

فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، سال ۳۰، شماره ۱، بهار ۱۳۹۴، شماره پیاپی ۱۱۶

B. Sobhani, Ph.D  
A. Goldoost

بهروز سبحانی، استادیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی  
اکبر گل دوست، دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی

E-mail: goldoostakbar@uma.ac.ir

شماره مقاله: ۱۰۰۵ صص: ۱۰۲-۱۳۵  
وصول: ۹۳/۳/۱۳ پذیرش: ۹۳/۱۱/۲۷

## پایش خشکسالی و ارزیابی امکان پیش‌بینی آن در استان اردبیل با استفاده از شاخص SPI و مدل ANFIS

### چکیده

خشکسالی به عنوان پدیده‌ای آب و هوایی به شدت بر همه جوانب فعالیت‌های بشری تأثیر می‌گذارد. با این حال، مطالعات انجام شده در رابطه با این پدیده بر اساس روش‌های مناسب بسیار کم است. بررسی ویژگی‌های خشکسالی و پیش‌بینی آن می‌تواند در کاهش خسارات حاصل از آن مؤثر باشد. از این رو، در این تحقیق به بررسی خشکسالی و ارزیابی امکان پیش‌بینی آن برای ایستگاه‌هایی از استان اردبیل پرداخته می‌شود. داده‌های مورد استفاده این تحقیق، مقدار بارندگی به صورت ماهانه در دوره آماری ۲۳ ساله است. شاخص بارندگی استاندارد شده در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶ و ۱۲ ماهه برای بررسی ویژگی خشکسالی و مدل سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی برای پیش‌بینی خشکسالی استفاده می‌شود. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، شدیدترین خشکسالی در استان اردبیل در ایستگاه شهرستان اردبیل در مقیاس زمانی ۶ ماهه، در ماه دسامبر سال ۲۰۱۰ با مقدار شاخص  $-2/47$  رخ داده است. در مجموع، بیشترین درصد وقوع خشکسالی در ایستگاه پارس‌آباد و کمترین آن در ایستگاه خلخال مشاهده می‌شود. به جز ایستگاه پارس‌آباد در مقیاس زمانی ۳ و ۶ ماهه، روند خطی شاخص SPI کاهشی است؛ به عبارتی، خشکسالی روند افزایشی دارد. بر اساس تحلیل خوشه‌ای انجام شده ایستگاه خلخال و اردبیل در هر چهار مقیاس زمانی در یک گروه قرار گرفته‌اند. بنابراین، ویژگی خشکسالی در آنها مشابه هم است و ایستگاه پارس‌آباد در گروه دیگر قرار دارد. نتایج حاصل از پیش‌بینی شاخص با مدل انفیس نشان داد که در اکثر موارد خطای پیش‌بینی قابل توجه بوده و مدل در این پیش‌بینی کارایی قابل قبولی ندارد.

**واژه‌های کلیدی:** خشکسالی، شاخص SPI، پیش‌بینی، ANFIS، استان اردبیل

### مقدمه

نوسان بارندگی یکی از مهمترین مسائل آب و هوای ایران است که آثار زیانبار آن در تمام عرصه‌های اجتماعی، اقتصادی و حتی سیاسی- امنیتی به نحوی منعکس می‌شود. در میان مسائل ناشی از بارندگی، خشکسالی هم از نظر شدت و فراوانی وقوع و هم از نظر وسعت فضایی و میزان خساراتی که به بار می‌آورد، اهمیت بیشتری دارد (زاهدی و قویدل رحیمی، ۱۳۸۶: ۲۱). از این رو، پدیده خشکسالی به عنوان یکی از مهم‌ترین مسائل محیطی از ابعاد مختلفی مورد توجه

محققان قرار گرفته است که از جمله آنها می‌توان به مطالعه روند خشکسالی با استفاده از شاخص SPI<sup>۱</sup> و مدل زنجیره مارکوف در منطقه آلتوجو<sup>۲</sup> در جنوب پرتغال توسط پایلو و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۰۵)، پیش‌بینی خشکسالی حوضه رودخانه کانس آباتی<sup>۴</sup> با استفاده از مدل آریما، ساریما و شبکه عصبی مصنوعی توسط میشر و دسای<sup>۵</sup> (۲۰۰۶)، بررسی اثرات توزیع فضایی و بسامد خشکسالی در منابع آب‌های زیرزمینی انگلستان توسط پترز و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۰۶)، بررسی روند خشکسالی در منطقه آلتوجو در جنوب پرتغال توسط مریرا و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۰۶) اشاره نمود. همچنین، کالانسا<sup>۸</sup> (۲۰۰۷)، تغییرات آب‌وهوا و رخدادهای خشکسالی برای سال‌های ۲۰۷۱ تا ۲۱۰۰ را بر اساس سناریوهای تغییر آب و هوا بررسی نموده، اظهار داشت، خشکسالی در دوره پیش‌بینی شده در منطقه آلپ تا ۵۰ درصد افزایش خواهد یافت. هانگ و چوی<sup>۹</sup> (۲۰۰۸)، در تایوان شمالی سعی در شبیه‌سازی روند خشکسالی و ارائه سیستم هشدار بر اساس رابطه آن با میزان تغییرات آب مخازن نمودند و نشان دادند که خشکسالی با این شیوه با اطمینان حدود ۷۷ درصد قابل روندیابی است. ماریرا و همکاران (۲۰۰۸)، در منطقه آلگارو<sup>۱۰</sup> جنوبی در کشور پرتغال، به پیش‌بینی شدت خشکسالی پرداختند و توانایی بالای مدل را در این پیش‌بینی تأیید نمودند. لوگان و همکاران<sup>۱۱</sup> (۲۰۱۰)، تغییرات بارندگی حوضه رودخانه کانزاس را از سال ۱۹۰۰ تا ۲۰۰۶ در ارتباط با خشکسالی مطالعه نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد روند شرایط مرطوب افزایشی بوده و تنها در غرب و شرق منطقه روند و تعداد ماه‌های خشک رو به افزایش است. عزیزی (۱۳۸۲)، به بررسی ارتباط خشکسالی و منابع آب زیرزمینی دشت قزوین پرداخت. وی به این نتیجه رسید که خشکسالی هیدرولوژیک این منطقه با دو الی سه ماه تأخیر نسبت به خشکسالی آب و هوای رخ می‌دهد. خزایی و تلوری (۱۳۸۲)، در حوضه رودخانه قره‌سو توزیع فراوانی خشکسالی هیدرولوژیک را تحلیل نموده و به این نتیجه رسیدند که دبی جریان حداقل روزانه برای تداوم‌های ۱ الی ۳۰ روزه در ایستگاه‌های مورد مطالعه تغییرات چندانی نسبت به هم ندارند. رجبی (۱۳۸۴)، با استفاده از شاخص SPI مشخصات خشکسالی استان فارس را بررسی کرده، به این نتیجه رسید که شدیدترین خشکسالی مربوط به ایستگاه گوزون، بیشترین تداوم خشکسالی در ایستگاه پل‌خان و بیشترین فراوانی خشکسالی در ایستگاه جهرم و دراشاهی رخ داده است. نوحی و عسگری (۱۳۸۴)، دوره‌های برگشت بارندگی سالانه را در منطقه قم محاسبه کردند و اقدام به محاسبه دهک‌های بارندگی در ماه‌های مختلف سال نمودند و مشخص شد که از مجموع یازده ایستگاه مورد مطالعه به غیر از قم، آران و باغیک، بقیه ایستگاه‌ها از ۱ تا ۳ سال خشکسالی بسیار شدید را تجربه کرده‌اند. انصاری و همکاران (۱۳۸۹)، با استفاده از داده‌های بارش و تبخیر و تعرق در ایستگاه مشهد به پایش خشکسالی پرداخته، اظهار داشتند که مداوم‌ترین و شدیدترین خشکسالی در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ میلادی رخ داده است.

