

برنامه مدیریت ریسک خشکسالی حوضه آبخیز دریاچه ارومیه

سوابق و رفتار خشکسالی در حوضه

«جلد چهارم»



سازمان حفاظت
محیط زیست



طرح حفاظت از
تالابهای ایران



پژوهشکده مهندسی آب
دانشگاه تربیت مدرس



دبیرخانه دائمی شورای منطقه‌ای
مدیریت حوضه آبخیز دریاچه ارومیه

کارگروه مدیریت پایدار منابع آب و کشاورزی
شورای منطقه‌ای مدیریت حوضه آبخیز دریاچه ارومیه
آذر ۱۳۹۱

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

برنامه مدیریت ریسک خشکسالی حوضه آبخیز

دریاچه ارومیه

سوابق و رفتار خشکسالی در حوضه

«جلد چهارم»

کارگروه مدیریت پایدار منابع آب و کشاورزی
شورای منطقه‌ای حوضه آبخیز دریاچه ارومیه
آذر ۱۳۹۱

فهرست مطالب

عنوان

صفحه

فصل اول؛ کلیات.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۱
۱-۲- دریاچه ارومیه.....	۲
۱-۳- هدف گزارش.....	۲
۱-۴- آمار و اطلاعات.....	۳
۱-۵- ساختار گزارش.....	۷
فصل دوم؛ پیشینه تحقیق.....	۸
۲-۱- مقدمه.....	۸
۲-۲- تحلیل شدت و مدت خشکسالی با استفاده از توابع مفصل.....	۸
۲-۳- تعیین مناطق همگن از لحاظ خشکسالی هواشناسی با استفاده از روش خوشه‌بندی.....	۱۱
۲-۴- بررسی پراکنش مکانی ظرفیت حمل منابع آب با استفاده از آنالیز خوشه‌بندی.....	۱۴
۲-۵- تعیین مناطق همگن از لحاظ خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از روش خوشه‌بندی.....	۱۵
فصل سوم؛ مواد و روش‌ها.....	۱۸
۳-۱- مقدمه.....	۱۸
۳-۲- شاخص‌های خشکسالی.....	۱۸

۱۸.....	۳-۲-۱- شاخص SPI
۱۹.....	۳-۲-۲- شاخص خشکسالی DI
۲۱.....	۳-۲-۳- شاخص RDI
۲۲.....	۳-۳- شناسایی مناطق همگن
۲۲.....	۳-۳-۱- خوشه بندی
۲۲.....	۳-۳-۲- ماتریس داده ها
۲۲.....	۳-۳-۳- معیار مشابهت
۲۳.....	۳-۳-۴- ماتریس ناهمبندی
۲۳.....	۳-۳-۵- روشهای خوشه بندی مورد استفاده
۲۴.....	۳-۳-۵-۱- روش خوشه بندی K-MEANS
۲۴.....	۳-۳-۵-۲- روش خوشه بندی K-MEDOIDS
۲۵.....	۳-۴-۱- بررسی شدت و مدت خشکسالی ها در حوضه ارومیه
۲۸.....	۳-۴-۱- توزیع یک متغیره شدت و مدت خشکسالی
۲۹.....	۳-۴-۲- توابع مفصل
۳۳.....	۳-۴-۳ نحوه کاربرد توابع مفصل
۳۴.....	۳-۴-۴ محاسبه دوره بازگشت توزیع دو متغیره
۳۷.....	فصل چهارم؛ نتایج و بحث

۳۷	۱-۴- مقدمه
۳۸	۲-۴- بررسی سابقه خشکسالی‌های مهم حوضه دریاچه ارومیه
۳۸	۱-۲-۴- سوابق خشکسالی با اطلاعات بارش
۴۱	۲-۲-۴- سوابق خشکسالی با اطلاعات دبی جریان
۴۲	۳-۲-۴- رفتار تراز دریاچه ارومیه در ترسالی و خشکسالی‌های حوضه آن
۴۴	۳-۴- منطقه بندی حوضه دریاچه ارومیه
۴۵	۴-۴- منطقه بندی شاخص استاندارد بارش (SPI) سه ماهه
۴۶	۴-۴- منطقه بندی شاخص استاندارد بارش (SPI) شش ماهه
۴۸	۵-۴- خوشه بندی ایستگاه‌های هیدرومتری بر اساس شاخص DI
۵۰	۱-۶-۴- تحلیل احتمالاتی شدت و مدت خشکسالی
۵۵	۲-۶-۴- دوره بازگشت خشکسالی
۵۸	۷-۴- بررسی تغییرات بیلان آب در حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از داده‌های ماهواره GRACE
۶۱	۱-۷-۴- آماده سازی داده‌های TWS برای حوضه دریاچه ارومیه
۶۲	۲-۷-۴- مقایسه تغییرات TWS و تراز سطح آب دریاچه ارومیه
۶۴	فصل پنجم؛ نتایج و جمع بندی
۶۴	۱-۵- مقدمه
۶۷	منابع و ماخذ

پیوست ۱..... ۶۹

پیوست ۲..... ۷۹

فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

خشکسالی به دوره‌ای اطلاق می‌شود که در آن موجودی منابع آب در مقایسه با دوره‌های نرمال کاهش یافته باشد. این پدیده یکی از مخرب‌ترین پدیده‌های اقلیمی است که متأسفانه شاهد روند صعودی در فراوانی آن طی سال‌های اخیر هستیم. حوضه دریاچه ارومیه نیز از این وضع مستثنی نبوده و خشکسالی، اثرات زیانبار مختلفی مخصوصاً بر محیط زیست آن داشته که یکی از آنها کاهش قابل توجه تراز آب دریاچه ارومیه بوده است. برای مدیریت خشکسالی و ارائه هر طرحی در این خصوص، شناسایی رفتار این پدیده بسیار حائز اهمیت است. رفتار خشکسالی را می‌توان در سه ویژگی مهم شامل شدت، مدت و فراوانی آن مورد بررسی قرار داد. بعلاوه، بررسی تغییرات مکانی و زمانی خشکسالی در یک منطقه، اطلاعات جامع‌تری را خواهد داد.

۱-۲- دریاچه ارومیه

حوضه دریاچه ارومیه با طول جغرافیایی $44^{\circ}7'$ تا $47^{\circ}53'$ شرقی و عرض جغرافیایی $35^{\circ}40'$ تا $38^{\circ}30'$ شمالی در شمال غرب کشور قرار گرفته است این حوضه که در سه استان آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی و کردستان واقع شده، دارای وسعت ۵۰۰۰۰ کیلومترمربع بوده و وسعت دریاچه نیز حدوداً ۵۷۵۰ کیلومترمربع می-باشد. حوضه دریاچه ارومیه براساس رودخانه‌های که به دریاچه ارومیه ختم می‌شوند از ۱۳ سیستم هیدرولوژیکی تشکیل شده است. رودخانه‌های زربینه‌رود، سیمینه‌رود، گادارچای، آجی‌چای، نازلوچای، باراندوزچای و مردوق-چای از مهمترین روخانه‌های تغذیه‌کننده دریاچه ارومیه می‌باشند. در گزارش اول طرح تحت عنوان "مطالعات پایه"، اطلاعات کامل‌تری از حوضه قابل مشاهده است.

۱-۳- هدف گزارش

هدف از این گزارش، بررسی سوابق خشکسالی‌های گذشته در حوضه دریاچه ارومیه است که در آن هم تحلیلی از شدت- مدت- فراوانی آنها به عمل خواهد آمد و هم رفتار مکانی و زمانی آنها مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بدین منظور به ترتیب روش‌های آماری توابع مفصلی (Copula) و داده‌کاوی خوشه بندی مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

بر اساس نتایج گزارش قبلی نیز، شاخص خشکسالی هواشناسی (SPI^1) (سه ماهه و شش ماهه) و شاخص

¹ Standardized Precipitation Index

خشکسالی هیدرولوژیکی (شاخص DI^1) برای شناسایی دوره‌های خشکسالی مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

۱-۴- آمار و اطلاعات

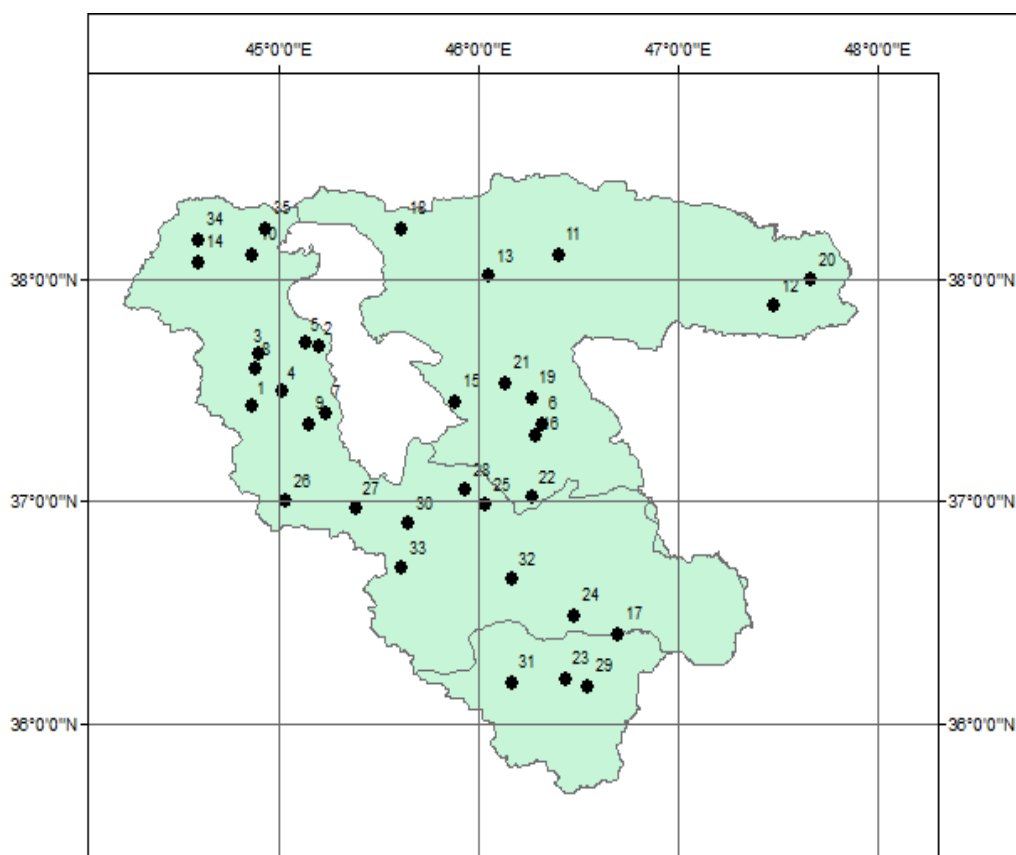
در گزارش اول این طرح، بطور کامل در خصوص داده و اطلاعات و همچنین نحوه تکمیل و تصحیح آنها بحث شد. در اینجا نیز به اختصار مواردی یادآوری می‌گردد.

در این مطالعه جهت منطقه‌بندی خشکسالی هواشناسی حوضه دریاچه ارومیه، از داده‌های مربوط به بارندگی ماهانه ۳۵ ایستگاه باران‌سنجی وزارت نیرو، طی دوره زمانی ۱۳۵۰ تا ۱۳۸۵ استفاده شده که مشخصات جغرافیایی آنها در جدول ۱-۱ قابل ملاحظه است. همچنین پراکنش مکانی این ایستگاه‌ها در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.

¹ Deficiency Index

جدول ۱-۱: مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های باران‌سنجی وزارت نیرو واقع در حوضه دریاچه ارومیه

شماره ایستگاه	ایستگاه	رودخانه	کد	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
1	ونیار	آجی چای	31-015	46-24	38-07
2	آخوله	آجی چای	31-045	46-03	38-01
3	شیشوان	قلعه چای	32-021	45-53	37-27
4	چکان	چکان چای	32-011	46-19	37-21
5	قشلاق امیر	مردوق چای	33-003	46-17	37-18
6	صفاخانه	ساروق چای	33-021	46-42	36-24
7	دریان	دریان چای	38-001	45-37	38-14
8	تازه کند (سدعلویان)	صوفی چای (مراغه)	32-007	46-16	37-28
9	سهراب	آغمیون چای	31-001	47-40	38-00
10	سرانسر	آجی چای	31-005	47-29	37-53
11	ینگجه	قلعه چای	32-015	46-08	37-32
12	شیرین کند	لیلان چای	33-005	46-16	37-01
13	پل آنیان	جیغاتوچای	33-015	46-26	36-12
14	ساری قمیش	زربنه رود	33-023	46-29	36-29
15	تازه کند	سیمینه رود	33-039	46-02	36-59
16	پی قلعه	گادارچای	34-011	45-02	37-00
17	نقده	گادارچای	34-019	45-23	36-58
18	بابارود	باراندوز چای	35-007	45-14	37-24
19	میر آباد	شهرچای	35-009	44-52	37-26
20	موش آباد	نازلوچای	35-026	45-12	37-42
21	تپیک	نازلوچای	35-031	44-54	37-40
22	کلهور	روضه چای	35-039	44-53	37-36
23	نظام آباد	زربنه رود	33-917	45-56	37-03
24	سسته	خرخره چای	33-919	46-33	36-10
25	کوثر	مهاباد چای	34-003	45-37	36-42
26	پل بهراملو	گادارچای	34-021	45-39	36-54
27	قاسملو	بالانچ چای	35-001	45-09	37-21
28	بند ارومیه	شهرچای	35-011	45-01	37-30
29	آباجالو سفلی	نازلوچای	35-033	45-08	37-43
30	چهریق علیا	زولاچای	36-001	44-36	38-05
31	نظر آباد	دریک چای	36-003	44-36	38-11
32	تمر	خرخره چای	36-009	44-52	38-07



شکل ۱- ۱: پراکنش مکانی ایستگاه‌های باران‌سنجی مورد استفاده در حوضه دریاچه ارومیه

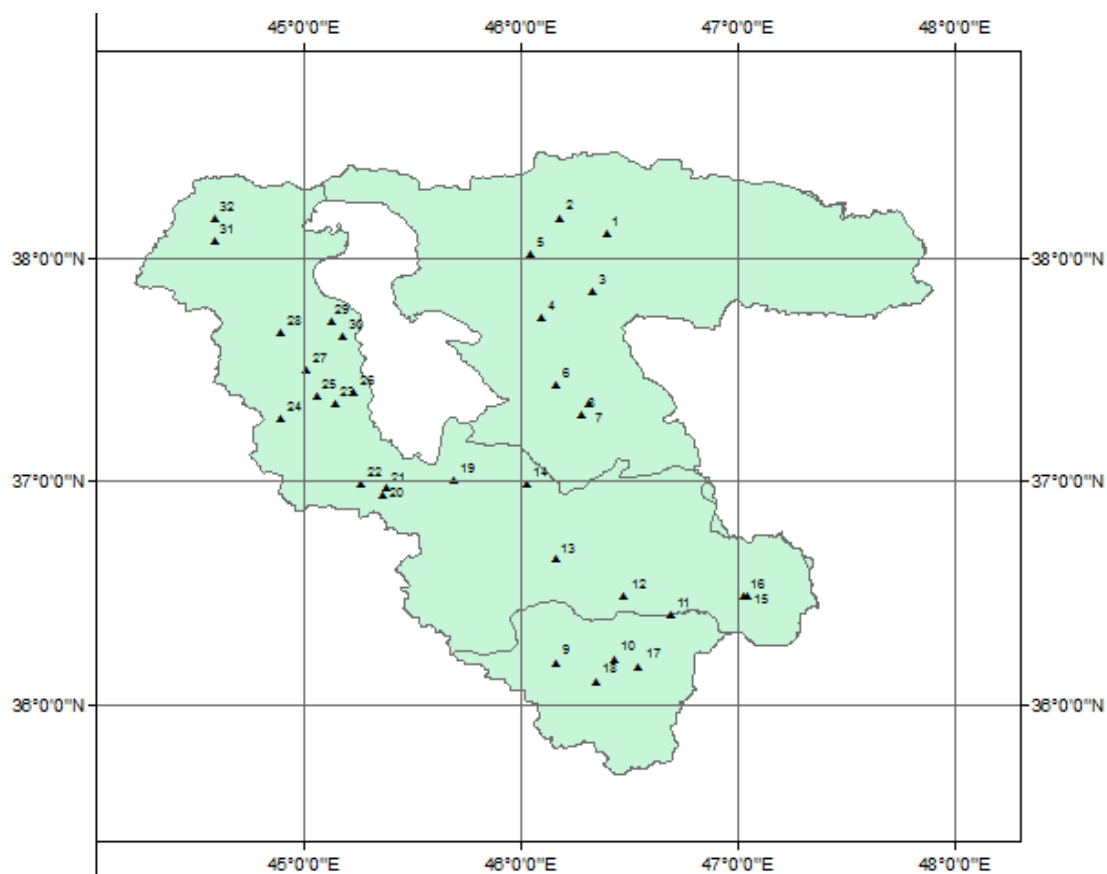
جهت بررسی خشکسالی هیدرولوژیکی حوضه دریاچه ارومیه نیز، از داده‌های دبی روزانه ۳۲ ایستگاه

هیدرومتری طی سال‌های ۱۳۶۶ تا ۱۳۸۴ استفاده گردید که مشخصات و موقعیت آنها در جدول ۱-۲ و شکل ۱-

۲ قابل مشاهده هستند.

