرار بهینه ۲۵۲ با میانگین مربعات خطای ۰/۰۰۹ در مرحله صحت سنجی انتخاب شد.



شکل ۹-۴ نتایج آزمایش جهت انتخاب تعداد تکرار بهینه در ایستگاه افرینه

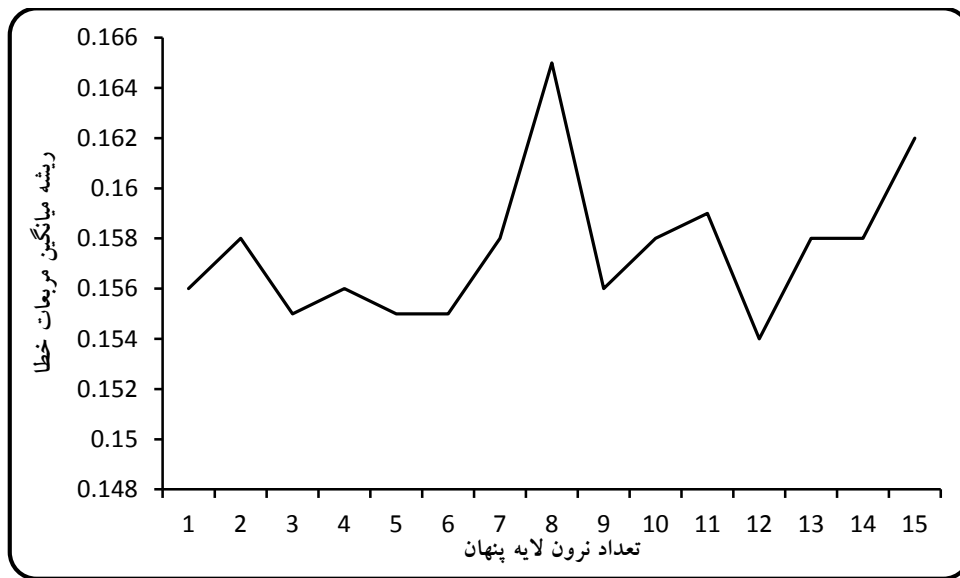
۲-۱-۲-۴ تعیین ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه افرینه

جهت انتخاب ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی، تعداد نرون لایه میانی از ۱ تا ۱۵ با نسبت یادگیری ۰/۱ و ضریب ممتم ۰/۷ تغییر داده شد و در هر مرحله ریشه میانگین مربعات خطا محاسبه گردید. در نهایت ساختاری که دارای کمترین خطا بود به عنوان ساختار بهینه انتخاب شد که نتایج آن را می توان در جدول ۱-۴ مشاهده کرد و در نهایت شکل ۱۰-۴ ریشه میانگین مربعات مدل بهینه را نشان می دهد.

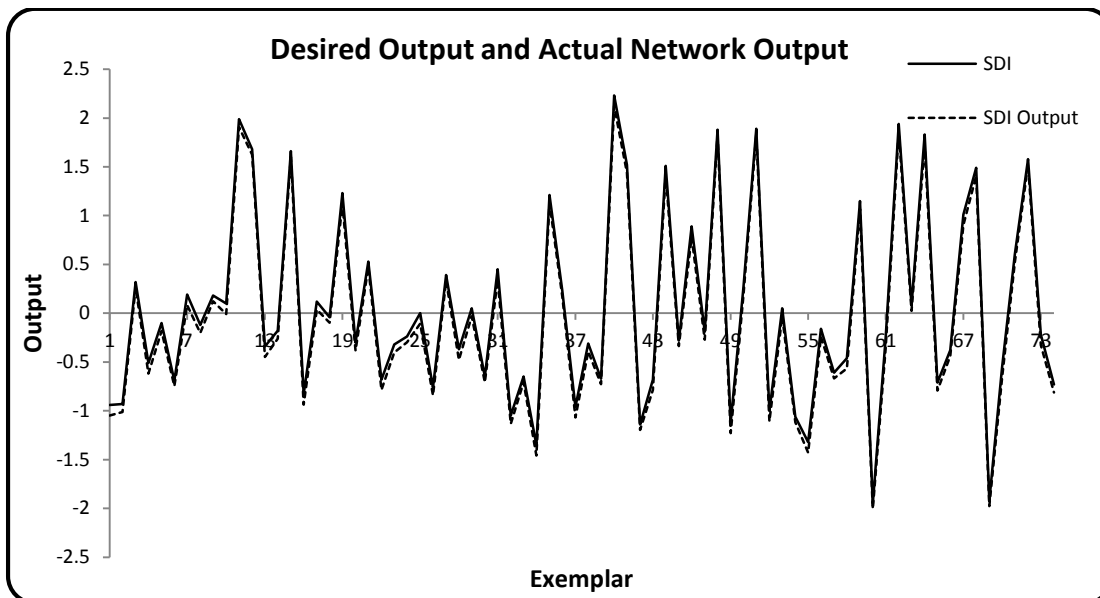
جدول ۱-۴ نتایج تکرارها جهت انتخاب ساختار بهینه شبکه در ایستگاه افرینه

تست						صحت سنجی	آموزش	ساختار مدل
R	Max Abs Error	Min Abs Error	MAE	NRMSE	RMSE	MSE	MSE	
۰,۶۰۸	۰,۳۳۵	۰,۰۰۱	۰,۱۲۹	۰,۱۷۷	۰,۱۵۶	۰,۰۵۰	۰,۰۴۶	۹-۱-۱
۰,۵۶۳	۰,۳۶۷	۰,۰۰۱	۰,۱۲۳	۰,۱۷۹	۰,۱۵۸	۰,۰۵۲	۰,۰۴۲	۹-۲-۱
۰,۶۳۲	۰,۳۳۰	۰,۰۰۲	۰,۱۲۶	۰,۱۷۵	۰,۱۵۵	۰,۰۵۴	۰,۰۴۰	۹-۳-۱
۰,۶۱۶	۰,۳۳۰	۰,۰۰۱	۰,۱۲۶	۰,۱۷۶	۰,۱۵۶	۰,۰۵۴	۰,۰۳۷	۹-۴-۱
۰,۶۶۰	۰,۳۴۰	۰,۰۰۱	۰,۱۲۹	۰,۱۷۶	۰,۱۵۵	۰,۰۶۰	۰,۰۳۳	۹-۵-۱
۰,۶۳۲	۰,۳۳۹	۰,۰۰۱	۰,۱۲۵	۰,۱۷۶	۰,۱۵۵	۰,۰۵۷	۰,۰۳۰	۹-۶-۱
۰,۵۱۱	۰,۳۲۶	۰,۰۰۲	۰,۱۲۸	۰,۱۷۹	۰,۱۵۸	۰,۰۵۵	۰,۰۳۲	۹-۷-۱

۰,۰۰۷-	۰,۳۳۱	۰,۰۰۴	۰,۱۳۹	۰,۱۸۶	۰,۱۶۵	۰,۰۷۷	۰,۰۲۶	۹-۸-۱
۰,۶۰۲	۰,۳۶۶	۰,۰۰۲	۰,۱۲۳	۰,۱۷۷	۰,۱۵۶	۰,۰۶۲	۰,۰۲۸	۹-۹-۱
۰,۶۴۱	۰,۳۳۰	۰,۰۰۱	۰,۱۳۲	۰,۱۷۹	۰,۱۵۸	۰,۰۷۲	۰,۰۱۹	۹-۱۰-۱
۰,۵۹۲	۰,۳۲۹	۰,۰۰۴	۰,۱۳۲	۰,۱۸۰	۰,۱۵۹	۰,۰۸۲	۰,۰۱۸	۹-۱۱-۱
۰,۶۶۸	۰,۳۴۶	۰,۰۰۱	۰,۱۲۶	۰,۱۷۶	۰,۱۵۴	۰,۰۰۹	۰,۰۱۶	۹-۱۲-۱
۰,۶۱۲	۰,۳۳۲	۰,۰۰۳	۰,۱۲۹	۰,۱۷۸	۰,۱۵۸	۰,۱۱۷	۰,۰۲۰	۹-۱۳-۱
۰,۵۵۲	۰,۳۴۸	۰,۰۰۳	۰,۱۲۶	۰,۱۷۹	۰,۱۵۸	۰,۰۸۷	۰,۰۱۶	۹-۱۴-۱
۰,۵۴۷	۰,۳۶۷	۰,۰۰۱	۰,۱۲۹	۰,۱۸۳	۰,۱۶۲	۰,۱۰۵	۰,۰۱۳	۹-۱۵-۱



شکل ۴-۱۰ منحنی کمترین خطای شبکه (RMSE) در تعداد نرون‌های میانی مختلف در ایستگاه افرینه همان‌گونه که در جدول ۴-۱ و شکل ۴-۱۰ مشاهده می‌گردد مدل ۹-۱۲-۱ (۱۲ نرون در لایه میانی) به کمترین مقدار خطا در مرحله آزمایش رسیده است. با توجه به جدول و شکل ارائه شده مشخص گردید که با نسبت یادگیری ۰/۱ و تعداد ۱۲ نرون در لایه میانی و نسبت ممتم ۰/۷ شبکه عصبی مصنوعی مورد نظر دارای کمترین خطا و بهترین جواب را ارائه می‌دهد که این مدل در ایستگاه افرینه به‌عنوان مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیکی انتخاب شد که نتیجه پیش‌بینی مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۱ نتایج پیش‌بینی با مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی برای خشکسالی هیدرولوژیکی (SDI) در ایستگاه افرینه

۴-۲-۱-۳ ضریب تبیین در شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه افرینه

برای تعیین درجه همبستگی مرحله آموزش و آزمایش، جواب‌های به‌دست آمده از خروجی شبکه با داده‌های شاهد^۱ موجود مقایسه شدند. ضریب تبیین که بین خروجی شبکه و داده‌های شاهد به‌دست آمد بیانگر همبستگی بالای بین داده‌های شاهد با داده‌های خروجی از شبکه بود. نتایج حاصله در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است. ضریب تبیین در مرحله آزمایش برابر $R^2 = 0/446$ و بهترین خطی که بین این دو سری داده‌ها می‌توان رسم کرد مطابق با رابطه ۴-۱ است.

$$y = 0,066x + 0,3545 \quad \text{رابطه ۴-۱}$$

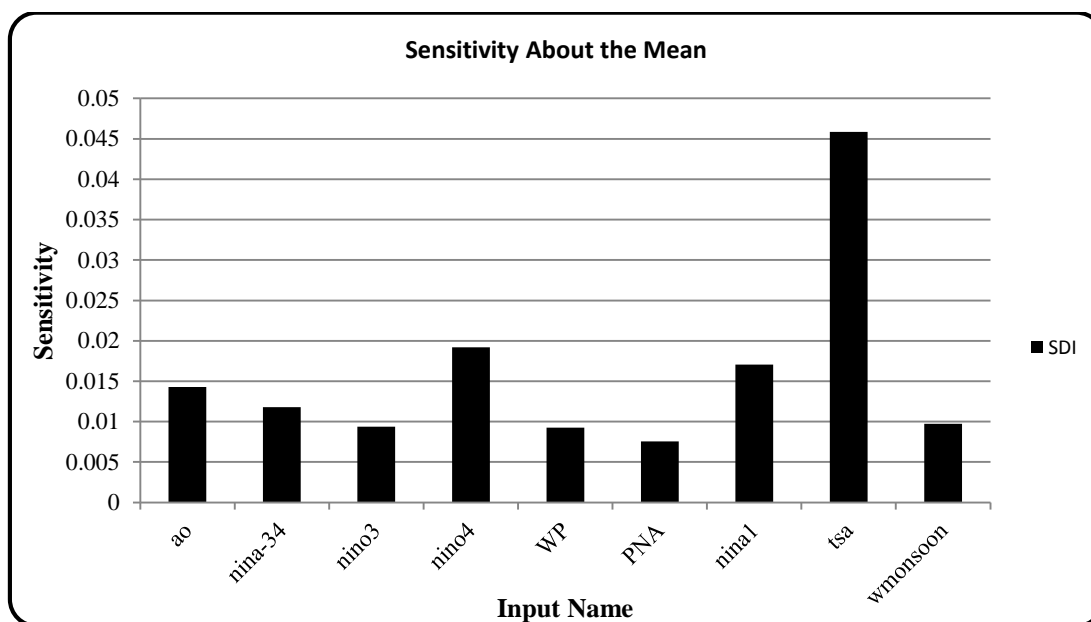
۴-۲-۱-۴ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه افرینه

تحلیل حساسیت^۲ به مطالعه تأثیرپذیری متغیرهای خروجی از متغیرهای ورودی یک مدل آماری گفته می‌شود. به عبارت دیگر روشی برای تغییر دادن در ورودی‌های یک مدل آماری به

^۱ Target

^۲ Sensitivity Analysis

صورت سازمان یافته (سیستماتیک) است که بتوان تأثیرات این تغییرها را در خروجی مدل پیش بینی کرد. در این تحقیق برای بررسی تأثیر هر نرون ورودی بر روی خروجی مدل، تحلیل حساسیت مدل انجام شد. شکل ۴-۱۲ تحلیل حساسیت مدل بهینه (ساختار ۱-۱۲-۹) و جدول ۴-۲ درصد میزان تأثیر هر نرون در لایه ورودی (حساسیت مدل به هر نرون و لایه ورودی) بر روی خروجی مدل در ایستگاه افرینه را نشان می دهد.



شکل ۴-۱۲ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه افرینه

جدول ۴-۲ درصد میزان تأثیر هر نرون در لایه ورودی بر روی خروجی مدل (SDI) در ایستگاه افرینه

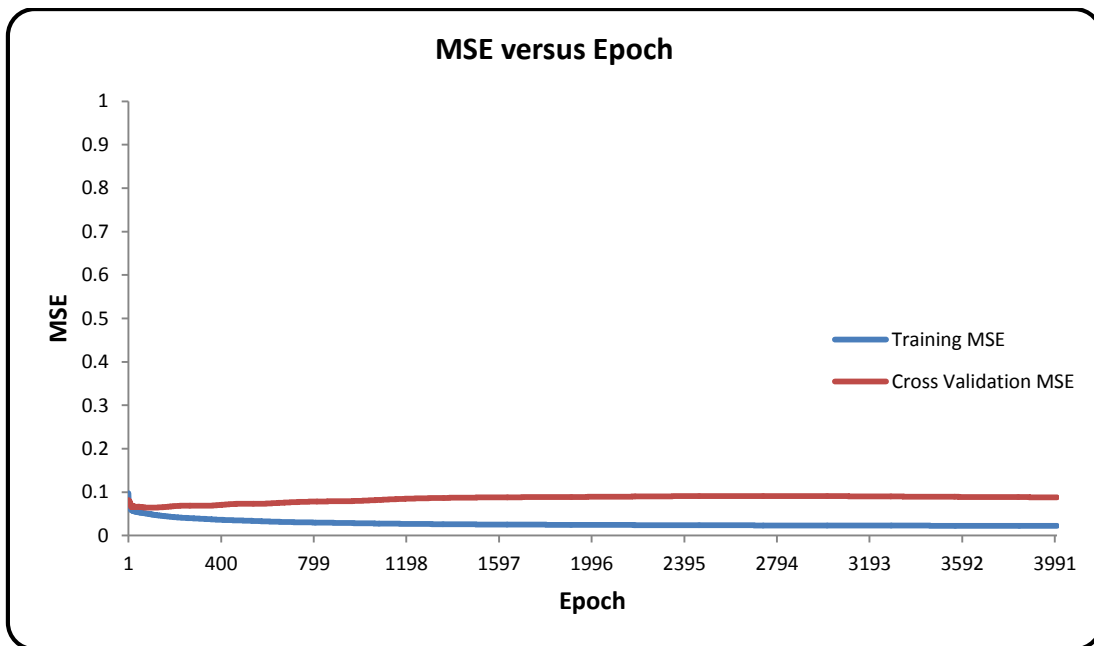
SW.MONSOON	TSA	NINO ₁	PNA	WP	NINO ₄	NINO ₃	NINO- ۳/۴	AO	نرون لایه ورودی
۶,۷۵	۳۱,۸۲	۱۱,۸۳	۵,۲۵	۶,۴۳	۱۳,۳۳	۶,۵۲	۸,۱۷	۹,۹۱	حساسیت مدل

نتایج شکل ۴-۱۲ و جدول ۴-۲ میزان تأثیر سیگنال های اقلیمی در وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی (SDI) در ایستگاه افرینه را نشان می دهد که مطابق نتایج به دست آمده سیگنال های TSA و PNA به ترتیب با میزان تأثیر ۳۱/۸۲ و ۵/۲۵ درصد دارای بیشترین و کمترین تأثیر می باشند.

۴-۲-۲ ایستگاه بادآور

۴-۲-۲-۱ تعیین تعداد تکرار بهینه در ایستگاه بادآور

جهت جلوگیری از یادگیری بیش از حد شبکه و افزایش خطا در شبکه می‌بایست تعداد تکرار بهینه در شبکه تعیین گردد. جهت انجام این کار تعداد تکرار از ۱ تا ۴۰۰۰ تغییر داده شد و در پایان هر مرحله خطای آموزش و صحت سنجی ثبت گردید. به‌طور معمول با افزایش تعداد تکرار، خطای مرحله آموزش کم می‌شد. ولی خطای صحت سنجی ابتدا تا تعداد حدود ۹۳ تکرار کاهش یافت ولی بعد از آن خطا شروع به افزایش گذاشت. نتایج این مرحله را می‌توان در شکل ۴-۱۳ مشاهده کرد. در نتیجه تعداد تکرار بهینه ۹۳ با میانگین مربعات خطای ۰/۰۶۴ در مرحله صحت سنجی انتخاب شد.



شکل ۴-۱۳ نتایج آزمایش جهت انتخاب تعداد تکرار بهینه در ایستگاه بادآور

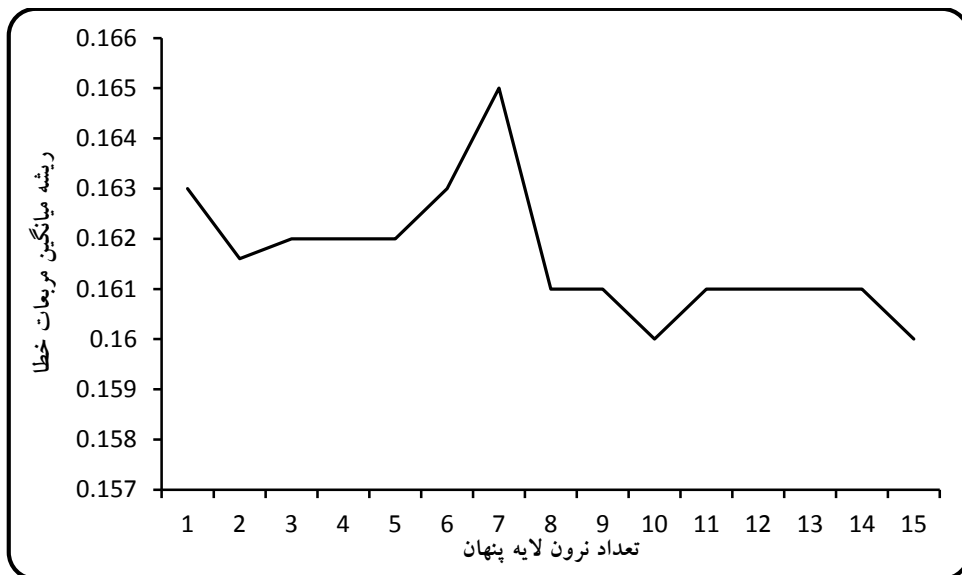
۴-۲-۲-۲ تعیین ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه بادآور

جهت انتخاب ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه بادآور، تعداد نرون لایه میانی از ۱ تا ۱۵ با نسبت یادگیری ۰/۱ و ضریب ممتنم ۰/۷ تغییر داده شد و در هر مرحله ریشه میانگین

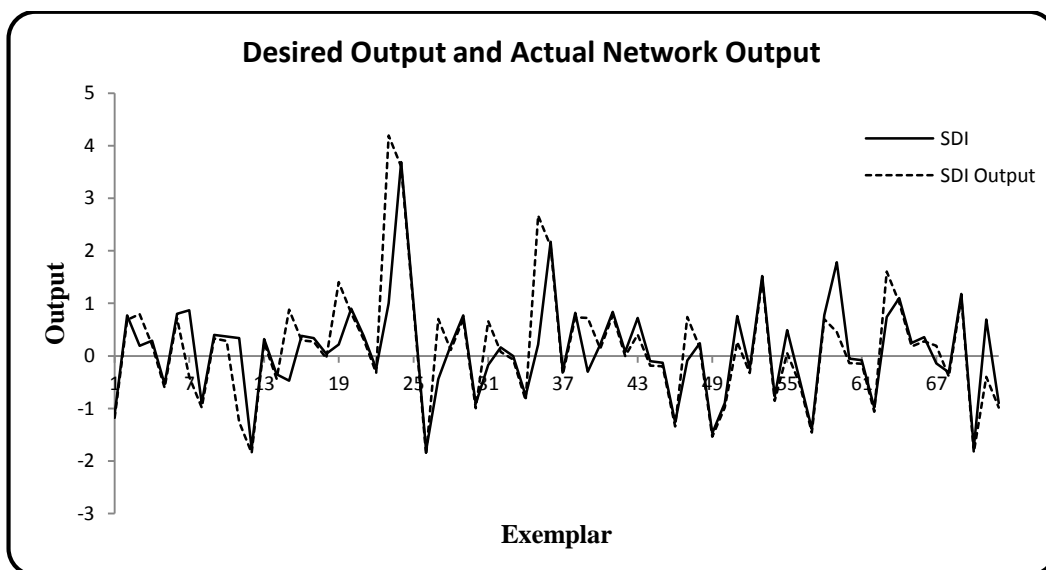
مربعات خطا محاسبه گردید. در نهایت ساختاری که دارای کمترین خطا بود به عنوان ساختار بهینه انتخاب شد که نتایج آن را می توان در جدول ۴-۳ مشاهده کرد و در نهایت شکل ۴-۱۴ ریشه میانگین مربعات مدل بهینه را نشان می دهد.