1 - Standardized Precipitation Index (SPI)

2- Alentejo

3- Paulo & et all

4- Kansabati

5- Mishra & Desai

6- Peters & et all

7- Moreira & et all

8 - Calanca

9 - Hanhg and Joy

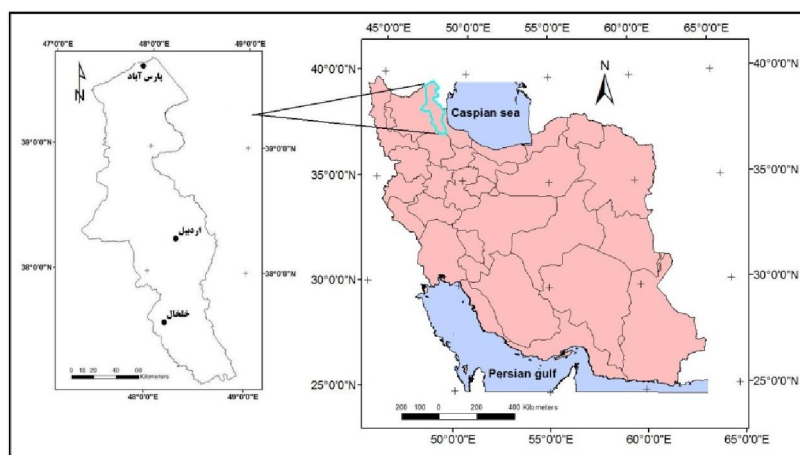
10 - Algarve

11 - Logan & et all

مطالعه سوابق پژوهش نشان می‌دهد که پدیده خشکسالی در مناطق مختلف جهان با شرایط متفاوتی رخ داده است. در زمان‌های مختلف خشکسالی در ایران یکی از مسائلی بوده که باعث بروز خسارات و مشکلاتی شده است. این پدیده در ایران به طور کامل شناسایی نشده و هنوز نواحی مختلف کشور؛ از جمله استان اردبیل نیازمند مطالعه و بررسی است. شناخت و پیش‌بینی موفق این رخداد می‌تواند کمک زیادی به بهبود زندگی این مناطق نماید و در مقابله با این پدیده و کاهش خسارات حاصل از آن کارساز باشد. با توجه به تبعاتی که وقوع خشکسالی می‌تواند داشته باشد و لزوم شناخت و پیش‌بینی این پدیده برای مدیریت آن، در این پژوهش سعی شده است ویژگی خشکسالی در استان اردبیل از ابعاد مختلف بررسی و امکان پیش‌بینی آن ارزیابی شود.

### داده‌ها و روش پژوهش

روش به کار رفته در این پژوهش، تلفیقی از مطالعات کتابخانه‌ای و تجزیه و تحلیل‌های آماری است. داده‌های مورد استفاده مقدار بارندگی به صورت ماهانه در ایستگاه‌هایی از استان اردبیل است که از سازمان هواشناسی شهرستان اردبیل اخذ گردید. در شکل (۱) موقعیت منطقه و ایستگاه‌های مورد مطالعه و در جدول (۱) مشخصات ایستگاه‌ها و طول دوره آماری داده‌های مورد استفاده ذکر شده است.



شکل (۱) موقعیت منطقه مورد مطالعه

جدول (۱) موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه

ایستگاه	عرض جغرافیایی (N)	طول جغرافیایی (E)	ارتفاع از سطح دریا (m)	طول دوره آماری
پارس آباد	۳۹/۳۹	۴۷/۵۵	۳۱/۹	۱۹۸۸ - ۲۰۱۰
اردبیل	۳۸/۱۵	۴۸/۱۷	۱۳۳۲	۱۹۸۸ - ۲۰۱۰
خلخال	۳۷/۳۸	۴۸/۳۱	۱۷۹۶	۱۹۸۸ - ۲۰۱۰

برای بررسی ویژگی خشکسالی استان اردبیل؛ از جمله شدت، تداوم زمانی، روند و فراوانی وقوع، شاخص بارندگی استاندارد شده (SPI) در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶ و ۱۲ ماهه استفاده شد. در شاخص SPI، خشکسالی برای مقیاس ماهانه

به این صورت تعریف می‌شود: دوره‌ای که SPI دائماً منفی باشد و به مقدار ۱- و کمتر برسد (در شکل‌های ۳ تا ۸ خط پیکان این مرز را نشان می‌دهد) و زمانی پایان می‌پذیرد که SPI مثبت شود. علت اینکه مقدار شاخص در بازه ۰ تا ۰/۹۹ (خشکسالی ملایم) در شروع خشکسالی محاسبه نمی‌شود، می‌تواند ورود رطوبت از دوره ترسالی گذشته باشد؛ اما در پایان خشکسالی این مقدار نشان‌دهنده خشکسالی خفیف است؛ چون ذخیره رطوبت به پایان رسیده و این مقدار کمبود رطوبت را بعد از دوره خشکسالی نشان می‌دهد (آسیایی، ۱۳۸۵: ۵۴). پس از محاسبه شاخص، شدت خشکسالی بر اساس جدول (۲) بررسی می‌شود.

جدول ۲) طبقه‌بندی شدت خشکسالی و ترسالی در شاخص SPI

مقادیر شاخص SPI	طبقات خشکسالی
$\geq 2$	ترسالی خیلی شدید
۱/۹۹ تا ۱/۵	ترسالی شدید
۱ تا ۱/۴۹	ترسالی متوسط
۰/۹۹ تا ۰/۵	ترسالی ملایم
-۰/۴۹ تا ۰/۴۹	نرمال
-۰/۵ تا -۰/۹۹	خشکسالی ملایم
-۱ تا -۱/۴۹	خشکسالی متوسط
-۱/۵۰ تا -۱/۹۹	خشکسالی شدید
$\leq -2$	خشکسالی خیلی شدید

مأخذ: سیگاروردی و همکاران، ۱۳۸۸: ۴۷.

به منظور ارزیابی امکان پیش‌بینی خشکسالی، سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی<sup>۱</sup> به کار گرفته شد. ساختارهای مختلفی برای پیاده‌سازی یک سیستم فازی توسط شبکه‌های عصبی پیشنهاد شده است که یکی از پر قدرت‌ترین آنها، ساختار موسوم به سیستم فازی تطبیق‌پذیر مبتنی بر شبکه‌های عصبی است. ترکیب سیستم‌های فازی که مبتنی بر قواعد منطقی بوده و روش شبکه‌های عصبی مصنوعی که توان استخراج دانش از اطلاعات عددی را دارند، به ارائه سیستم استنتاج تطبیقی عصبی منجر شده است<sup>۲</sup>.

برای پیش‌بینی خشکسالی با مدل انفیس، ابتدا داده‌های SPI برای ورود به مدل در هر ایستگاه به صورت سری‌هایی به طول ۲۷۶ ماه در هر مقیاس زمانی تنظیم شدند (۱۲ ماه سال در ۲۳ سال دوره آماری، برابر ۲۷۶ ماه). سری‌های زمانی مربوطه در سه ستون ایجاد شد. ستون اول سال‌های مربوط به سری زمانی، ستون دوم ماه‌هایی که سری زمانی در آن مشاهده شده و ستون سوم مربوط به مقادیر سری‌هاست.

در سری‌های زمانی، از یک سری مقادیر مشخص در زمان معین  $t$  برای پیشگویی برخی نقاط در آینده  $(t+p)$  استفاده می‌شود. روش استاندارد برای انجام این نوع پیشگویی، اعمال یک نگاشت از  $D$  نمونه داده که در بازه‌های  $\Delta$  واحدی در

1 - Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)

۲- برای آشنایی بیشتر با روش سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی می‌توان از منبع شماره ۱۰ استفاده نمود.