جدول ۱-۲: مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در حوضه دریاچه ارومیه

شماره ایستگاه	نام ایستگاه	کد ایستگاه	استان	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع	رودخانه
1	ونیار	31-015	آذربایجان شرقی	46.40	38.12	1450.0	آجی چای
2	پل سنیخ	31-029	آذربایجان شرقی	46.18	38.18	1380.0	سنیخ چای
3	زینجناب	31-031	آذربایجان شرقی	46.33	37.85	2150.0	سردرود
4	قرمزگل	31-037	آذربایجان شرقی	46.10	37.73	1800.0	گمبرچای
5	آخولا	31-045	آذربایجان شرقی	46.05	38.02	1310.0	آجی چای
6	خرمازرد	32-005	آذربایجان شرقی	46.17	37.43	1550.0	ماهپری
7	چکان	32-011	آذربایجان شرقی	46.32	37.35	1550.0	چکان
8	قشلاق امیر	33-003	آذربایجان شرقی	46.28	37.30	1450.0	مردق چای
9	قبقلو	33-007	کردستان	46.17	36.18	1500.0	سقز چای
10	پل آنیان	33-015	کردستان	46.43	36.20	1460.0	جیغاتوچای
11	صفاخانه	33-021	کردستان	46.70	36.40	1475.0	ساروق چای
12	ساری قمیش	33-023	آذربایجان غربی	46.48	36.48	1380.0	زرینه رود
13	داشبند-بوکان	33-035	آذربایجان غربی	46.17	36.65	1329.0	سیمینه رود
14	تازه کند	33-039	آذربایجان غربی	46.03	36.98	1290.0	سیمینه رود
15	شاخه چپ آلاسقل	33-912	آذربایجان غربی	47.05	36.48	1700.0	ساروق چای
16	شاخه راست آلاسقل	33-916	آذربایجان غربی	47.03	36.48	1750.0	ساروق چای
17	سنته	33-919	کردستان	46.55	36.17	1434.0	خرخره چای
18	پل قشلاق	33-973	کردستان	46.35	36.10	1436.0	جیغاتوچای
19	گرد یعقوب	34-009	آذربایجان غربی	45.70	37.00	1280.0	مهاباد چای
20	بالقچی	34-017	آذربایجان غربی	45.37	36.93	1350.0	بالخلو چای
21	نقده	34-019	آذربایجان غربی	45.38	36.97	1340.0	گادار چای
22	پیه جیک	34-029	آذربایجان غربی	45.27	36.98	1375.0	نهر خان
23	قاسملو	35-001	آذربایجان غربی	45.15	37.35	1380.0	بالانج
24	هاشم آباد بیبکران	35-003	آذربایجان غربی	44.90	37.28	1570.0	باراندوز چای
25	دیرج-ارومیه	35-005	آذربایجان غربی	45.07	37.38	1320.0	باراندوز چای
26	بابارود	35-007	آذربایجان غربی	45.23	37.40	1285.0	باراندوز چای
27	بندارومیه	35-011	آذربایجان غربی	45.02	37.50	1390.0	شهر چای
28	تپیک	35-031	آذربایجان غربی	44.90	37.67	1450.0	نازلوچای
29	آباجالو سفلی	35-033	آذربایجان غربی	45.13	37.72	1290.0	نازلوچای
30	گویجعلی اصلان	35-037	آذربایجان غربی	45.18	37.65	1285.0	روضه چای
31	چهریق علیا	36-001	آذربایجان غربی	44.60	38.08	1600.0	زولا چای
32	نظرآباد	36-003	آذربایجان غربی	44.60	38.18	1620.0	دریک چای



شکل ۱-۲: پراکنش مکانی ایستگاه‌های هیدرومتری در حوضه دریاچه ارومیه

۱-۵- ساختار گزارش

پس از این قسمت، در فصل دوم به کاربردهای روش‌های مورد استفاده در تحقیقات و مطالعات مشابه پرداخته می‌شود. در فصل سوم، شرح شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی و روش‌های توابع مفصلی و خوشه‌بندی آورده شده است. در فصل چهارم نیز به نتایج تحقیق پرداخته می‌گردد و نهایتاً، فصل پنجم به جمع‌بندی گزارش خواهد پرداخت.

فصل دوم

پیشینه تحقیق

۲-۱- مقدمه

از آنجا که بررسی رفتار زمانی و مکانی خشکسالی، یکی از مباحث مهم در تدوین طرح‌های مدیریت خشکسالی است و می‌تواند تدوین برنامه‌های اقدام و کاهش خسارات خشکسالی موثر باشد، در نقاط مختلف دنیا به بررسی این موضوع پرداخته شده است، هر چند سابقه‌ی چندان طولانی برای آنها وجود ندارد. در این فصل تلاش می‌گردد تا به بعضی از تحقیقات و مطالعات صورت گرفته در این زمینه اشاره شود و از آنها برای روش-شناسی این گزارش استفاده گردد.

۲-۲- تحلیل شدت و مدت خشکسالی با استفاده از توابع مفصل

از مقدمات لازم در آمادگی برای مقابله با خشکسالی و کاهش اثرات آن، شناخت رفتار این بلیه طبیعی است. مدت و شدت دو ویژگی رفتاری خشکسالی می‌باشند که چنانچه در تلفیق با مباحثی احتمالاتی ارائه گردد، می‌تواند در تدوین بهتر طرح‌های مقابله با خشکسالی و ارزیابی ریسک آنها موثر باشد. مشخصات احتمالی خشکسالی در تحقیقاتی از جمله (Gozalez 2003)، (Cancelliere and Salas 2004)، لوکاس و سینادس (۲۰۰۴) و (Salas, et. Al., 2005) مد نظر بوده‌اند، اما این مطالعات عمدتاً به تحلیل تک متغیره مشخصات

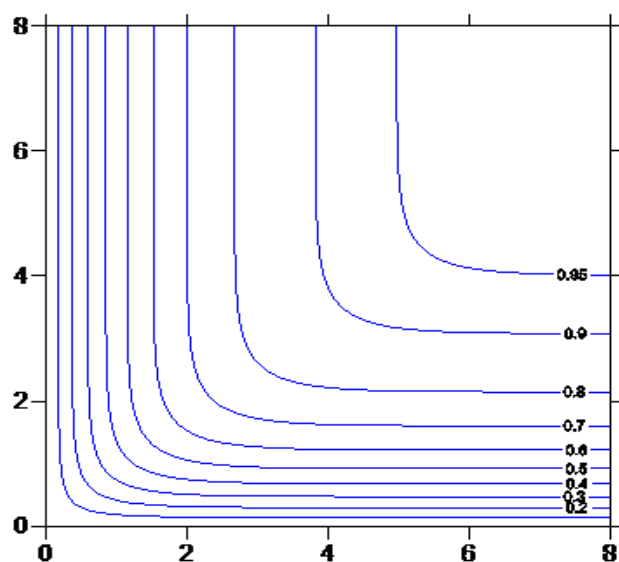
خشکسالی پرداخته‌اند، در حالی که این نوع تحلیل‌ها با دخالت همزمان متغیرهایی مانند مدت و شدت بهتر و دقیق‌تر قابل استفاده هستند که در تحقیقات شن (۲۰۰۱)، (Gozalez and Valdes (2003 و Salas, et. Al., (2005) برای بدست آوردن توزیع توام مدت و شدت خشکسالی مد نظر بوده است.

اما در روش‌هایی که در مطالعات مورد استفاده قرار گرفتند، همبستگی موجود بین دو متغیر لحاظ نگردید. برای این منظور و رفع نواقص فوق، استفاده از توابع مفصل^۱ (Sklar, 1959) می‌تواند گزینه مناسبی باشد که ضمن تحلیل توام دو متغیر، همبستگی بین آنها را نیز در محاسبات دخالت دهد. این توابع خانواده‌های گسترده‌ای دارد که (Shiau (2006) با تعدادی محدودی از آنها، شدت و مدت خشکسالی را در یک ایستگاه هواشناسی در تایوان ارزیابی نمود. فرخ‌نیا و مرید (۱۳۸۷) نیز با استفاده از طیف متنوعی از توابع مفصل، خشکسالی در استان تهران را با توجه به دو عامل مدت و شدت خشکسالی مدل‌بندی و توزیع توام آنها را تعیین کردند. برای این منظور با بکارگیری دو معیار حداکثر لگاریتم درستنمایی و میانگین توان دوم فواصل^۲ (MSD)، توزیع توام از توزیع تجربی آن، بهترین تابع مفصل انتخاب و سپس توزیع شدت-مدت - خشکسالی در استان تعیین و به کمک آنها دوره بازگشت خشکسالی‌ها مورد بررسی قرار خواهد گرفت. همچنین آنها در تحقیقشان از شاخص بارندگی استاندارد شده^۳ (SPI) سه ماهه استفاده کردند. شکل ۲-۱

¹ Copula

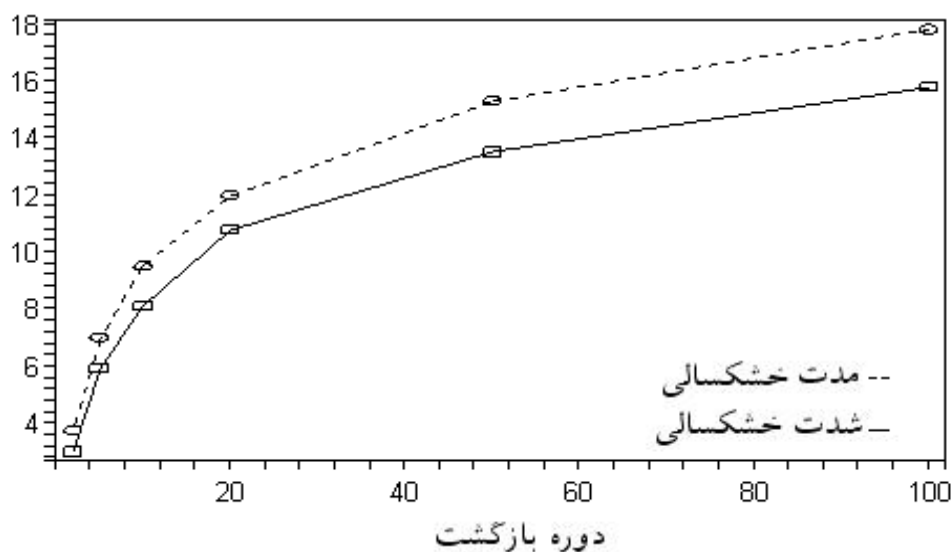
² Mean Square Distances

³ Standardized Precipitation Index



شکل ۱-۲ احتمال دو متغیره وقوع خشکسالی بر اساس شاخص SPI با استفاده از تابع مفصل Joe
در ایستگاه مهر آباد تهران (فرح نیا و مرید، ۱۳۸۷)

امیدی و همکاران (۱۳۸۹) نیز کار مشابهی را برای همین استان انجام دادند، با این تفاوت که اطلاعات ایستگاه‌های مورد استفاده‌شان تجمیع و روابط بطور منطقه‌ای ارائه گردید که در شکل ۲-۲ قابل ملاحظه هستند.

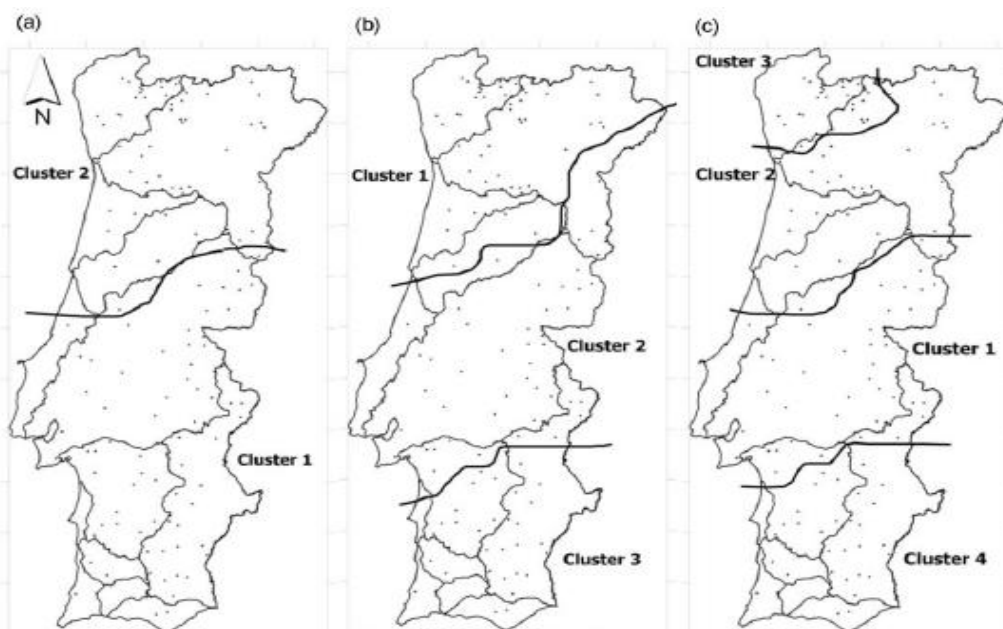


شکل ۲-۲: متوسط مقادیر منطقه‌ای شدت-مدت خشکسالی در استان تهران (امیدی و همکاران،)

۲-۳- تعیین مناطق همکن از لحاظ خشکسالی هواشناسی با استفاده از روش خوشه‌بندی

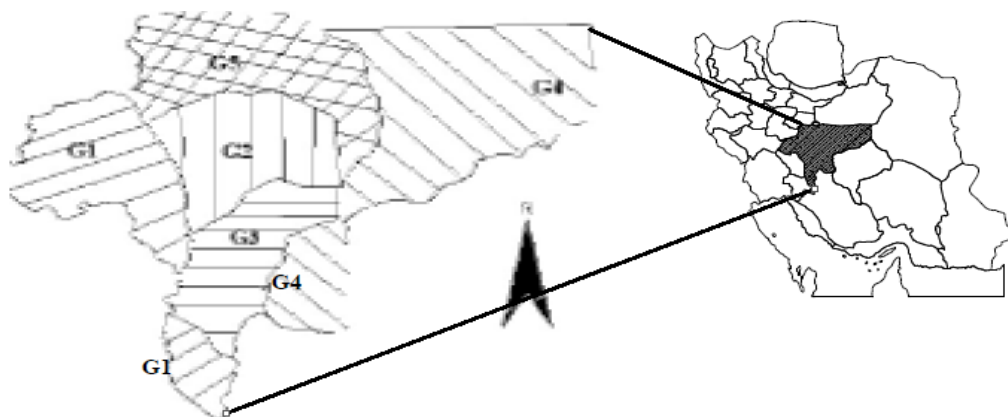
Santos و همکاران (۲۰۱۰) تغییرات زمانی و مکانی خشکسالی را در کشور پرتغال بر اساس داده‌های بارندگی ماهانه (از سپتامبر سال ۱۹۱۰ تا اکتبر ۲۰۰۴) ۱۴۴ ایستگاه باران‌سنجی که به طور یکنواخت در سطح کشور پخش شده‌اند، مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. شاخص خشکسالی مورد استفاده در این تحقیق، شاخص SPI در مقیاس‌های زمانی مختلف یک و شش (از آوریل تا سپتامبر) و دوازده (از اکتبر تا سپتامبر) ماهه می‌باشد. در این تحقیق جهت ارزیابی الگوی مکانی و زمانی خشکسالی در منطقه مورد مطالعه، روش‌های خوشه‌بندی-k-means و تحلیل مولفه‌های اصلی^۱ بر روی سری SPI، مورد استفاده قرار گرفتند. در روش خوشه‌بندی-k-means، تعداد کلاس‌های خوشه‌بندی ۲، ۳ و ۴ جهت خوشه‌بندی SPI شش ماهه (آوریل تا سپتامبر) مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان داد که تعداد کلاس خوشه‌بندی ۳، بهترین تعداد بود. توزیع مکانی ایستگاه‌های باران‌سنجی در منطقه‌ی مورد مطالعه و همچنین نتایج خوشه‌بندی برای تعداد کلاس‌های ۲، ۳ و ۴ در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.

¹ Principal component analysis



شکل ۲-۳: نتایج خوشه‌بندی SPI شش ماهه (آوریل تا سپتامبر) برای تعداد کلاس‌های ۲ و ۳ و ۴ در کشور پرتغال

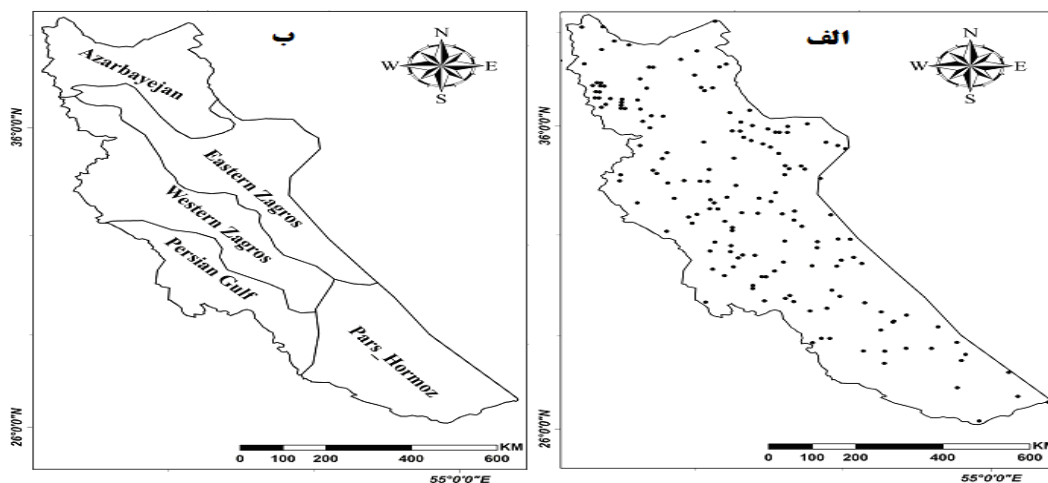
اسلامیان و همکاران (۱۳۸۴) به بررسی پراکنش مکانی ویژگی‌های خشکسالی در استان اصفهان با استفاده از روش تحلیل خوشه‌ای پرداختند. در این مطالعه از داده‌های بارندگی ماهانه سی ساله (۱۹۷۰-۲۰۰۰) ۴۵ ایستگاه هواشناسی و سینوپتیک جهت این تحلیل استفاده شد. همچنین با استفاده از ۱۰ مشخصه خشکسالی که بر اساس شدت، مدت و فراوانی شاخص SPI سه ماهه استوار بودند و بکارگیری روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی Ward، پنج گروه مکانی خشکسالی برای استان مشخص شد که در شکل ۲-۴ نشان داده شده است.



شکل ۲-۴: نتایج مربوط به تحلیل خوشه‌ای و توزیع مکانی خشکسالی در استان اصفهان

بر اساس شاخص SPI سه ماهه (اسلامیان و همکاران، ۱۳۸۴)

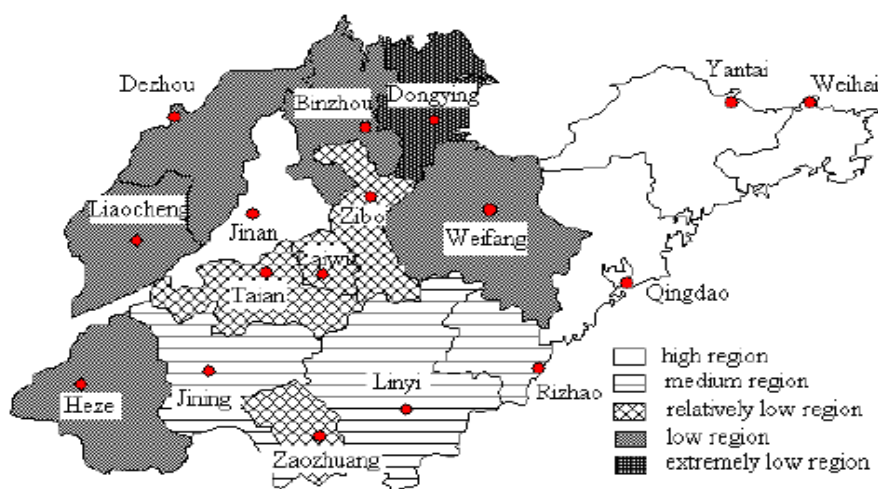
رضیئی و همکاران (۱۳۸۶) نیز به کمک روش‌های خوشه‌بندی و تحلیل اجزای اصلی (PCA) به منطقه‌بندی رژیم بارشی در منطقه کوهستانی غرب ایران بر اساس ۱۰ پارامتر اقلیمی در ۱۷۰ ایستگاه هواشناسی در سطح منطقه پرداختند. در این تحقیق ۱۰ پارامتر مورد استفاده بوسیله تحلیل PCA به ۴ مولفه کاهش داده شد و سپس با استفاده از روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی Ward و بر اساس مقادیر نمرات استاندارد مولفه‌های بدست آمده، منطقه غرب ایران به پنج زیرمنطقه همگن تقسیم شد. نتایج نشان داد (شکل ۲-۵) که عرض جغرافیایی و همچنین ناهمواری‌های موجود در منطقه‌بندی رژیم بارشی این ناحیه نقش اساسی داشته‌است.