جدول ۴-۳ نتایج تکرارها جهت انتخاب ساختار بهینه شبکه در ایستگاه بادآور

تست						صحت سنجی	آموزش	
R	Max Abs Error	Min Abs Error	MAE	NRMSE	RMSE	MSE	MSE	ساختار مدل
-۰,۰۰۱	۰,۶۴۲	۰,۰۰۲	۰,۱۲۱	۰,۱۸۷	۰,۱۶۳	۰,۰۶۷۷	۰,۰۶۷۵	۹-۱-۱
۰,۶۹۹۵	۰,۶۴۳۲	۰,۰۰۷۷	۰,۱۲۰۹	۰,۱۸۵۰	۰,۱۶۱۶	۰,۰۶۷۶۶	۰,۰۶۷۳۱	۹-۲-۱
۰,۵۸۹	۰,۶۴۵	۰,۰۰۷	۰,۱۲۱	۰,۱۸۶	۰,۱۶۲	۰,۰۶۷۶	۰,۰۶۷۳	۹-۳-۱
۰,۷۰۳	۰,۶۴۵	۰,۰۱۰	۰,۱۲۱	۰,۱۸۵	۰,۱۶۲	۰,۰۶۷۷	۰,۰۶۷۳	۹-۴-۱
۰,۶۳۷	۰,۶۴۹	۰,۰۰۱	۰,۱۲۱	۰,۱۸۶	۰,۱۶۲	۰,۰۶۷۷	۰,۰۶۷۳	۹-۵-۱
۰,۵۲۹	۰,۶۵۱	۰,۰۰۱	۰,۱۲۱	۰,۱۸۷	۰,۱۶۳	۰,۰۶۷۶	۰,۰۶۷۳	۹-۶-۱
-۰,۰۶۸	۰,۶۵۹	۰,۰۰۱	۰,۱۲۳	۰,۱۸۹	۰,۱۶۵	۰,۰۶۷۷	۰,۰۶۷۴	۹-۷-۱
۰,۶۸۷	۰,۶۴۲	۰,۰۰۲	۰,۱۲۱	۰,۱۸۴	۰,۱۶۱	۰,۰۶۷۶	۰,۰۶۷۲	۹-۸-۱
۰,۶۸۹	۰,۶۴۰	۰,۰۰۱	۰,۱۲۱	۰,۱۸۴	۰,۱۶۱	۰,۰۶۷۶	۰,۰۶۷۲	۹-۹-۱
۰,۷۰۹	۰,۶۳۹	۰,۰۰۱	۰,۱۲۰	۰,۱۸۳	۰,۱۶۰	۰,۰۶۴۲	۰,۰۶۷۰	۹-۱۰-۱
۰,۶۹۲	۰,۶۴۰	۰,۰۰۴	۰,۱۲۱	۰,۱۸۴	۰,۱۶۱	۰,۰۶۷۶	۰,۰۶۷۲	۹-۱۱-۱
۰,۶۵۲	۰,۶۴۴	۰,۰۰۹	۰,۱۲۱	۰,۱۸۵	۰,۱۶۱	۰,۰۶۷۶	۰,۰۶۷۲	۹-۱۲-۱
۰,۶۸۳	۰,۶۴۰	۰,۰۰۰	۰,۱۲۰	۰,۱۸۴	۰,۱۶۱	۰,۰۶۷۶	۰,۰۶۷۲	۹-۱۳-۱
۰,۶۳۱	۰,۶۴۰	۰,۰۰۰	۰,۱۲۰	۰,۱۸۵	۰,۱۶۱	۰,۰۶۷۵	۰,۰۶۷۱	۹-۱۴-۱
۰,۷۰۸	۰,۶۳۵	۰,۰۰۳	۰,۱۲۰	۰,۱۸۳	۰,۱۶۰	۰,۰۶۷۶	۰,۰۶۷۱	۹-۱۵-۱



شکل ۴-۱۴ منحنی کمترین خطای شبکه (RMSE) در تعداد نرون‌های میانی مختلف در ایستگاه بادآور همان‌گونه که در جدول ۴-۳ و شکل ۴-۱۴ مشاهده می‌گردد مدل ۱-۱۰-۹ (۱۰ نرون در لایه میانی) به کمترین مقدار خطا در مرحله آزمایش رسیده است. با توجه به جدول و شکل ارائه شده مشخص گردید که با نسبت یادگیری ۰/۱ و تعداد ۱۰ نرون در لایه میانی و نسبت ممتم ۰/۷ شبکه عصبی مصنوعی مورد نظر دارای کمترین خطا و بهترین جواب را ارائه می‌دهد که این مدل در ایستگاه بادآور به‌عنوان مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیکی انتخاب شد که نتیجه پیش‌بینی مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۵ نتایج پیش‌بینی با مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی برای خشکسالی هیدرولوژیکی (SDI) در ایستگاه بادآور

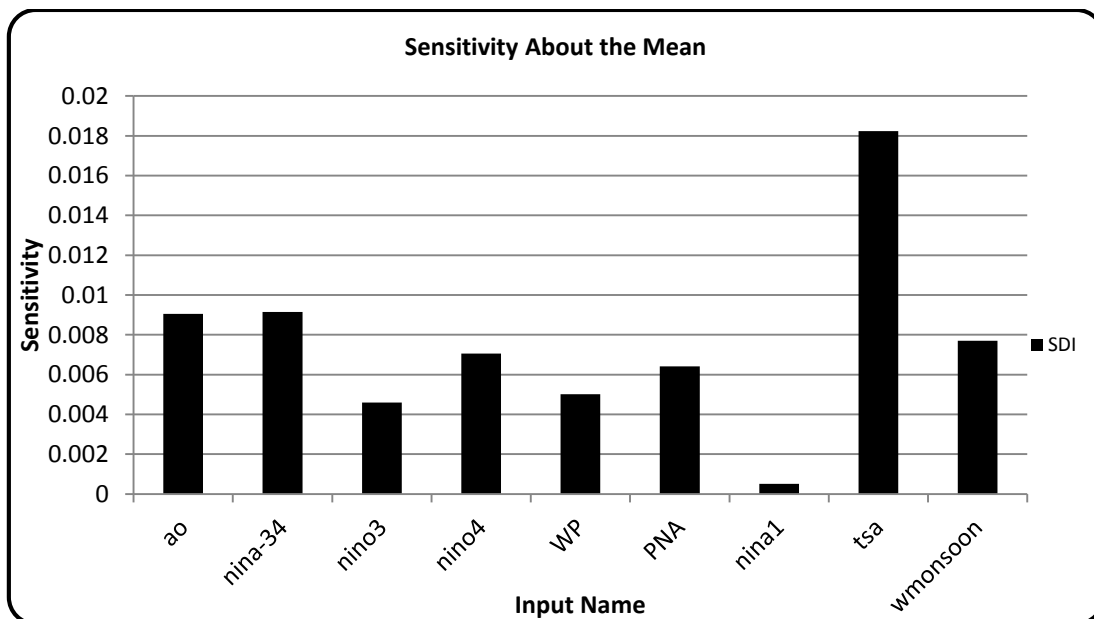
۴-۲-۲-۳ ضریب تبیین در شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه بادآور

ضریب تبیین که بین خروجی شبکه و داده‌های شاهد به دست آمد بیانگر همبستگی بالای بین داده‌های شاهد با داده‌های خروجی از شبکه بود. نتایج حاصله در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است. ضریب تبیین در مرحله آزمایش برابر $R^2=0/502$ و بهترین خطی که بین این دو سری داده‌ها می‌توان رسم کرد مطابق با رابطه ۴-۲ است.

$$y = 0,262x + 0,3365 \quad \text{رابطه ۴-۱}$$

۴-۲-۲-۴ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه بادآور

شکل ۴-۱۶ تحلیل حساسیت مدل بهینه (ساختار ۱-۱۰-۹) و جدول ۴-۴ درصد میزان تأثیر هر نرون در لایه ورودی (حساسیت مدل به هر نرون و لایه ورودی) بر روی خروجی مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۶ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه بادآور

جدول ۴-۴ درصد میزان تأثیر هر نرون در لایه ورودی بر روی خروجی مدل (SDI) در ایستگاه بادآور

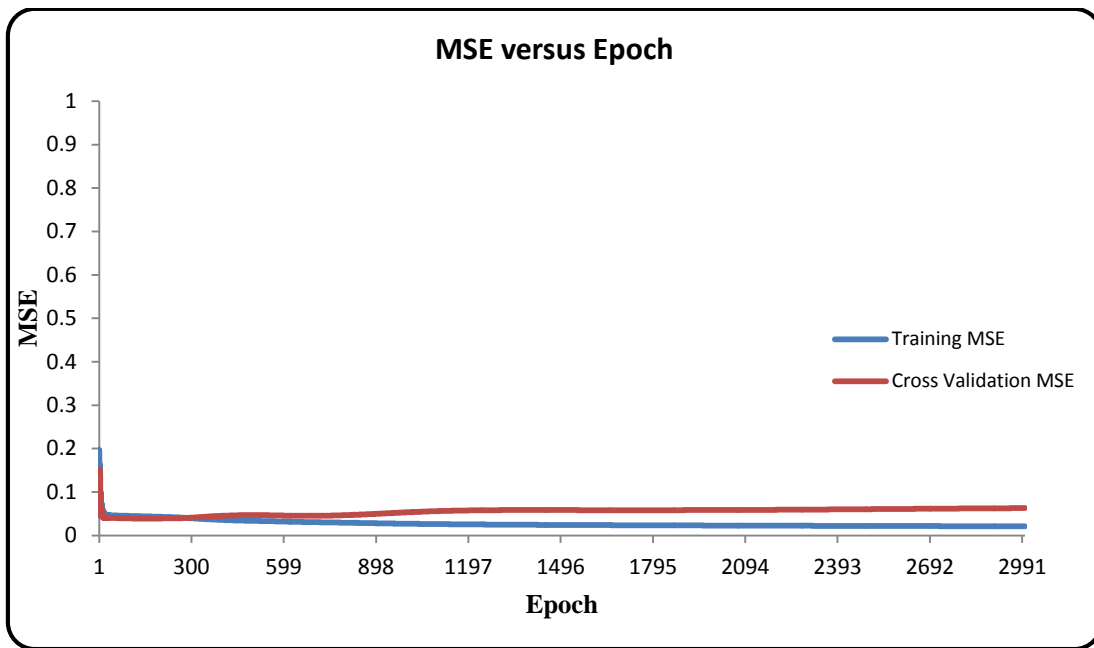
SW.MONSOON	TSA	NINO _۱	PNA	WP	NINO _۴	NINO _۳	NINO- ۳/۴	AO	نرون لایه ورودی
۱۱,۳۷	۲۶,۹۵	۰,۷۴	۹,۴۸	۷,۳۹	۱۰,۴۱	۶,۷۷	۱۳,۵۱	۱۳,۳۷	حساسیت مدل

نتایج شکل ۴-۱۶ و جدول ۴-۴ میزان تأثیر سیگنال‌های اقلیمی در وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی (SDI) در ایستگاه بادآور را نشان می‌دهد که مطابق نتایج به دست آمده سیگنال‌های tsa و nino_۱ به ترتیب با میزان تأثیر ۲۶/۹ و ۰/۷۴ درصد دارای بیشترین و کمترین تأثیر می‌باشند.

۴-۲-۳ ایستگاه چم انجیر

۴-۲-۳-۱ تعیین تعداد تکرار بهینه در ایستگاه چم انجیر

جهت جلوگیری از یادگیری بیش از حد شبکه و افزایش خطا در شبکه می‌بایست تعداد تکرار بهینه در شبکه تعیین گردد. جهت انجام این کار تعداد تکرار از ۱ تا ۳۰۰۰ تغییر داده شد و در پایان هر مرحله خطای آموزش و صحت سنجی ثبت گردید. به‌طور معمول با افزایش تعداد تکرار، خطای مرحله آموزش کم می‌شد. ولی خطای صحت سنجی ابتدا تا تعداد حدود ۱۵۹ تکرار کاهش یافت ولی بعد از آن خطا شروع به افزایش گذاشت. نتایج این مرحله را می‌توان در شکل ۴-۱۷ مشاهده کرد. در نتیجه تعداد تکرار بهینه ۱۵۹ با میانگین مربعات خطای ۰/۰۶۲ در مرحله صحت سنجی انتخاب شد.



شکل ۴-۱۷ نتایج آزمایش جهت انتخاب تعداد تکرار بهینه در ایستگاه چم انجیر

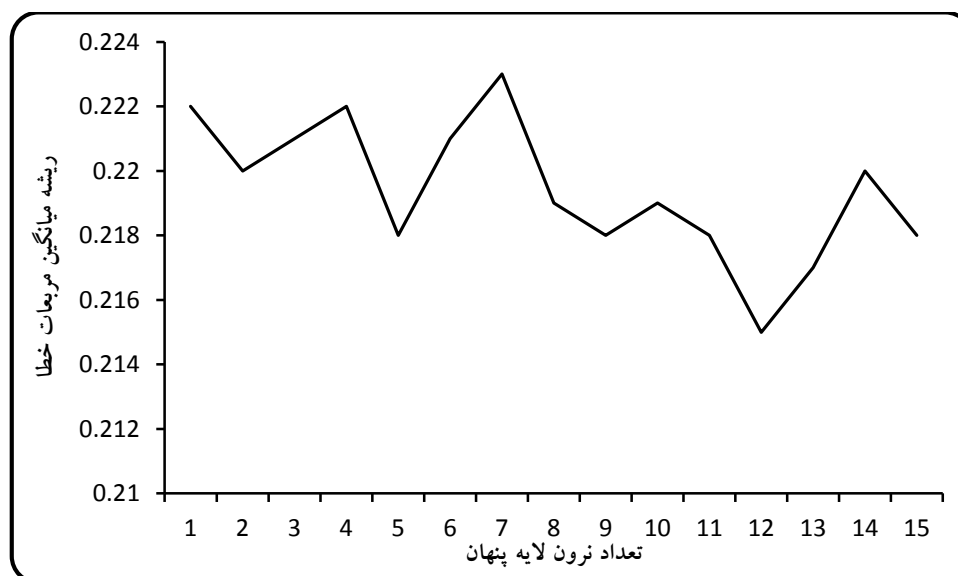
۴-۲-۳-۲ تعیین ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه چم انجیر

جهت انتخاب ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه چم انجیر، تعداد نرون لایه میانی از ۱ تا ۱۵ با نسبت یادگیری ۰/۱ و ضریب ممتد ۰/۷ تغییر داده شد و در هر مرحله ریشه میانگین مربعات خطا محاسبه گردید. در نهایت ساختاری که دارای کمترین خطا بود به عنوان ساختار بهینه انتخاب شد که نتایج آن را می توان در جدول ۴-۵ مشاهده کرد و در نهایت شکل ۴-۱۸ ریشه میانگین مربعات مدل بهینه را نشان می دهد.

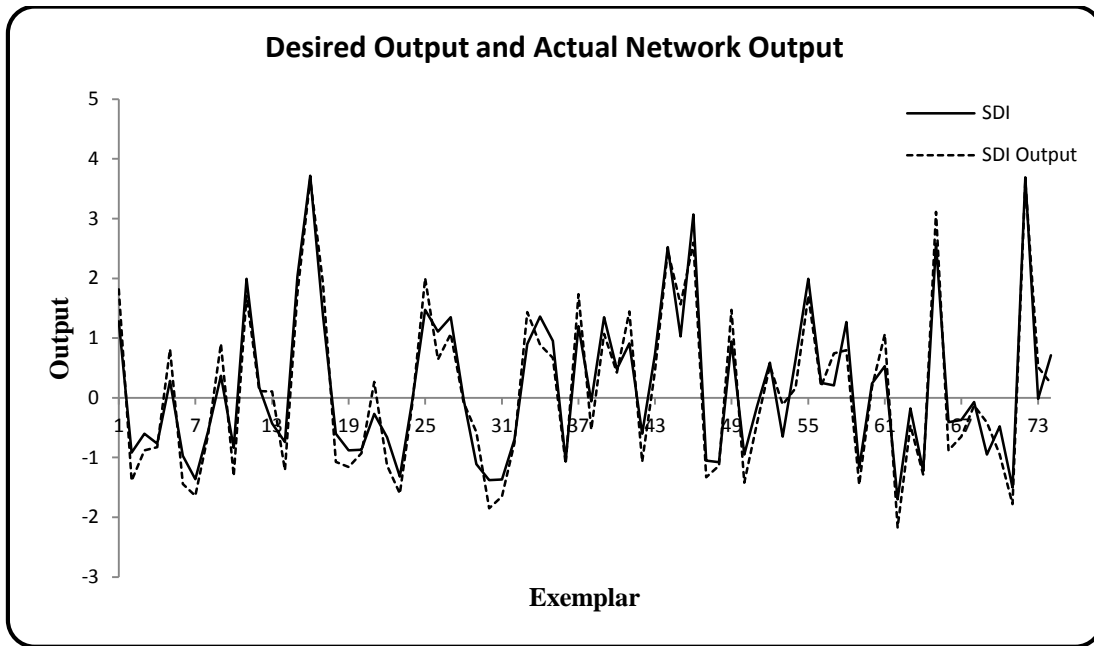
جدول ۴-۵ نتایج تکرارها جهت انتخاب ساختار بهینه شبکه در ایستگاه چم انجیر

تست						صحت سنجی	آموزش	
R	Max Abs Error	Min Abs Error	MAE	NRMSE	RMSE	MSE	MSE	ساختار مدل
۰,۶۱۲	۰,۶۷۳	۰,۰۰۶	۰,۱۷۸	۰,۲۳۵	۰,۲۲۲	۰,۰۳۹	۰,۰۴۶	۹-۱-۱
۰,۶۲۸	۰,۶۴۶	۰,۰۰۳	۰,۱۷۶	۰,۲۳۳	۰,۲۲۰	۰,۰۴۲	۰,۰۴۴	۹-۲-۱
۰,۶۰۸	۰,۶۶۷	۰,۰۰۱	۰,۱۷۷	۰,۲۳۴	۰,۲۲۱	۰,۰۵۱	۰,۰۳۹	۹-۳-۱
۰,۰۰۰	۰,۷۱۲	۰,۰۰۲	۰,۱۷۸	۰,۲۳۵	۰,۲۲۲	۰,۰۵۳	۰,۰۳۸	۹-۴-۱