زمان جمع‌آوری شده‌اند  $x(t)$ ,  $x(t-\Delta)$ , ...,  $x(t-d-1-\Delta)$  به مقدار پیش‌بینی شده  $x(t+p)$  است. مطابق پیکربندی مرسوم در روش سری‌های زمانی نامنظم  $D = 4$  و  $\Delta = P = 6$  در نظر گرفته می‌شود. به ازای هر  $t$  داده‌های آموزشی برای انفیس یک بردار چهار عضوی به فرم رابطه ۱ است (کیا، ۱۳۸۹: ۲۵۹):

$$w(t) = [x(t-18) \ x(t-12) \ x(t-6) \ x(t)] \quad (1)$$

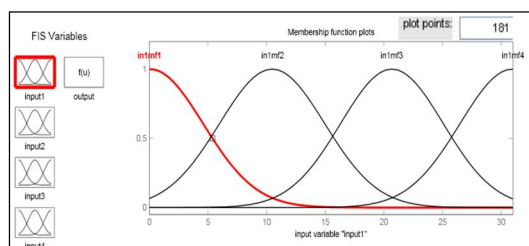
خروجی متناظر با بردار بالا با پیش‌گویی مقدار نقطه در  $t+6$  است:

$$S(t) = x(t+6) \quad (2)$$

به ازای هر  $t$  در محدوده داده‌های پیش‌بینی شونده، ساختار ورودی/خروجی آموزشی شامل بردار چهار عضوی ورودی  $W$  و خروجی  $S$  است. داده‌های SPI باید به صورت این فرم چهار عضوی تنظیم شده و آماده انجام عملیات بعدی در مدل شوند.

از آنجا که پیش‌بینی شاخص در مدل بر اساس ویژگی داده‌ها در گذشته انجام خواهد شد، باید بخشی از داده‌ها به آموزش و بخشی هم به اعتبارسنجی مدل اختصاص یابد. گرچه اجماع کلی در مورد چگونگی تقسیم داده‌ها برای آموزش و آزمایش الگوهای عصبی وجود ندارد؛ اما اکثر مطالعات بخش عمده داده‌ها (به طور معمول ۷۰، ۸۰ یا ۹۰ درصد) را به آموزش و باقی مانده‌ی داده‌ها را به آزمون الگو اختصاص می‌دهند. در این مطالعه از ۷۰ درصد داده‌ها به عنوان داده‌های آموزشی و از ۳۰ درصد آنها به عنوان داده‌های اعتبارسنجی استفاده شد.

قبل از شروع مدل آموزش سیستم استنتاج فازی باید ساختار اولیه آن تعیین شود. با آزمون ترکیبات مختلفی از معماری مدل، حالت بهینه با توجه به ضریب همبستگی و مقادیر خطای حاصله به دست می‌آید. برای آموزش سیستم عصبی-فازی دو روش گسسته‌سازی شبکه‌ای<sup>۱</sup> و خوشه‌بندی جزئی<sup>۲</sup> وجود دارد. تفاوت عمده این دو روش در چگونگی تعیین تابع عضویت فازی است. در روش جداسازی شبکه‌ای، نوع و تعداد تابع عضویت بردار اطلاعات ورودی توسط کاربر تعیین می‌شود و در روش خوشه‌بندی جزئی نوع تابع عضویت با توجه به خصوصیات بردار اطلاعات ورودی و دسته‌بندی‌های موجود در آنها توسط مدل تعیین می‌گردد (کوهی و همکاران، ۱۳۸۹: ۹۹). در این تحقیق با استفاده از روش گسسته‌سازی شبکه‌ای، نوع و تعداد توابع عضویت ورودی و خروجی مشخص شده و پس از آزمون حالت‌های مختلف ساختار، چهار تابع عضویت<sup>۳</sup> به شکل قوسی<sup>۴</sup> انتخاب شد (شکل ۲).



شکل ۲) تعداد و شکل توابع عضویت ساختار مدل انتخاب شده

- 1 - Grid Partitioning
- 2 - Sub-Clustering
- 3- Number of MFs
- 4 - gauss

پس از تعیین ساختار، مدل آموزش داده می‌شود. برای آموزش ساختار انفیس روش‌های مختلفی وجود دارد: یکی از این روش‌ها، روش هیبرید<sup>۱</sup> است. این روش از روش‌های بهینه‌سازی برای آموزش پارامترهای تابع عضویت بوده و ترکیبی از روش حداقل مربعات و روش کاهش شیب پس‌انتشار است (کیا، ۱۳۸۹: ۲۵۹). در آموزش مدل، تعداد دوره‌های آموزش<sup>۲</sup> و خطای مطلوب<sup>۳</sup> تعیین می‌شود. در این پژوهش مقدار خطای مطلوب صفر و تعداد دوره‌های آموزش ۱۵۰ در نظر گرفته شد. برای ارزیابی دقت مدل از معیارهایی به شرح جدول (۳) استفاده شد.

جدول (۳) معیارهای ارزیابی کارایی مدل

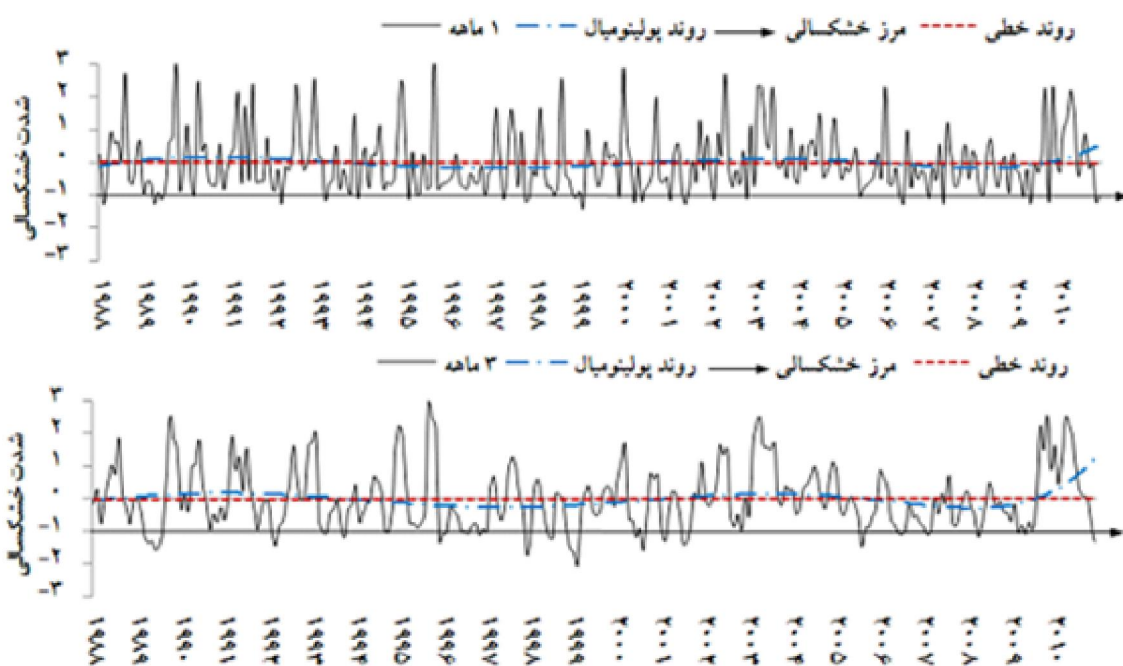
فرمول	معیار
$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (o_i - e_i)^2}{n}}$	جذر میانگین مربعات خطا
$MAD = \frac{\sum  o_i - e_i }{n}$	میانگین قدر مطلق انحرافات

در این روابط  $o_i$  و  $e_i$  به ترتیب مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده در زمان  $i$ ، و  $n$  تعداد مشاهدات است.