شکل ۲-۵: پراکنش مکانی ایستگاه‌های باران‌سنجی منطقه غرب کشور و منطقه‌بندی رژیم بارشی آن

۲-۴- بررسی پراکنش مکانی ظرفیت حمل منابع آب^۱ با استفاده از آنالیز خوشه‌بندی

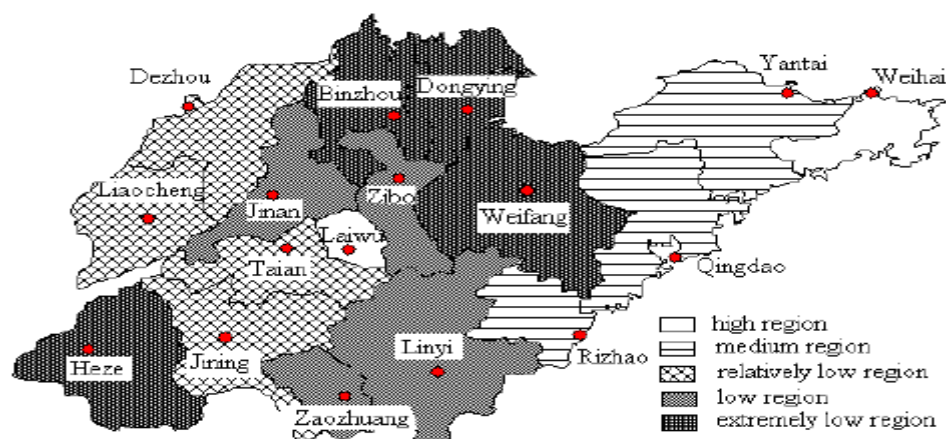
در تحقیق Wang و همکاران (۲۰۱۰)، ظرفیت حمل منابع آب^۲ استان Shandong در کشور چین را بر اساس روش‌های خوشه‌بندی مکانی مورد ارزیابی قرار دادند. در این کار، روش خوشه‌بندی k-means همراه با مدل شبکه عصبی جهت ارزیابی ظرفیت حمل منابع آب این استان مورد استفاده قرار گرفتند. تجزیه و تحلیل نتایج نشان داد که مدل شبکه عصبی در ارزیابی ظرفیت حمل منابع آب نتایج منطقی را به دست می‌دهد و می‌توان از نتایج آن به عنوان یک راهنمای علمی در تصمیم‌گیری‌های مربوط به بهره‌برداری پایدار از سیستم‌های منابع آب استفاده کرد. نتایج مربوط به روش خوشه‌بندی k-means و مدل شبکه عصبی به ترتیب در شکل‌های ۲-۶ (a) و (b) نشان داده شده است.



شکل ۲-۶ (a): نتایج ارزیابی ظرفیت حمل منابع آب استان Shandong به روش k-means (در پنج خوشه)

^۱Water Resources Carrying Capacity

^۲تعداد افرادی که نیازشان توسط سیستم منابع آب یک منطقه قابل تامین است



شکل ۶-۲ (b): نتایج ارزیابی ظرفیت حمل منابع آب استان Shandong به روش مدل شبکه عصبی

۲-۵- تعیین مناطق همگن از لحاظ خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از روش خوشه‌بندی

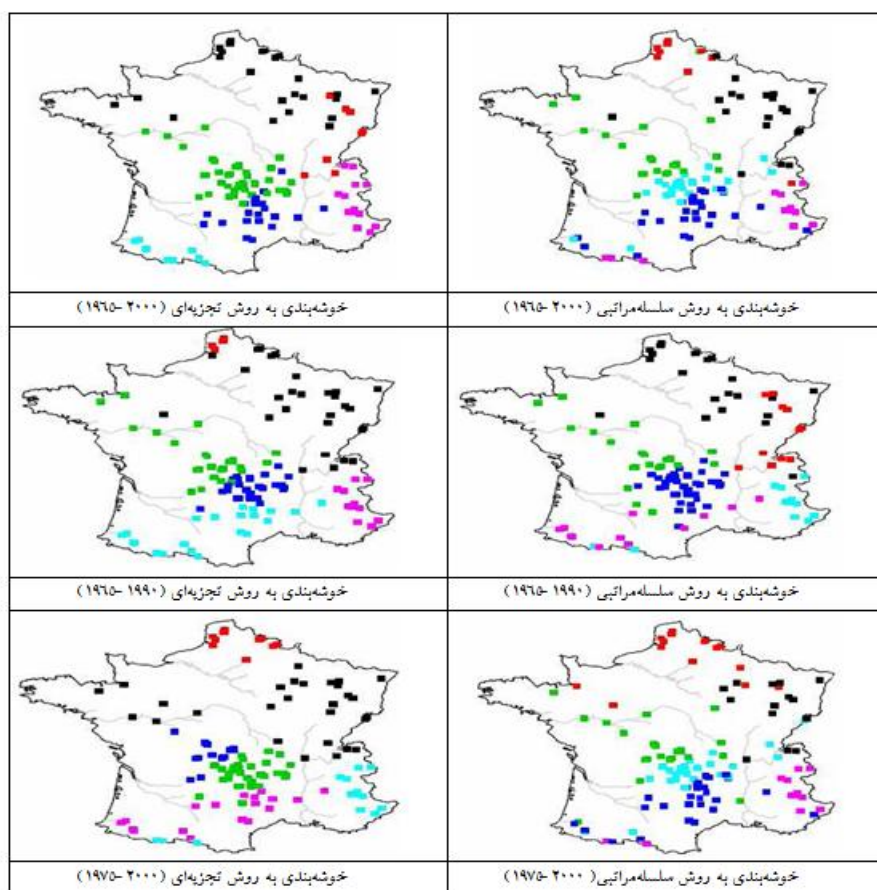
به منظور بررسی منطقه‌ای خشکسالی در کشور فرانسه Prudhomme و همکاران (۲۰۰۷) شاخص خشکسالی منطقه‌ای RDI^1 و خشکسالی نقطه‌ای DI را مورد استفاده قرار دادند. برای بدست آوردن شاخص RDI ابتدا سری زمانی شاخص خشکسالی DI با استفاده از سطح آستانه ۹۰ درصد ($Q90$) برای منطقه مورد مطالعه به دست آمد (منظور از $Q90$ مقدار دبی از رودخانه است که در ۹۰ درصد از زمان دبی رودخانه از آن بیشتر است). سپس با استفاده از روش آنالیز خوشه‌بندی مناطق با رفتار همگن خشکسالی مشخص و مقدار شاخص RDI برای هر کدام از این مناطق محاسبه شد. در این تحقیق از روش‌های خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی^۲ و تجزیه‌ای^۳ و با شش خوشه (در هر دو روش)، ایستگاه‌ها خوشه‌بندی شدند. همچنین با هر دو روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی و

^۱Reginol Drought Index

^۱Hierarchical Algorithm

^۲Partitioning Technique

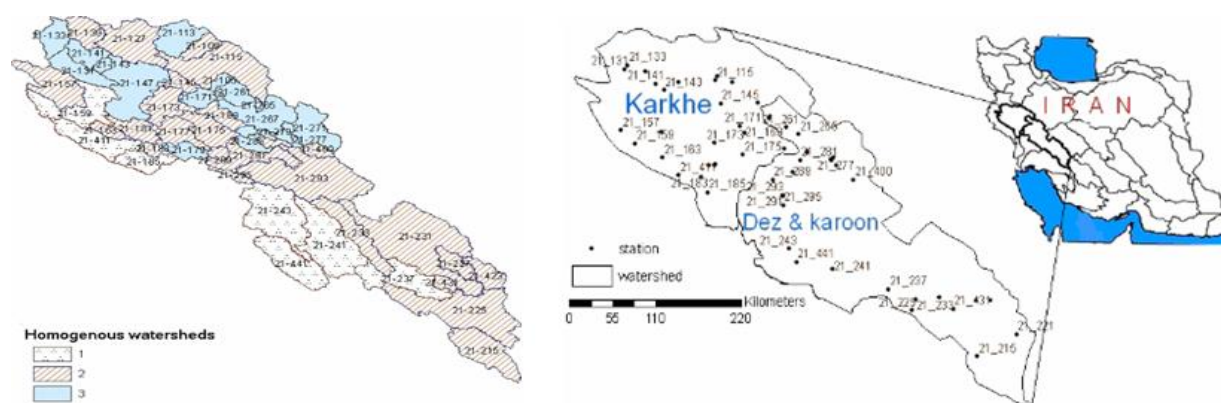
تجزیه‌ای، آنالیز خوشه‌بندی بر روی داده‌های روزانه دبی ایستگاه‌های هیدرومتری برای دوره‌های ۱۹۶۵-۱۹۹۰، ۱۹۷۵-۲۰۰۰ و ۱۹۶۵-۲۰۰۴ تکرار و انجام شد. نتایج نشان داد که نتایج خوشه‌بندی ایستگاه‌های هیدرومتری در هر دو روش در سه دوره زمانی مذکور با هم متفاوت بوده و همچنین روش خوشه‌بندی تجزیه‌ای نتایج بهتری را نسبت به روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی بدست می‌دهد. در شکل ۲-۷، نتایج خوشه‌بندی ایستگاه‌ها با هر دو روش در سه دوره زمانی مذکور نشان داده شده است.



شکل ۲-۷: خوشه‌بندی ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در کشور فرانسه با استفاده از دو روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی و تجزیه‌ای با ۶ خوشه و در سه دوره زمانی متفاوت

Byzedi و همکاران (۲۰۰۹) به بررسی خشکسالی هیدرولوژیکی در منطقه ی جنوب غربی ایران با استفاده از روش سطح برش (سطح برش ۷۰ درصد) و داده‌های دبی در ۵۴ ایستگاه هیدرومتری، پرداختند. همچنین در این تحقیق تحلیل فراوانی بر روی سری حداکثر سالانه کمبود حجم و مدت خشکسالی انجام شد. شاخص‌های

فیزیوگرافی، آب و هوایی، زمین‌شناسی و پوشش گیاهی به عنوان شاخص‌های مهم در این تحلیل مورد مطالعه قرار گرفتند. با توجه به نتایج آنالیز فاکتورها، شش فاکتور مهم شامل: مساحت، مقدار بارندگی از دسامبر تا فوریه، درصد مساحت با^۱ $NDVI < 0.1$ ، درصد مساحت برجسته^۲، تراکم زهکشی و حداقل ارتفاع حوضه انتخاب شدند. این مجموعه ۹۰/۹ درصد از کل واریانس را به خود اختصاص می‌دادند. در این تحقیق، روش‌های آنالیز خوشه-بندی و آنالیز تابع تشخیص برای مشخص کردن مناطق همگن مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان داد که فاکتور مساحت حوضه موثرترین فاکتور بوده و با حجم کمبود همبستگی بالایی دارد. همچنین شاخص مدت خشکسالی، شاخص مناسبی برای آنالیز منطقه‌ای خشکسالی نمی‌باشد. در این تحقیق برای خوشه‌بندی از روش سلسله مراتبی استفاده گردید که نتایج آن در شکل ۲-۸ نشان داده شده است.



شکل ۲-۸: پراکنش مکانی ایستگاه‌های هیدرومتری در منطقه جنوب غرب ایران و مناطق همگن هیدرولوژیکی در آن

¹Normalized Difference Vegetation Index

²The Percent of Convex Area

فصل سوم

مواد و روش‌ها

۳-۱- مقدمه

بنابر آنچه که در قبل آمد، شاخص‌های خشکسالی SPI سه و شش ماهه و DI برای بررسی رفتار خشکسالی در منطقه انتخاب گردیدند که می‌توانند معرفی از خشکسالی‌های کشاورزی و هیدرولوژیکی باشند. در این گزارش رفتارسنجی خشکسالی شامل بررسی شدت و مدت خشکسالی ثبت شده در ایستگاه‌ها و سپس شناسایی مناطق همگن از این بابت و می‌باشد. در این فصل ابتدا شرح مختصری از این شاخص‌ها ارائه می‌گردد (در گزارش اول طرح تحت عنوان "مطالعات پایه" توضیحاتی کامل ارائه شده است) و سپس به روش‌های مورد استفاده برای اهداف فوق پرداخته می‌شود.

۳-۲- شاخص‌های خشکسالی

۳-۲-۱- شاخص SPI

شاخص SPI برای هر منطقه بر اساس داده‌های بلند مدت بارندگی محاسبه می‌شود. به این ترتیب که در ابتدا یک توزیع احتمالاتی مناسب برای داده‌های بارندگی در دوره موردنظر برازش داده می‌شود. سپس این توزیع به توزیع نرمال استاندارد تبدیل می‌گردد. بنابراین مقدار میانگین SPI برابر با صفر بوده و مقادیر مثبت SPI نشان

دهنده بارندگی بیشتر و مقادیر منفی آن نشان‌دهنده بارندگی کمتر از میانگین می‌باشد. در جدول ۳-۱ طبقه‌بندی شاخص SPI نشان داده شده است.

جدول ۳-۱: طبقه‌بندی شدت خشکسالی بر اساس شاخص SPI

وضعیت	درصد از نرمال
خیلی خفیلی مرطوب	بزرگتر یا مساوی از ۲
خیلی مرطوب	۱/۵ تا ۱/۹۹
کمی مرطوب	۱ تا ۱/۹۹
نزدیک به نرمال	۰/۹۹ تا ۰/۹۹
کمی خشک	۱ تا ۱/۴۹
خشک شدید	۱/۵ تا ۱/۹۹
بسیار زیاد خشک	کوچکتر یا مساوی -۲

۳-۲-۲- شاخص خشکسالی^۱ DI

شاخص خشکسالی DI از جمله شاخص‌هایی است که برای پایش خشکسالی هیدرولوژیکی در یک ایستگاه به کار می‌رود. این شاخص قابلیت پایش منطقه‌ای خشکسالی را نیز دارد که از طریق شاخص RDI^۲ که بر اساس بررسی اطلاعات DI در مجموعه‌ای از ایستگاه‌ها است، به انجام می‌رسد. نحوه محاسبه شاخص‌های فوق در ادامه شرح داده می‌گردد.

^۱ Deficiency Index

^۲ Regional Deficiency Index

برای محاسبه شاخص DI برای هر یک از روزهای سال (J) در طول N سال داده‌های آماری موجود در یک ایستگاه هیدرومتری ابتدا برای هر یک از روزهای سال بازه‌ای به طول D روز قبل و D روز بعد انتخاب می‌گردد. مقدار D باید طوری باشد که تعداد دبی‌های انتخاب شده برای بازه هر یک از روزها در طول N سال آماری، کمتر از ۳۰۰ نباشد. در این تحقیق مقدار D برابر با ۱۰ روز در نظر گرفته شده است که در تحقیق Prudhomme و همکاران (۲۰۰۷) نیز مورد استفاده قرار گرفت. در مرحله بعد، منحنی تداوم جریان برای بازه هر روز (j) محاسبه و رسم می‌گردد.

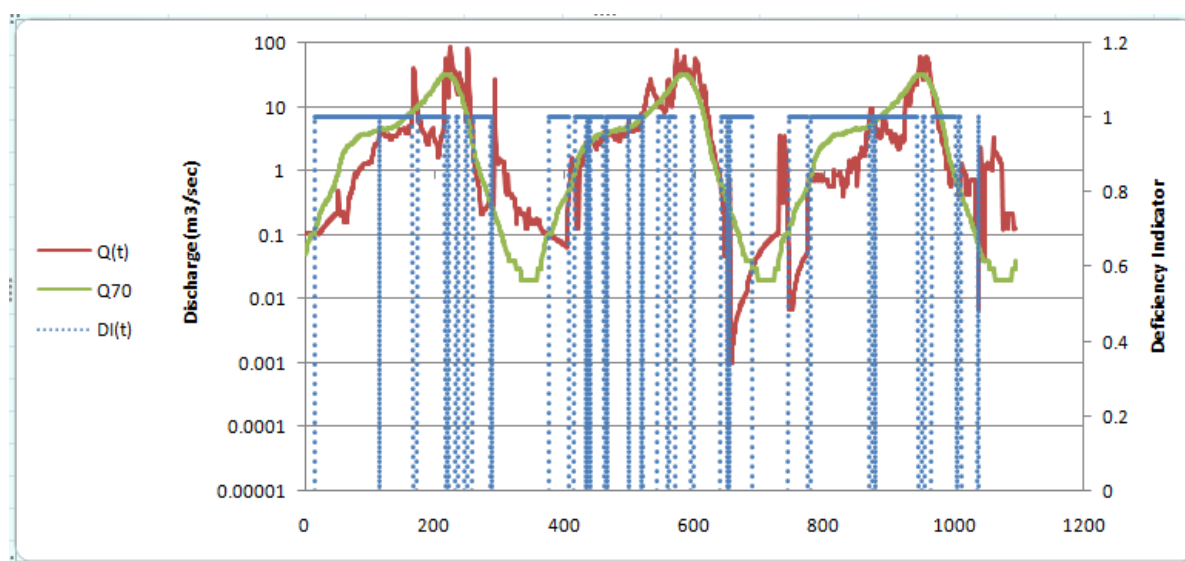
محاسبه Q آستانه مرحله بعدی می‌باشد. در این مطالعه مقدار Q_{70} به عنوان دبی آستانه در نظر گرفته شد (مقدار دبی که در ۷۰ درصد از ایام سال دبی رودخانه مساوی و یا بیشتر از آن است). در مرحله سری جریان رودخانه با دبی آستانه مقایسه و ارقام کمتر و بیشتر از آن مبین وقوع و عدم وقوع خشکسالی خواهد بود:

$$DI(t) = 1 \quad (\text{اگر } Q(t) \leq Q_{70}) \quad (3-1)$$

$$DI(t) = 0 \quad (\text{اگر } Q(t) > Q_{70}) \quad (3-2)$$

به عنوان نمونه شکل ۱-۳ تغییرات مقدار دبی، Q_{70} و DI را در ایستگاه ونیار واقع در رودخانه آجی‌چای برای

سال‌های آبی ۸۳-۱۳۸۲ تا ۸۵-۱۳۸۴ نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳: تغییرات مقدار دبی و سری زمانی شاخص DI در ایستگاه ونیار طی سال‌های ۸۳-۱۳۸۲ لغایت ۸۵-۱۳۸۴

۳-۲-۳ شاخص RDI

شاخص منطقه‌ای RDI در واقع جمع شاخص‌های DI در یک روز و ناحیه‌ای است که همگنی آن مورد تأیید قرار گرفته باشد. چنانچه در این ناحیه M ایستگاه هیدرومتری با N سال داده روزانه دبی وجود داشته باشد، در این صورت شاخص RDI(t) مطابق رابطه ۳-۲ محاسبه می‌شود:

$$RDI(t) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M DI_i(t) \quad (۳-۲)$$

در این رابطه i: شمارنده ایستگاه‌های موجود در منطقه و $DI_i(t)$: مقدار DI در ایستگاه i ام در روز t ام می‌باشند. چنانچه مقدار RDI(t) برای منطقه‌ای برای یک روز خاص بیشتر از 0.3 بیشتر باشد، آنگاه در آن روز در منطقه مورد مطالعه خشکسالی رخ داده است (Prudhomme et al., 2007).