۰,۶۰۳	۰,۶۳۰	۰,۰۱۰	۰,۱۷۷	۰,۲۳۱	۰,۲۱۸	۰,۰۴۷	۰,۰۳۶	۹-۵-۱
-۰,۰۰۳	۰,۶۶۷	۰,۰۰۱	۰,۱۷۷	۰,۲۳۵	۰,۲۲۱	۰,۰۵۰	۰,۰۳۳	۹-۶-۱
۰,۶۵۴	۰,۶۹۵	۰,۰۰۳	۰,۱۷۷	۰,۲۳۷	۰,۲۲۳	۰,۰۵۶	۰,۰۳۰	۹-۷-۱
۰,۶۵۴	۰,۶۸۸	۰,۰۰۲	۰,۱۷۵	۰,۲۳۲	۰,۲۱۹	۰,۰۵۹	۰,۰۲۸	۹-۸-۱
۰,۰۵۸	۰,۶۵۸	۰,۰۰۲	۰,۱۷۶	۰,۲۳۱	۰,۲۱۸	۰,۰۵۷	۰,۰۲۵	۹-۹-۱
۰,۶۵۰	۰,۶۵۷	۰,۰۰۸	۰,۱۷۷	۰,۲۳۲	۰,۲۱۹	۰,۰۵۵	۰,۰۲۷	۹-۱۰-۱
۰,۶۸۴	۰,۶۵۹	۰,۰۰۵	۰,۱۷۵	۰,۲۳۱	۰,۲۱۸	۰,۰۷۰	۰,۰۲۲	۹-۱۱-۱
۰,۷۴۷	۰,۶۷۵	۰,۰۰۱	۰,۱۷۴	۰,۲۲۸	۰,۲۱۵	۰,۰۶۳	۰,۰۲۱	۹-۱۲-۱
۰,۶۹۵	۰,۶۴۲	۰,۰۰۱	۰,۱۷۴	۰,۲۳۱	۰,۲۱۷	۰,۰۷۵	۰,۰۱۹	۹-۱۳-۱
۰,۶۲۹	۰,۶۵۹	۰,۰۰۱	۰,۱۷۶	۰,۲۳۳	۰,۲۲۰	۰,۰۸۴	۰,۰۱۷	۹-۱۴-۱
۰,۶۰۷	۰,۶۶۷	۰,۰۰۱	۰,۱۷۵	۰,۲۳۲	۰,۲۱۸	۰,۰۷۱	۰,۰۱۸	۹-۱۵-۱



شکل ۴-۱۸ منحنی کمترین خطای شبکه (RMSE) در تعداد نرون‌های میانی مختلف در ایستگاه چم انجیر همان‌گونه که در جدول ۴-۵ و شکل ۴-۱۸ مشاهده می‌گردد مدل ۹-۱۲-۱ (۱۲ نرون در لایه میانی) به کمترین مقدار خطا در مرحله آزمایش رسیده است. با توجه به جدول و شکل ارائه شده مشخص گردید که با نسبت یادگیری ۰/۱ و تعداد ۱۲ نرون در لایه میانی و نسبت ممتم ۰/۷ شبکه عصبی مصنوعی مورد نظر دارای کمترین خطا و بهترین جواب را ارائه می‌دهد که این مدل در ایستگاه افرینه به‌عنوان مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیکی انتخاب شد که نتیجه پیش‌بینی مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی در شکل ۴-۱۹ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۹ نتایج پیش‌بینی با مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی برای خشکسالی هیدرولوژیکی (SDI) در ایستگاه دره تخت

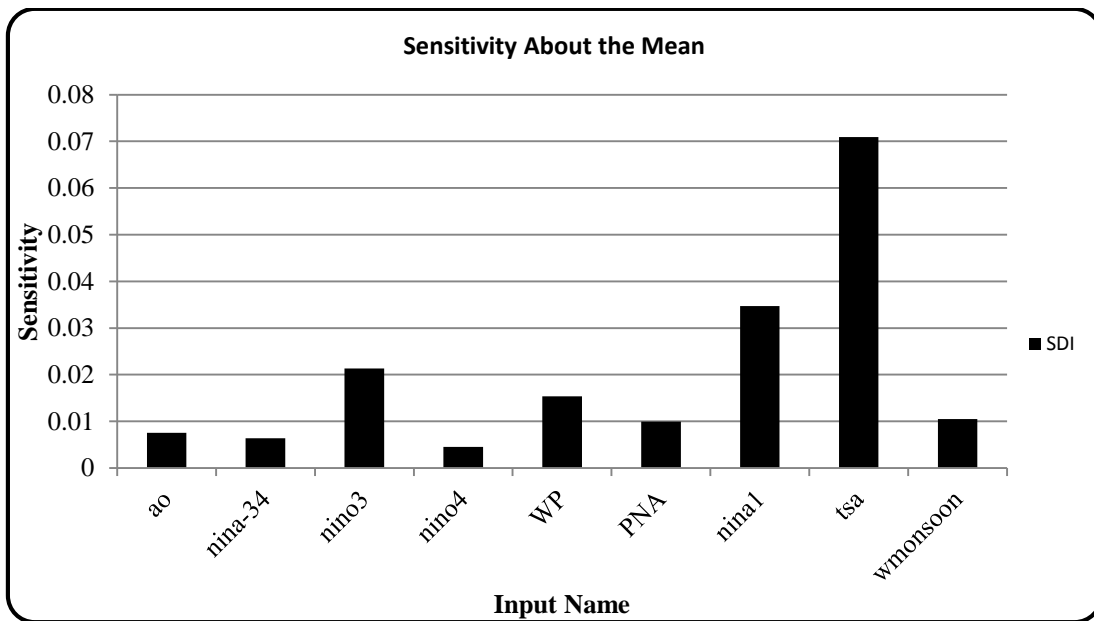
۴-۲-۳-۳ ضریب تبیین در شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه چم انجیر

ضریب تبیین که بین خروجی شبکه و داده‌های شاهد به دست آمد بیانگر همبستگی بالای بین داده-های شاهد با داده‌های خروجی از شبکه بود. نتایج حاصله در شکل ۴-۱۸ نشان داده شده است. ضریب تبیین در مرحله آزمایش برابر $R^2=0/558$ و بهترین خطی که بین این دو سری داده‌ها می‌توان رسم کرد مطابق با رابطه ۴-۱ است.

$$y = 0,0406x + 0,3549 \quad \text{رابطه ۴-۱}$$

۴-۳-۲-۴ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه چم انجیر

شکل ۴-۲۰ تحلیل حساسیت مدل بهینه (ساختار ۱-۱۲-۹) و جدول ۴-۶ درصد میزان تأثیر هر نرون در لایه ورودی (حساسیت مدل به هر نرون و لایه ورودی) بر روی خروجی مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۰ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه چم انجیر

جدول ۴-۶ درصد میزان تأثیر هر نرون در لایه ورودی بر روی خروجی مدل (SDI) در ایستگاه چم انجیر

SW.MONSOON	TSA	NINO ₁	PNA	WP	NINO ₄	NINO ₃	NINO- ۳/۴	AO	نرون لایه ورودی
۵,۸۱	۳۹,۱	۱۹,۱۵	۵,۴۹	۸,۴۹	۲,۵۰	۱۱,۷۸	۳,۵۱	۴,۱۸	حساسیت مدل

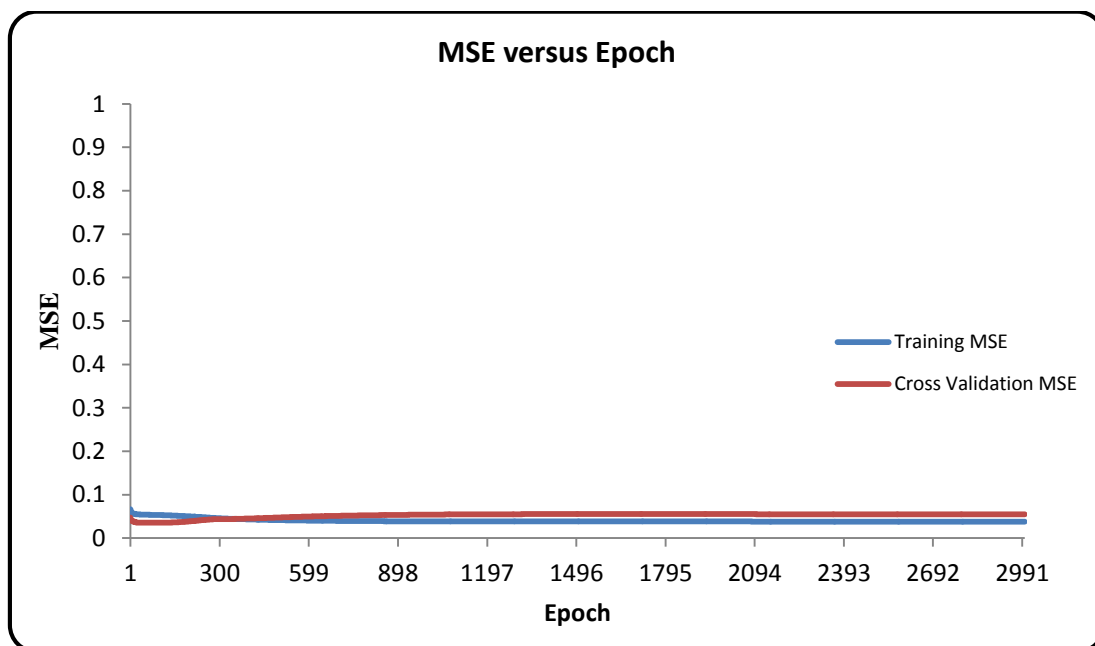
نتایج شکل ۴-۲۰ و جدول ۴-۶ میزان تأثیر سیگنال‌های اقلیمی در وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی (SDI) در ایستگاه چم انجیر را نشان می‌دهد که مطابق نتایج به دست آمده سیگنال‌های TSA و NINO₄ به ترتیب با میزان تأثیر ۳۹/۱۱ و ۲/۵ درصد دارای بیشترین و کمترین تأثیر می‌باشند.

۴-۲-۴ ایستگاه چم چیت

۴-۲-۴-۱ تعیین تعداد تکرار بهینه در ایستگاه چم چیت

جهت جلوگیری از یادگیری بیش از حد شبکه و افزایش خطا در شبکه می‌بایست تعداد تکرار بهینه در شبکه تعیین گردد. جهت انجام این کار تعداد تکرار از ۱ تا ۳۰۰۰ تغییر داده شد و در پایان هر مرحله خطای آموزش و صحت سنجی ثبت گردید. به‌طور معمول با افزایش تعداد تکرار،

خطای مرحله آموزش کم می‌شد. ولی خطای صحت سنجی ابتدا تا تعداد حدود ۹۶ تکرار کاهش یافت ولی بعد از آن خطا شروع به افزایش گذاشت. نتایج این مرحله را می‌توان در شکل ۴-۲۱ مشاهده کرد. در نتیجه تعداد تکرار بهینه ۹۶ با میانگین مربعات خطای ۰/۰۳۵ در مرحله صحت سنجی انتخاب شد.



شکل ۴-۲۱ نتایج آزمایش جهت انتخاب تعداد تکرار بهینه در ایستگاه چم چیت

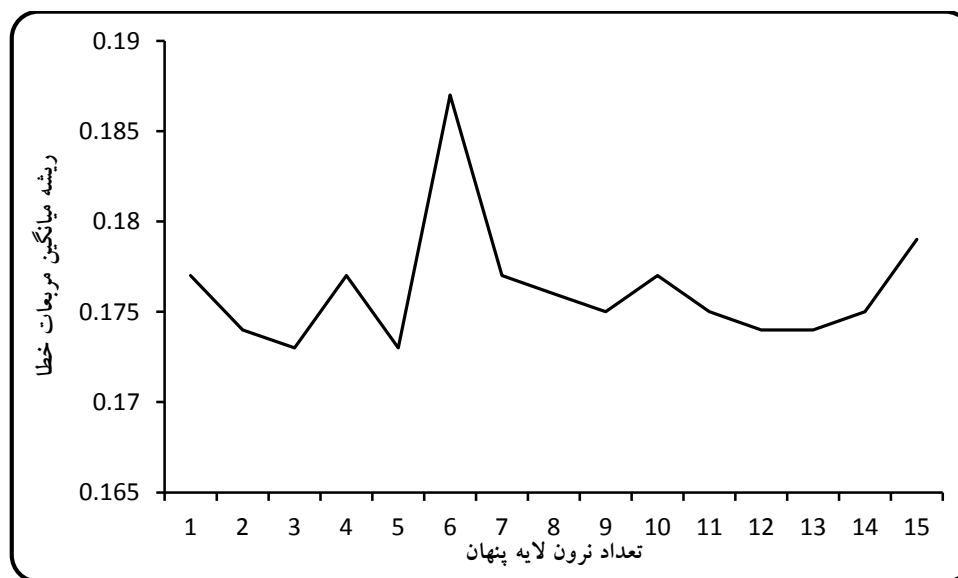
۴-۲-۲-۲ تعیین ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه چم چیت

جهت انتخاب ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه چم چیت، تعداد نرون لایه میانی از ۱ تا ۱۵ با نسبت یادگیری ۰/۱ و ضریب ممتم ۰/۷ تغییر داده شد و در هر مرحله ریشه میانگین مربعات خطا محاسبه گردید. در نهایت ساختاری که دارای کمترین خطا بود به‌عنوان ساختار بهینه انتخاب شد که نتایج آن را می‌توان در جدول ۴-۷ مشاهده کرد و در نهایت شکل ۴-۲۲ ریشه میانگین مربعات مدل بهینه را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۷ نتایج تکرارها جهت انتخاب ساختار بهینه شبکه در ایستگاه چم چیت

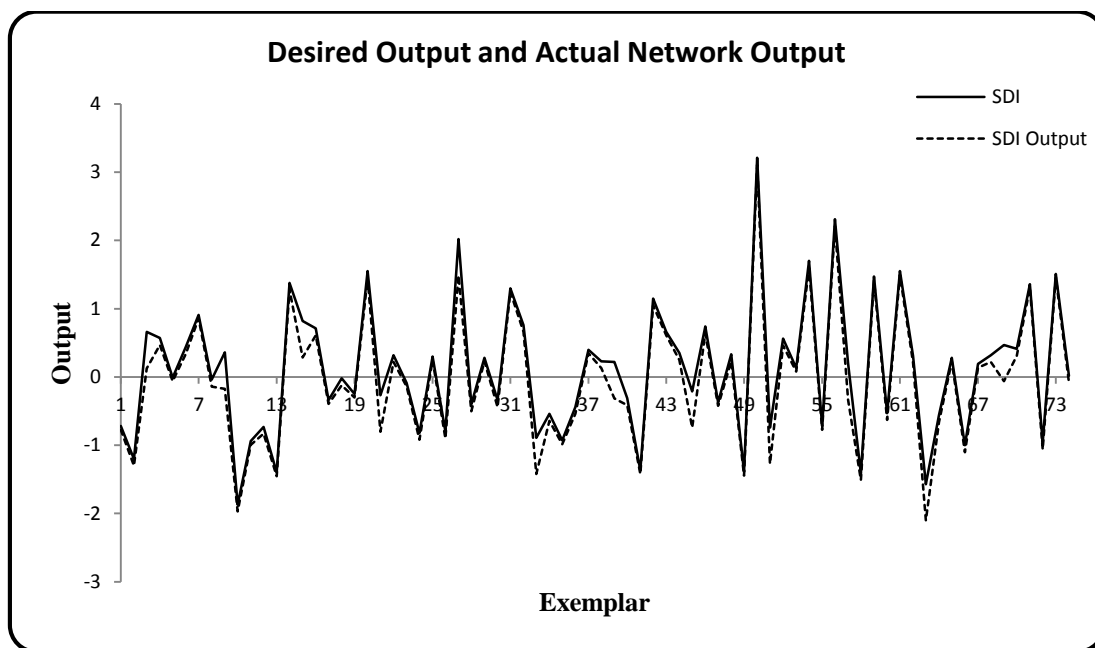
تست	صحت سنجی	آموزش

R	Max Abs Error	Min Abs Error	MAE	NRMSE	RMSE	MSE	MSE	ساختار مدل
۰,۷۲۷	۰,۵۹۱	۰,۰۰۳	۰,۱۳۷	۰,۱۷۷	۰,۱۷۷	۰,۰۳۵	۰,۰۵۳	۹-۱-۱
۰,۷۶۸	۰,۵۳۸	۰,۰۰۳	۰,۱۳۵	۰,۱۷۴	۰,۱۷۴	۰,۰۳۶	۰,۰۴۹	۹-۲-۱
۰,۷۸۹	۰,۵۶۲	۰,۰۰۵	۰,۱۳۵	۰,۱۷۳	۰,۱۷۳	۰,۰۴۳	۰,۰۴۳	۹-۳-۱
۰,۷۲۱	۰,۵۴۶	۰,۰۰۳	۰,۱۳۶	۰,۱۷۷	۰,۱۷۷	۰,۰۵۳	۰,۰۳۹	۹-۴-۱
۰,۷۹۶	۰,۵۴۴	۰,۰۰۱	۰,۱۳۲	۰,۱۷۳	۰,۱۷۳	۰,۰۳۵	۰,۰۳۸	۹-۵-۱
۰,۶۶۲	۰,۵۸۹	۰,۰۰۱	۰,۱۴۴	۰,۱۸۷	۰,۱۸۷	۰,۰۴۷	۰,۰۳۸	۹-۶-۱
۰,۷۳۶	۰,۵۴۸	۰,۰۰۱	۰,۱۳۷	۰,۱۷۷	۰,۱۷۷	۰,۰۵۶	۰,۰۳۵	۹-۷-۱
۰,۷۳۹	۰,۵۵۷	۰,۰۰۱	۰,۱۳۵	۰,۱۷۶	۰,۱۷۶	۰,۰۵۲	۰,۰۳۴	۹-۸-۱
۰,۷۶۲	۰,۵۴۷	۰,۰۰۰	۰,۱۳۴	۰,۱۷۵	۰,۱۷۵	۰,۰۷۳	۰,۰۳۳	۹-۹-۱
۰,۷۲۲	۰,۵۷۱	۰,۰۰۳	۰,۱۳۴	۰,۱۷۷	۰,۱۷۷	۰,۰۶۵	۰,۰۲۸	۹-۱۰-۱
۰,۷۵۵	۰,۵۵۷	۰,۰۰۱	۰,۱۳۵	۰,۱۷۵	۰,۱۷۵	۰,۰۶۱	۰,۰۲۸	۹-۱۱-۱
۰,۷۸۴	۰,۵۴۶	۰,۰۰۱	۰,۱۳۳	۰,۱۷۴	۰,۱۷۴	۰,۰۷۸	۰,۰۲۳	۹-۱۲-۱
۰,۷۷۷	۰,۵۵۵	۰,۰۰۰	۰,۱۳۱	۰,۱۷۴	۰,۱۷۴	۰,۰۹۶	۰,۰۱۹	۹-۱۳-۱
۰,۷۵۸	۰,۵۴۸	۰,۰۰۲	۰,۱۳۵	۰,۱۷۵	۰,۱۷۵	۰,۰۹۵	۰,۰۲۰	۹-۱۴-۱
۰,۷۲۲	۰,۵۹۴	۰,۰۰۱	۰,۱۳۴	۰,۱۷۹	۰,۱۷۹	۰,۱۲۳	۰,۰۰۳	۹-۱۵-۱



شکل ۴-۲۲ منحنی کمترین خطای شبکه (RMSE) در تعداد نرون‌های میانی مختلف در ایستگاه چم چیت همان‌گونه که در جدول ۴-۷ و شکل ۴-۲۲ مشاهده می‌گردد مدل ۹-۵-۱ (۵ نرون در لایه میانی) به کمترین مقدار خطا در مرحله آزمایش رسیده است. با توجه به جدول و شکل ارائه شده مشخص گردید که با نسبت یادگیری ۰/۱ و تعداد ۵ نرون در لایه میانی و نسبت ممتنم ۰/۷ شبکه عصبی

مصنوعی مورد نظر دارای کمترین خطا و بهترین جواب را ارائه می‌دهد که این مدل در ایستگاه چم چیت به‌عنوان مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیکی انتخاب شد که نتیجه پیش‌بینی مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی در شکل ۴-۲۳ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۳ نتایج پیش‌بینی با مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی برای خشکسالی هیدرولوژیکی (SDI) در ایستگاه چم چیت