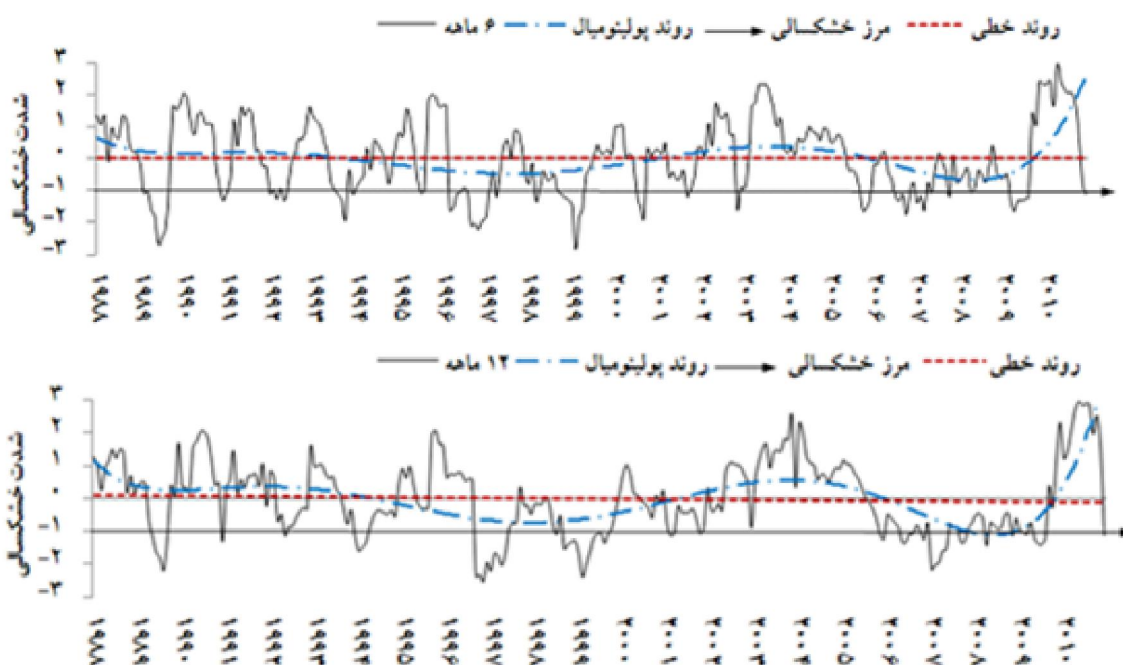
## یافته‌های پژوهش

### پایش خشکسالی به تفکیک ایستگاه‌ها

شکل‌های (۳ و ۴) برای پایش و بررسی خشکسالی در ایستگاه سینوپیتیک پارس آباد ترسیم شده‌اند. طبق تعریفی که از خشکسالی در شاخص SPI ارائه شده است، در ایستگاه پارس آباد در مقیاس زمانی یک ماهه، ۳۰ ماه از ۲۷۶ ماه مورد مطالعه در شرایط خشکسالی بوده است. همه این ماه‌های خشک در طبقه خشکسالی متوسط قرار دارند. شدیدترین خشکسالی در این مقیاس با مقدار ۱/۳۷- در دسامبر سال ۱۹۹۸ رخ داده است. متوسط بارندگی این ماه در دوره آماری این پژوهش برای مقیاس زمانی یک ماهه، ۱۹/۴ میلی‌متر است که در دسامبر سال ۱۹۹۸ به ۱/۱ میلی‌متر رسیده است. در مقیاس زمانی ۳ ماهه ۳۷ ماه خشکسالی رخ داده است (در حدود ۱۲ دوره خشکسالی). بادوام‌ترین آن در سال ۱۹۸۹ از ماه مارس تا جولای، به مدت پنج ماه طول کشیده است. شدیدترین خشکسالی در ماه فوریه سال ۱۹۹۹، با مقدار ۲/۰۲- اتفاق افتاده است. در مقیاس زمانی ۶ ماهه، ۶۴ ماه خشکسالی مشاهده می‌شود که بادوام‌ترین آن در سال ۱۹۸۹ از ماه فوریه تا آگوست به مدت ۷ ماه است. در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه، ۶۱ ماه در شرایط خشکسالی بوده است که شدیدترین مورد آن در ماه سپتامبر سال ۱۹۹۶ با مقدار ۲/۳۸- است.

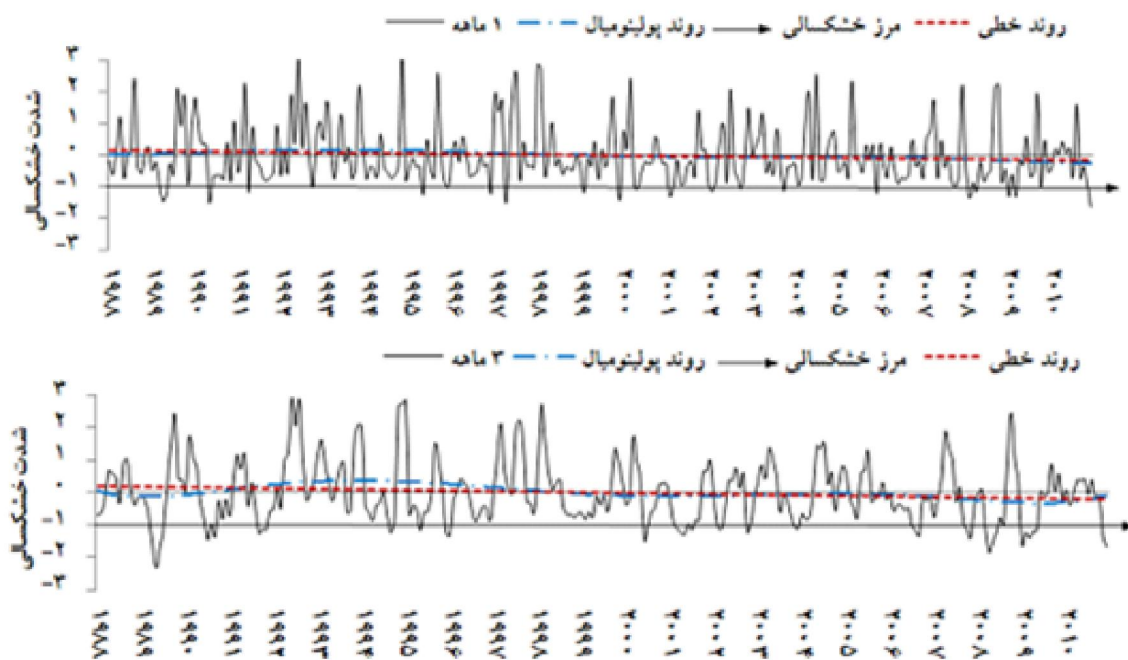


شکل ۳) مدل نوسانی و روند تغییرات SPI ۱ و ۳ ماهه در ایستگاه پارس آباد



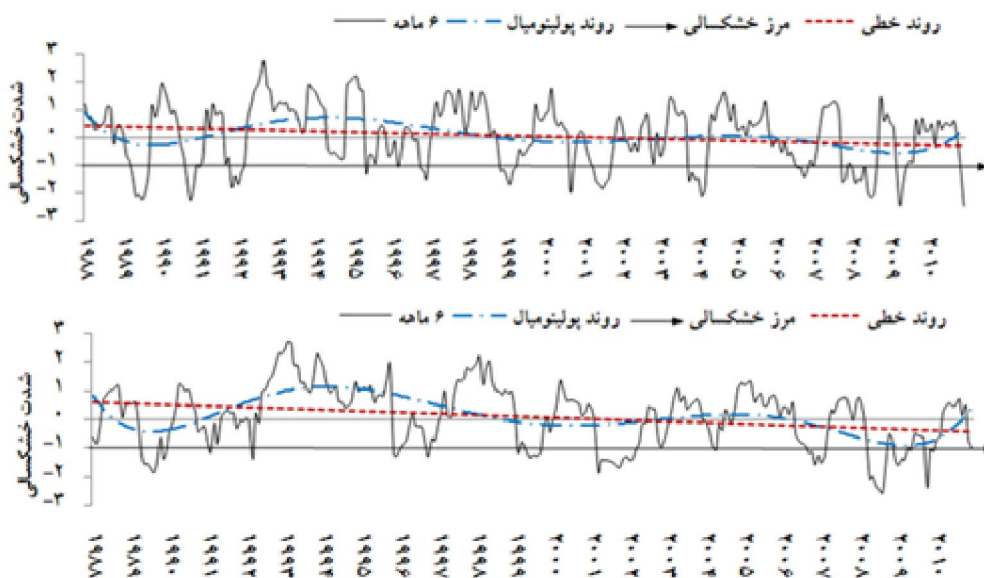
شکل ۴) مدل نوسانی و روند تغییرات SPI ۶ و ۱۲ ماهه در ایستگاه پارس آباد