۳-۳-۳ شناسایی مناطق همگن

در این گزارش برای شناسایی منطقه همگن از روش خوشه‌بندی استفاده شده که بر اساس آن شباهت ایستگاه‌ها در مواقع خشکسالی مورد بررسی واقع شده است. معیار این شباهت رفتار DI در آنها طی دوره آماری مشترک بین ایستگاه‌ها می‌باشد که در ادامه با شرح بیشتری ارائه خواهند شد.

۳-۳-۱ خوشه بندی

خوشه به گروهی از اشیاء اطلاق می‌شود که نسبت به بقیه اشیاء شباهت بیشتری با یکدیگر دارند. در عین حال بقیه اشیاء نیز ممکن است در خوشه‌های دیگری قرار گیرند که خود از شباهت‌هایی با هم برخوردار هستند. این روش یکی از تکنیک‌هایی است که در مبحث داده‌کاوی جهت استخراج الگوهای موجود در حجم عظیمی از داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. مانند آنچه در این گزارش است که اطلاعات روزانه ۳۵ ایستگاه بطور همزمان و طی دوره آماری آنها مورد مقایسه قرار می‌گیرند. برای شرح با روش‌های خوشه‌بندی، به مفاهیمی همچون ماتریس داده‌ها، معیارهای شباهت و ماتریس ناهمبندی نیاز است.

۳-۳-۲- ماتریس داده‌ها

چنانچه در مطالعه یک فرایند فیزیکی، تعداد مشاهدات (objects) مورد بررسی N باشد و هر مشاهده با n متغیر (variables) اندازه‌گیری شده باشد، در آن صورت ماتریس داده‌ها یک ماتریس با ابعاد $N \times n$ به صورت زیر خواهد بود:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N1} & x_{N2} & \cdots & x_{Nn} \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

در این مطالعه، منظور از مشاهدات، ایستگاه‌های باران‌سنجی و هیدرومتری موجود در حوضه دریاچه ارومیه می‌باشند و منظور از ویژگی، مقدار شاخص استاندارد بارش (SPI) سه و شش ماهه برای ایستگاه‌های باران-سنجی (از سال ۱۳۵۰ تا ۱۳۸۵) و مقدار شاخص DI (از سال ۱۳۶۶ تا ۱۳۸۴) برای ایستگاه‌های هیدرومتری می‌باشد. این تعداد ایستگاه و طول دوره آماری به ترتیب ماتریس‌های داده با ابعاد 35×430 ، 35×427 و 32×6935 را به ترتیب برای شاخص‌های SPI3، SPI6 و DI تولید می‌کنند.

۳-۳-۳- معیار شباهت

در فضای اندازه‌گیری، شباهت اغلب براساس معیار فاصله تعریف می‌شود که در اینجا از فاصله اقلیدسی استفاده شده است. این فاصله اندازه خط راست بین دو شی می‌باشد. همانگونه که قبلاً اشاره شد، شباهت دو ایستگاه باران‌سنجی یا هیدرومتری به معنی وقوع رخداد‌های همزمان خشکسالی در آنها است. برای دو نقطه با مختصات $U(u_1, u_2, \dots, u_p)$ و $V(v_1, v_2, \dots, v_p)$ فاصله اقلیدسی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$D^2(U, V) = (u_1 - v_1)^2 + (u_2 - v_2)^2 + \cdots + (u_p - v_p)^2 \quad (3-4)$$

در این رابطه، $D^2(U, V)$ مجذور فاصله بین دو شی می باشد. همچنین $u_1, u_2, \dots, u_p$ متغیرهای مربوط به شی U و $v_1, v_2, \dots, v_p$ متغیرهای مربوط به شی V می باشند. v_1 تا v_p در واقع سری زمانی صفر و یک (وقوع و یا عدم وقوع خشکسالی) برای هر ایستگاه می باشند.

۳-۳-۴- ماتریس ناهمانندی

ماتریس ناهمانندی ماتریسی است که درایه های آن فاصله هر مشاهده را با مشاهدات دیگر نشان می دهد:

$$\begin{bmatrix} 0 & d(1,2) & d(1,3) & \dots & d(1,N) \\ & 0 & d(2,3) & \dots & d(2,N) \\ & & 0 & \ddots & \vdots \\ & & & \ddots & \vdots \\ & & & & 0 \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

در این ماتریس $d(i,j)$ فاصله ی بین شی i و j می باشد $(j=1,2,\dots,N, i=1,2,\dots,N)$. این ماتریس متقارن

بوده و درایه های روی قطر اصلی این ماتریس صفر می باشد (زیرا شی با خودش مقایسه شده است):

$$\begin{aligned} \forall i, j, d(i, j) &= d(j, i) \\ i = j, d(i, j) &= 0 \end{aligned} \quad (3-6)$$

۳-۳-۵- روش های خوشه بندی مورد استفاده

روش های خوشه بندی به دو گروه کلی سلسله مراتبی و تجزیه ای تفکیک می شوند. در این مطالعه، روش خوشه بندی تجزیه ای جهت خوشه بندی ایستگاه های باران سنجی و هیدرومتری به کار گرفته شد که شامل K-means و K-medoids می باشند.

۳-۳-۵-۱- روش خوشه‌بندی K-means

روش K-means با یک تقسیم‌بندی تصادفی اشیاء شروع به کار می‌کند و براساس مشابهت آنها با مراکز خوشه‌ها، کار اختصاص دادن آنها را به خوشه‌ها به انجام می‌رساند و این حلقه تا زمانی ادامه می‌یابد که شرط همگرایی محقق شود. شرط همگرایی معمولاً رسیدن به میزان حداقل مجذور خطا می‌باشد. خطای مربع در خوشه‌بندی مجموعه‌ای از اشیاء (X) از رابطه‌ی ۴-۶ بدست می‌آید:

$$J(X; V) = \sum_{i=1}^c \sum_{k \in i} \|x_k^{(i)} - v_i\|^2 \quad (۷-۳)$$

در این رابطه c تعداد خوشه‌ها، $x_k^{(i)}$ ، فاصله شی k ام از خوشه i ام از مبدا مختصات و v_i فاصله مرکز جرم خوشه i ام از مبدا مختصات می‌باشد:

$$v_i = \frac{\sum_{k=1}^{N_i} x_k}{N_i} \quad (۸-۳)$$

در این رابطه، N_i تعداد مشاهدات در خوشه‌ی i ام می‌باشد.

۳-۳-۵-۲- روش خوشه‌بندی K-medoids

این روش مشابه روش قبل است با این تفاوت که برای بدست آوردن مراکز خوشه‌ها از یک معیار عدم تشابه استفاده کرده و برای پیدا کردن آنها، تمامی جفت داده‌ها مورد آزمایش قرار می‌گیرند. یکی از مزایای این روش نسبت به روش قبل این است که نسبت به نقاط پرت حساس نمی‌باشد. خوشه‌بندی به روش k-medoids باید مراحل زیر را دنبال کرد:

۱- ابتدا مشاهدات به K خوشه تقسیم می‌شوند

۲- برای خوشه t ام ($t=1,2,\dots,k$) یک نمایانگر (m_t) انتخاب می‌شود. مشاهده‌ای در خوشه t به عنوان نمایانگر انتخاب می‌شود که عبارت $\sum_i d(c_i, m_t)$ را حداقل کند. فاصله اقلیدسی بین شی i ام در خوشه t و نمایانگر خوشه t ام بوده و C_i مشاهده i ام می‌باشد.

۳- تمام مشاهدات به شرط زیر بین خوشه‌ها جابه‌جا می‌شوند:

مشاهده C_i درون خوشه j ام قرار می‌گیرد، اگر رابطه ۳-۹ برقرار باشد:

$$d(c_i, m_j) \leq d(c_i, m_t), t = 1, 2, \dots, k \quad (9-3)$$

اکنون K خوشه جدید به دست آمده است.

۴- حال به مرحله ۲ رفته و مراحل فوق آنقدر تکرار می‌شود تا عبارت $\sum_{i=1}^n d(c_i, m_t)$ حداقل گردد (n تعداد کل مشاهدات می‌باشد).

۳-۴- بررسی شدت و مدت خشکسالی‌ها در حوضه ارومیه

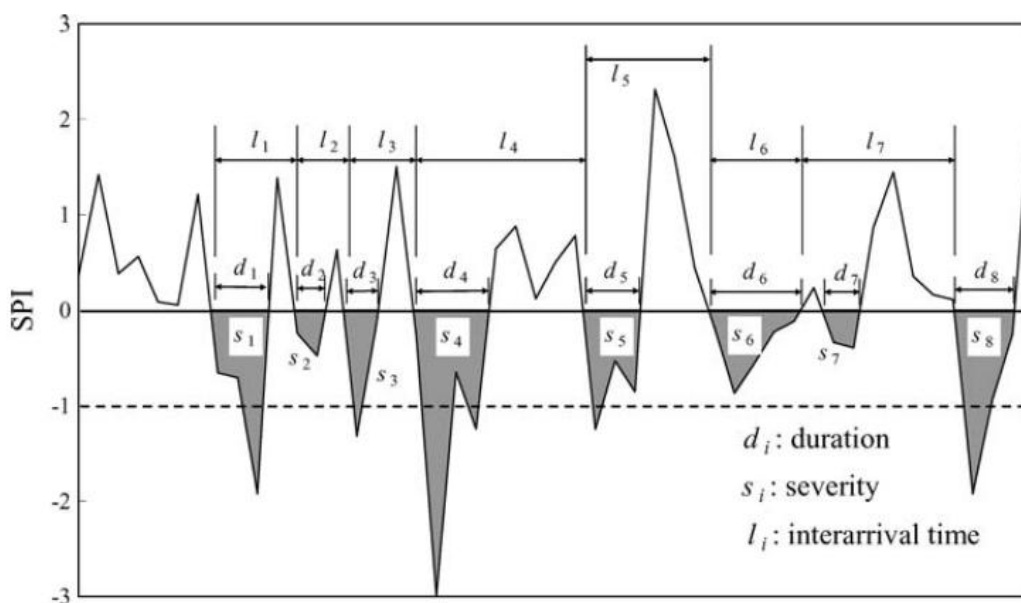
شدت و مدت دو ویژگی مهم خشکسالی می‌باشد که هر دو از ماهیت تصادفی برخوردار هستند. لذا لازم است تا در بررسی آنها روش‌های آماری مورد استفاده قرار گیرند که در این گزارش توابع مفصل^۱ بکار رفته است. این توابع توانایی ساخت توزیع احتمالاتی چندمتغیره را دارند بطوریکه تاثیر آنها بر یکدیگر نیز لحاظ می‌گردد که جزء ویژگی این روش‌ها می‌باشد. توضیحات بیشتر در باره این توابع برای تحلیل خشکسالی در مرجع

¹ Copula Function

فرخ‌نیا و مرید (۱۳۸۷) و Shiau (2006) قابل دسترس است. محاسبات این روش‌ها با شدت و مدت هر خشکسالی بر اساس شاخص مدنظر و مطابق ذیل آغاز می‌گردد:

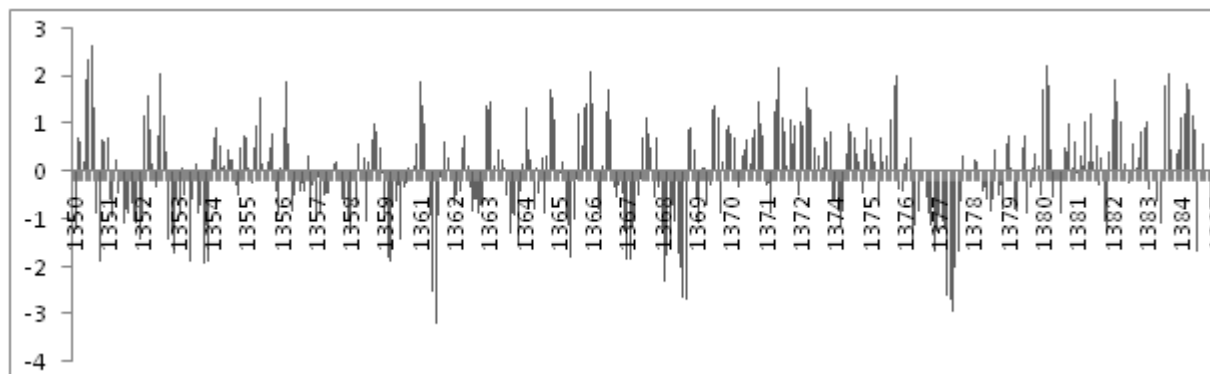
$$S = -\sum_{i=1}^D Index_i \quad (10-3)$$

که در آن S شدت، D مدت و $Index$ شاخص خشکسالی مورد نظر می‌باشد. نحوه محاسبه S و D نیز با استفاده از شکل ۳-۲ قابل شرح است. سری زمانی فرضی یک شاخص خشکسالی در این شکل نشان داده شده است که در آن s_i ، d_i به ترتیب نشان دهنده شدت (جمع مقادیر منفی شاخص در موقع رخداد یک واقعه) و مدت خشکسالی i ام و l_i فاصله زمانی بین دو خشکسالی‌های i ام و $(i+1)$ ام را نشان می‌دهد. قابل ملاحظه است که در اینجا مقادیر SPI کمتر از -۱، وقوع خشکسالی در نظر گرفته شده است. برای شرح کاملتر این روش مطالب برای ایستگاه دریان به عنوان نمونه ارائه می‌گردد و در فصل بعدی نیز به نتایج روش برای سایر ایستگاه‌ها اشاره می‌گردد.



شکل ۳-۲- سری زمانی فرضی شاخص خشکسالی SPI و نحوه تعریف مدت (محور Xها) و شدت (محور Yها) (Shiau, 2006)

شکل ۳-۳ سری زمانی SPI سه ماهه را در ایستگاه دریان از سال خرداد ۱۳۵۰ لغایت اسفند ۱۳۸۵ نشان می‌دهد که براساس رابطه ۱ شرح شکل ۱ مقادیر شدت و مدت وقایع خشکسالی محاسبه و در جدول ۲ آمده است. ملاحظه می‌گردد که در سال ۱۳۵۷ به لحاظ مدت و سال ۱۳۷۶ به لحاظ شدت شدیدترین وضعیت را داشته است.



شکل ۳-۳- سری زمانی شاخص SPI در دریان (۱۳۵۰ لغایت ۱۳۸۵)

جدول ۳-۲: مدت و شدت رخداد های خشکسالی در ایستگاه دریان

شروع		پایان		مدت (ماه)	شدت
سال	ماه	سال	ماه		
1350	6	1350	7	2	1.75
1351	4	1351	4	1	0.04
1351	6	1351	6	1	0.03
1351	8	1352	6	11	10.62
1353	4	1354	7	16	16.31
1355	4	1355	5	2	0.37
1356	7	1356	8	2	0.86
1357	4	1359	6	27	14.39
1360	1	1360	11	11	9.27
1361	6	1361	12	7	6.58
1362	2	1363	1	12	5.8
1363	10	1364	4	7	4.58
1364	6	1364	6	1	0.18
1364	10	1365	1	4	1.37

ادامه جدول ۳-۲

1365	8	1366	2	7	6.06
1366	9	1366	10	2	0.15
1367	5	1368	1	9	12.95
1368	7	1369	9	15	22.65
1369	12	1370	2	3	2.24
1374	3	1374	6	4	3.24
1375	8	1375	8	1	0.02
1376	6	1378	3	22	33.79
1378	7	1379	4	10	5.19
1379	7	1380	1	7	2.68
1380	4	1380	6	3	0.69
1381	2	1381	2	1	1.03
1382	6	1382	7	2	1.46
1383	4	1383	4	1	0.28
1383	6	1383	6	1	0.29
1384	2	1384	4	3	2.02
1385	8	1385	10	3	1.08

۳-۴-۱ توزیع یک متغیره شدت و مدت خشکسالی

پس از مرحله قبل در این قسمت توزیع احتمالاتی شدت و مدت ابتدا بطور مستقل محاسبه می گردند. عموماً برای تحلیل آماری این دو ویژگی خشکسالی به ترتیب از توزیع های گاما و نمایی استفاده می شود (Zelenhastic and Salvai, 1987) که توابع چگالی احتمال آنها به ترتیب در روابط (۳-۱۱) و (۳-۱۲) آورده شده است:

$$f_D(d) = \frac{1}{\lambda} e^{-d/\lambda} \quad , \quad d > 0 \quad (3-11)$$

$$f_S(s) = \frac{s^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} e^{-s/\beta} \quad , \quad s > 0 \quad (3-12)$$

که در آن d مدت خشکسالی، λ پارامتر توزیع نمایی، s شدت خشکسالی، α و β به ترتیب پارامترهای شکل و مقیاس توزیع گاما و Γ تابع گاما می‌باشد. برای برآورد پارامترهای توزیع‌های مربوط به شدت و مدت خشکسالی‌های ثبت شده توسط هر شاخص از روش حداکثر درست‌نمایی^۱ استفاده گردید که پارامترهای حاصل برای ایستگاه دریان در جدول ۳-۳ آورده شده است.

جدول ۳-۳- پارامترهای توزیع‌های تک‌متغیره نمایی و گاما برای شاخص SPI در ایستگاه دریان

مدت		
تابع توزیع	λ	
Exponential	۶/۳۹	
شدت		
Gamma	α	β
	۰/۵۲	۱۰/۴۵

لازم به ذکر است که توزیع‌های دیگری نیز بدین منظور مورد ارزیابی قرار گرفت که نهایتاً مطابق توصیه قبل همچنان نمایی و گاما برازش بهتری را نشان دادند.

۳-۴-۲ توابع مفصل

همانطور که در بخش‌های قبلی ذکر شد، توابع مفصل توابعی هستند که امکان ترکیب توزیع‌های تک متغیره متفاوت آماری را جهت ساخت یک توزیع چند متغیره فراهم می‌سازند. مزیت استفاده از توزیع چندمتغیره ساخته شده از این توابع در نظر گرفتن همبستگی موجود بین متغیرهای مورد مطالعه می‌باشد. طبق قضیه Sklar

^۱ Maximum Likelihood

در حالت وجود دو متغیر x و y ، اگر $F_{x,y}(x,y)$ یک تابع توزیع احتمالاتی دومتغیره با توابع حاشیه‌ای $F_x(x)$ و $F_y(y)$ باشد، تابع مفصل این توابع حاشیه‌ای به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_{x,y}(x,y) = C(F_x(x), F_y(y)) \quad (3-13)$$

این قضیه برگشت‌پذیر بوده و اگر $F_x(x)$ و $F_y(y)$ پیوسته باشند، تابع C یکتاست. برای آگاهی بیشتر در مورد توابع مفصل می‌توان به مرجع (Schweizer and Sklar, 1983) مراجعه نمود. در صورتی که تابع چگالی احتمال (pdf) متغیرهای x و y پیوسته باشد و آن‌ها را با $f_x(x)$ و $f_y(y)$ نشان دهیم، تابع چگالی احتمال ترکیب آن‌ها از رابطه γ به دست می‌آید:

$$f_{x,y}(x,y) = c(f_x(x), f_y(y)) \times f_x(x) \times f_y(y) \quad (3-14)$$

که در آن c تابع چگالی احتمال تابع مفصل C می‌باشد که طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$c(u,v) = \frac{\partial^2 C(u,v)}{\partial u \cdot \partial v} \quad (3-15)$$

که در آن u و v توابع توزیع احتمال حاشیه‌ای دو متغیر مورد بررسی می‌باشد.