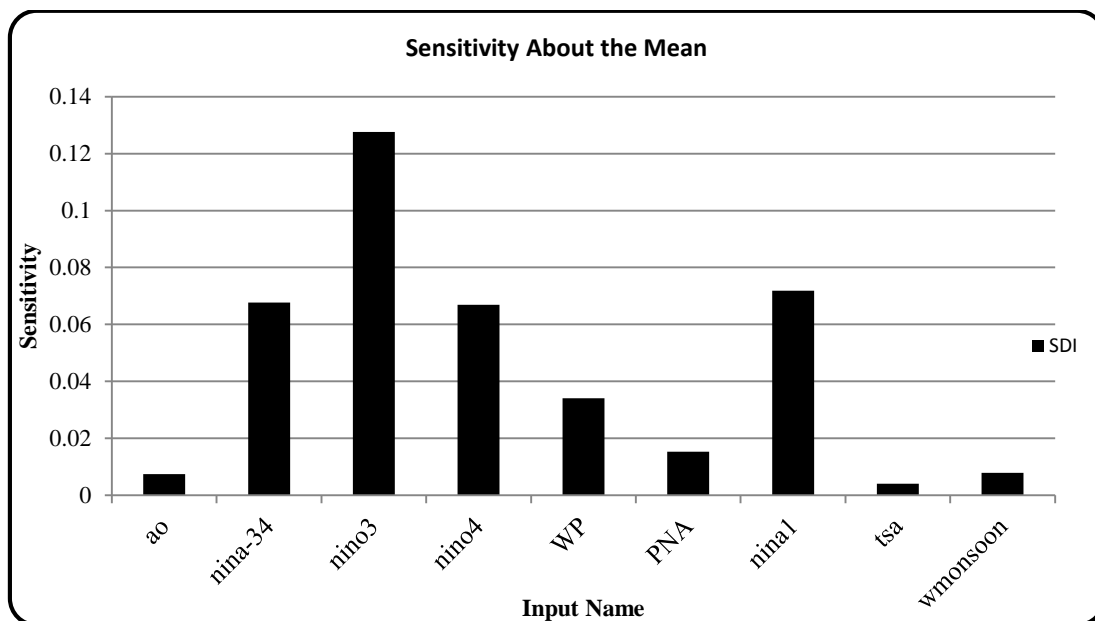
۴-۲-۳ ضریب تبیین در شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه چم چیت

ضریب تبیین که بین خروجی شبکه و داده‌های شاهد به‌دست آمد بیانگر همبستگی بالای بین داده‌های شاهد با داده‌های خروجی از شبکه بود. نتایج حاصله در شکل ۴-۲۲ نشان داده شده است. ضریب تبیین در مرحله آزمایش برابر $R^2=0/633$ و بهترین خطی که بین این دو سری داده‌ها می‌توان رسم کرد مطابق با رابطه ۴-۱ است.

$$y = 0,0779x + 0,3721 \quad \text{رابطه ۴-۱}$$

۴-۲-۴-۴ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه چم چیت

شکل ۴-۲۴ تحلیل حساسیت مدل بهینه (ساختار ۱-۵-۹) و جدول ۴-۸ درصد میزان تأثیر هر نرون در لایه ورودی (حساسیت مدل به هر نرون و لایه ورودی) بر روی خروجی مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۴ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه چم چیت

جدول ۴-۸ درصد میزان تأثیر هر نرون در لایه ورودی بر روی خروجی مدل (SDI) در ایستگاه چم چیت

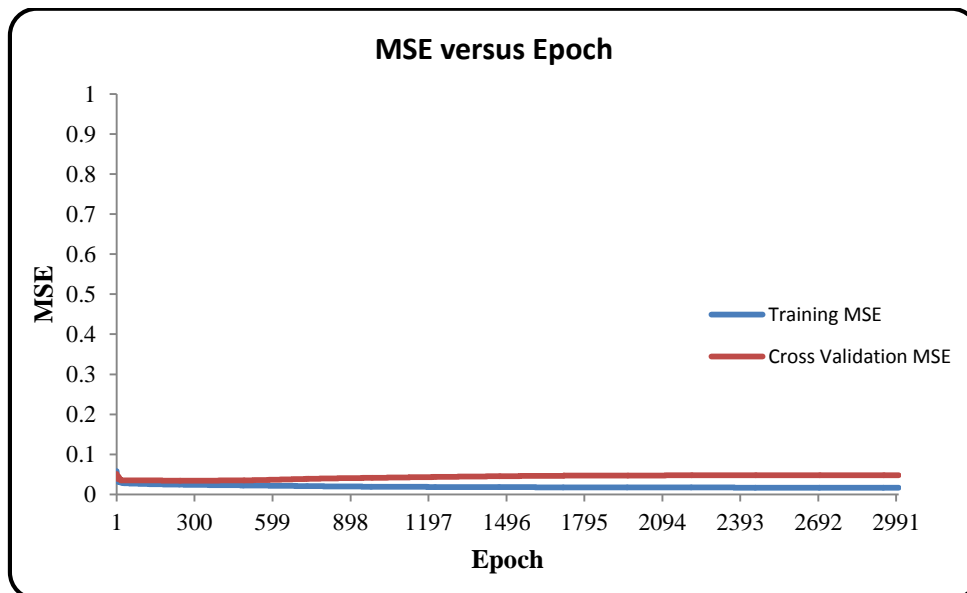
SW.MONSOON	TSA	NINO ₁	PNA	WP	NINO ₄	NINO ₃	NINO- ۳/۴	AO	نرون لایه ورودی
۱,۹۴	۰,۹۹	۱۷,۸۶	۳,۷۹	۸,۴۵	۱۶,۶۲	۳۱,۷۱	۱۶,۸۱	۱,۸۴	حساسیت مدل

نتایج شکل ۴-۲۴ و جدول ۴-۸ میزان تأثیر سیگنال‌های اقلیمی در وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی (SDI) در ایستگاه چم چیت را نشان می‌دهد که مطابق نتایج به دست آمده سیگنال‌های NINO₃ و TSA به ترتیب با میزان تأثیر ۳۱/۷۱ و ۰/۹۹ درصد دارای بیشترین و کمترین تأثیر می‌باشند.

۴-۲-۵ ایستگاه دره تخت

۴-۲-۵-۱ تعیین تعداد تکرار بهینه در ایستگاه دره تخت

جهت جلوگیری از یادگیری بیش از حد شبکه و افزایش خطا در شبکه می‌بایست تعداد تکرار بهینه در شبکه تعیین گردد. جهت انجام این کار تعداد تکرار از ۱ تا ۳۰۰۰ تغییر داده شد و در پایان هر مرحله خطای آموزش و صحت سنجی ثبت گردید. به‌طور معمول با افزایش تعداد تکرار، خطای مرحله آموزش کم می‌شد. ولی خطای صحت سنجی ابتدا تا تعداد حدود ۲۵۲ تکرار کاهش یافت ولی بعد از آن خطا شروع به افزایش گذاشت. نتایج این مرحله را می‌توان در شکل ۴-۲۵ مشاهده کرد. در نتیجه تعداد تکرار بهینه ۲۵۲ با میانگین مربعات خطای ۰/۰۳۴ در مرحله صحت سنجی انتخاب شد.



شکل ۴-۲۵ نتایج آزمایش جهت انتخاب تعداد تکرار بهینه در ایستگاه دره تخت

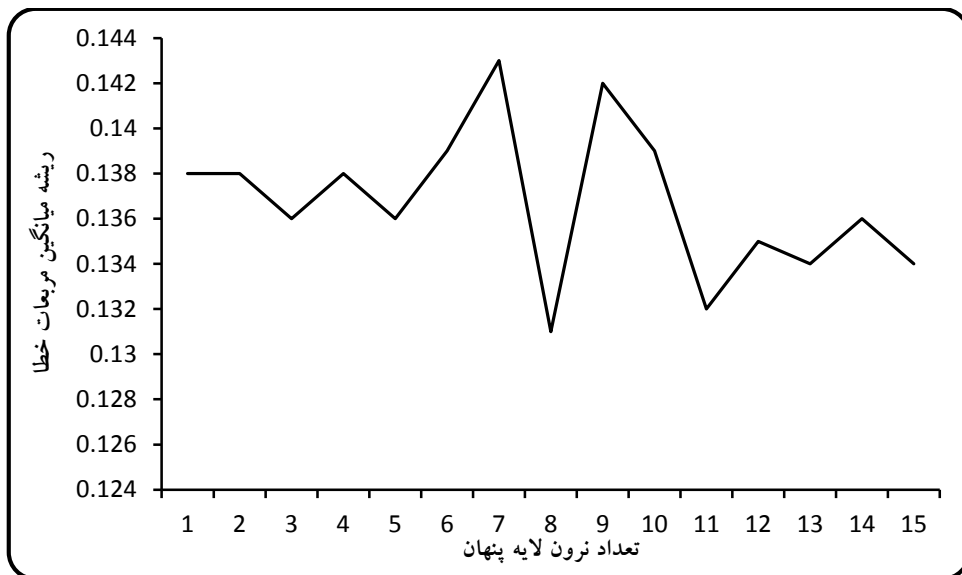
۴-۲-۵-۲ تعیین ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه دره تخت

جهت انتخاب ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه دره تخت، تعداد نرون لایه میانی از ۱ تا ۱۵ با نسبت یادگیری ۰/۱ و ضریب ممتم ۰/۷ تغییر داده شد و در هر مرحله ریشه میانگین مربعات خطا محاسبه گردید. در نهایت ساختاری که دارای کمترین خطا بود به‌عنوان ساختار بهینه

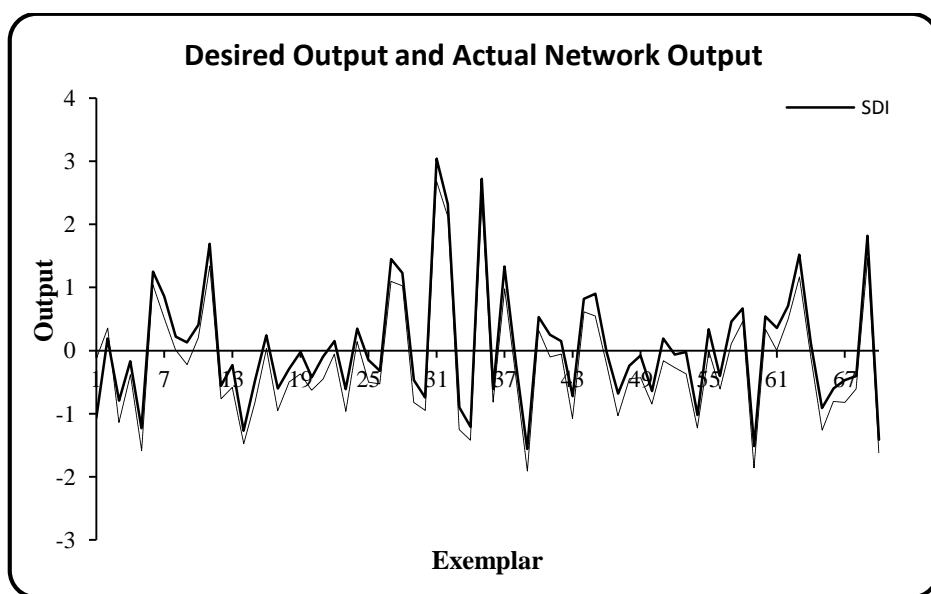
انتخاب شد که نتایج آن را می‌توان در جدول ۴-۹ مشاهده کرد و در نهایت شکل ۴-۲۶ ریشه میانگین مربعات مدل بهینه را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۹ نتایج تکرارها جهت انتخاب ساختار بهینه شبکه در ایستگاه دره تخت

تست						صحت سنجی	آموزش	
R	Max Abs Error	Min Abs Error	MAE	NRMSE	RMSE	MSE	MSE	ساختار مدل
۰,۶۱۸	۰,۴۳۷	۰,۰۰۰	۰,۱۰۶	۰,۱۳۸	۰,۱۳۸	۰,۰۳۴	۰,۰۲۸	۹-۱-۱
۰,۶۱۲	۰,۴۴۱	۰,۰۰۲	۰,۱۰۷	۰,۱۳۸	۰,۱۳۸	۰,۰۳۵	۰,۰۲۶	۹-۲-۱
۰,۶۸۳	۰,۴۴۶	۰,۰۰۳	۰,۱۰۴	۰,۱۳۶	۰,۱۳۶	۰,۰۴۰	۰,۰۲۴	۹-۳-۱
۰,۶۲۶	۰,۴۳۳	۰,۰۰۳	۰,۱۰۶	۰,۱۳۸	۰,۱۳۸	۰,۰۴۱	۰,۰۲۳	۹-۴-۱
۰,۶۷۷	۰,۴۶۲	۰,۰۰۱	۰,۱۰۳	۰,۱۳۶	۰,۱۳۶	۰,۰۴۲	۰,۰۱۹	۹-۵-۱
۰,۶۸۵	۰,۴۷۳	۰,۰۰۱	۰,۱۰۸	۰,۱۳۹	۰,۱۳۹	۰,۰۳۹	۰,۰۲۲	۹-۶-۱
۰,۶۹۱	۰,۴۱۰	۰,۰۰۵	۰,۱۱۲	۰,۱۴۳	۰,۱۴۳	۰,۰۳۸	۰,۰۱۹	۹-۷-۱
۰,۸۲۵	۰,۴۲۴	۰,۰۰۰	۰,۱۰۱	۰,۱۳۱	۰,۱۳۱	۰,۰۳۴	۰,۰۱۷	۹-۸-۱
۰,۵۸۶	۰,۴۳۱	۰,۰۰۳	۰,۱۱۱	۰,۱۴۲	۰,۱۴۲	۰,۰۴۹	۰,۰۱۵	۹-۹-۱
۰,۶۵۷	۰,۴۰۶	۰,۰۰۴	۰,۱۰۸	۰,۱۳۹	۰,۱۳۹	۰,۰۴۸	۰,۰۱۳	۹-۱۰-۱
۰,۸۰۸	۰,۳۸۷	۰,۰۰۱	۰,۱۰۳	۰,۱۳۲	۰,۱۳۲	۰,۰۵۹	۰,۰۱۲	۹-۱۱-۱
۰,۷۱۷	۰,۴۲۶	۰,۰۰۱	۰,۱۰۲	۰,۱۳۵	۰,۱۳۵	۰,۰۴۶	۰,۰۱۳	۹-۱۲-۱
۰,۸۰۹	۰,۳۶۸	۰,۰۰۸	۰,۱۰۶	۰,۱۳۴	۰,۱۳۴	۰,۰۶۳	۰,۰۱۰	۹-۱۳-۱
۰,۷۲۸	۰,۴۵۲	۰,۰۰۰	۰,۱۰۲	۰,۱۳۶	۰,۱۳۶	۰,۰۷۳	۰,۰۱۰	۹-۱۴-۱
۰,۷۵۱	۰,۴۲۴	۰,۰۰۱	۰,۰۹۹	۰,۱۳۴	۰,۱۳۴	۰,۰۸۰	۰,۰۰۹	۹-۱۵-۱



شکل ۴-۲۶ منحنی کمترین خطای شبکه (RMSE) در تعداد نرون‌های میانی مختلف در ایستگاه دره تخت همان‌گونه که در جدول ۴-۹ و شکل ۴-۲۶ مشاهده می‌گردد مدل ۱-۸-۹ (۸ نرون در لایه میانی) به کمترین مقدار خطا در مرحله آزمایش رسیده است. با توجه به جدول و شکل ارائه شده مشخص گردید که با نسبت یادگیری ۰/۱ و تعداد ۸ نرون در لایه میانی و نسبت ممتنم ۰/۷ شبکه عصبی مصنوعی مورد نظر دارای کمترین خطا و بهترین جواب را ارائه می‌دهد که این مدل در ایستگاه دره تخت به‌عنوان مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیکی انتخاب شد که نتیجه پیش‌بینی مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی در شکل ۴-۲۷ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۷ نتایج پیش‌بینی با مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی برای خشکسالی هیدرولوژیکی (SDI) در ایستگاه دره تخت

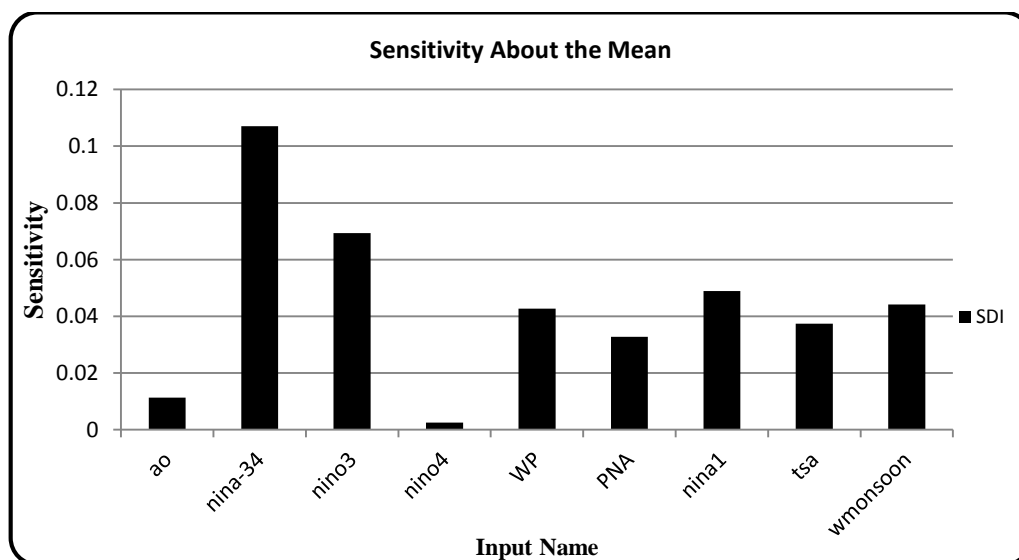
۴-۲-۵-۳ ضریب تبیین در شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه دره تخت

ضریب تبیین که بین خروجی شبکه و داده‌های شاهد به‌دست آمد بیانگر همبستگی بالای بین داده‌های شاهد با داده‌های خروجی از شبکه بود. نتایج حاصله در شکل ۴-۲۶ نشان داده شده است. ضریب تبیین در مرحله آزمایش برابر $R^2=0.68$ و بهترین خطی که بین این دو سری داده‌ها می‌توان رسم کرد مطابق با رابطه ۴-۱ است.

$$y = 0.135x + 0.3215 \quad \text{رابطه ۴-۱}$$

۴-۲-۵-۴ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه دره تخت

شکل ۴-۲۸ تحلیل حساسیت مدل بهینه (ساختار ۱-۸-۹) و جدول ۴-۱۰ درصد میزان تأثیر هر نرون در لایه ورودی (حساسیت مدل به هر نرون و لایه ورودی) بر روی خروجی مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۸ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه دره تخت

جدول ۴-۱۰ درصد میزان تأثیر هر نرون در لایه ورودی بر روی خروجی مدل (SDI) در ایستگاه دره تخت

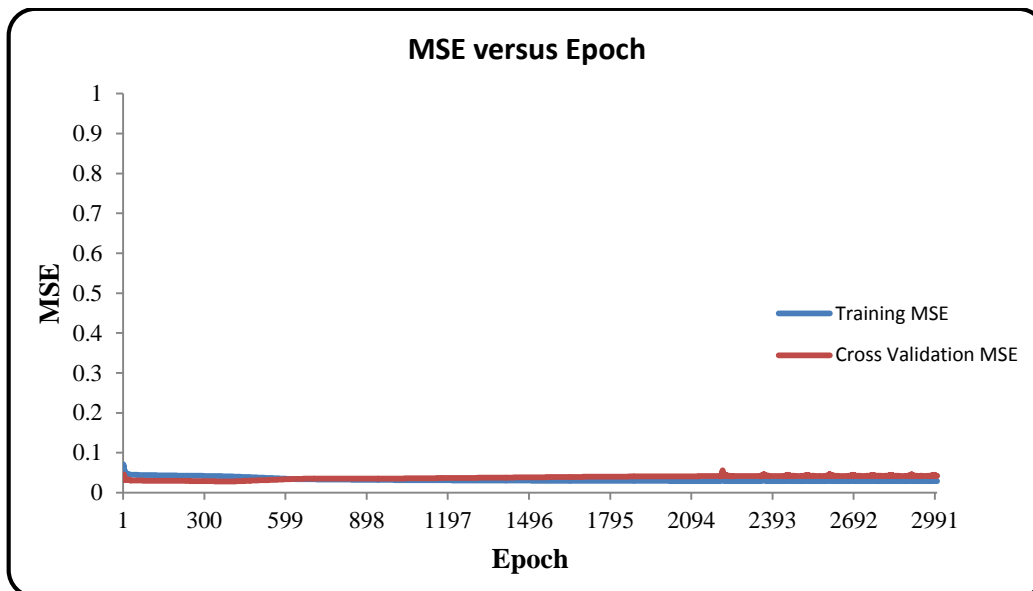
SW.MONSOON	TSA	NINO ^۱	PNA	WP	NINO ^۴	NINO ^۳	NINO- ۳/۴	AO	نرون لایه ورودی
۱۱,۱۵	۹,۴۴	۱۲,۳۴	۸,۲۶	۱۰,۷۹	۰,۶۳	۱۷,۵۲	۲۷,۰۴	۲,۸۴	حساسیت مدل

نتایج شکل ۴-۲۸ و جدول ۴-۱۰ میزان تأثیر سیگنال‌های اقلیمی در وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی (SDI) در ایستگاه دره تخت را نشان می‌دهد که مطابق نتایج به دست آمده سیگنال‌های NINO^{۳/۴} و NINO^۴ به ترتیب با میزان تأثیر ۲۷/۰۴ و ۰/۶۳ درصد دارای بیشترین و کمترین تأثیر می‌باشند.