بررسی خشکسالی ایستگاه سینوپتیک شهرستان اردبیل نشان می‌دهد که در این ایستگاه در مقیاس زمانی ۱ ماهه ۲۶ ماه خشکسالی در ۱۳ دوره خشک رخ داده که شدیدترین مورد آن در ماه دسامبر سال ۲۰۱۰ با مقدار  $1/64$ - بوده است. متوسط بارندگی این ماه  $24/4$  میلی‌متر است که در دسامبر سال ۲۰۱۰ فقط ۲ میلی‌متر بارش ثبت شده است. در این مقیاس زمانی مقدار شاخص، بین ۳ تا  $1/64$ - نوسان دارد. در مقیاس زمانی ۳ ماهه مقدار شاخص بین  $2/33$ - تا  $2/93$  در نوسان است. در این مقیاس زمانی ۴۰ ماه خشکسالی رخ داده است و شدیدترین آن در ماه می سال ۱۹۸۹ بوده و مقدار آن  $2/33$ - است. طولانی‌ترین دوره خشکسالی در این مقیاس زمانی از ماه ژانویه ۲۰۰۹ تا می ۲۰۰۹ به مدت ۵ ماه و بیشترین مقدار شاخص در این دوره  $1/62$ - با طبقه خشکسالی شدید است. در مقیاس زمانی ۶ ماهه ۵۹ ماه خشکسالی رخ داده است و شدیدترین مورد آن ماه دسامبر سال ۲۰۱۰ با مقدار شاخص  $2/47$ - و طبقه خشکسالی خیلی شدید است. در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه ۵۵ ماه خشکسالی در ۷ دوره قابل توجه مشاهده شده و بادوام‌ترین دوره آن از ماه مارس ۲۰۰۱ تا ماه مارس سال ۲۰۰۲ به مدت ۱۳ ماه است. این دوره خشکسالی با دوام‌ترین خشکسالی رخ داده در استان اردبیل است (شکل‌های ۵ و ۶).



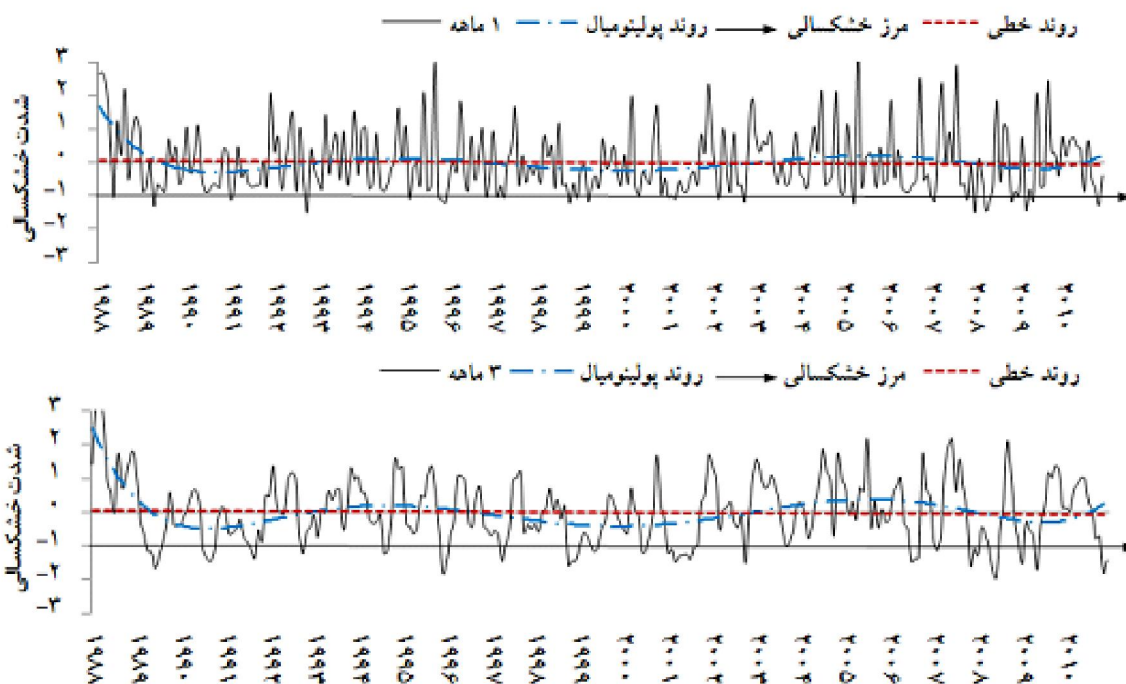
شکل ۵) مدل نوسانی و روند تغییرات SPI ۱ و ۳ ماهه در ایستگاه شهرستان اردبیل



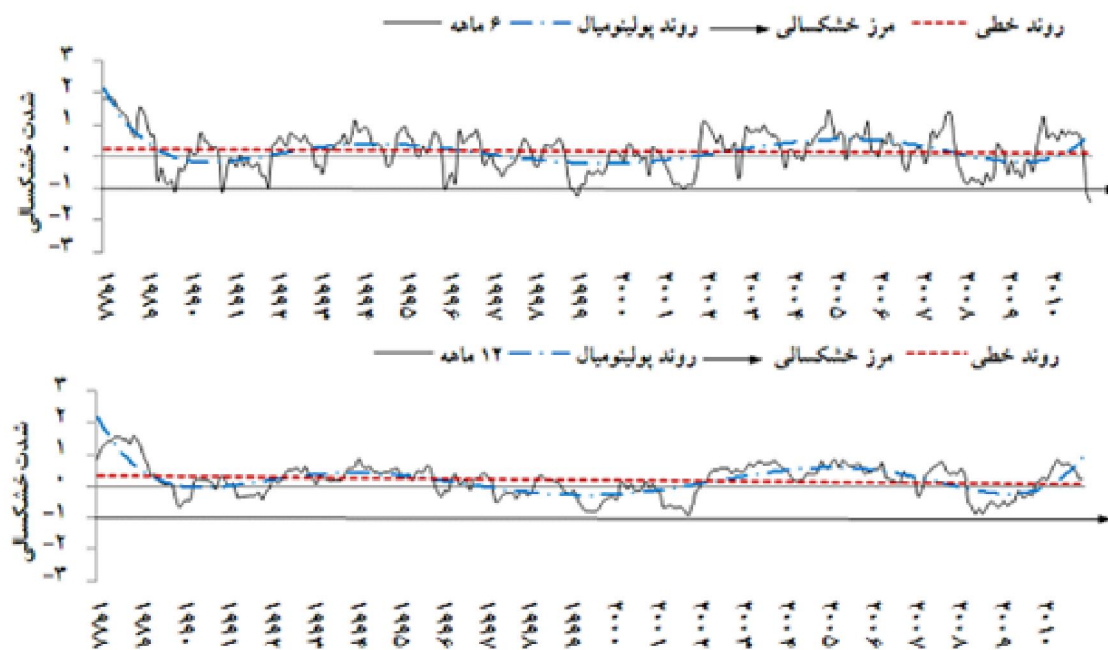


شکل ۶) مدل نوسانی و روند تغییرات SPI ۶ و ۱۲ ماهه در ایستگاه اردبیل

در ایستگاه سینوپیتیک خلخال در مقیاس زمانی ۱ ماهه مقدار شاخص بین  $-1/51$  تا ۳ در نوسان است. بنابراین خشکترین شرایط با مقدار  $-1/51$  است که در ماه ژانویه سال ۲۰۰۸ رخ داده است. در این مقیاس زمانی حدود ۳۱ ماه خشکسالی طی حدود ۱۴ دوره خشک مشاهده می‌شود. در مقیاس زمانی ۳ ماهه، ۴۷ ماه خشکسالی رخ داده که مداوم‌ترین آن از ماه ژانویه تا آگوست سال ۲۰۰۱ طول کشیده است. شدیدترین خشکسالی‌ها در این مقیاس زمانی در ماه نوامبر سال ۲۰۱۰ با مقدار  $-1/79$ ، در ماه ژوئن ۲۰۰۸ با مقدار  $-1/95$  و در ماه دسامبر سال ۱۹۹۵ با مقدار  $-1/80$  مشاهده می‌شود که در هر سه مورد خشکسالی در طبقه شدید بوده است. در مقیاس زمانی ۶ ماهه حدود ۴ دوره خشکسالی قابل توجه رخ داده است که مجموع آنها ۷ ماه است. در این مقیاس زمانی به طور چشمگیری دامنه نوسان شاخص کمتر شده و بین مقدار  $-1/42$  تا  $1/86$  در نوسان است و شدیدترین مورد که  $-1/42$  بوده، در ماه دسامبر سال ۲۰۱۰ اتفاق افتاده است. در ایستگاه خلخال در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه خشکسالی رخ نداده است. دامنه نوسان شاخص در این مقیاس زمانی بسیار کمتر شده و بین  $-0/91$  تا  $1/58$  است. در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه شدت خشکسالی‌ها خیلی کمتر از مقیاس‌های زمانی دیگر است. به‌طور کلی، در ایستگاه خلخال شدت خشکسالی نسبت به ایستگاه‌های دیگر کمتر است (شکل‌های ۷ و ۸).