γ نوع از توابع مفصل دوبعدی یک‌پارامتری مرسوم که در این گزارش مد نظر قرار گرفته‌اند به همراه تابع چگالی احتمال مربوط در جدول ۳ آورده شده‌اند.

جدول ۳-۴ روابط توابع مفصل مورد استفاده

نام تابع مفصل	رابطه تابع مفصل ^۱	تابع چگالی احتمال	ملاحظات
Ali-Mikhail-Haq	$C(u, v) = \frac{uv}{1 - \theta(1-u)(1-v)}$	$c(u, v) = \frac{[1 - \theta(1-u)(1-v)](1-\theta) + 2\theta uv}{[1 - \theta(1-u)(1-v)]^3}$	$-1 \leq \theta \leq 1$
Galambos	$C(u, v) = uv \exp \{ [(-\ln u)^{-\theta} + (-\ln v)^{-\theta}]^{\frac{1}{\theta}} \}$	$c(u, v) = \frac{C(u, v)}{uv} \{ 1 - [(-\ln u)^{-\theta} + (-\ln v)^{-\theta}]^{\frac{1}{\theta}-1} \times [(-\ln u)^{-\theta-1} + (-\ln v)^{-\theta-1}] + [(-\ln u)^{-\theta} + (-\ln v)^{-\theta}]^{\frac{1}{\theta}-2} \times [(-\ln u)(-\ln v)]^{\theta-1} [1 + \theta + [(-\ln u)^{-\theta} + (-\ln v)^{-\theta}]^{\frac{1}{\theta}}] \}$	$\theta \geq 0$
Gumble-Hougaard	$C(u, v) = \exp \{ -[(-\ln u)^{\theta} + (-\ln v)^{\theta}]^{\frac{1}{\theta}} \}$	$c(u, v) = C(u, v) \frac{[(-\ln u)(-\ln v)]^{\theta-1}}{uv} [(-\ln u)^{\theta} + (-\ln v)^{\theta}]^{\frac{2}{\theta}-2} \times \{ (\theta-1)[(-\ln u)^{\theta} + (-\ln v)^{\theta}]^{\frac{1}{\theta}} + 1 \}$	$\theta \geq 1$
Clyton	$C(u, v) = (u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1)^{\frac{1}{\theta}}$	$c(u, v) = (\theta+1)(u^{-\theta} + v^{-\theta} - 1)^{\frac{1}{\theta}-2} (uv)^{-\theta-1}$	$\theta \geq 0$
Frank	$C(u, v) = -\frac{1}{\theta} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\theta u} - 1)(e^{-\theta v} - 1)}{e^{-\theta} - 1} \right]$	$c(u, v) = -\frac{\theta e^{-\theta(u+v)}(e^{-\theta} - 1)}{[e^{-\theta(u+v)} - e^{-\theta u} - e^{-\theta v} + e^{-\theta}]^2}$	$\theta \neq 0$
Plackett	$C(u, v) = \frac{1}{2(\theta-1)} \{ 1 + (\theta-1)(u+v) - \times [(1 + (\theta-1)(u+v))^2 - 4\theta(\theta-1)uv]^{\frac{1}{2}} \}$	$c(u, v) = [(1 + (\theta-1)(u+v))^2 - 4\theta(\theta-1)uv]^{-\frac{3}{2}} \times \theta [1 + (\theta-1)(u+v-2uv)]$	$\theta \geq 0$
Joe	$C(u, v) = 1 - [(1-u)^{\theta} + (1-v)^{\theta} - (1-u)^{\theta}(1-v)^{\theta}]^{\frac{1}{\theta}}$	$c(u, v) = [(1-u)^{\theta} + (1-v)^{\theta} - ((1-u)^{\theta}(1-v)^{\theta})^{\frac{1}{\theta}}]^{\frac{1}{\theta}-2} \times [(1-u)(1-v)]^{\theta-1} [(\theta-1) + (1-u)^{\theta} + (1-v)^{\theta} - (1-u)^{\theta}(1-v)^{\theta}]$	$\theta \geq 0$

برای به دست آوردن پارامتر تابع مفصل نیز از روش حداکثر درستنمایی استفاده گردید، به این ترتیب که تابع لگاریتم درستنمایی تابع مفصل با استفاده از پارامترهای به دست آمده برای توابع حاشیه ای نمایی و گاما حداکثر گردید تا بهترین مقدار θ به دست آید. لگاریتم درستنمایی تابع مفصل طبق رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\ln L(d, s; \lambda, \alpha, \beta, \theta) = \ln L_C(F_D(d), F_S(s); \theta) + \ln L_D(F_D(d); \lambda) + \ln L_S(F_S(s); \alpha, \beta) \quad (3-16)$$

که در آن L_C لگاریتم درستنمایی تابع مفصل می باشد و تابع بالا با معلوم بودن λ ، α و β حداکثر گردیده تا مقدار بهینه پارامتر θ به دست آید. مقدار بهینه پارامتر و لگاریتم درستنمایی توابع مفصل مختلف برای دو شاخص

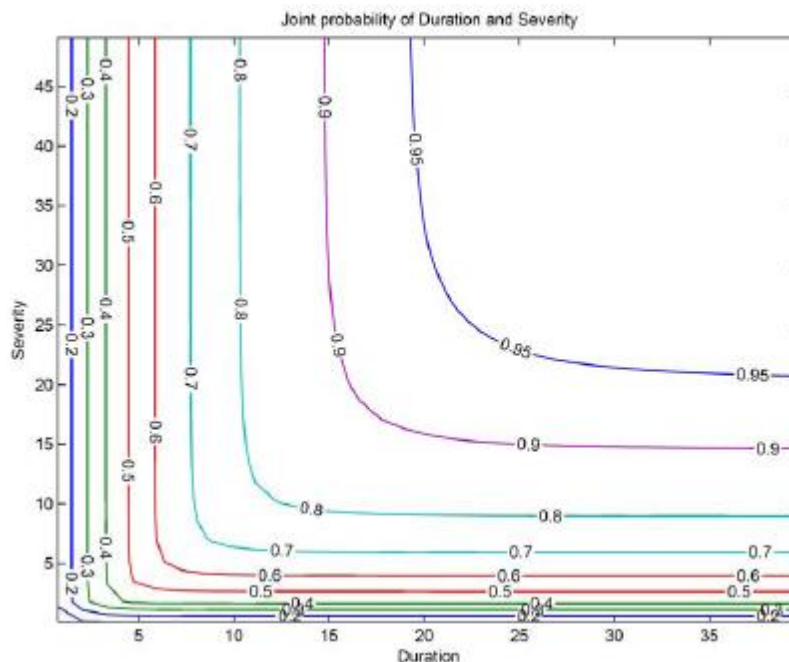
^۱ - u و v به ترتیب F_D و F_S در رابطه ۹ هستند.

مد نظر در جدول ۴ آورده شده است. بر این اساس برای شاخص SPI در ایستگاه دریان به ترتیب توابع مفصل Frank و Joe مقدار بیشینه درستنمایی را داشته‌اند و در نتیجه برای ساخت توزیع دومتغیره مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۳-۵ مقدار بهینه پارامتر و لگاریتم درستنمایی توابع مفصل مختلف برای شاخص SPI

نوع تابع مفصل	حداکثر درستنمایی	مقدار پارامتر
Frank	-134.65	16.38
Joe	-144.92	4.04
Plackett	-137.44	48.60
Galambos	-151.40	1.70
Gumble-Hougaard	-139.83	3.55
Clyton=Cook-Johnson	-143.92	3.61
Ali-Mikhail-Haq	-134.66	-0.98

بر اساس تحلیل‌های این بخش، توزیع دو متغیره شدت و مدت خشکسالی شاخص‌های SPI در شکل ۳-۴ نشان داده شده است. در این اشکال خطوط کنتور نشان دهنده احتمالات مختلف وقوع خشکسالی با توجه به شدت و مدت در آنها می‌باشد.



شکل ۳-۴ احتمال دو متغیره وقوع خشکسالی بر اساس شاخص SPI با استفاده از تابع مفصل Frank در ایستگاه دریان

۳-۴-۳ نحوه کاربرد توابع مفصل

با توجه به حال با توجه به توزیع دومتغیره به دست آمده اطلاعاتی قابل حصول است که در مدیریت خشکسالی نقش مهمی دارند. به طور مثال احتمال اینکه مقادیر شدت و مدت خشکسالی به طور همزمان از حد معینی بیشتر شود، طبق رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود (Shiau 2006):

$$P(D \geq d, S \geq s) = 1 - F_D(d) - F_S(s) + C(F_D(d), F_S(s)) \quad (3-17)$$

با استفاده از این رابطه چنانچه بخواهیم احتمال وقوع خشکسالی با شدت بیش از ۹ و مدت بیش از ۶ ماه را برای شاخص SPI محاسبه کنیم، در این صورت $F_D(6) = 0.62$ و $F_S(9) = 0.85$ و $C(F_D(d), F_S(s)) = 0.61$ خواهد بود و در نتیجه احتمال وقوع این حالت برابر ۰/۱۴ خواهد بود.

همچنین احتمالات شرطی دو متغیر نیز به راحتی قابل محاسبه می‌باشند، به این معنی که اگر هدف بررسی احتمال وقوع یک متغیر در حالت فرضی تجاوز متغیر دیگر از آستانه خاصی باشد روابط (۳-۱۸) و (۳-۱۹) قابل استفاده می‌باشد (Shiau, 2006):

$$P(S \leq s, D \geq d') = \frac{F_s(s) - C(F_D(d'), F_s(s))}{1 - F_D(d')} \quad (3-18)$$

$$P(D \leq d, S \geq s') = \frac{F_D(d) - C(F_D(d), F_s(s'))}{1 - F_s(s')} \quad (3-19)$$

به عنوان مثال اگر مدیریت سیستم منابع آب بخواهد بداند که احتمال وقوع خشکسالی بر اساس شاخص SPI با شدت کمتر از ۳ و ۶ در صورتی که مدت خشکسالی از ۴ ماه تجاوز کند چقدر می‌باشد؟ داریم،
 $F_D(4)=0/91$ ، $F_s(3)=0/89$ ، $F_s(6)=0/99$ ، $C(F_D(4), F_s(3))=0/87$ و $C(F_D(4), F_s(3))=0/91$. حال با استفاده از رابطه ۱۱ احتمال وقوع خشکسالی با شدت‌های کمتر از ۳ و ۶ با فرض بیشتر بودن مدت خشکسالی از ۴ ماه به ترتیب برابر ۰/۲۲ و ۰/۸۹ می‌باشد.

۳-۴-۴ محاسبه دوره بازگشت توزیع دومتغیره

دوره بازگشت و تحلیل‌های مربوط فاکتور مهمی در مدیریت منابع می‌باشد. Shiau (2003) نشان داد که دوره بازگشت یک توزیع دومتغیره هیدرولوژیکی به صورت ترکیبی، در دو حالت تجاوز همزمان یا یکی از دو متغیر، از آستانه مورد نظر به ترتیب توسط رابطه‌های (۳-۲۰) و (۳-۲۱) قابل محاسبه می‌باشد:

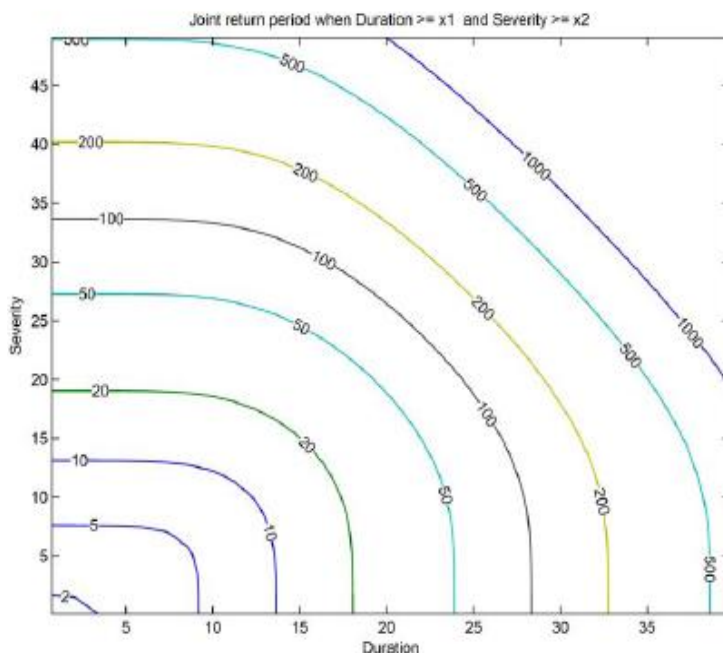
$$D \geq d \text{ and } S \geq s \Rightarrow T_{DS} = \frac{E(L)}{1 - F_D(d) - F_s(s) + C(F_D(d), F_s(s))} \quad (3-20)$$

$$D \geq d \text{ or } S \geq s \Rightarrow T'_{DS} = \frac{E(L)}{1 - C(F_D(d), F_s(s))} \quad (3-21)$$

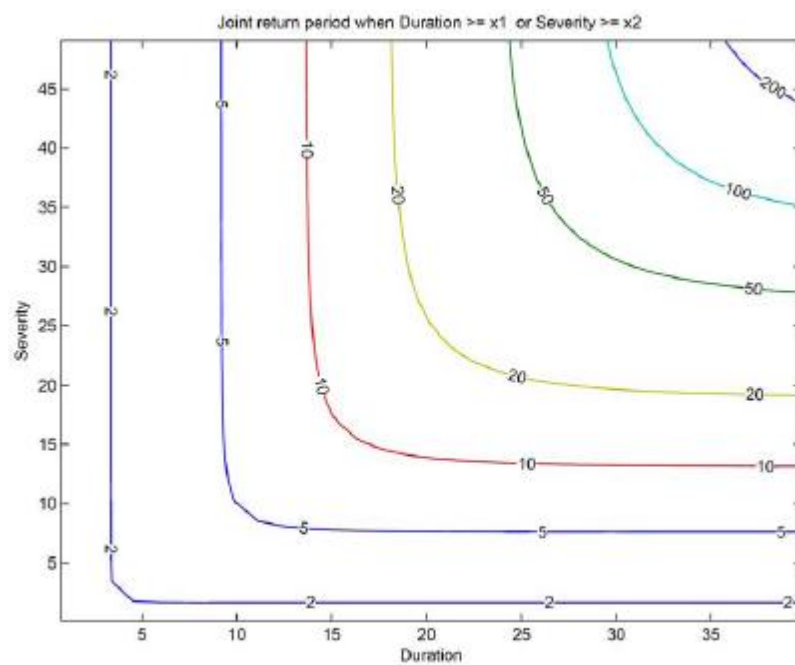
که در آن L فاصله زمانی بین وقوع خشکسالی‌های متوالی است که در شکل ۱ نشان داده شد و $E(L)$ امید ریاضی فاصله زمانی دو خشکسالی متوالی می‌باشد که با توجه به آمار مربوط قابل محاسبه می‌باشد و مقدار آن برای شاخص‌های SPI و EDI در ایستگاه ۴/۶۷ ماه می‌باشد (قابل ذکر است که برای سری سالیانه این مقدار برابر ۱ است). در یک مثال عددی اگر دوره بازگشت خشکسالی بر مبنای شاخص SPI به ترتیب با شدت و

مدت بیش از ۹ و ۶ مد نظر باشد، با توجه به اینکه $F_D(6)=0/62$ و $F_S(9)=0/85$ و $C(F_D(d),F_S(s))=0/61$ در نتیجه با استفاده روابط (۲۰-۳) و (۲۱-۳) داریم $T_{DS}=6/97$ و $T'_{DS}=2/5$ سال.

اشکال ۳-۵ و ۳-۶ کنتور دوره بازگشت خشکسالی بر اساس شاخص SPI را به ترتیب برای روابط (۲۰-۳) و (۲۱-۳) نشان می‌دهد.



شکل ۳-۵ کنتور دوره بازگشت خشکسالی بر مبنای شاخص SPI بر اساس رابطه ۱۳ (TDS) در ایستگاه دریان



شکل ۳-۶- کنتور دوره بازگشت خشکسالی بر مبنای شاخص SPI بر اساس رابطه ۱۴ (T'_{DS}) در ایستگاه مهر آباد تهران

فصل چهارم

نتایج و بحث

۴-۱- مقدمه

در این فصل به نتایج حاصل از محاسبات انجام شده بر اساس روش شناسی منتخب اشاره می‌گردد. این موارد در چهار بخش اصلی مطابق زیر قابل ارائه هستند:

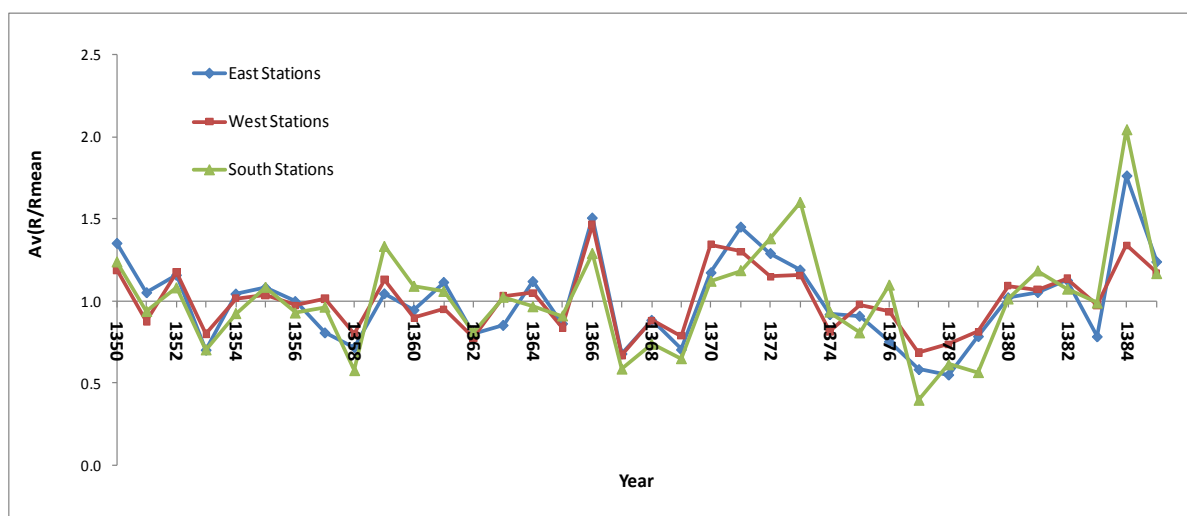
- بررسی سابقه خشکسالی‌های
 - رفتار رودخانه‌ها در خشکسالی‌های
 - منطقه‌بندی خشکسالی با معرف‌های هواشناسی
 - منطقه‌بندی خشکسالی با معرف‌های هیدرولوژیکی
 - بررسی شدت و مدت خشکسالی در منطقه
 - بررسی تغییرات منابع آبی حوضه با استفاده از اطلاعات ماهواره‌ای
- همچنین اطلاعات مورد نیاز این بخش شامل از ۳۵ ایستگاه بارانسنجی و ۳۲ ایستگاه آبسنجی در سطح حوضه دریافت شده است که طی دوره آماری ۱۳۵۰ لغایت ۱۳۸۶ مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. اطلاعات سنسجش از دور مورد نیز از ماهواره GRACE (سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۹) تهیه شد.