۴-۲-۶ ایستگاه کشکان پل دختر

۴-۲-۶-۱ تعیین تعداد تکرار بهینه در ایستگاه کشکان پل دختر

جهت جلوگیری از یادگیری بیش از حد شبکه و افزایش خطا در شبکه می‌بایست تعداد تکرار بهینه در شبکه تعیین گردد. جهت انجام این کار تعداد تکرار از ۱ تا ۳۰۰۰ تغییر داده شد و در پایان هر مرحله خطای آموزش و صحت سنجی ثبت گردید. به‌طور معمول با افزایش تعداد تکرار، خطای مرحله آموزش کم می‌شد. ولی خطای صحت سنجی ابتدا تا تعداد حدود ۳۹۵ تکرار کاهش یافت ولی بعد از آن خطا شروع به افزایش گذاشت. نتایج این مرحله را می‌توان در شکل ۴-۲۹ مشاهده کرد. در نتیجه تعداد تکرار بهینه ۳۹۵ با میانگین مربعات خطای ۰/۰۲۸ در مرحله صحت سنجی انتخاب شد.



شکل ۴-۲۹ نتایج آزمایش جهت انتخاب تعداد تکرار بهینه در ایستگاه کشکان پل دختر

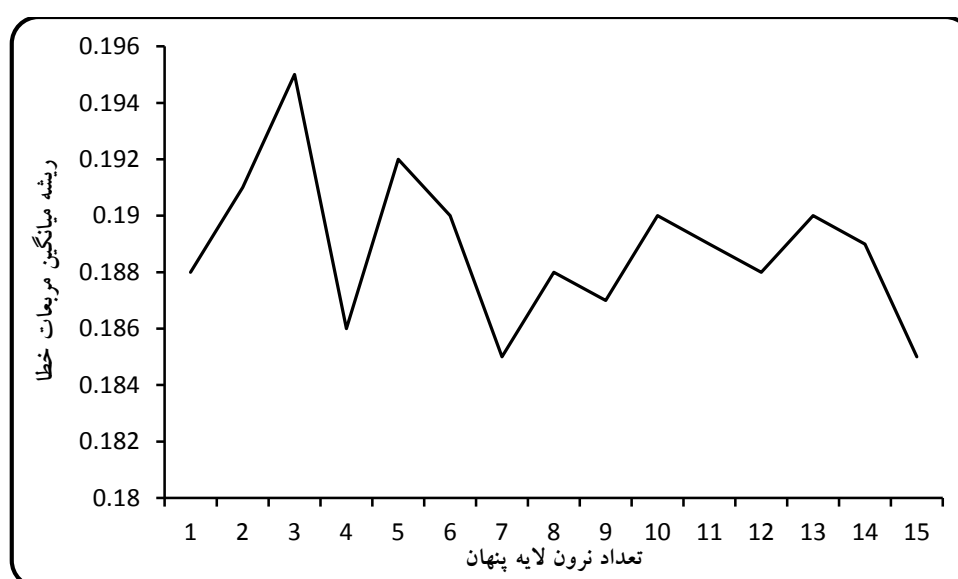
۴-۲-۶-۲ تعیین ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه کشکان پل دختر

جهت انتخاب ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه کشکان پل دختر، تعداد نرون لایه میانی از ۱ تا ۱۵ با نسبت یادگیری ۰/۱ و ضریب ممتنم ۰/۷ تغییر داده شد و در هر مرحله ریشه میانگین مربعات خطا محاسبه گردید. در نهایت ساختاری که دارای کمترین خطا بود به عنوان ساختار بهینه انتخاب شد که نتایج آن را می توان در جدول ۴-۱۱ مشاهده کرد و در نهایت شکل ۴-۳۰ ریشه میانگین مربعات مدل بهینه را نشان می دهد.

جدول ۴-۱۱ نتایج تکرارها جهت انتخاب ساختار بهینه شبکه در ایستگاه کشکان پل دختر

تست						صحت سنجی	آموزش	
R	Max Abs Error	Min Abs Error	MAE	NRMSE	RMSE	MSE	MSE	ساختار مدل
۰,۷۰۶	۰,۵۵۰	۰,۰۰۱	۰,۱۵۶	۰,۱۸۸	۰,۱۸۸	۰,۰۲۹	۰,۰۴۴	۹-۱-۱
۰,۷۴۳	۰,۵۰۵	۰,۰۰۴	۰,۱۶۰	۰,۱۹۱	۰,۱۹۱	۰,۰۲۸	۰,۰۴۲	۹-۲-۱
۰,۷۲۷	۰,۵۰۲	۰,۰۰۲	۰,۱۶۲	۰,۱۹۵	۰,۱۹۵	۰,۰۲۹	۰,۰۳۹	۹-۳-۱
۰,۷۳۸	۰,۵۱۸	۰,۰۰۳	۰,۱۵۴	۰,۱۸۶	۰,۱۸۶	۰,۰۳۱	۰,۰۳۶	۹-۴-۱
۰,۷۰۹	۰,۵۰۱	۰,۰۰۰	۰,۱۶۰	۰,۱۹۲	۰,۱۹۲	۰,۰۴۹	۰,۰۳۲	۹-۵-۱

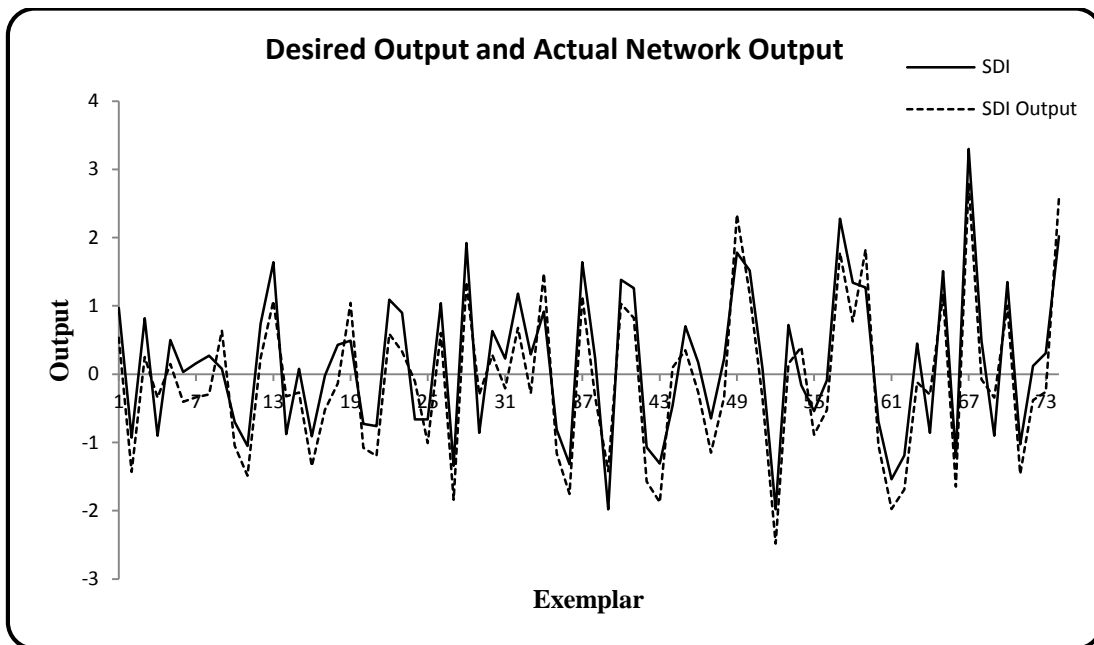
۰,۷۱۸	۰,۵۲۲	۰,۰۰۸	۰,۱۶۰	۰,۱۹۰	۰,۱۹۰	۰,۰۵۶	۰,۰۳۰	۹-۶-۱
۰,۷۶۱	۰,۵۰۵	۰,۰۰۳	۰,۱۵۵	۰,۱۸۷	۰,۱۸۵	۰,۰۲۸	۰,۰۲۹	۹-۷-۱
۰,۷۲۵	۰,۴۹۷	۰,۰۰۱	۰,۱۵۷	۰,۱۸۸	۰,۱۸۸	۰,۰۶۰	۰,۰۲۶	۹-۸-۱
۰,۷۵۶	۰,۴۹۳	۰,۰۰۳	۰,۱۵۶	۰,۱۸۷	۰,۱۸۷	۰,۰۴۴	۰,۰۲۶	۹-۹-۱
۰,۶۸۸	۰,۵۵۴	۰,۰۰۱	۰,۱۵۹	۰,۱۹۰	۰,۱۹۰	۰,۰۷۶	۰,۰۲۲	۹-۱۰-۱
۰,۷۳۸	۰,۵۲۶	۰,۰۱۰	۰,۱۵۸	۰,۱۸۹	۰,۱۸۹	۰,۰۴۲	۰,۰۲۲	۹-۱۱-۱
۰,۷۲۱	۰,۵۱۴	۰,۰۰۶	۰,۱۵۶	۰,۱۸۸	۰,۱۸۸	۰,۰۷۱	۰,۰۱۹	۹-۱۲-۱
۰,۶۷۸	۰,۵۵۱	۰,۰۰۴	۰,۱۵۹	۰,۱۹۰	۰,۱۹۰	۰,۰۷۳	۰,۰۱۷	۹-۱۳-۱
۰,۷۱۱	۰,۵۰۶	۰,۰۱۴	۰,۱۵۹	۰,۱۸۹	۰,۱۸۹	۰,۰۶۸	۰,۰۱۷	۹-۱۴-۱
۰,۷۴۹	۰,۵۱۸	۰,۰۰۲	۰,۱۵۳	۰,۱۸۵	۰,۱۸۵	۰,۰۷۲	۰,۰۱۵	۹-۱۵-۱



شکل ۴-۳۰ منحنی کمترین خطای شبکه (RMSE) در تعداد نرون‌های میانی مختلف در ایستگاه کشکان

پل دختر

همان‌گونه که در جدول ۴-۱۱ و شکل ۴-۳۰ مشاهده می‌گردد مدل ۹-۷-۱ (۷ نرون در لایه میانی) به کمترین مقدار خطا در مرحله آزمایش رسیده است. با توجه به جدول و شکل ارائه شده مشخص گردید که با نسبت یادگیری ۰/۱ و تعداد ۱۲ نرون در لایه میانی و نسبت ممتم ۰/۷ شبکه عصبی مصنوعی مورد نظر دارای کمترین خطا و بهترین جواب را ارائه می‌دهد که این مدل در ایستگاه کشکان پل دختر به‌عنوان مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیکی انتخاب شد که نتیجه پیش‌بینی مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی در شکل ۴-۳۱ نشان داده شده است.



شکل ۴-۳۱ نتایج پیش‌بینی با مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی برای خشکسالی هیدرولوژیکی (SDI) در ایستگاه کشکان پل دختر

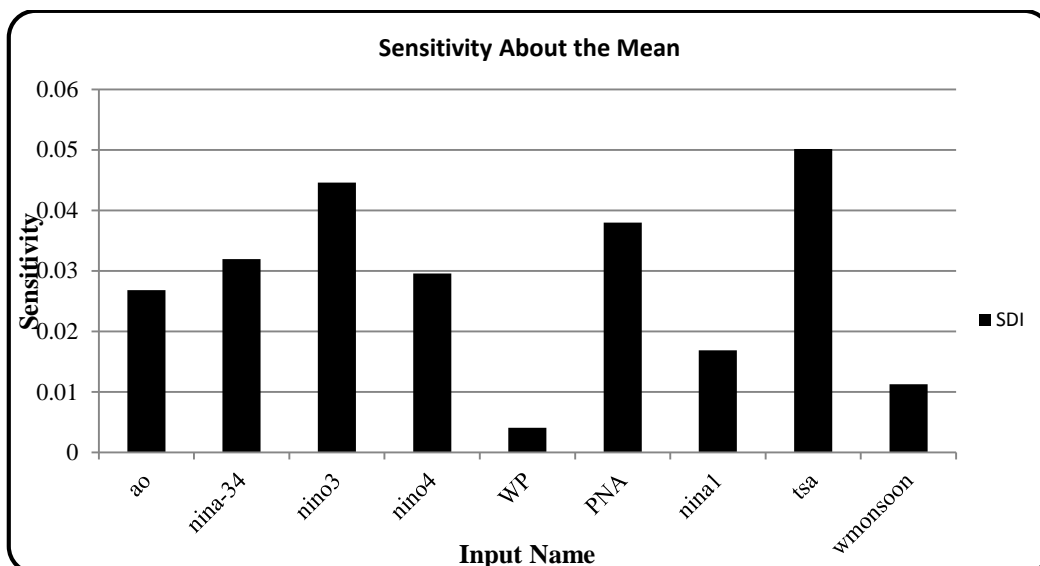
۴-۲-۶-۳ ضریب تبیین در شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه کشکان پل دختر

ضریب تبیین که بین خروجی شبکه و داده‌های شاهد به دست آمد بیانگر همبستگی بالای بین داده-های شاهد با داده‌های خروجی از شبکه بود. نتایج حاصله در شکل ۴-۳۰ نشان داده شده است. ضریب تبیین در مرحله آزمایش برابر $R^2 = 0/579$ و بهترین خطی که بین این دو سری داده‌ها می‌توان رسم کرد مطابق با رابطه ۴-۱ است.

$$y = 0,0804x + 0,3112 \quad \text{رابطه ۴-۱}$$

۴-۲-۶-۴ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه کشکان پل دختر

شکل ۴-۳۲ تحلیل حساسیت مدل بهینه (ساختار ۱-۷-۹) و جدول ۴-۱۲ درصد میزان تأثیر هر نرون در لایه ورودی (حساسیت مدل به هر نرون و لایه ورودی) بر روی خروجی مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۳۲ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه کشکان پل دختر

جدول ۴-۱۲ درصد میزان تأثیر هر نرون در لایه ورودی بر روی خروجی مدل (SDI) در ایستگاه کشکان

پل دختر

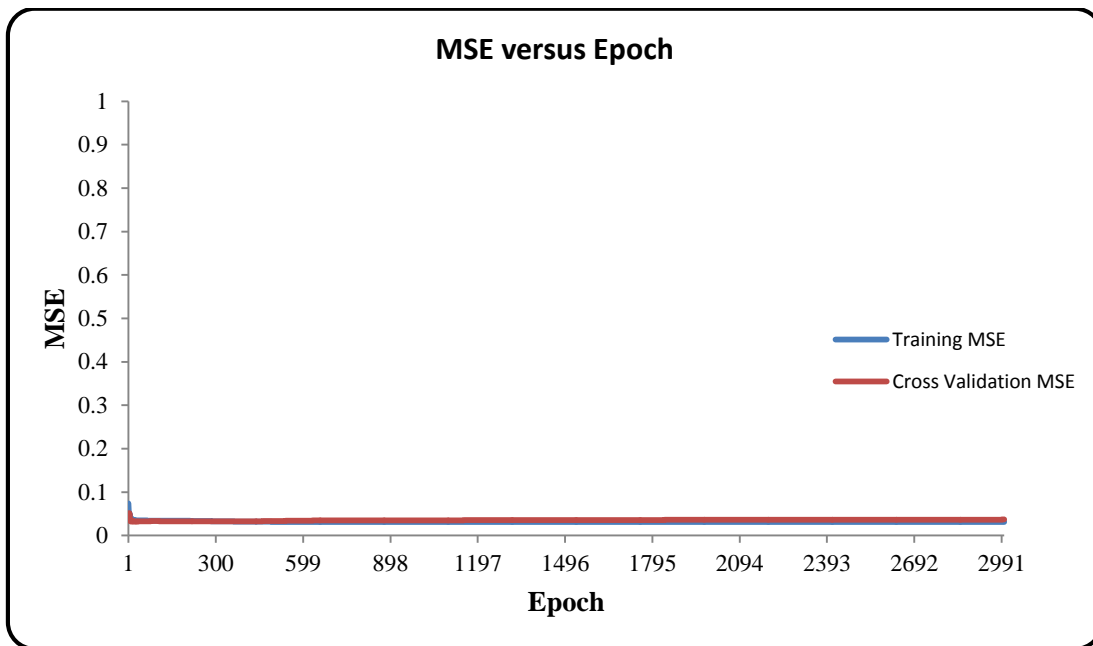
SW.MONSOON	TSA	NINO ₁	PNA	WP	NINO ₄	NINO ₃	NINO-3/4	AO	نرون لایه ورودی
۴.۴۴	۱۹,۸۰	۶,۶۷	۱۵,۰۰	۱,۶۱	۱۱,۶۷	۱۷,۶۰	۱۲,۶۲	۱۰,۵۹	حساسیت مدل

نتایج شکل ۴-۳۲ و جدول ۴-۱۲ میزان تأثیر سیگنال‌های اقلیمی در وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی (SDI) در ایستگاه کشکان پل دختر را نشان می‌دهد که مطابق نتایج به دست آمده سیگنال‌های TSA و WP به ترتیب با میزان تأثیر ۱۹/۸ و ۱/۶۱ درصد دارای بیشترین و کمترین تأثیر می‌باشند.

۷-۲-۴ ایستگاه کشور

۱-۷-۲-۴ تعیین تعداد تکرار بهینه در ایستگاه کشور

جهت جلوگیری از یادگیری بیش از حد شبکه و افزایش خطا در شبکه می‌بایست تعداد تکرار بهینه در شبکه تعیین گردد. جهت انجام این کار تعداد تکرار از ۱ تا ۳۰۰۰ تغییر داده شد و در پایان هر مرحله خطای آموزش و صحت سنجی ثبت گردید. به‌طور معمول با افزایش تعداد تکرار، خطای مرحله آموزش کم می‌شد. ولی خطای صحت سنجی ابتدا تا تعداد حدود ۲۱ تکرار کاهش یافت ولی بعد از آن خطا شروع به افزایش گذاشت. نتایج این مرحله را می‌توان در شکل ۴-۳۳ مشاهده کرد. در نتیجه تعداد تکرار بهینه ۲۱ با میانگین مربعات خطای ۰/۰۳۱ در مرحله صحت سنجی انتخاب شد.