شکل ۷) مدل نوسانی و روند تغییرات SPI ۱ و ۳ ماهه در ایستگاه خلخال



شکل ۸) مدل نوسانی و روند تغییرات SPI ۶ و ۱۲ ماهه در ایستگاه خلخال

مقایسه خشکسالی در چهار مقیاس زمانی نشان می‌دهد که در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت شدت خشکسالی‌ها بیشتر بوده؛ ولی در مقیاس زمانی بلندمدت شدت خشکسالی‌ها به نسبت کاهش یافته و تداوم آن بیشتر شده است. به عبارتی، خشکسالی در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت از تداوم زیادی برخوردار نبوده و شدیداً تحت تأثیر بارش‌های ماهانه است؛ در حالی که دوره‌های زمانی بلندمدت واکنش بسیار کندتری نسبت به تغییرات ماهانه بارش نشان می‌دهند. جدول (۴) معادلات روند خطی را در ایستگاه‌ها نشان می‌دهد. با توجه به شیب این معادلات ملاحظه می‌شود شیب خطوط روند کم بوده و در اکثر ایستگاه‌ها روند خطی منفی و کاهشی است (به جز در ایستگاه پارس‌آباد در مقیاس زمانی ۳ و ۶ ماهه).

روند چند جمله‌ای شاخص در تمام مقیاس‌های زمانی و در هر سه ایستگاه از سال ۲۰۱۰ به بعد روند افزایشی را نشان می‌دهد؛ به عبارتی، روند بارندگی رو به ترسالی است. دامنه نوسان موج روند چند جمله‌ای از مقیاس زمانی کم به طرف مقیاس‌های زمانی بیشتر، افزایش یافته است و روند مشخص‌تری به خود می‌گیرد. همچنین، روند چندجمله‌ای در ایستگاه‌های پارس‌آباد و اردبیل چهار موج نوسانی داشته است؛ اما در ایستگاه خلخال این روند پنج موج نوسانی را نشان می‌دهد.

جدول (۴) معادلات روند خطی شاخص SPI

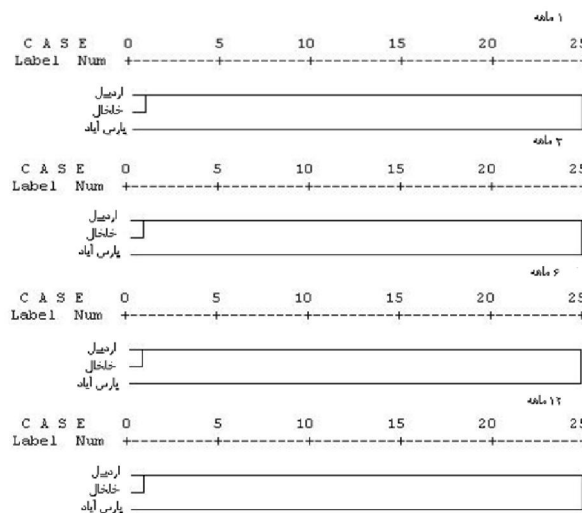
خلخال	اردبیل	پارس‌آباد	
$y = -0/000x + 0/076$	$y = -0/001x + 0/171$	$y = -0/000x + 0/019$	۱ ماهه
$y = -0/000x + 0/074$	$y = -0/001x + 0/219$	$y = 0/000x + 0/017$	۳ ماهه
$y = -0/000x + 0/264$	$y = -0/002x + 0/407$	$y = 3E-05x + 0/002$	۶ ماهه
$y = -0/000x + 0/328$	$y = -0/003x + 0/611$	$y = -0/000x + 0/109$	۱۲ ماهه

در جدول (۵) درصد وقوع خشکسالی در هر ایستگاه به تفکیک مقیاس‌های زمانی مشخص شده است. درصد وقوع خشکسالی در ایستگاه خلخال کمتر از ایستگاه‌های دیگر است. ویژگی خشکسالی در ایستگاه پارس‌آباد و اردبیل از نظر درصد وقوع تقریباً مشابه هم است؛ ولی در کل پارس‌آباد بیشتر شرایط خشکسالی را تجربه کرده است.

جدول (۵) درصد فراوانی وقوع خشکسالی

خلخال	اردبیل	پارس‌آباد	
۱۱/۲۳	۹/۷۸	۱۱/۲۳	۱ ماهه
۱۷/۰۳	۱۴/۴۹	۱۳/۴۱	۳ ماهه
۲/۵۴	۲۱/۳۸	۲۳/۱۹	۶ ماهه
۰	۱۹/۹۳	۲۲/۱۰	۱۲ ماهه

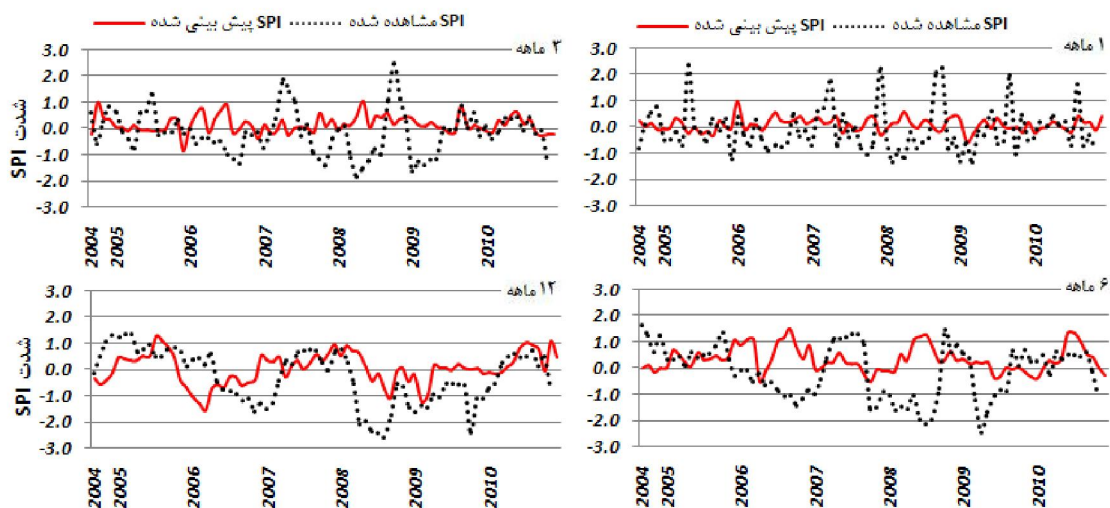
برای بررسی ویژگی خشکسالی ایستگاه‌ها از نظر تشابه، می‌توان از روش تحلیل خوشه‌ای استفاده نمود تا از این طریق ایستگاه‌های مشابه از نظر ویژگی شاخص SPI گروه‌بندی شوند. در این پژوهش، روش تحلیل خوشه‌ای ادغام بر اساس روش وارد و معیار فاصله اقلیدسی بر روی سری‌های SPI ایستگاه‌ها در هر مقیاس زمانی انجام شد. درخت خوشه‌بندی (دندروگرام) حاصل از روش مذکور در شکل (۹) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که ایستگاه خلخال و اردبیل در هر چهار مقیاس زمانی در یک گروه قرار گرفته‌اند. به طور کلی، در ایستگاه اردبیل و خلخال ویژگی خشکسالی مشابه هم بوده و در ایستگاه پارس آباد شرایط خشکسالی نسبت به دو ایستگاه دیگر متفاوت است. هر چند با توجه به مباحث قبلی ایستگاه پارس آباد و اردبیل از نظر درصد وقوع شرایط خشک و روند چند جمله‌ای تا حدودی مشابه هم ذکر شدند؛ ولی تحلیل خوشه‌ای نتایج متفاوتی به دست می‌دهد، چون این روش در گروه‌بندی مؤلفه‌ها تمام شرایط و مشخصات داده‌ها را در نظر می‌گیرد. یکی از موارد تفاوت خشکسالی ایستگاه پارس آباد نسبت به ایستگاه‌های دیگر در روند خطی آن است. در ایستگاه پارس آباد بر خلاف ایستگاه‌های دیگر روند خطی در مقیاس زمانی ۳ و ۶ ماهه افزایشی است.