۴-۲- بررسی سابقه خشکسالی‌های مهم حوضه دریاچه ارومیه

بررسی سوابق خشکسالی منطقه با استفاده از دو سری اطلاعات بارش و جریان رودخانه‌ها به انجام رسید. بدین منظور اطلاعات بارندگی و جریان ابتدا بی بعد شدند تا رفتار آنها را نسبت به هم قابل مقایسه باشد. برای دبی سالیانه ارقام مربوط بر میانگین خود تقسیم (استاندارد سازی) و در خصوص بارندگی این کار با استفاده از شاخص SPI انجام شد. این قسمت با دو هدف دنبال گردید که یکی بررسی خشکسالی‌های فراگیر و گسترده در حوضه و دیگری شناسایی رفتار بخش‌های مختلف آن در ایام فوق بود. این بخش‌ها شامل شرق، جنوب و غرب دریاچه است که با مرزهای استانی آن نیز تا حد زیادی هماهنگ می‌باشد.

۴-۲-۱- سوابق خشکسالی با اطلاعات بارش

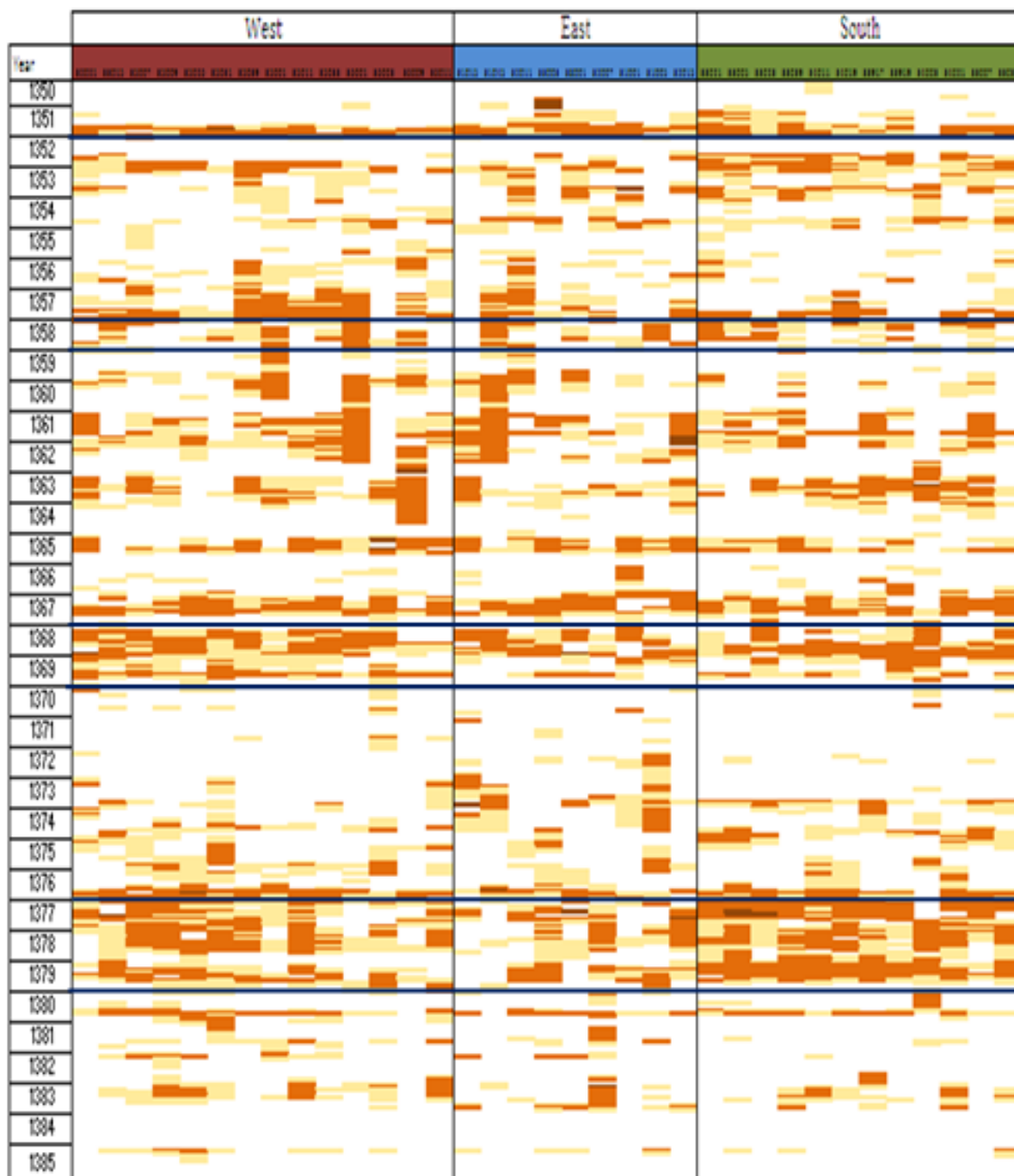
شکل ۴-۱ سری زمانی متوسط استاندارد بارش‌ها را در بخش‌های شرقی، غربی و جنوبی نشان می‌دهد. شکل نوسانات کم و بیش یکسان در محدود میانگین را قبل از اواسط دهه ۱۳۶۰ نشان می‌دهد. ولی بعد از آن، این رفتار به افزایش محسوس در دامنه نوسانات، خشکسالی و ترسالی‌های شدید و طولانی‌تر تغییر یافته است. در این بین ترسالی حدود سال‌های ۱۳۷۰ تا ۱۳۷۳ و خشکسالی ۱۳۷۶ تا ۱۳۷۹ قابل توجه هستند.



شکل ۴-۱: وضعیت متوسط استاندارد شده بارندگی در سطح ایستگاه‌های شرقی، جنوبی و غربی حوضه دریاچه ارومیه

در بخش دوم سری زمانی SPI سه و شش ماهه مورد استفاده قرار گرفت که بدلیل طولانی بودن، ارائه آنها در متن گزارش مقدور نمی باشد. ولی بطور کامل در لوح فشرده پیوست گزارش آمده است. اما جهت ارزیابی کلی، شکل ۴-۲ وضعیت شاخص SPI شش ماهه را در سطح ایستگاه های منتخب حوضه با تغییر رنگ نشان می دهد. رنگ های کرم تا قهوه ای تیره، خشکسالی و شدت بیشتر آن را نشان می دهد. همچنین ستون های شکل در سه دسته تقسیم شده اند که به ترتیب مربوط به ایستگاه های غرب، جنوب و شرق حوضه هستند. شکل هرچند قدری فشرده است، ولی نگاه نسبتا جامعی را از وضعیت خشکسالی در بعد زمان و مکان ارائه می دهد.

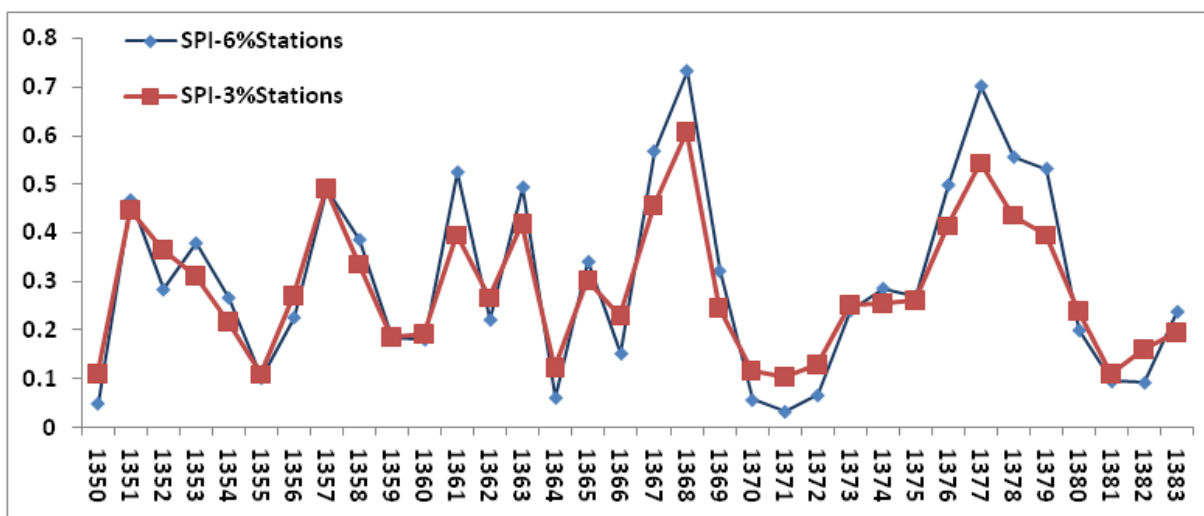
شکل ۴-۲ چهار خشکسالی فراگیر را طی دوره آماری (۱۳۵۰ لغایت ۱۳۸۵) نشان می دهد. این وقایع مربوط به سال های ۱۳۵۱، ۱۳۵۷-۵۸، ۱۳۶۷-۶۹ و نیز ۱۳۷۶-۷۹ هستند. نکته قابل توجه طولانی تر شدن این وقایع بوده که به ترتیب از ۱ سال در ابتدای دوره به ۴ سال در آخر آن افزایش یافته است.



شکل ۴-۲: وضعیت شدت خشکسالی SPI شش ماهه در سطح ایستگاه‌های باران سنجی حوضه دریاچه ارومیه

شکل ۲-۴ این را نیز نشان می‌دهد که تراکم خشکسالی‌های شدید (رنگ قهوه‌ای) در قسمت مرکزی کمتر مشاهده می‌گردد تا در قسمت‌های شرقی و غربی. نتایج شاخص SPI سه ماهانه نیز کم و بیش گویای این وضعیت بود که از تکرار آن پرهیز می‌گردد.

همچنین شکل ۲-۴ درصد ایستگاه‌هایی که وقایع خشکسالی را بر اساس شاخص SPI در منطقه ثبت کرده‌اند را نشان می‌دهد. افزایش گستره خشکسالی در منطقه بعد از سال ۱۳۶۸ قابل ملاحظه می‌باشد، بطوریکه در سال ۱۳۷۸ برای حدود ۷۰ درصد ماه‌ها در ایستگاه‌های حوضه، خشکسالی مشاهده شده است. وضعیت SPI سه و شش ماهه شرایط نسبتاً مشابهی را نشان می‌دهند.

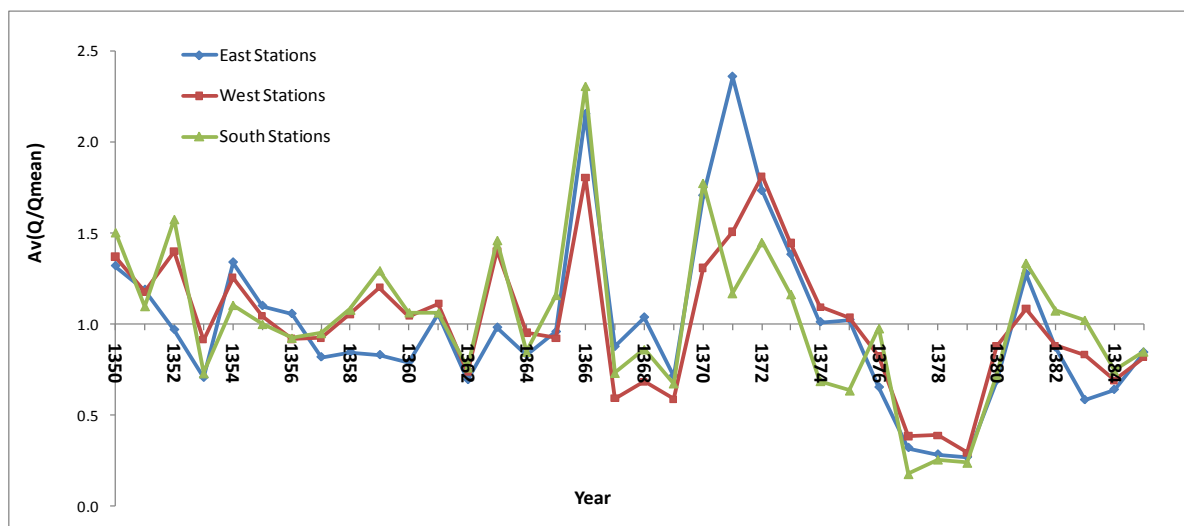


شکل ۲-۴: درصد اعلام خشکسالی براساس شاخص‌های SPI سه و شش ماهه در ایستگاه‌های حوضه

۴-۲-۲- سوابق خشکسالی با اطلاعات دبی جریان

مانند بخش بارش، سری زمانی جریان‌ات رودخانه‌ها در پاسخ به خشکسالی‌ها نیز براساس میانگین استاندارد شده ایستگاه‌ها، به تفکیک در سه بخش محاسبه و در شکل ۳-۴ ارائه شده است. مقایسه این شکل با سوابقی که از خشکسالی‌های مورد اشاره در قسمت قبل به آنها اشاره شد (سال‌های ۱۳۵۱، ۱۳۵۷-۵۸، ۱۳۶۷-۶۹ و

۱۳۷۶-۷۹) پاسخ نسبتاً مشابه را هرچند با تاخیر به کاهش بارش‌ها را نشان می‌دهد. همچنین نوسانات شدید حول میانگین نیز بعد از سال ۱۳۶۵، مانند آنچه برای بارندگی مشهود گردید در اینجا نیز قابل مشاهده است، با این تفاوت که از شدت نوسانات در سال‌های اخیر کاسته شده است.



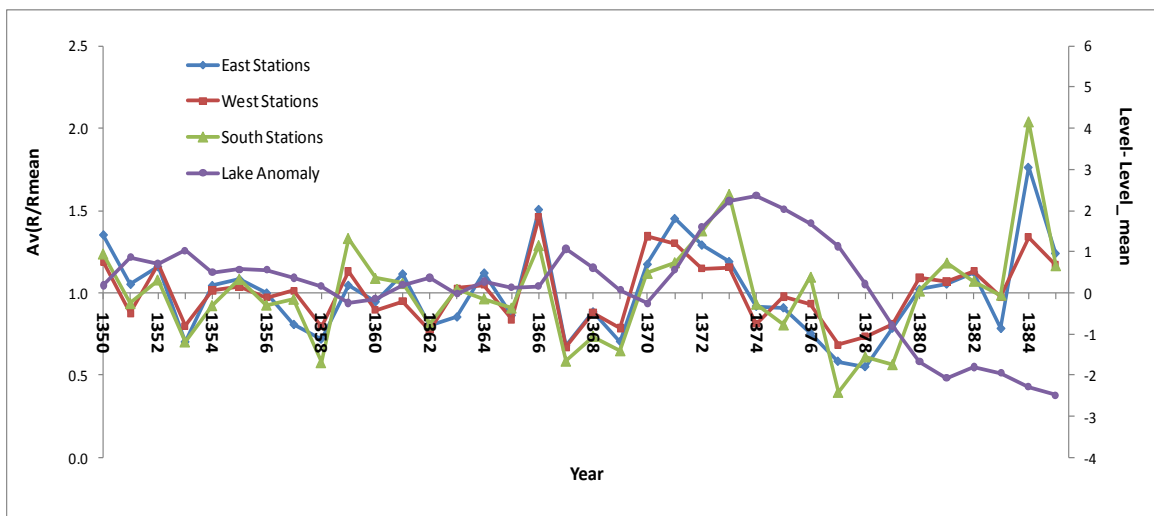
شکل ۴-۳: وضعیت متوسط استاندارد شده جریان رودخانه‌ها در سطح ایستگاه‌های شرقی، جنوبی و غربی حوضه دریاچه ارومیه

۴-۲-۳- رفتار تراز دریاچه ارومیه در ترسالی و خشکسالی‌های حوضه آن

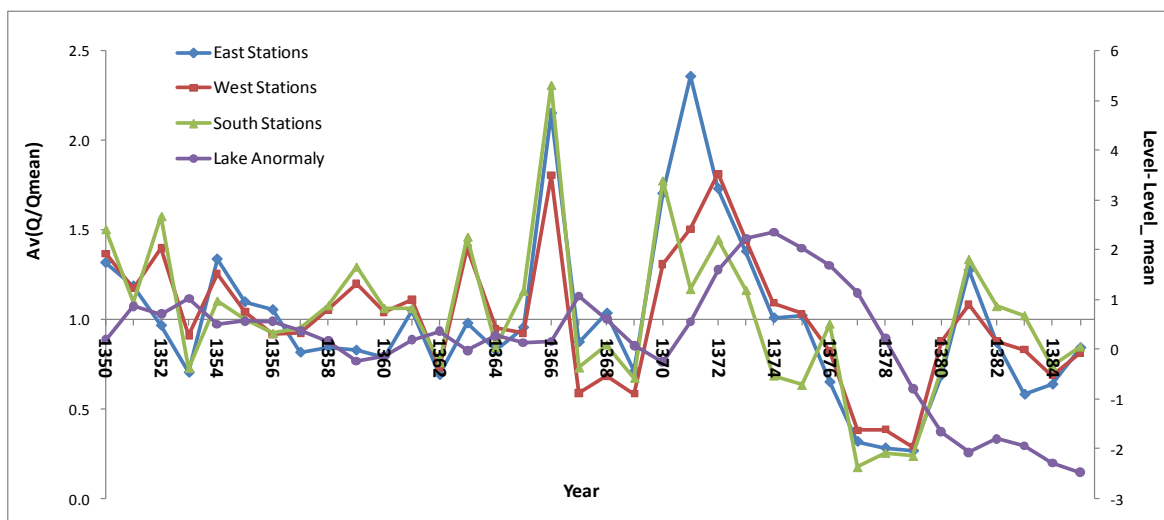
در ادامه تحلیل‌های قبل مقادیر میانگین استاندارد شده بارندگی و جریان در سطح ایستگاه‌های منتخب حوضه نیز در کنار مقادیر آنومالی تراز دریاچه ارومیه (تراز منهای متوسط آن) قرار داده شد که در اشکال ۴-۴ و ۴-۵ آمده‌اند. این اشکال نیز پاسخ تراز دریاچه را به تغییرات بارش و رواناب نشان می‌دهد.

از این اشکال قابل ملاحظه می‌باشد که قبل از اواخر دهه شصت، آنومالی دریاچه عمدتاً کمتر از +۱ و -۱ - بوده است. از این سال شاهد افزایش آن تا حدود +۲/۵ در سال ۱۳۷۴ هستیم که بخش عمده آن به پرابی اوائل دهه هفتاد باز می‌گردد. پس از سال ۱۳۷۴، این روند وضعیت عکسی به خود می‌گیرد که تا کنون نیز ادامه داشته

است. نکته قابل توجه در اشکال عکس العمل تراز دریاچه به سال‌های تر و خشک می‌باشد که معمولاً با یک سال تاخیر بعد از بارندگی‌ها رخ می‌دهد، ولی نسبت به دبی سریع‌تر است.