شکل ۴-۳۳ نتایج آزمایش جهت انتخاب تعداد تکرار بهینه در ایستگاه کشور

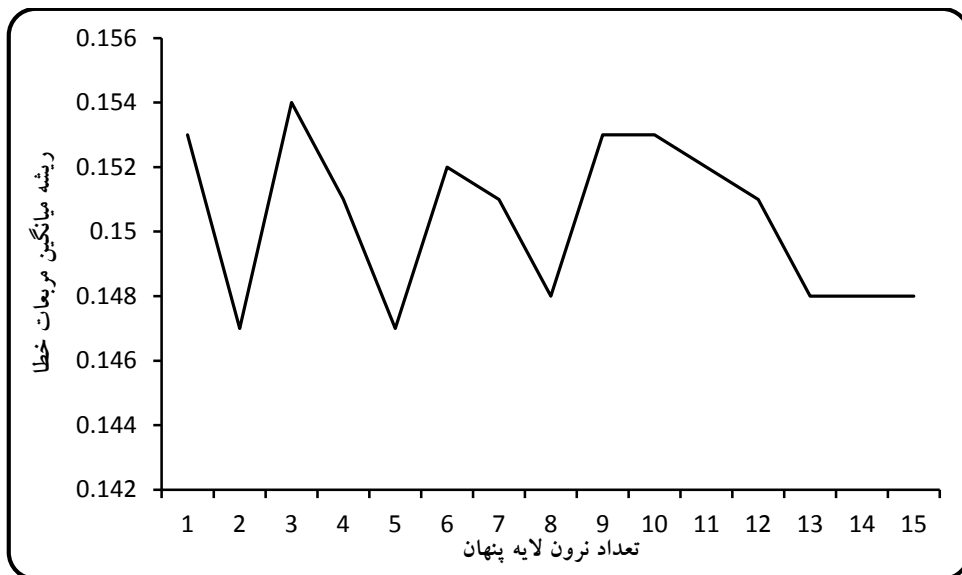
۲-۷-۲-۴ تعیین ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه کشور

جهت انتخاب ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه کشور، تعداد نرون لایه میانی از ۱ تا ۱۵ با نسبت یادگیری ۰/۱ و ضریب ممتم ۰/۷ تغییر داده شد و در هر مرحله ریشه میانگین مربعات خطا محاسبه گردید. در نهایت ساختاری که دارای کمترین خطا بود به‌عنوان ساختار بهینه

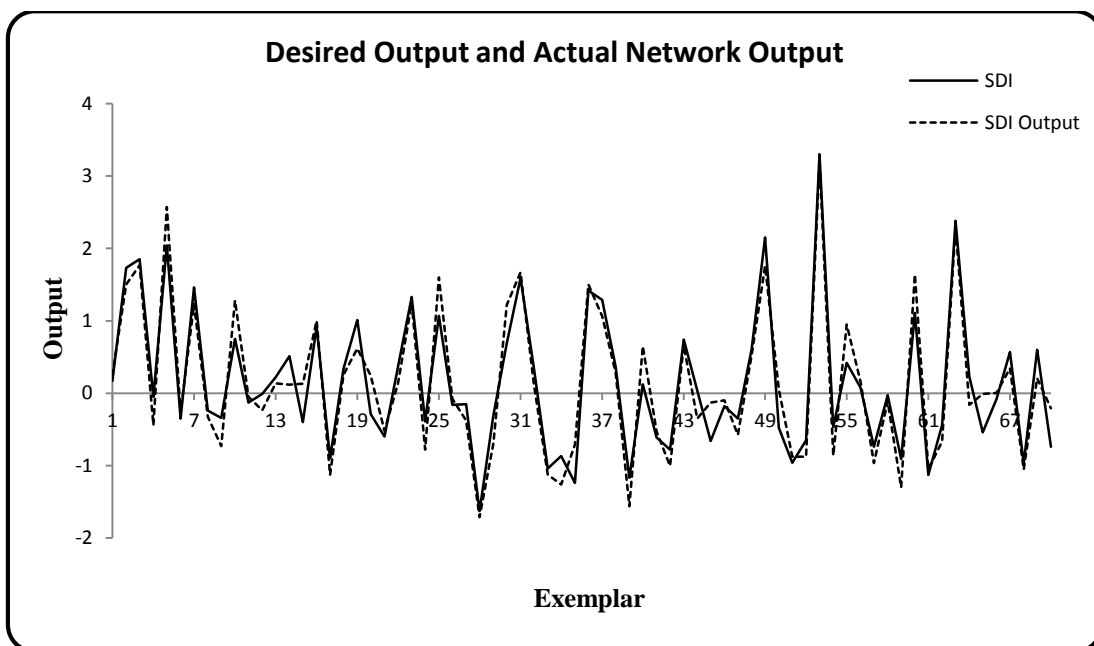
انتخاب شد که نتایج آن را می‌توان در جدول ۴-۱۳ مشاهده کرد و در نهایت شکل ۴-۳۴ ریشه میانگین مربعات مدل بهینه را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱۳ نتایج تکرارها جهت انتخاب ساختار بهینه شبکه در ایستگاه کشور

تست						صحت سنجی	آموزش	
R	Max Abs Error	Min Abs Error	MAE	NRMSE	RMSE	MSE	MSE	ساختار مدل
۰,۵۱۲	۰,۵۲۲	۰,۰۰۲	۰,۱۲۰	۰,۱۵۳	۰,۱۵۳	۰,۰۳۰	۰,۰۳۲	۹-۱-۱
۰,۷۷۷	۰,۵۰۶	۰,۰۰۱	۰,۱۱۳	۰,۱۴۸	۰,۱۴۷	۰,۰۳۱	۰,۰۳۱	۹-۲-۱
۰,۷۳۸	۰,۴۹۰	۰,۰۰۱	۰,۱۲۰	۰,۱۵۴	۰,۱۵۴	۰,۰۳۳	۰,۰۲۹	۹-۳-۱
۰,۶۳۱	۰,۵۲۳	۰,۰۰۱	۰,۱۱۷	۰,۱۵۱	۰,۱۵۱	۰,۰۳۶	۰,۰۲۶	۹-۴-۱
۰,۶۸۲	۰,۴۹۵	۰,۰۰۱	۰,۱۱۵	۰,۱۴۷	۰,۱۴۷	۰,۰۴۰	۰,۰۲۶	۹-۵-۱
۰,۵۹۰	۰,۵۳۱	۰,۰۰۱	۰,۱۱۷	۰,۱۵۲	۰,۱۵۲	۰,۰۴۴	۰,۰۲۴	۹-۶-۱
۰,۷۰۸	۰,۴۵۶	۰,۰۰۲	۰,۱۲۲	۰,۱۵۱	۰,۱۵۱	۰,۰۵۳	۰,۰۱۸	۹-۷-۱
۰,۶۹۲	۰,۵۰۷	۰,۰۰۶	۰,۱۱۶	۰,۱۴۸	۰,۱۴۸	۰,۰۶۲	۰,۰۱۹	۹-۸-۱
۰,۵۰۶	۰,۵۳۵	۰,۰۰۴	۰,۱۲۴	۰,۱۵۳	۰,۱۵۳	۰,۰۴۲	۰,۰۱۸	۹-۹-۱
۰,۶۱۳	۰,۵۳۰	۰,۰۰۳	۰,۱۱۶	۰,۱۵۳	۰,۱۵۳	۰,۰۶۳	۰,۰۱۵	۹-۱۰-۱
۰,۶۲۵	۰,۵۴۹	۰,۰۰۱	۰,۱۱۴	۰,۱۵۲	۰,۱۵۲	۰,۰۶۰	۰,۰۱۶	۹-۱۱-۱
۰,۵۷۶	۰,۴۷۵	۰,۰۰۴	۰,۱۲۱	۰,۱۵۱	۰,۱۵۱	۰,۰۷۴	۰,۰۱۳	۹-۱۲-۱
۰,۶۹۴	۰,۴۶۴	۰,۰۰۱	۰,۱۱۶	۰,۱۴۸	۰,۱۴۸	۰,۰۷۲	۰,۰۱۲	۹-۱۳-۱
۰,۶۶۳	۰,۵۱۸	۰,۰۰۱	۰,۱۱۶	۰,۱۴۸	۰,۱۴۸	۰,۰۷۷	۰,۰۱۱	۹-۱۴-۱
۰,۶۷۶	۰,۴۷۰	۰,۰۰۲	۰,۱۱۷	۰,۱۴۸	۰,۱۴۸	۰,۱۰۳	۰,۰۰۹	۹-۱۵-۱



شکل ۴-۳۴ منحنی کمترین خطای شبکه (RMSE) در تعداد نرون‌های میانی مختلف در ایستگاه کشور همان‌گونه که در جدول ۴-۳۳ و شکل ۴-۳۴ مشاهده می‌گردد مدل ۱-۲-۹ (۲ نرون در لایه میانی) به کمترین مقدار خطا در مرحله آزمایش رسیده است. با توجه به جدول و شکل ارائه شده مشخص گردید که با نسبت یادگیری ۰/۱ و تعداد ۲ نرون در لایه میانی و نسبت ممتنم ۰/۷ شبکه عصبی مصنوعی مورد نظر دارای کمترین خطا و بهترین جواب را ارائه می‌دهد که این مدل در ایستگاه کشور به‌عنوان مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیکی انتخاب شد که نتیجه پیش‌بینی مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی در شکل ۴-۳۵ نشان داده شده است.



شکل ۴-۳۵ نتایج پیش‌بینی با مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی برای خشکسالی هیدرولوژیکی (SDI) در ایستگاه کشور

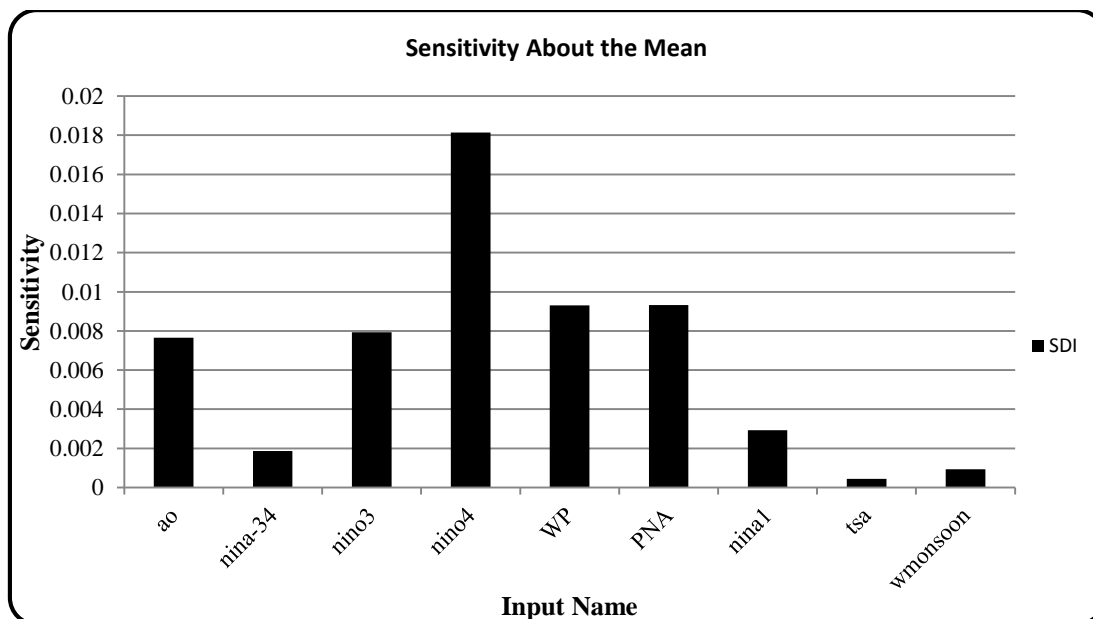
۴-۲-۷-۳ ضریب تبیین در شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه کشور

ضریب تبیین که بین خروجی شبکه و داده‌های شاهد به دست آمد بیانگر همبستگی بالای بین داده‌های شاهد با داده‌های خروجی از شبکه بود. نتایج حاصله در شکل ۴-۳۴ نشان داده شده است. ضریب تبیین در مرحله آزمایش برابر $R^2 = 0.603$ و بهترین خطی که بین این دو سری داده‌ها می‌توان رسم کرد مطابق با رابطه ۴-۱ است.

$$y = 0.314x + 0.3025 \quad \text{رابطه ۴-۱}$$

۴-۲-۷-۴ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه چ کشور

شکل ۴-۳۶ تحلیل حساسیت مدل بهینه (ساختار ۱-۲-۹) و جدول ۴-۱۴ درصد میزان تأثیر هر نرون در لایه ورودی (حساسیت مدل به هر نرون و لایه ورودی) بر روی خروجی مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۳۶ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه کشور

جدول ۴-۱۴ درصد میزان تأثیر هر نرون در لایه ورودی بر روی خروجی مدل (SDI) در ایستگاه کشور

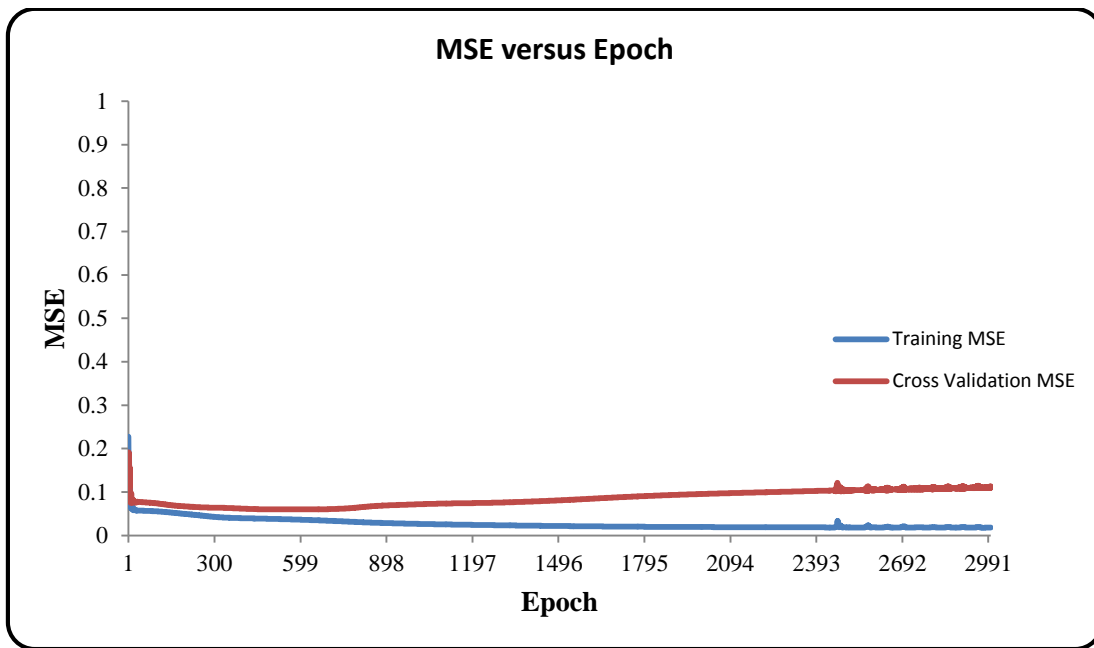
SW.MONSOON	TSA	NINO ^۱	PNA	WP	NINO ^۴	NINO ^۳	NINO- ۳/۴	AO	نرون لایه ورودی
۱,۶۰	۰,۷۶	۵,۰۰	۱۵,۹۴	۱۵,۸۹	۳۰,۹۹	۱۳,۵۵	۳,۱۹	۱۳,۰۷	حساسیت مدل

نتایج شکل ۴-۳۶ و جدول ۴-۱۴ میزان تأثیر سیگنال‌های اقلیمی در وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی (SDI) در ایستگاه کشور را نشان می‌دهد که مطابق نتایج به دست آمده سیگنال‌های NINO^۴ و TSA به ترتیب با میزان تأثیر ۳۰/۹۹ و ۰/۷۶ درصد دارای بیشترین و کمترین تأثیر می‌باشند.

۴-۲-۸ ایستگاه ونایی

۴-۲-۸-۱ تعیین تعداد تکرار بهینه در ایستگاه ونایی

جهت جلوگیری از یادگیری بیش از حد شبکه و افزایش خطا در شبکه می‌بایست تعداد تکرار بهینه در شبکه تعیین گردد. جهت انجام این کار تعداد تکرار از ۱ تا ۳۰۰۰ تغییر داده شد و در پایان هر مرحله خطای آموزش و صحت سنجی ثبت گردید. به‌طور معمول با افزایش تعداد تکرار، خطای مرحله آموزش کم می‌شد. ولی خطای صحت سنجی ابتدا تا تعداد حدود ۶۵۳ تکرار کاهش یافت ولی بعد از آن خطا شروع به افزایش گذاشت. نتایج این مرحله را می‌توان در شکل ۴-۳۷ مشاهده کرد. در نتیجه تعداد تکرار بهینه ۶۵۳ با میانگین مربعات خطای ۰/۰۶ در مرحله صحت سنجی انتخاب شد.



شکل ۴-۳۷ نتایج آزمایش جهت انتخاب تعداد تکرار بهینه در ایستگاه ونایی

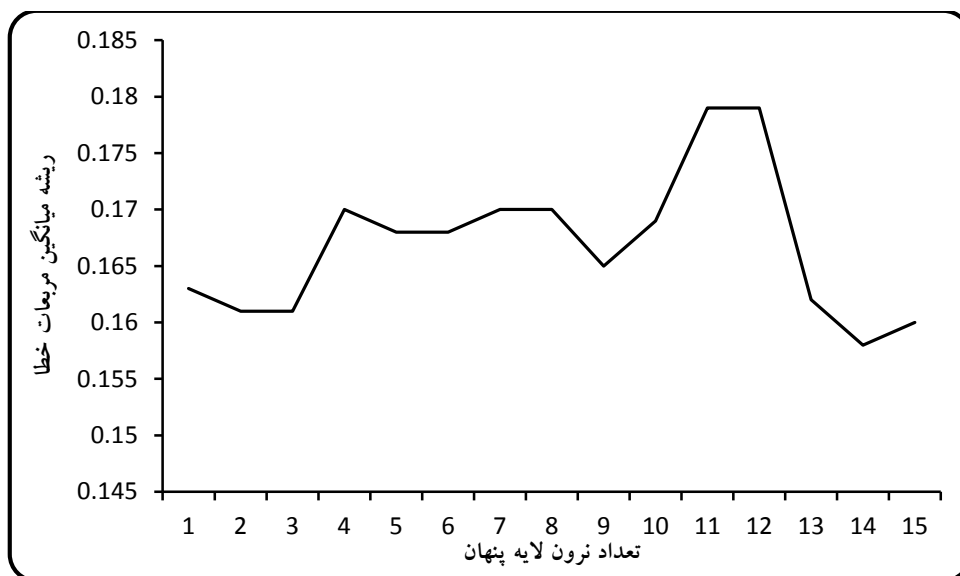
۴-۲-۸-۲ تعیین ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه ونایی

جهت انتخاب ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه ونایی، تعداد نرون لایه میانی از ۱ تا ۱۵ با نسبت یادگیری ۰/۱ و ضریب ممتد ۰/۷ تغییر داده شد و در هر مرحله ریشه میانگین مربعات خطا محاسبه گردید. در نهایت ساختاری که دارای کمترین خطا بود به عنوان ساختار بهینه انتخاب شد که نتایج آن را می توان در جدول ۴-۱۵ مشاهده کرد و در نهایت شکل ۴-۳۸ ریشه میانگین مربعات مدل بهینه را نشان می دهد.