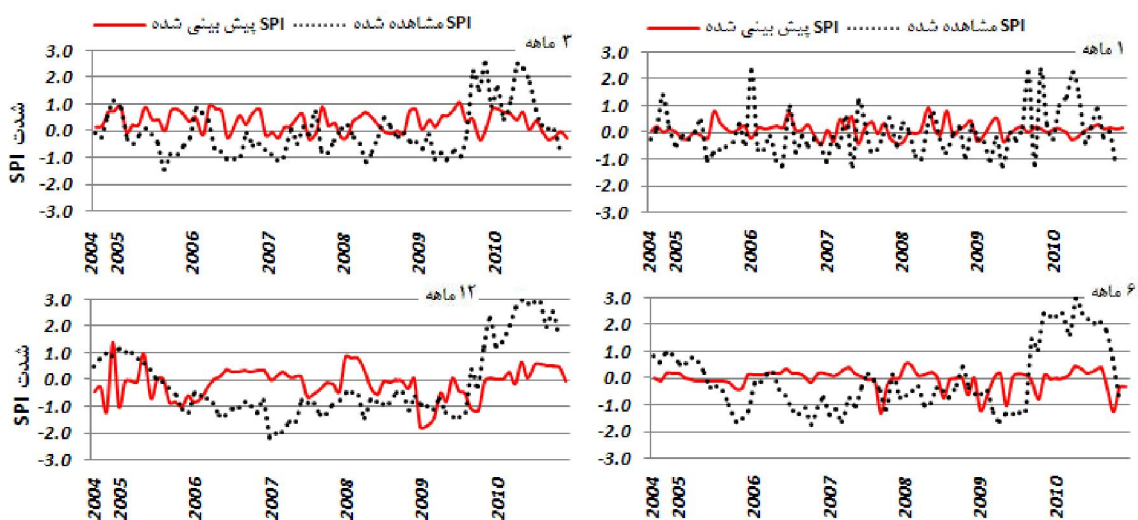
شکل ۹) دندروگرام ایستگاه‌ها بر اساس شاخص SPI به تفکیک مقیاس زمانی

### - پیش‌بینی خشکسالی

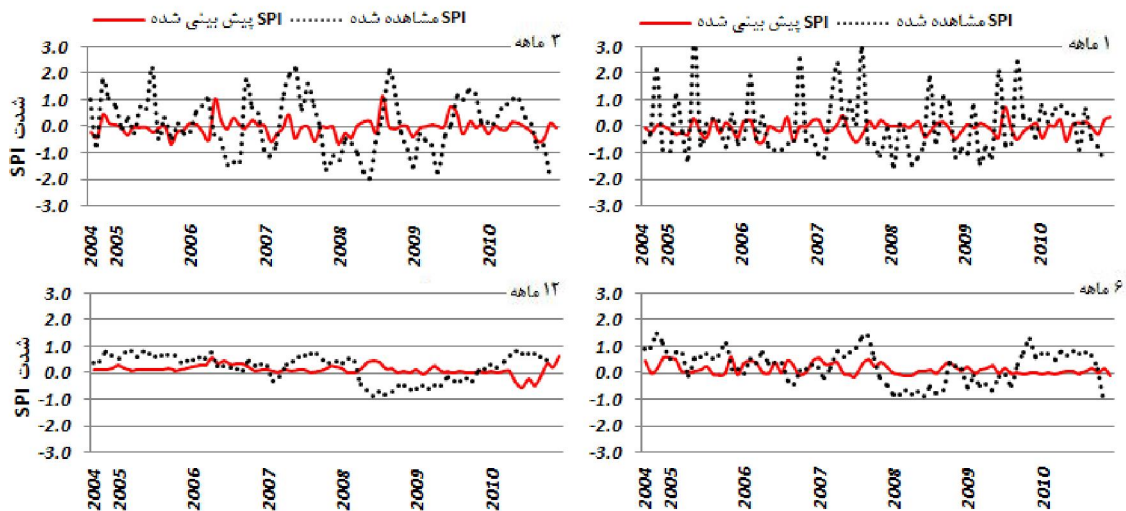
در بحث مربوط به ارزیابی توان مدل ANFIS در پیش‌بینی خشکسالی، پس از اجرای مدل، نمودار مقایسه‌ای مربوط به داده‌های پیش‌بینی شده و داده‌های مشاهده شده ترسیم شد. با بررسی این نمودارها و مقادیر خطای پیش‌بینی، می‌توان کارایی مدل را برای پیش‌بینی خشکسالی تعیین نمود. شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ نمودار مقایسه‌ای داده‌های مشاهده شده با داده‌های پیش‌بینی شده را در مقیاس‌های زمانی مختلف نشان می‌دهند. طول داده‌های اعتبارسنجی ۷۶ ماه، از ماه سپتامبر سال ۲۰۰۴ تا دسامبر سال ۲۰۱۰ است.



شکل (۱۰) مقایسه SPI پیش‌بینی شده و مشاهده شده در ایستگاه پارس آباد



شکل (۱۱) مقایسه SPI پیش‌بینی شده و مشاهده شده در ایستگاه اردبیل



شکل ۱۲) مقایسه SPI پیش‌بینی شده و مشاهده شده در ایستگاه خلخال

در جدول (۶) مقادیر خطای پیش‌بینی بر اساس معیارهای ارزیابی دقت مدل در ایستگاه‌ها به تفکیک مقیاس‌های زمانی ذکر شده است.

جدول (۶) مقادیر خطای پیش‌بینی بر اساس معیارهای ارزیابی

میانگین قدر مطلق انحرافات			جذر میانگین مربعات خطا			
ارdebیل	پارس‌آباد	خلخال	ارdebیل	پارس‌آباد	خلخال	
۰/۹۲	۰/۷۸	۰/۷۲	۱/۱۶	۰/۹۹	۰/۹۹	۱ ماهه
۰/۸۷	۰/۷۴	۰/۸۷	۱/۰۶	۰/۹۱	۱/۰۴	۳ ماهه
۰/۵۶	۱/۰۲	۱/۰۱	۰/۶۵	۱/۲۷	۱/۲۱	۶ ماهه
۰/۴۷	۰/۸۶	۱/۱۱	۰/۵۵	۱/۰۵	۱/۳۱	۱۲ ماهه

در جدول (۶) مشخص است که مدل بیشترین و کمترین مقادیر خطای پیش‌بینی را به ترتیب در ایستگاه پارس‌آباد و خلخال در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه داشته است. در ایستگاه خلخال در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه همان طوری که در شکل (۸) ملاحظه می‌شود، دامنه نوسان شاخص کمتر از مقیاس‌های زمانی دیگر در هر ایستگاه است. در کل مقادیر خطاهای به دست آمده در اکثر موارد بالاست. برای نمونه، در ایستگاه پارس‌آباد در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه، خطای ۱/۳۱، نشان دهنده انحراف و یا فاصله داده‌های پیش‌بینی و داده‌های واقعی در حد نزدیک به ۳ طبقه در شاخص SPI است؛ چرا که فاصله طبقات خشکسالی در این شاخص نزدیک به ۰/۵ است.