شکل ۴-۵: وضعیت متوسط استاندارد شده بارندگی‌ها در سطح ایستگاه‌های شرقی، جنوبی و غربی حوضه دریاچه ارومیه و مقایسه آن با تراز دریاچه



شکل ۴-۵: وضعیت متوسط استاندارد شده جریان رودخانه‌ها در سطح ایستگاه‌های شرقی، جنوبی و غربی حوضه دریاچه ارومیه و مقایسه آن با تراز دریاچه

۴-۳- منطقه‌بندی حوضه دریاچه ارومیه

این فصل بر اساس سری زمانی شاخص‌های SPI و DI که شرح آنها در فصل ۳ ارائه شد، نسبت به منطقه بندی خشکسالی با استفاده از تکنیک خوشه‌بندی اقدام می‌شود. بدین منظور ابتدا سری زمانی بارندگی و دبی در ایستگاه‌های منتخب (۳۵ ایستگاه باران‌سنجی و ۳۲ ایستگاه هیدرومتری) به ماتریس سری زمانی صفر و یک تبدیل می‌شوند (یک وقوع خشکسالی و صفر عدم وقوع خشکسالی). بدین ترتیب سری زمانی صفر و یک هر ایستگاه در مقابل ایستگاه دیگر به صورت ماهانه برای شاخص SPI و روزانه برای DI، مورد ارزیابی قرار گرفت. این گونه بررسی باعث می‌گردد که منطقه بندی با توجه به رفتار زمانی و مکانی خشکسالی در حوضه به عمل آید که در تحقیق (Prudhomme and Sauquet, 2007) نیز مورد استفاده بوده است.

ماتریس داده‌ها برای شاخص SPI از آمار بارندگی ماهانه سال‌های ۱۳۵۰ لغایت ۱۳۸۵ ایستگاه‌های باران-سنجی و برای شاخص DI بر اساس آمار دبی روزانه سال‌های ۱۳۶۶ لغایت ۱۳۸۴ بدست آمده است. با این توضیح ابعاد ماتریس داده‌های شاخص‌های هواشناسی 35×430 (ایستگاه و ۴۳۰ ماه) و 35×427 به ترتیب برای شاخص‌های SPI سه و شش ماهه خواهد بود. همچنین ابعاد این ماتریس برای شاخص هیدرولوژیکی DI ، 32×6935 (۳۲ ایستگاه هیدرومتری و ۶۹۳۵ روز) می‌باشد.

جهت خوشه‌بندی ایستگاه‌ها معمولاً تعداد خوشه با توجه به شناخت اولیه از منطقه انتخاب می‌گردد و سپس بهترین آنها تعیین می‌شود. با توجه به وضعیت حوضه، تعداد خوشه ۲، ۳، ۴ و ۵ در بررسی اولیه انتخاب شدند که در این تصمیم سیستم‌های اثر گذار بر منطقه مد نظر قرار داشت. همچنین با شرحی که در فصل سوم آمد، روش‌های K-means و K-medoids هر دو مورد بررسی قرار گرفتند که در مجموع جواب‌های روش اول منطقی‌تر بود. بدین دلیل و به منظور پرهیز از طولانی شدن متن، از ارائه نتایج روش دوم پرهیز می‌گردد.

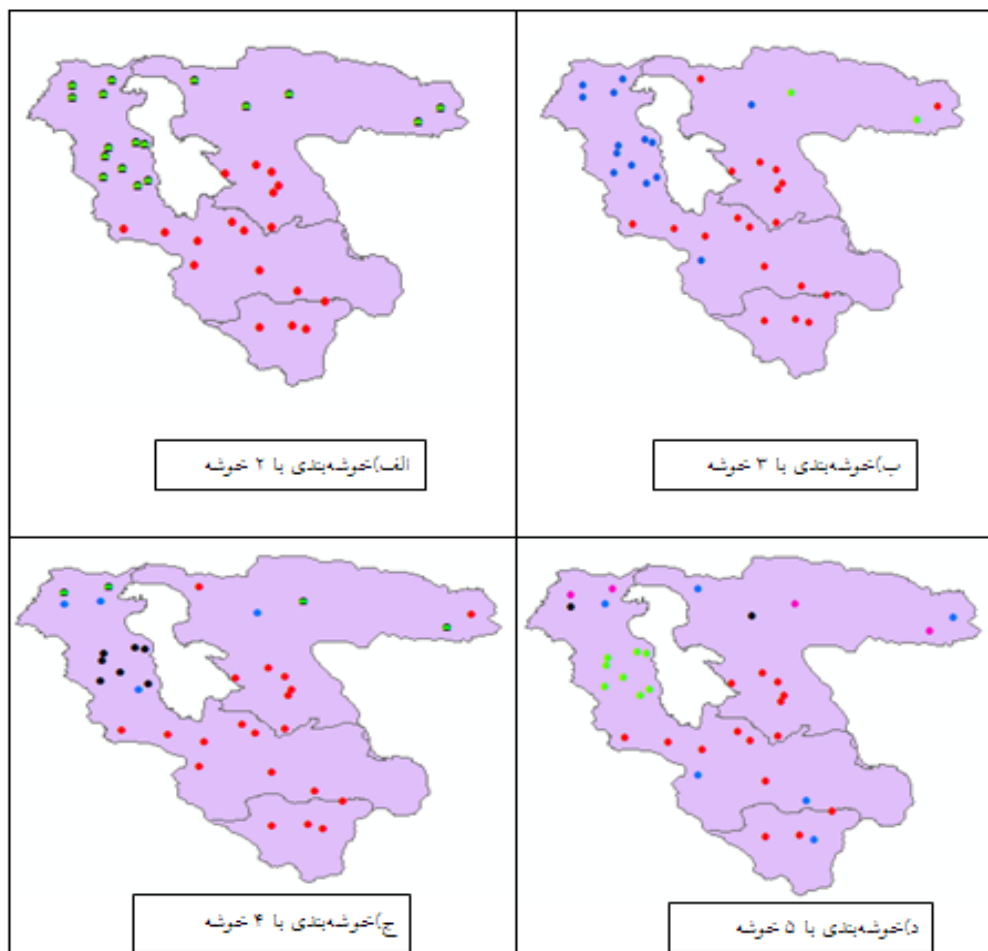
۴-۴- منطقه‌بندی شاخص استاندارد بارش (SPI) سه ماهه

نتایج اولیه خوشه‌بندی ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه بر اساس شاخص SPI سه ماهه و روش K-means با تعداد خوشه‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ در جدول ۱-۵ قابل مشاهده است. در این ارزیابی از شاخصی بنام Silhouette استفاده شده که مقدار کمتر آن دال بر مناسب‌تر بودن تعداد خوشه‌ها می‌باشد. ملاحظه می‌گردد که دو خوشه نتایج بهتری را به همراه داشته‌اند.

جدول ۱-۴: متوسط مقادیر شاخص Silhouette برای تعداد خوشه‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ در خوشه‌بندی به روش k-means با شاخص SPI سه ماهه

SPI سه ماهه				
تعداد خوشه	۲	۳	۴	۵
k-means	۰.۲۳	۰.۱۶۵	۰.۱۹۶	۰.۱۸

همچنین این نتایج در شکل ۴-۶ در قالب ۴ نقشه ارائه شده‌اند. مطابق با شکل ۴-۶ الف که مربوط به ۲ خوشه است، اکثر ایستگاه‌های موجود در نیمه شمالی دریاچه در خوشه اول (ایستگاه‌های سبز رنگ) و بیشتر ایستگاه‌های موجود در نیمه جنوبی دریاچه (ایستگاه‌های قرمز) در خوشه دوم قرار گرفتند. در خوشه‌بندی با ۳ خوشه نیز نتایج مشابهی بدست آمد (شکل ۴-۱-ب)، هرچند در بخش شرقی تغییراتی ایجاد شد. در خوشه-بندی با ۴ و ۵ دسته (شکل ۴-۱-ج و د) ساختار مشخصی قابل تشخیص نمی‌باشد.



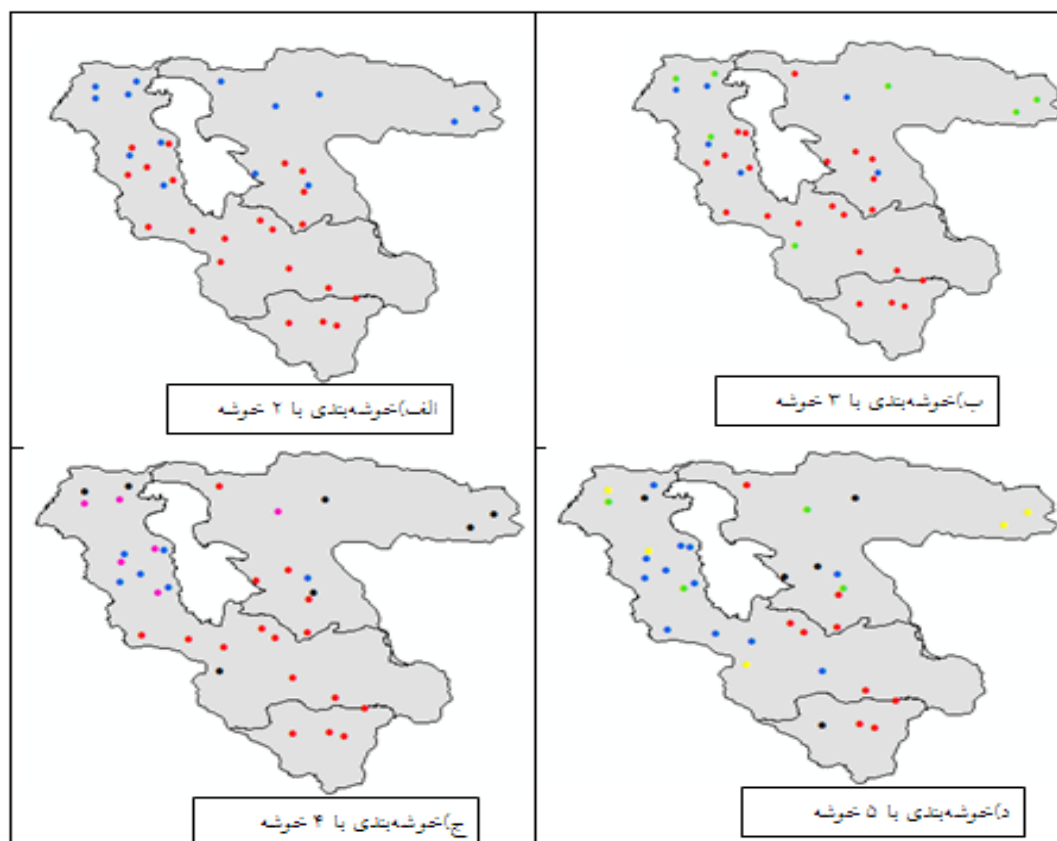
شکل ۴-۶: منطقه‌بندی خشکسالی هواشناسی با توجه به شاخص SPI سه ماهه با استفاده از روش K-means با تعداد خوشه-های ۲ (الف)، ۳ (ب)، ۴ (ج) و ۵ (د) در حوضه دریاچه ارومیه

۴-۵- منطقه‌بندی شاخص استاندارد بارش (SPI) شش ماهه

جهت خوشه‌بندی مکانی و زمانی خشکسالی با شاخص SPI شش ماهه نیز انجام شد و مجدداً تعداد خوشه‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۴-۲ و همچنین شکل ۴-۷ آورده شده است. ملاحظه می‌گردد که شاخص Silhouette تعداد خوشه ۳ را پیشنهاد می‌دهد، ولی شکل برای هیچکدام از خوشه‌ها مانند قبل مرزبندی مشخصی نشان نمی‌دهد. مقایسه شکل ۴-۷-الف و ۴-۶-الف نشان می‌دهد که همچنان می‌توان جنوب و شمال دریاچه را در دو دسته مورد ارزیابی قرار داد.

جدول ۴-۲: متوسط مقادیر شاخص silhouette برای تعداد خوشه‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ در خوشه‌بندی به روش k-means با شاخص SPI شش ماهه

شماره خوشه	SPI			
	۲	۳	۴	۵
k-means	۰.۵	۰.۸	۰.۵	۰.۴



شکل ۴-۷: منطقه‌بندی خشکسالی هواشناسی با توجه به شاخص SPI شش ماهه با استفاده از روش K-means با تعداد خوشه‌های ۲ (الف)، ۳ (ب)، ۴ (ج) و ۵ (د) در حوضه دریاچه ارومیه

در توجیه دو خوشه مورد شناسایی بررسی سیستم‌های باران‌زای حوضه می‌تواند مفید باشد. بررسی نقشه‌های سینوپتیک نشان می‌دهد که بیشتر سامانه‌های جوی که در نواحی کردستان (جنوب دریاچه) اثر می‌گذارند از جنوب غربی ایران تأمین می‌شود که به آن سامانه‌های سودانی گفته می‌شود. این سامانه‌ها به علت دمای بالاتر نسبت به سامانه جوی که از نواحی شرق مدیترانه به سوی شمال غرب ایران بویژه بر روی نواحی

آذربایجان شرقی و غربی اثرگذار است، بیشتر بوده و در نتیجه دارای رطوبت بیشتری است. وجود ارتفاعات کردستان و تأثیرگذاری آنها بر روی سامانه‌های جوی، افزایش بارش نواحی جنوب دریاچه را نسبت به قسمت شمالی رقم می‌زند که متعاقباً بر دبی‌ها و ورودی به دریاچه اثر گذار می‌باشد.

اما منابع رطوبتی که توسط جریان‌ات جوی بر روی آذربایجان شرقی و غربی (بخش شمالی دریاچه) اثرگذار است، اکثراً از شرق مدیترانه و دریای سیاه تأمین می‌شود. به سبب پایین بودن دمای این نوع سامانه‌ها نسبت کم فشار سودانی دارای نم ویژه کمتری بوده و در نتیجه میزان بارش نواحی شمالی دریاچه نسبت به جنوبی کمتر خواهد بود.

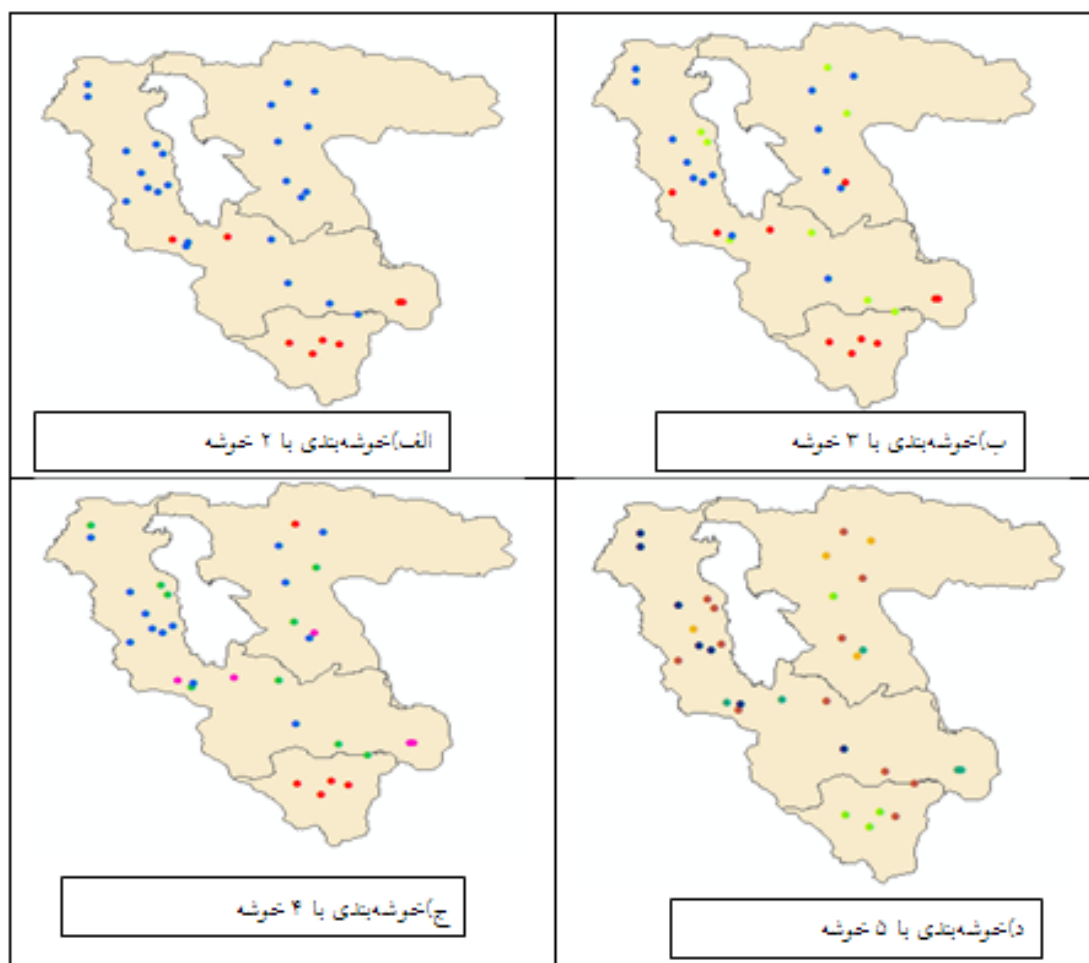
۴-۶- خوشه‌بندی ایستگاه‌های هیدرومتری بر اساس شاخص DI

برای این بخش ابتدا مقادیر روزانه شاخص DI در سطح ایستگاه‌های منطقه محاسبه شده که مقادیر مربوط در CD پیوست گزارش قابل مشاهده است. سپس تحلیل خوشه بندی انجام گردید که نتایج آن برای این شاخص جهت منطقه‌بندی خشکسالی هیدرولوژیکی حوضه دریاچه ارومیه با تعداد خوشه‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ در جدول ۴-۳ و شکل ۴-۸ قابل مشاهده است. با توجه به این شکل در خوشه‌بندی با ۲ خوشه، ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در شمال استان کردستان در یک خوشه و بقیه ایستگاه‌های واقع در آذربایجان شرقی و غربی در خوشه دیگری قرار گرفتند. در خوشه‌بندی با ۳ و ۴ خوشه منطقه غرب دریاچه در یک خوشه و همچنین شمال استان کردستان در خوشه دیگر واقع می‌شوند. بقیه مناطق حوضه نیز در خوشه خاصی قرار نگرفتند. در خوشه‌بندی با ۵ خوشه هم هیچکدام از مناطق حوضه در خوشه خاصی قرار نگرفتند.

جدول ۴-۳: متوسط مقادیر شاخص silhouette برای تعداد خوشه‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ در خوشه‌بندی

به روش K-means با شاخص DI

شاخص DI				
تعداد خوشه	۲	۳	۴	۵
K-means	۰.۱۴	۰.۱	۰.۱	۰.۱



شکل ۴-۸: منطقه‌بندی خشکسالی هیدرولوژیکی با توجه به شاخص DI با استفاده از روش K-means

با تعداد خوشه‌های ۲ (الف)، ۳ (ب)، ۴ (ج) و ۵ (د) در حوضه دریاچه ارومیه

با توجه به نتایج این بخش، همچنان به نظر می‌رسد که قبول دو ناحیه در حوضه که همان شمال و جنوب

دریاچه باشد، با واقعیت‌ها سازگارتر است.