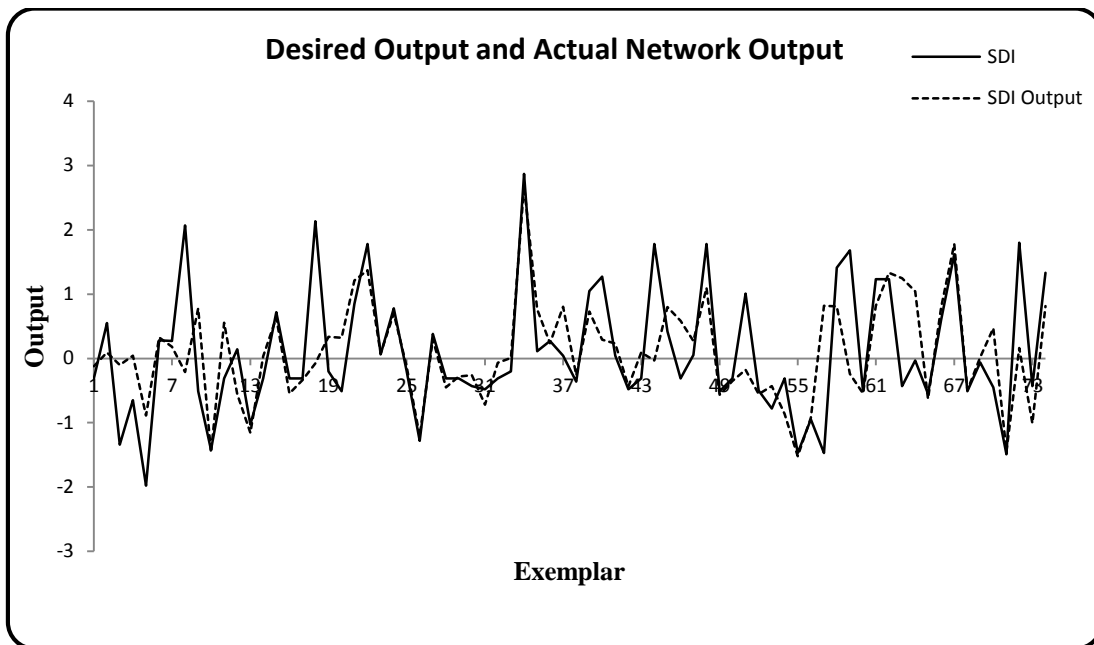
جدول ۴-۱۵ نتایج تکرارها جهت انتخاب ساختار بهینه شبکه در ایستگاه ونایی

تست						صحت سنجی	آموزش	
R	Max Abs Error	Min Abs Error	MAE	NRMSE	RMSE	MSE	MSE	ساختار مدل
۰,۶۴۷	۰,۴۷۲	۰,۰۰۱	۰,۱۳۰	۰,۲۰۳	۰,۱۶۳	۰,۰۷۳	۰,۰۵۶	۹-۱-۱
۰,۶۸۴	۰,۴۴۴	۰,۰۰۲	۰,۱۲۶	۰,۲۰۱	۰,۱۶۱	۰,۰۷۵	۰,۰۵۱	۹-۲-۱
۰,۷۰۲	۰,۴۷۸	۰,۰۰۰	۰,۱۲۶	۰,۲۰۱	۰,۱۶۱	۰,۰۸۲	۰,۰۴۳	۹-۳-۱
-۰,۰۵۳	۰,۴۸۳	۰,۰۰۰	۰,۱۲۶	۰,۲۱۳	۰,۱۷۰	۰,۰۸۳	۰,۰۴۰	۹-۴-۱

۰,۷۹۳	۰,۴۵۲	۰,۰۰۰	۰,۱۳۴	۰,۲۱۰	۰,۱۶۸	۰,۰۷۴	۰,۰۳۷	۹-۵-۱
۰,۶۳۳	۰,۴۸۴	۰,۰۰۷	۰,۱۳۱	۰,۲۱۰	۰,۱۶۸	۰,۰۹۱	۰,۰۳۲	۹-۶-۱
۰,۶۸۲	۰,۵۰۰	۰,۰۰۳	۰,۱۳۱	۰,۲۱۲	۰,۱۷۰	۰,۰۸۱	۰,۰۳۴	۹-۷-۱
۰,۶۹۵	۰,۵۰۲	۰,۰۰۴	۰,۱۳۳	۰,۲۱۳	۰,۱۷۰	۰,۰۸۰	۰,۰۲۸	۹-۸-۱
۰,۷۰۳	۰,۴۹۰	۰,۰۰۴	۰,۱۲۸	۰,۲۰۶	۰,۱۶۵	۰,۰۸۴	۰,۰۲۸	۹-۹-۱
۰,۷۳۵	۰,۵۲۶	۰,۰۰۱	۰,۱۳۰	۰,۲۱۱	۰,۱۶۹	۰,۰۹۷	۰,۰۲۷	۹-۱۰-۱
۰,۷۷۲	۰,۴۶۲	۰,۰۰۱	۰,۱۳۶	۰,۲۲۳	۰,۱۷۹	۰,۰۸۷	۰,۰۲۵	۹-۱۱-۱
۰,۷۳۳	۰,۵۶۱	۰,۰۰۲	۰,۱۳۳	۰,۲۲۴	۰,۱۷۹	۰,۰۸۲	۰,۰۲۲	۹-۱۲-۱
۰,۷۱۰	۰,۴۵۵	۰,۰۰۶	۰,۱۲۶	۰,۲۰۲	۰,۱۶۲	۰,۱۳۱	۰,۰۲۱	۹-۱۳-۱
۰,۸۰۴	۰,۵۳۰	۰,۰۰۳	۰,۱۲۷	۰,۲۰۹	۰,۱۵۸	۰,۰۶۰	۰,۰۱۵	۹-۱۴-۱
۰,۷۴۲	۰,۴۹۰	۰,۰۰۱	۰,۱۲۲	۰,۲۰۰	۰,۱۶۰	۰,۱۲۸	۰,۰۱۵	۹-۱۵-۱



شکل ۴-۳۸ منحنی کمترین خطای شبکه (RMSE) در تعداد نرون‌های میانی مختلف در ایستگاه ونایی همان‌گونه که در جدول ۴-۱۵ و شکل ۴-۳۸ مشاهده می‌گردد مدل ۹-۱۴-۱ (۱۴ نرون در لایه میانی) به کمترین مقدار خطا در مرحله آزمایش رسیده است. با توجه به جدول و شکل ارائه شده مشخص گردید که با نسبت یادگیری ۰/۱ و تعداد ۱۴ نرون در لایه میانی و نسبت ممتم ۰/۷ شبکه عصبی مصنوعی مورد نظر دارای کمترین خطا و بهترین جواب را ارائه می‌دهد که این مدل در ایستگاه ونایی به‌عنوان مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیکی انتخاب شد که نتیجه پیش‌بینی مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی در شکل ۴-۳۹ نشان داده شده است.



شکل ۴-۳۹ نتایج پیش‌بینی با مدل بهینه شبکه عصبی مصنوعی برای خشکسالی هیدرولوژیکی (SDI) در ایستگاه ونایی

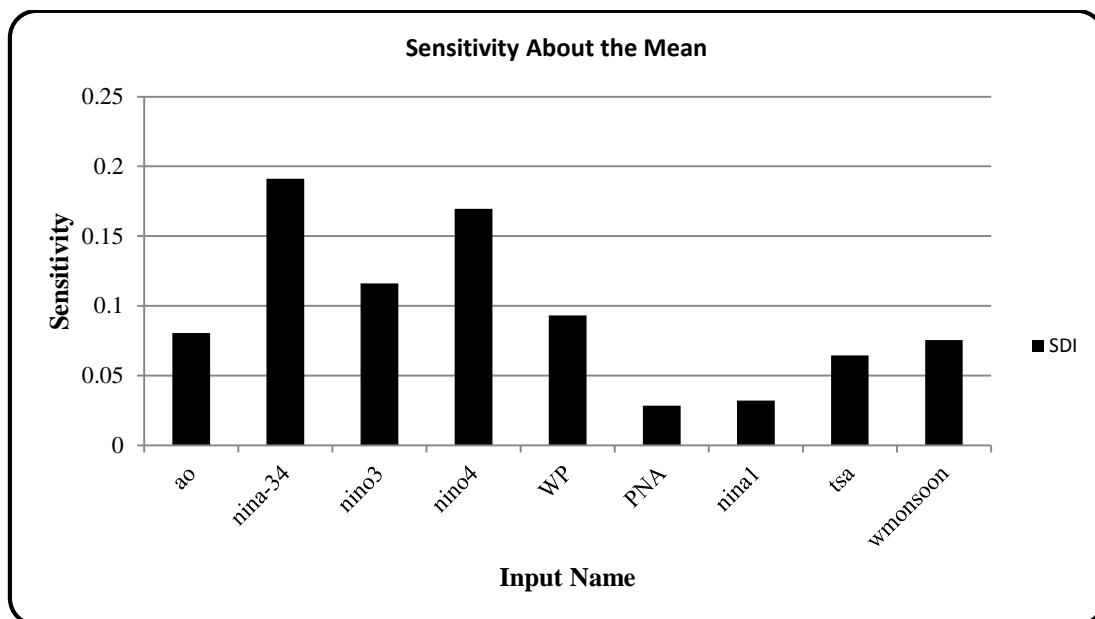
۴-۲-۸-۳ ضریب تبیین در شبکه عصبی مصنوعی در ایستگاه ونایی

ضریب تبیین که بین خروجی شبکه و داده‌های شاهد به دست آمد بیانگر همبستگی بالای بین داده‌های شاهد با داده‌های خروجی از شبکه بود. نتایج حاصله در شکل ۴-۳۹ نشان داده شده است. ضریب تبیین در مرحله آزمایش برابر $R^2 = 0.746$ و بهترین خطی که بین این دو سری داده‌ها می‌توان رسم کرد مطابق با رابطه ۴-۱ است.

$$y = 0.2148x + 0.2761 \quad \text{رابطه ۴-۱}$$

۴-۲-۸-۴ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه ونایی

شکل ۴-۴۰ تحلیل حساسیت مدل بهینه (ساختار ۱-۱۴-۹) و جدول ۴-۱۶ درصد میزان تأثیر هر نرون در لایه ورودی (حساسیت مدل به هر نرون و لایه ورودی) بر روی خروجی مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۴۰ تحلیل حساسیت مدل بهینه در ایستگاه ونایی

جدول ۴-۱۶ درصد میزان تأثیر هر نرون در لایه ورودی بر روی خروجی مدل (SDI) در ایستگاه ونایی

SW.MONSOON	TSA	NINO ₁	PNA	WP	NINO ₄	NINO ₃	NINO- ۳/۴	AO	نرون لایه ورودی
۸,۸۷	۷,۵۸	۳,۷۷	۳,۳۵	۱۰,۹۴	۱۹,۹۳	۱۳,۶۵	۲۲,۴۶	۹,۴۶	حساسیت مدل

نتایج شکل ۴-۴۰ و جدول ۴-۱۶ میزان تأثیر سیگنال‌های اقلیمی در وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی (SDI) در ایستگاه ونایی را نشان می‌دهد که مطابق نتایج به دست آمده سیگنال‌های NINO_{۳/۴} و PNA به ترتیب با میزان تأثیر ۲۲/۴۶ و ۳/۳۵ درصد دارای بیشترین و کمترین تأثیر می‌باشند.

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱ نتیجه گیری

خشکسالی از پدیده‌هایی است که بشر از قدیم‌الایام با آن روبرو بوده است به‌طوریکه زیان‌های سنگین به اقتصاد کشورها مخصوصاً مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران وارد می‌سازد. بهترین راه مقابله با آن شناخت صحیح این پدیده است. در این تحقیق با توجه به کارایی شبکه‌های عصبی مصنوعی در مدل‌سازی عناصر اقلیمی و پیش‌بینی سیکل خشکسالی‌ها، واضح است که توانایی‌های این تکنیک با توجه به ساختارهای مختلف آن و نیز طبیعت مسئله‌ای که به دنبال حل آن هستیم، متفاوت است. با انتخاب نوع و تعداد مناسب عوامل ورودی و نیز کالیبره کردن مناسب آن می‌توان گفت، این تکنیک ابزاری بسیار مفید و قدرتمند برای مدل‌سازی خشکسالی‌های استان لرستان است.

۵-۱-۱ ایستگاه افرینه

مناسب‌ترین مدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی سیکل خشکسالی هیدرولوژیکی در ایستگاه افرینه به کمک سیگنال‌های اقلیمی، با ۹ نرون در لایه ورودی، ۱۲ نرون در لایه پنهان و ۱ نرون خروجی، یعنی ساختار (۱-۱۲-۹) است که میزان میانگین مربعات خطای آموزش و صحت‌سنجی به ترتیب برابر ۰/۰۱۶ و ۰/۰۰۹ است. ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین مرحله آزمایش به ترتیب برابر ۰/۱۵۴ و ۰/۴۴۶ است. علاوه بر این تعداد تکرار بهینه مدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیکی برابر ۲۵۲ تکرار با میانگین مربعات خطای ۰/۰۰۹ بود. تحلیل حساسیت سیگنال‌های اقلیمی در ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی نشان داد که سیگنال‌های بزرگ مقیاس TSA و PNA به ترتیب با داشتن میزان ۳۱/۸۲ و ۵/۲۵ درصد بیشترین و کمترین تأثیر را در پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیک ایستگاه افرینه داشته‌اند.

۵-۱-۲ ایستگاه بادآور

مناسب‌ترین مدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی سیکل خشکسالی هیدرولوژیکی در ایستگاه بادآور به کمک سیگنال‌های اقلیمی، با ۹ نرون در لایه ورودی، ۱۰ نرون در لایه پنهان و ۱ نرون خروجی، یعنی ساختار (۱-۱۰-۹) است که میزان میانگین مربعات خطای آموزش و صحت‌سنجی به ترتیب برابر ۰/۰۶۷ و ۰/۰۶۴۲ است. ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین مرحله

آزمایش به ترتیب برابر ۰/۱۶ و ۰/۵۰۲ است. علاوه بر این تعداد تکرار بهینه مدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیکی برابر ۹۳ تکرار با میانگین مربعات خطای ۰/۰۶۴ بود. تحلیل حساسیت سیگنال‌های اقلیمی در ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی نشان داد که سیگنال‌های بزرگ مقیاس TSA و NINO۱ به ترتیب با داشتن میزان ۲۶/۹ و ۰/۷۴ درصد بیشترین و کمترین تأثیر را در پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیکی ایستگاه بادآور داشته‌اند.

۳-۱-۵ ایستگاه چم‌انجیر

مناسب‌ترین مدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی سیکل خشکسالی هیدرولوژیکی در ایستگاه چم‌انجیر به کمک سیگنال‌های اقلیمی، با ۹ نرون در لایه ورودی، ۱۲ نرون در لایه پنهان و ۱ نرون خروجی، یعنی ساختار (۱-۱۲-۹) است که میزان میانگین مربعات خطای آموزش و صحت سنجی به ترتیب برابر ۰/۰۲۱ و ۰/۰۶۳ است. ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین مرحله آزمایش به ترتیب برابر ۰/۲۱۵ و ۰/۵۵۸ است. علاوه بر این تعداد تکرار بهینه مدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیکی برابر ۱۵۹ تکرار با میانگین مربعات خطای ۰/۰۶۲ بود. تحلیل حساسیت سیگنال‌های اقلیمی در ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی نشان داد که سیگنال‌های بزرگ مقیاس TSA و NINO۴ به ترتیب با داشتن میزان ۳۹/۱۱ و ۲/۵ درصد بیشترین و کمترین تأثیر را در پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیکی ایستگاه چم‌انجیر داشته‌اند.

۴-۱-۵ ایستگاه چم‌چیت

مناسب‌ترین مدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی سیکل خشکسالی هیدرولوژیکی در ایستگاه چم‌چیت به کمک سیگنال‌های اقلیمی، با ۹ نرون در لایه ورودی، ۵ نرون در لایه پنهان و ۱ نرون خروجی، یعنی ساختار (۱-۵-۹) است که میزان میانگین مربعات خطای آموزش و صحت سنجی به ترتیب برابر ۰/۰۳۸ و ۰/۰۳۵ است. ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین مرحله آزمایش به ترتیب برابر ۰/۱۷۳ و ۰/۶۳۳ است. علاوه بر این تعداد تکرار بهینه مدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیکی برابر ۹۶ تکرار با میانگین مربعات خطای ۰/۰۳۵ بود. تحلیل حساسیت سیگنال‌های اقلیمی در ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی نشان داد که

سیگنال‌های بزرگ مقیاس $NINO_3$ و TSA به ترتیب با داشتن میزان $31/71$ و $0/99$ درصد بیشترین و کمترین تأثیر را در پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیک ایستگاه چم‌چیت داشته‌اند.

۵-۱-۵ ایستگاه دره تخت

مناسب‌ترین مدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی سیکل خشکسالی هیدرولوژیکی در ایستگاه دره تخت به کمک سیگنال‌های اقلیمی، با ۹ نرون در لایه ورودی، ۸ نرون در لایه پنهان و ۱ نرون خروجی، یعنی ساختار (۹-۸-۱) است که میزان میانگین مربعات خطای آموزش و صحت سنجی به ترتیب برابر $0/017$ و $0/034$ است. ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین مرحله آزمایش به ترتیب برابر $0/131$ و $0/68$ است. علاوه بر این تعداد تکرار بهینه مدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیکی برابر ۲۵۲ تکرار با میانگین مربعات خطای $0/034$ بود. تحلیل حساسیت سیگنال‌های اقلیمی در ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی نشان داد که سیگنال‌های بزرگ مقیاس $NINO_{3/4}$ و $NINO_4$ به ترتیب با داشتن میزان $27/04$ و $0/63$ درصد بیشترین و کمترین تأثیر را در پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیک ایستگاه دره تخت داشته‌اند.

۶-۱-۵ ایستگاه کشکان پل دختر

مناسب‌ترین مدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی سیکل خشکسالی هیدرولوژیکی در ایستگاه کشکان پل دختر به کمک سیگنال‌های اقلیمی، با ۹ نرون در لایه ورودی، ۷ نرون در لایه پنهان و ۱ نرون خروجی، یعنی ساختار (۹-۷-۱) است که میزان میانگین مربعات خطای آموزش و صحت سنجی به ترتیب برابر $0/029$ و $0/028$ است. ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین مرحله آزمایش به ترتیب برابر $0/185$ و $0/579$ است. علاوه بر این تعداد تکرار بهینه مدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیکی برابر ۳۹۵ تکرار با میانگین مربعات خطای $0/028$ بود. تحلیل حساسیت سیگنال‌های اقلیمی در ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی نشان داد که سیگنال‌های بزرگ مقیاس TSA و WP به ترتیب با داشتن میزان $19/8$ و $1/61$ درصد بیشترین و کمترین تأثیر را در پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیک ایستگاه کشکان پل دختر داشته‌اند.

۵-۱-۷ ایستگاه کشور

مناسب‌ترین مدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی سیکل خشکسالی هیدرولوژیکی در ایستگاه کشور به کمک سیگنال‌های اقلیمی، با ۹ نرون در لایه ورودی، ۲ نرون در لایه پنهان و ۱ نرون خروجی، یعنی ساختار (۱-۲-۹) است که میزان میانگین مربعات خطای آموزش و صحت‌سنجی به ترتیب برابر ۰/۰۳۱ و ۰/۰۳۱ است. ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین مرحله آزمایش به ترتیب برابر ۰/۱۴۷ و ۰/۶۰۳ است. علاوه بر این تعداد تکرار بهینه مدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیکی برابر ۲۱ تکرار با میانگین مربعات خطای ۰/۰۳۱ بود. تحلیل حساسیت سیگنال‌های اقلیمی در ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی نشان داد که سیگنال‌های بزرگ مقیاس NINO₄ و TSA به ترتیب با داشتن میزان ۳۰/۹۹ و ۰/۷۶ درصد بیشترین و کمترین تأثیر را در پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیک ایستگاه کشور داشته‌اند.

۵-۱-۸ ایستگاه ونایی

مناسب‌ترین مدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی سیکل خشکسالی هیدرولوژیکی در ایستگاه ونایی به کمک سیگنال‌های اقلیمی، با ۹ نرون در لایه ورودی، ۱۴ نرون در لایه پنهان و ۱ نرون خروجی، یعنی ساختار (۱-۱۴-۹) است که میزان میانگین مربعات خطای آموزش و صحت‌سنجی به ترتیب برابر ۰/۰۱۵ و ۰/۰۶ است. ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین مرحله آزمایش به ترتیب برابر ۰/۱۵۸ و ۰/۶۴۶ است. علاوه بر این تعداد تکرار بهینه مدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیکی برابر ۶۵۳ تکرار با میانگین مربعات خطای ۰/۰۶ بود. تحلیل حساسیت سیگنال‌های اقلیمی در ساختار بهینه شبکه عصبی مصنوعی نشان داد که سیگنال‌های بزرگ مقیاس NINO₃₄ و PNA به ترتیب با داشتن میزان ۲۲/۴۶ و ۳/۳۵ درصد بیشترین و کمترین تأثیر را در پیش‌بینی خشکسالی هیدرولوژیک ایستگاه ونایی داشته‌اند.

نتایج کلی تحقیق نشان داد که مدل شبکه عصبی مصنوعی به علت داشتن خاصیت غیر خطی و نامعین نسبت به روش‌های کلاسیک از اهمیت بیشتری برخوردارند. البته، شایان ذکر است که

شبکه‌های عصبی در درون خود مدل‌های خطی را نیز شامل می‌شوند؛ یعنی به تناسب با روش‌های کلاسیک، بسیار جامع‌تر هستند.