در جدول (۷) درصد قرار داشتن داده‌های پیش‌بینی شده و مشاهده شده در یک طبقه، بر اساس طبقات خشکسالی در شاخص SPI، مشخص شده است. ملاحظه می‌شود که در ایستگاه خلخال در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه در ۶۷/۱ درصد موارد داده‌های پیش‌بینی شده و داده‌های مشاهده شده در یک طبقه خشکسالی قرار دارند. در ایستگاه اردبیل در مقیاس زمانی ۳ ماهه این مقدار ۵۰/۲ درصد است. کمترین درصد مربوط به ایستگاه پارس‌آباد در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه است.

جدول ۷) درصد قرار داشتن داده‌های پیش‌بینی شده و مشاهده شده در یک طبقه

خلخال	اردبیل	پارس آباد	
۳۲/۹	۳۶/۸	۴۶	۱ ماهه
۳۸/۱	۵۰	۳۹/۴	۳ ماهه
۴۳/۴	۳۱	۲۸/۹	۶ ماهه
۶۷/۱	۳۶	۲۶/۳	۱۲ ماهه

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش ابتدا به پایش خشکسالی در ایستگاه‌هایی از استان اردبیل پرداخته شد و در ادامه، امکان پیش‌بینی خشکسالی با مدل سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی ارزیابی گردید. مهمترین نتایج حاصل از یافته‌های این مباحث به این شرح است:

✓ شدیدترین خشکسالی در استان اردبیل مربوط به ایستگاه شهرستان اردبیل در مقیاس زمانی ۶ ماهه است که در ماه دسامبر سال ۲۰۱۰ با طبقه خیلی شدید و مقدار ۲/۴۷- رخ داده است.

✓ بیشترین درصد وقوع خشکسالی در ایستگاه پارس آباد و کمترین آن در ایستگاه خلخال مشاهده می‌شود.

✓ روند خطی شاخص SPI در اکثر موارد کاهشی است (به جز در ایستگاه پارس آباد در مقیاس زمانی ۳ و ۶ ماهه).

✓ بر اساس تحلیل خوشه‌ای انجام شده، ویژگی خشکسالی در ایستگاه خلخال و ایستگاه شهرستان اردبیل مشابه هم است.

✓ سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی کارایی قابل قبولی در پیش‌بینی شاخص SPI استان اردبیل ندارد.

این روش در اکثر مطالعاتی که صورت گرفته، روش مناسبی در امر پیش‌بینی عنوان شده است. از جمله علیاری و همکاران (۱۳۸۷: ۱)، در پیش‌بینی کوتاه‌مدت آلودگی هوا در شهر اراک، فلاح قاهری و همکاران (۱۳۸۹: ۱۲۱)، در پیش‌بینی بارش بهاره خراسان رضوی بر پایه الگوهای سینوپیتیکی پیوند از دور، و همچنین، هنر و همکاران (۱۳۸۹: ۱۶۹) در پیش‌بینی دبی سرریز جانبی، دقت قابل قبول مدلی را تأیید نمودند. با این حال، این مدل در پژوهش حاضر در پیش‌بینی شاخص SPI، کارایی قابل قبولی ندارد.

## منابع

- ۱- آسیایی، مهدی. (۱۳۸۵). شاخص‌های خشکسالی، انتشارات سخن گستر، ص ۱۷۳.
- ۲- انصاری، حسین؛ داوری، کامران و ثنائی‌نژاد، سیدحسین. (۱۳۸۹). پایش خشکسالی با استفاده از شاخص بارندگی و تبخیر و تعرق استاندارد شده (SEPI). توسعه یافته براساس منطق فازی، نشریه آب‌وخاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ش ۱، صص ۳۸-۵۲.
- ۳- خزایی، محمدرضا و تلوری، عبدالرسول. (۱۳۸۲). تحلیل توزیع فراوانی خشکسالی هیدرولوژیک (مطالعه موردی: حوضه رودخانه قره‌سو)، مجله جغرافیا و توسعه، ش ۸۲، صص ۴۶-۵۶.

- ۴- رجیبی، منوچهر. (۱۳۸۴) بررسی مشخصات خشکسالی استان فارس در محیط GIS، پایان نامه کارشناسی ارشد، راهنما حمید رضا مرادی، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، گروه آبخیزداری، دانشگاه تربیت مدرس.
- ۵- زاهدی، مجید، قویدل رحیمی، یوسف. (۱۳۸۶). تعیین آستانه خشکسالی و مقایسه بارش قابل اعتماد ایستگاه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه، پژوهش‌های جغرافیایی، ش ۵۹، صص ۲۱-۳۴.
- ۶- هنر، تورج؛ طراز کار، محمدحسن و طراز کار، محمدرضا. (۱۳۸۹). برآورد ضریب دبی سرریزهای جانبی با استفاده از سیستم استنتاج فازی-عصبی، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ش ۲، صص ۱۶۹-۱۷۷.
- ۷- علیاری، مهدی؛ تشنه‌لب، محمد و خاکی صدق، علی. (۱۳۸۷). پیش‌بینی کوتاه‌مدت آلودگی هوا با کمک شبکه‌های عصبی پرسپترون چند لایه، خط حافظه‌دار تأخیر، گاما و ANFIS با روش‌های ترکیبی آموزشی مبتنی بر PSO، مجله کنترل، ش ۱، صص ۱-۱۹.
- ۸- عزیزی، قاسم. (۱۳۸۲). ارتباط خشکسالی‌های اخیر و منابع آب زیرزمینی در دشت قزوین، پژوهش‌های جغرافیایی، ش ۴۶، صص ۱۳۱-۱۴۳.
- ۹- فلاح قاهری، غلام عباس؛ موسوی بایگی، محمد و مهدی نوخندان، مجید. (۱۳۸۷). پیش‌بینی بارش فصلی بر اساس الگوهای سینوپیتیک با استفاده از سیستم استنباط فازی-عصبی تطبیقی ANFIS، پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی، ش ۶۶، صص ۱۲۱-۱۳۹.
- ۱۰- کیا، سید مصطفی. (۱۳۸۹). منطق فازی در MATLAB، انتشارات کیان‌رایانه سبز.
- ۱۱- کنارکوهی، عذرا؛ سلیمان جاهی، حوریه؛ فلاحی، شهاب؛ ریاحی، حسین و مشکات، زهرا. (۱۳۸۹). استفاده از سیستم جدید هوشمند استنتاج فازی-عصبی تطبیقی پیش‌بینی قدرت سرطانزایی ویروس پاپیلوما‌ی انسانی، مجله علمی پژوهشی دانشگاه علوم پزشکی اراک، ش ۴، صص ۹۵-۱۰۵.
- ۱۲- نوحی، کیوان و عسگری، احمد. (۱۳۸۴). مطالعه خشکسالی و دوره‌های برگشت ترسالی‌ها و خشکسالی‌ها در منطقه قم، خشکی و خشکسالی کشاورزی، ش ۱۵، صص ۱-۱۷.
- 13- Calanca, P, 2007, Climate change and drought occurrence in the Alpine region, Global and Planetary Change 57, 151-160.
- 14- Huang, W, C, Chou, C, 2008, Risk-based drought early warning system in reservoir operation. Advances in water resources 31, 649-660.
- 15- Logan, K, E, Brunzell, N, A, Jones, A, R, Feddema, J, J, 2010, Assessing spatiotemporal variability of drought in the U, S, central plains. Journal of Arid Environments 74, 247-255.
- 16- Mishra, A, K, Desai, V, R, 2006, Drought forecasting using feed-forward recursive neural network. Ecological modelling 198, 127-138.
- 17- Moreira, E, E, Coelho, A, Paulo, A, Pereira, S, Mexia, T, 2008, SPI-based drought category prediction using loglinear models, Journal of Hydrology 354, 116-130.
- 18- Moreira, E, Paulo, A, Pereira, S, Mexia, T, 2006, Analysis of SPI drought class transitions using loglinear models, Journal of Hydrology, 331, 349- 59.



- 19- Paulo, A, A, Ferreira, E, Coelho, C, Pereira, L, S, 2005, Drought class transition analysis through Markov and Loglinear models, an approach to early warning, *Agricultural water management* 77, 8-59.
- 20- Peters, E, Bier, G, Lanen, H, A, Torfs, P, 2006, Propagation and spatial distribution of drought in a groundwater catchment. *Journal of Hydrology* 321, 257-275.