به طور کلی، می‌توان اظهار داشت که مدل شبکه عصبی مصنوعی، مدلی قدرتمندی با توانمندی بالا است که می‌توان با دیدگاهی مثبت در پیش‌بینی مسایل اقلیم به آن نگرست؛ به خصوص آنجا که این شبکه قادر است قانون حاکم بر داده‌ها، حتی داده‌های مغشوش را استخراج نماید و این خصوصیت، برجسته‌ترین ویژگی این مدل در مقایسه با سایر مدل‌هاست و با استفاده از سیگنال‌های اقلیمی به طور قابل قبولی خشکسالی هیدرولوژیکی را برآورد نماید.

۲-۵ پیشنهادات

۱- جهت برنامه ریزی مدیریتی در منابع آب منطقه، نتایج پیش‌بینی‌ها ملاک تصمیم‌گیری‌ها قرار گیرند.

۲- ارتباط سیگنال‌های اقلیمی با دیگر مؤلفه‌های مهم هیدرولوژیک مانند پوشش برفی، رطوبت خاک... منطقه مورد بررسی قرار گیرد.

۳- مدل سازی در تحقیقات مشابه توسط مدل‌های ترکیبی برای حصول به نتایج بهتر لازم به نظر می‌رسد.

۴- پیشنهاد می‌گردد جهت بررسی تأثیر سیگنال‌های اقلیمی بر نوسانات بارش و جریان رودخانه از آنالیز طیفی نیز استفاده شود.

فهرست منابع

منابع

- احمدی م.، ابراهیم‌پور ج.، ۱۳۸۷: تخمین مقدار تغییر شکل در اطراف تونل و تأثیر نسبی پارامترهای ژئومکانیکی بر آن با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی. نشریه انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران. ۱(۱): ۶۱-۷۰.
- اسدی ا.ا.، مبین م.ح.، ملکی نژاد ح.، ۱۳۸۸: بررسی شاخص‌های اقلیمی در ایستگاه اصفهان با استفاده از شاخص جدید RDI، دومین همایش ملی اثرات خشکسالی و راهکارهای مدیریت آن، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان و ستاد حوادث غیر مترقبه استانداری اصفهان، ۲۰۰۱-۲۰۰۲: ۳۰-۲۴.
- اطلس اقلیمی لرستان، ۱۳۸۸: اداره کل هواشناسی استان لرستان، سازمان هواشناسی استان لرستان.
- انصافی مقدم ط.، ۱۳۸۶: ارزیابی چند شاخص خشکسالی اقلیمی و تعیین مناسب‌ترین شاخص در حوضه دریاچه نمک، فصلنامه علمی-پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۱۴(۲): ۲۸۸-۲۷۱.
- ایمانی، م.، ۱۳۹۰، اثرات خشکسالی بر نوسانات سطح آب زیرزمینی دشت بهاباد با استفاده از شاخص SPI و GRI، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد.
- بداق جمالی ج.، آسیایی م.، صمدی نقاب س.، جوانمرد س.، ۱۳۸۴: مدیریت ریسک خشکسالی، انتشارات سخن گستر، چاپ اول، ۳۱۰ ص.
- بنی‌مهد م.، یثربی س.، ۱۳۸۲: کاربرد شبکه عصبی مصنوعی در مهندسی ژئوتکنیک: مدل‌سازی، تحلیل، طراحی، فنی و مهندسی مدرس، ۱۴: ۱-۱۳.
- پیره، ع.ر و ا. فاتحی مرج.، ۱۳۹۰، بررسی میزان توان تأثیر گذاری سیگنال‌های بزرگ مقیاس اقلیمی بر بارش نواحی مختلف ایران. اولین کنفرانس خشکسالی و تغییر اقلیم. کرج
- جکسون آ.ب.و.، ۱۳۸۳: آشنایی با شبکه‌های عصبی، ترجمه دکتر محمود البرزی. چاپ دوم. موسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، ص ۸۷.
- رحمانی، ع.ر.، سدهی، م.، ۱۳۸۳: پیش آگاهی تغییرات سطح آب زیرزمینی دشت همدان بهار با مدل سری‌های زمان، آب و فاضلاب، ۲: ۱۵-۴۹.

زارع ایبانه، ح.، محبوبی، ع.ا.، ۱۳۸۳. بررسی وضعیت خشکسالی و روند آن در منطقه همدان بر اساس شاخص‌های آماری خشکسالی. مجله پژوهش و سازندگی در زراعت و باغبانی. ۶۴: ۷-۲.

سایت شرکت آب منطقه‌ای، ۱۳۸۹: www.isrw.ir

شفیع‌زاده، ف.، ۱۳۸۹: گروه‌بندی و تعیین روند تغییرات زمانی خشکسالی در ایران با استفاده از نمایه RDI، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد، ۱۴۳ ص.

فاتحی مرج، احمد. ۱۳۸۲. ارزیابی تغذیه مصنوعی به وسیله پخش سیلاب با استفاده از مدل ریاضی در دشت آب باریک بم (استان کرمان). گزارش نهایی طرح تحقیقاتی، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، ۱۳۶ص.

فاست ل، ۱۳۸۸: مبانی شبکه های عصبی، ترجمه: هادی ویسی، کبری مفاخری، سعید باقری شورکی، چاپ اول، انتشارات نص، ص ۴۴۸.

فرج زاده اصل، م.، ۱۳۷۸: تحلیل و پیش بینی خشکسالی در ایران، رساله دکتری اقلیم شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۳.

قربانی م.ع.، فرسادی زاده د.، جهانگیری ح.، چابک‌پور ج.، فتحی پ.، ۱۳۸۸: نرم‌افزارهای مهندسی آب، نوپردازان، ۲:۲۶۱ ص.

کارآموز و همکاران، ۱۳۸۵، پیش بینی بلند مدت بارش با استفاده از سیگنال‌های هواشناسی، کاربرد شبکه های عصبی مصنوعی در جنوب ایران، دومین کنفرانس مدیریت منابع آب. کارآموز، م و عراقی نژاد، ش. ۱۳۸۴. هیدرولوژی پیشرفته. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر. ۴۶۴ ص.

لشنی‌زند م.، خرمیان ن.، ۱۳۸۰: پهنه‌بندی‌های خشکسالی‌های اقلیمی در استان لرستان با به- کارگیری شاخص‌های آماری، مجموعه مقالات اولین کنفرانس ملی بررسی راه‌کارهای مقابله با بحران آب، جلد سوم، صفحه ۱۰۹.

محمدی ی.، فتحی پ.، نجفی نژاد ع.، نوران.، ۱۳۸۷: تخمین دبی متوسط سالانه با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۵(۴): ۲۶۸-۲۵۸.

مرادی، ح.ر.، رجبی، م.، فرج زاده، م.، ۱۳۸۶. تحلیل روند و خصوصیات مکانی شدت خشکسالی- های استان فارس. فصلنامه علمی پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان، ۱۴(۱) ۹۷-۱۰۹.

- مسعودیان س.، ۱۳۸۵: تحلیل روند خشکسالی‌های اقلیمی حوضه‌ای آبی ایران، سازمان تحقیقات ایران: ۱-۱۳.
- ملکی نژاد، ح.، سلیمانی مطلق، م.، ۱۳۹۰، بررسی شدت خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیک در حوضه چغلوندی، مجله پژوهش آب ایران، ۹(۵): ۶۱-۷۲.
- منهاج م.ب.، ۱۳۸۱: مبانی شبکه‌های عصبی، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر(پلی تکنیک تهران)، جلد اول: چاپ دوم، ۷۱۵ ص
- یاراحمدی د.، عزیزی ق.، ۱۳۸۶: تحلیل چند متغیره ارتباط میزان بارش فصلی ایران و شاخص‌های اقلیمی، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۶۲، صص ۱۶۱-۱۷۴.
- American Meteorological Society, ۲۰۰۴, Meteorological drought policy statement, Bull. Amer. Meteor. Soc., ۷۸, ۸۴۷-۸۹۴.
- Beran M.A., Rodier J.A., ۱۹۸۵: Hydrological aspects of drought, UNESCO-WMO studies and report in hydrology, ۳۹: ۱۴۹ pp.
- Bhalme, H.N., Mooley, D.A., ۱۹۸۰, Large-scale drought floods and monsoon circulation. Mon. Weather Rev, ۱۰۸(۸): ۱۱۹۷-۱۲۱۱.
- Bradbury JA. Keim BD. and Wake CP. ۲۰۰۲. east coast trough indices at ۵۰۰ hpa and New England winter climate variability. Journal of Climate ۱۵:۳۵۰۹-۳۵۱۷.
- Davis, M., ۲۰۰۱: Late Victorian Holocausts: El Nino Famines and the making of the Third World, Verso Press, p.۲۴۴
- Dracup, J. A., K. S. Lee. and E. G. Jr. Paulson. ۱۹۸۰. On the definition of droughts. Water Resources Research ۱۶(۲): ۲۹۷-۳۰۲.
- Edwards, D.C. and T.B. Mckee. ۱۹۹۷. Characteristics of ۲۰th century drought in the university. Colorad.
- Glantz.h, ۲۰۰۲, La Nina and Its Impacts, United Nations University Press
- Goltsev V., Zaharieva I., Chernev P., Kouzmanova M., Kalaji H. M., Yordanov I., Krasteva V., Alexandrov V., Stefanov D., Allakhverdiev S.I., Strasser R.J., ۲۰۱۲: Drought-induced modifications of photosynthetic electron transport in intact leaves: Analysis and use of neural networks as a tool for a rapid non-invasive estimation, Biochimica et Biophysica Acta ۱۸۱۷: ۱۴۹۰-۱۴۹۸.

- Gomez H. and Kavzoglu T., 2005: Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basin, Venezuela, *Engineering Geology*, Vol, 78, No, 1-2. pp :11-27.
- Hamlet.A.Lettenmaier.D.P.1999.Columbia River Streamflow Forecasting Based on ENSO and PDO Climate Signals.*Journal of Water Resources Planning and Management*.Vol.125.No.6.pp.333-341
- Hisdal, H., Tallaksen, L.M., 2003, Estimation of Regional Meteorological and Hydrological Drought Characteristics: A Case Study for Denmark, *Journal of Hydrology*, 281(3): 230-247. doi:10.1016/S0022-1494(03)00233-6.
- Iglesias A., Garrote L., Cancelliere A., Cubillo F., Wilhite D.A., 2009: Drought Management and Policy Development in the Mediterranean, *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, Springer: 320 pp.
- Keyantash, J., Dracup, J.A., 2002. The quantification of drought: an evaluation of drought indices. *The drought monitor. Bull. Am. Meteorol. Soc.* 83 (8), 1167-1180.
- Kim D.W., Byun H.R., Choi K.S., 2009: Evaluation, modification, and application of the Effective Drought Index to 200-Year drought climatology of Seoul, Korea, *Journal of Hydrology*, (378): 1-12.
- Kresic, N. 2009. *Groundwater Resources, Sustainability, Management, and Restoration*. McGraw-Hill Inc, 1st Edition, 860pp.
- Lee S. 2007: Application and verification of fuzzy algebraic operators to landslide susceptibility mapping, *Environmental Geology*, 52, 615-623.
- Lee S., Ryu J. H., Lee M. J. and Won J. S., 2006 :The Application of artificial neural networks to landslide susceptibility mapping at Janghung, Korea, *Mathematical Geology*, Vol, 38, No, 2. pp :199-220 .
- Mendicino G, Senatore A and Versace P, 2008. A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. *Journal of Hydrology*, 357: 282-30.
- Mishra A.K., Singh V.P., 2011: Drought modeling – A review, *Journal of Hydrology*, (403): 157-175.
- Philander, G. 1998: Learning from El Nino. *Weather* 53, 270-8.
- Rivera J.C.O., 2008: Prospecting droughts with stochastic artificial neural networks, *Journal of Hydrology* (352): 174- 180.

- Smith, K., ۲۰۰۰; Environmental hazards, assessment risk and reduction disasters, Routledge, London.
- Srinivasulu, S., Jain, A.: A comparative analysis of training methods for artificial neural network rainfall-runoff models, Applied Soft Computing, Volume ۶, Issue ۳, March ۲۰۰۶, Pages ۲۹۵-۳۰۶
- Trenberth, K. E., ۱۹۹۷: The definition of El Niño. Bull. Amer. Meteor. Soc., ۷۸, ۲۷۷۱-۲۷۷۷
- Trenberth, K. E., and D. P. Stepaniak, ۲۰۰۱: Indices of El Niño evolution
- Tsakiris, G. and Vangelis, H. ۲۰۰۵. "Establishing a drought index incorporating evapotranspiration", European water, ۹-۱۰: ۳-۱۱.
- Tsakiris, G., D, Pangalou. and H, Vangelis. ۲۰۰۶. Regional Drought Assessment Based on the Reconnaissance Drought Index (RDI), Water Resources Management, ۲۱: ۸۲۱-۸۳۳.
- Van Lanen, H.A.J. ۲۰۰۵. On the definition of groundwater drought. In: Abstract of European geosciences union general assembly, Vienna, ۲۴-۲۹ April ۲۰۰۵.
- Wilhite, D.A., Glantz, M.H., ۱۹۸۵. Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. Water Int. ۱۰, ۱۱۱-۱۲۰.
- Yılmaz, I., Evaluation of relationship between exhaust gas temperature and operational parameters in CFM۵۶-۷B engines, Proc. IMechE, Part G: J.Aerospace Engineering, ۲۲۳, ۴۳۳-۴۴۰, ۲۰۰۹.

پیوست

واژگان تخصصی مرتبط با پژوهش

ADPC	Asian Disaster Preparedness Center	مرکز آمادگی بلاای آسیا
AH	AZOR HIGH PRESSURE	پرفشار آزرز
AMJ	APRIL, MAY JUNE	آوریل، می، ژوئن
AO	ARCTIC OCSILLIATION	نوسان قطبی
ARCs	Applied Research Centers	مراکز تحقیقات کاربردی
BOM	Australia Bureau of Meteorology	سازمان هواشناسی استرالیا

CDC	Climate Diagnostics Center	مرکز تشخیص اقلیمی امریکا
CIRES	Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences	موسسه همکاری برای تحقیق در علوم محیطی
CLIPS	Climate Information and Prediction Services Project	پروژه اطلاعات آب و هوا شناسی و خدمات پیش بینی
CLIVAR	Climate Variability and Predictability Programme	برنامه پیش بینی و تغییر پذیری اقلیمی
CMI	Caribbean Meteorological Institute	موسسه هواشناسی کارائیب
COLA	Center for Ocean, Land, and Atmosphere Studies	مرکز مطالعات اقیانوس - خشکی - جو
CPC	Climate Prediction Center	مرکز پیش بینی اقلیمی (نوآ)
DMC	Drought Monitoring Center	مرکز دیده بانی خشکسالی
EA	East Atlantic	اقیانوس اطلس شرقی
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts	مرکز اروپایی برای برای پیش بینی های میان مدت هوا
ENRICH	European Network for Research in Global Change	شبکه اروپایی برای تحقیق درباره تغییر اقلیم
ENSO	El Nino-Southern Oscillation	الینو نوسان جنوبی
EP	East Pacific	اقیانوس آرام شرقی
ERRP	ENSO Rapid Response Project	پروژه واکنش سریع به انسو
GHA	Greater Horn of Africa	منطقه شاخ بزرگ افریقا
GOALS	Global-Oceanic-Atmospheric-Land system	سیستم جهانی اقیانوس، اتمسفر، زمین
GPSS	Global Precipitation Climatology Center	مرکز اقلیم شناسی بارش جهانی
I T C Z	Inter- Tropical Convergence Zone	منطقه همگرایی درون حاره ای

ICTP	International Center for Theoretical Physics	مرکز بین المللی فیزیک نظری
IL	Iceland low pressure	مرکز کم فشار ایسلند
IRI	International Research Institute for Climate Prediction	موسسه بین المللی تحقیقات جهت پیش بینی اقلیم
IRRI	International Rice Research Institute	موسسه بین المللی تحقیقات برنج
JAS	July, August ,September	ژوئیه، اگوست، سپتامبر
JFM	January ,February, March	ژانویه، فوریه، مارس،
K M D	Kenya Meteorological Department	موسسه هواشناسی کنیا
KW	Kelvin wave	امواج کلوین
M P I -	Max Planck Institute	موسسه ماکس پلانگ
MEI	Multivariate ENSO Index	شاخص چند متغیره انسو
MSLP	Mean Sea Level Pressure	میانگین فشار سطح دریا
NAO	North Atlantic Oscillation	نوسان اطلس شمالی
NCAR	National Center for Atmospheric Research	مرکز ملی برای تحقیقات جوی
NCEP	National Centers for Environmental Prediction	مراکز ملی برای پیش بینی محیط
NINO _{۳,۴}		شاخص نینو ۳/۴
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration	اداره کل ملی اتمسفر و اقیانوس
NOAA - CDC	NOAA's Climate Diagnostics Center	مرکز تشخیص اقلیمی نوآ
NOAA - CPC	NOAA's Climate Prediction Center	مرکز پیش بینی اقلیمی نوآ
NP	North Pacific	اقیانوس آرام شمالی
NVA	Negative Vorticity Advection	وزش تاوایی منفی
NWS	NOAA's National Weather Service	خدمات رسانی ملی هوا نوآ

NWS - PR	NOAA's National Weather Service Pacific Region	خدمات رسانی ملی هوا برای منطقه اقیانوس آرام نوآ
OG P	NOAA's Office of Global Programs	اداره برنامه های جهانی نوآ
OND	October- November- December	اکتبر، نوامبر، دسامبر
PDO	Pacific Decadal Oscillation	نوسان دهه ای اقیانوس آرام
PEAC	Pacific ENSO Application Center	مرکز کاربردی انسو در اقیانوس آرام
PFJ	Polar Front Jet Stream	رودباد جبهه قطبی
PNA	Pacific-North American	الگوی آرام-آمریکای شمالی
PNNL	Pacific Northwest National Laboratory	آزمایشگاه ملی شمال غرب اقیانوس آرام
PNW	Pacific Northwest	شمال غرب اقیانوس آرام
POL/EUR	Polar/Eurasian	الگوی قطبی-اوراسیا
PVA	Positive Vorticity Advection	وزش تاوایی مثبت
SADC	Southern Africa Development Community	کمیته توسعه آفریقای جنوبی
SCPP	Seasonal-to-Interannual Climate Prediction Program	برنامه پیش بینی اقلیمی سالانه و فصلی
SLP	Sea Level Pressure	فشار سطح دریا
SO	Southern Oscillation	نوسان جنوبی
SOI	Southern Oscillation Index	شاخص نوسان جنوبی
SPCZ	South Pacific Convergences Zone	منطقه همگرایی آرام جنوبی
SPI	Standardized Precipitation Index	شاخص استاندارد شده بارش
SPREP	South Pacific Regional Environmental Programme	برنامه محیطی منطقه اقیانوس آرام جنوبی
SSTs	Sea-Surface Temperatures	دمای سطح دریا
STHP	Subtropical High Pressure	پرفشار جنب حاره
STJ	Subtropical Jet Stream	رودباد جنب حاره ای

SVS	Standardized Verification System	سیستم استاندارد شده تحقیق
TAO	Tropical Atmosphere-Ocean	اقیانوس و اتمسفر حاره ای
TNI	Trans-Nino INDEX	شاخص انتقالی انسو
TOGA	Tropical Oceans-Global Atmosphere Programme	برنامه جوی جهانی-اقیانوسی حاره ای
UK-DFID	United Kingdom-Department for International Development	بریتانیای کبیر-بخش توسعه بین المللی
UKMO	United Kingdom Meteorological Office	اداره هواشناسی بریتانیای کبیر
UNCED	United Nations Conference on Environment and Development	کنفرانس سازمان ملل متحد در محیط و توسعه
UNDHA	United Nations Department for Humanitarian Affairs	بخش سازمان ملل متحد در امور انسان دوستانه
UNDP	United Nations Development Programme	برنامه توسعه سازمان ملل متحد
USFS	U.S. Forest Service	خدمات جنگل در ایالات متحده
USGS	U.S. Geological Survey	بررسی زمین شناسی ایالات متحده
WCRP	World Climate Research Programme	برنامه تحقیقات آب و هوای جهانی
WHO	World Health Organization	سازمان جهانی بهداشت
WMO	World Meteorological Organization	سازمان هواشناسی جهانی
ZACP	Zonal Atmospheric Circulation Pattern	الگوی گردش مداری جوی
ZW	Zonal Winds	بادهای مداری