۴-۶- ارزیابی شدت و مدت خشکسالی در حوضه آبریز ارومیه

همانگونه که آمد برای تحلیل و مدیریت ریسک خشکسالی در یک ناحیه، شناسایی شدت و مدت آن اهمیت دارد. با توجه به همبستگی بالای این دو عامل، در این گزارش از توابع مفصل ارائه شده در جدول ۳-۴ برای مدل‌سازی ساختار همبستگی متغیرها استفاده شد. شرح این روش در فصل قبل همراه با مثالی که کاربردهای آن را بهتر نشان می‌دهد، ارائه گردید. تاکید می‌شود که براساس دو شاخص مورد استفاده، مدت خشکسالی زمانی است که SPI زیر صفر و در مورد DI مقدار آن یک باشد. به همین ترتیب شدت، برابر جمع مقادیر منفی SPI و برای DI، جمع کمبود منابع (مقادیر جریان منهای آستانه تعیین شده) تعریف می‌گردد.

به دلیل تعدد ایستگاه‌ها و خروجی‌های متنوع این روش، در گزارش تنها بخشی از نتایج برای تعدادی از ایستگاه‌ها ارائه شده که اسامی آنها از جداول ۴-۵ و ۴-۶ قابل مشاهده هستند.

خروجی کامل نتایج هم در لوح فشرده پیوست گزارش در دو بخش آمده است. ابتدا نتایج فوق برای ۶ ایستگاه باران‌سنجی با استفاده از شاخص SPI (صفحات ۱ تا ۴۲) و سپس نتایج برای ۵ ایستگاه هیدرومتری براساس شاخص DI ارائه می‌گردند (صفحات ۴۲ تا ۷۲).

۴-۶-۱- تحلیل احتمالاتی شدت و مدت خشکسالی

آنچه که مجدداً در اینجا لازم به تاکید می‌باشد، هدف از این بخش است که در آن تلاش می‌گردد تا امکان تولید سناریوهای مختلف خشکسالی را در حوضه دریاچه ارومیه فراهم نمود. اما در تعریف این پدیده حداقل دو عامل شدت (S) و مدت (D) نقش دارند و در عین به هم نیز وابسته هستند. این قسمت برای تدقیق تحلیل‌ها با استفاده از توابع مفصلی آن را مد نظر قرار می‌دهد. نهایتاً نتایج این بخش می‌تواند انواع سناریوهای خشکسالی را با ویژگی‌های زیر تولید کند:

- دوره بازگشت خشکسالی با مقدار توام شدت و مدت خاص ($S \geq s$ و $D \geq d$) (مانند شکل پ-۲۷ در لوح فشرده)

- دوره بازگشت خشکسالی با مقدار خاص شدت و یا مدت خاص ($S \geq s$ یا $D \geq d$) (مانند شکل پ-۲۸ در لوح فشرده)

همچنین موارد فوق را می‌توان بطور شرطی ارائه نمود. مثلاً اینکه دوره بازگشت خشکسالی با مدتی خاص، بطوریکه شدت آن از آستانه‌ای مشخصی بیشتر باشد و برعکس آن، یعنی اینکه دوره بازگشت خشکسالی با شدتی خاص، بطوریکه مدت آن از آستانه‌ای معلوم بیشتر باشد

برای این بخش ابتدا وقایع خشکسالی در منطقه بر اساس ایستگاه‌های مورد مطالعه قرار گرفت که این وقایع برای ایستگاه‌های باران‌سنجی در جداول پ-۱ تا پ-۶ و برای ایستگاه‌های آبسنجی در جداول پ-۷ تا پ-۱۲ در پیوست گزارش آمده است. همچنین تعداد رخداد‌های خشکسالی و همبستگی شدت و مدت در آنها در جداول ۴-۵ و ۴-۶ آمده‌اند. از جداول موارد زیر قابل استنباط می‌باشد:

- مقایسه متوسط طول مدت رخداد‌های خشکسالی در ایستگاه‌ها ($E(L)$) برای دو شاخص SPI و DI نشان می‌دهد که ارقام حاصل بسیار نزدیک هستند و در هر دو مورد حدود ۱۲ ماه می‌باشند.

- همبستگی بالا و معنی‌دار بین شدت و مدت در شاخص SPI و $\bar{II}$ (به ترتیب ۰/۸۶ تا ۰/۹۹)، نشان دهنده اهمیت تحلیل توام این دو عامل برای خشکسالی و توجه به تأثیر آنها در تحلیل توزیع توام احتمالاتی خشکسالی می‌باشد.

جدول ۴-۵: ضرایب همبستگی بین دو عامل مدت و شدت خشکسالی در ایستگاه‌های منتخب بر اساس شاخص SPI

نام ایستگاه	بابارود	شیشوان	موش آباد	یالقوزآغاچ	دریان	قبقبلو
ضریب همبستگی اسپیرمن	۰/۹۶	۰/۹۴	۰/۹۳	۰/۹۴	۰/۹۳	۰/۹۶

جدول ۴-۶: ضرایب همبستگی بین دو عامل مدت و شدت خشکسالی در ایستگاه‌های منتخب بر اساس شاخص DI

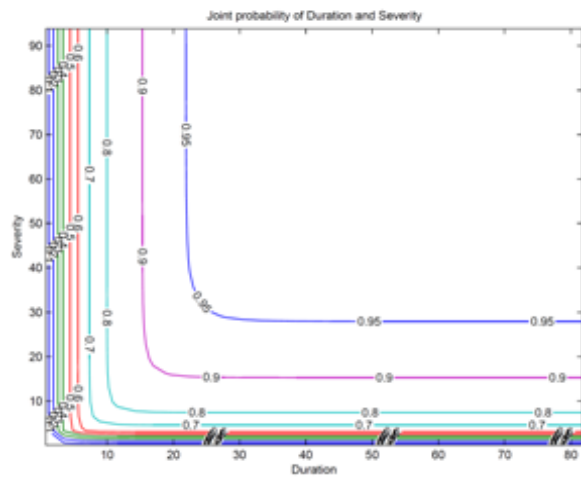
نام ایستگاه	ونیار	ساریقمیش	تازه کند	آباجالو سفلی	چهریق علیا	تازه کند (علویان)
ضریب همبستگی اسپیرمن	۰/۹۱	۰/۹۶	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۵

بدین ترتیب با استفاده از توزیع توام D (مدت خشکسالی) و S (شدت خشکسالی) نمودار کانتور آنها در

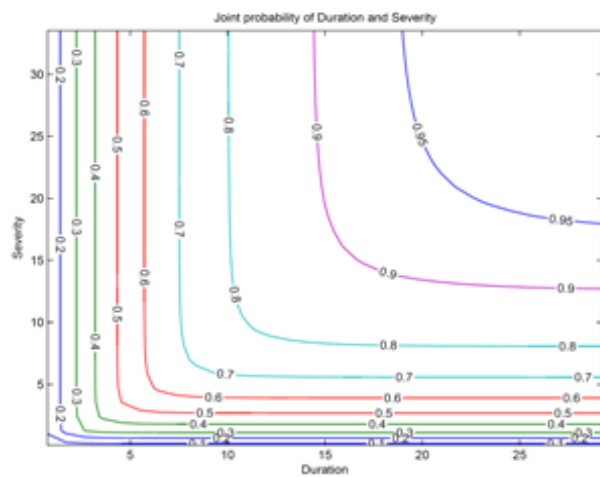
ایستگاه‌های منتخب رسم گردید و می‌توان احتمال وقوع یک خشکسالی با مدت و شدت بیشتر از مقدار یک

آستانه را بدست آورد که برای مدیریت ذخیره منابع آب در شرایط بحرانی بسیار مفید است. اشکال ۴-۹ و ۴-۱۰

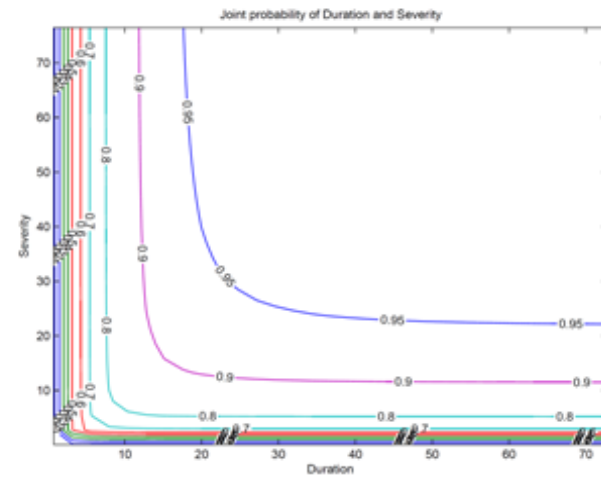
نتایج محاسبات فوق را در ایستگاه‌های منتخب برای دو شاخص SPI و DI نشان می‌دهد.



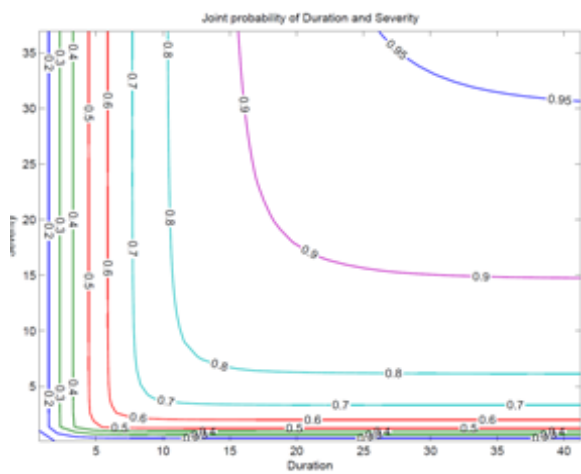
موش آباد



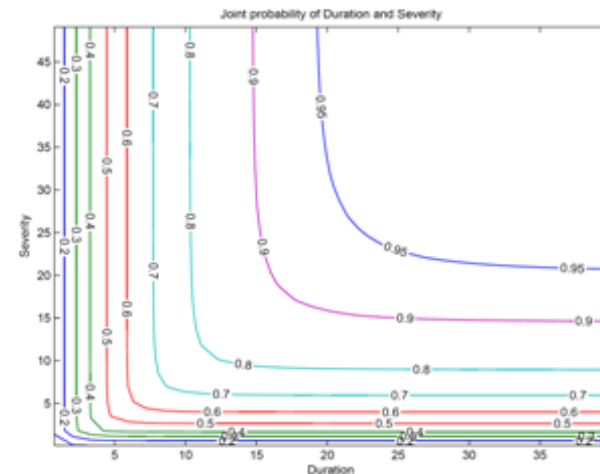
شیشوان



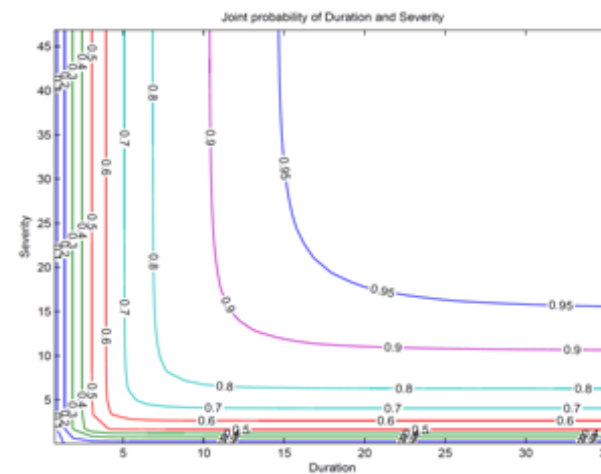
بابارود



قبقبلو

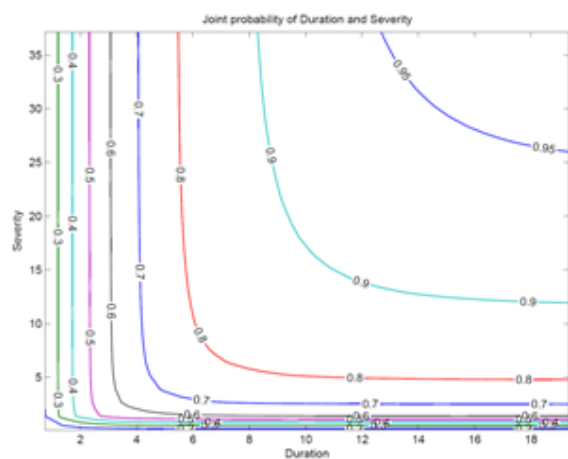


دریان

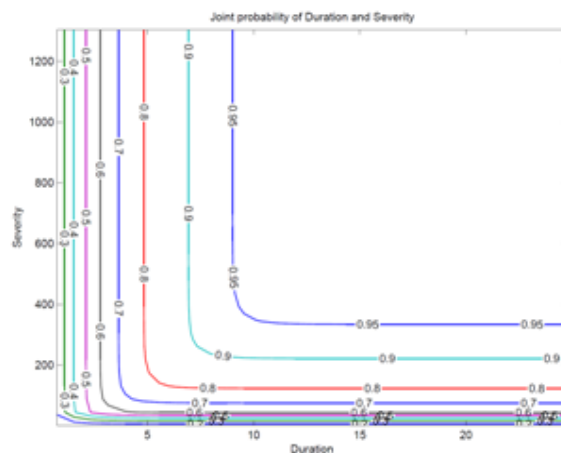


یالقوز

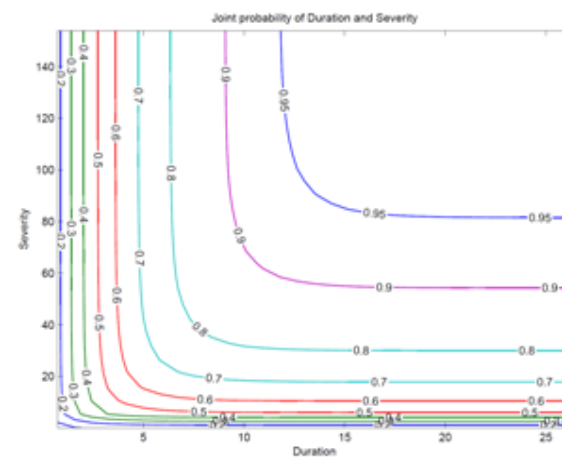
شکل ۴-۹: نمودار کانتور توزیع توام مدت و شدت خشکسالی SPI در ایستگاه‌های منتخب



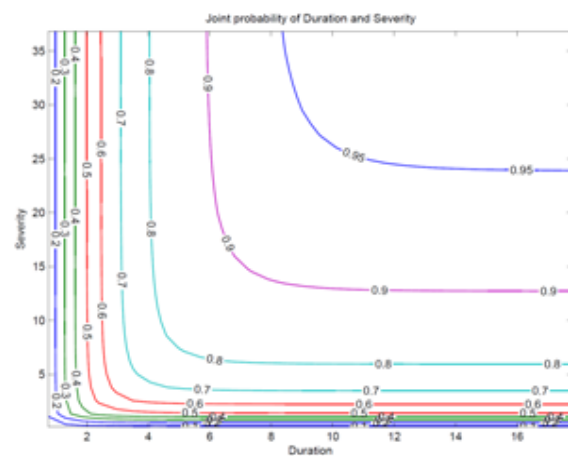
تازه کند



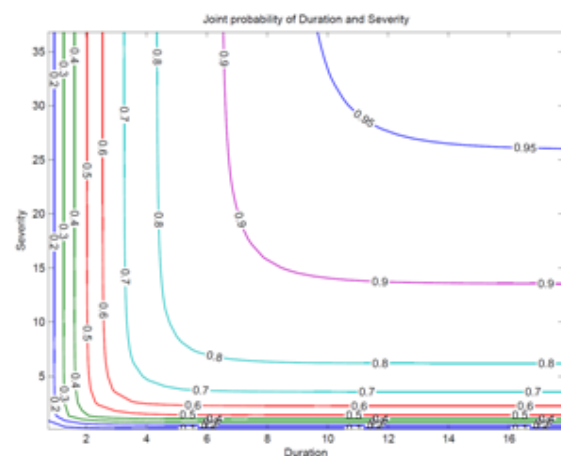
ساریقمیش



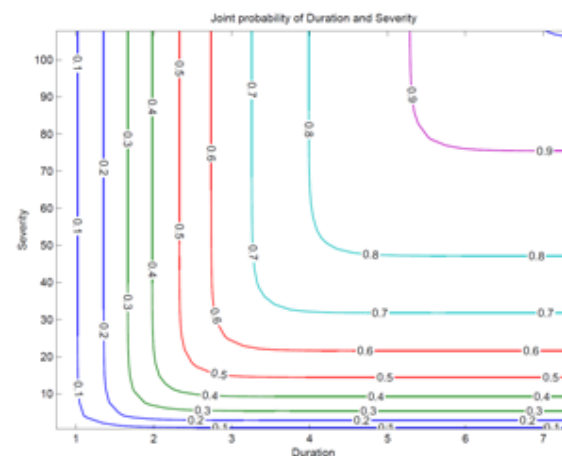
ونیار



تازه کند علویان



چهریق علیا



آباجالو سفلی

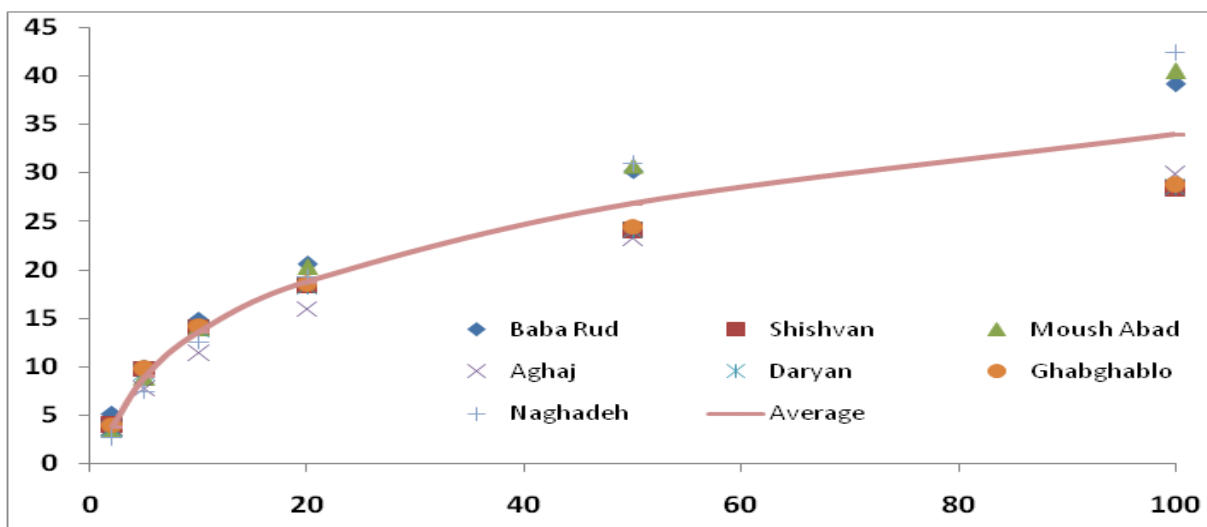
شکل ۴-۱۰: نمودار کانتور توزیع توام مدت و شدت خشکسالی DI در ایستگاه‌های منتخب

۴-۶-۲- دوره بازگشت خشکسالی

معمولا دوره بازگشت خشکسالی برای تعریف مدت زمان بین دو اتفاق یکسان بکار می‌رود. شیائو و شن (۲۰۰۱) دوره بازگشت خشکسالی‌هایی که مدت یا شدت آنها از مقدار یک آستانه بیشتر شود را بصورت زیر پیشنهاد نمود:

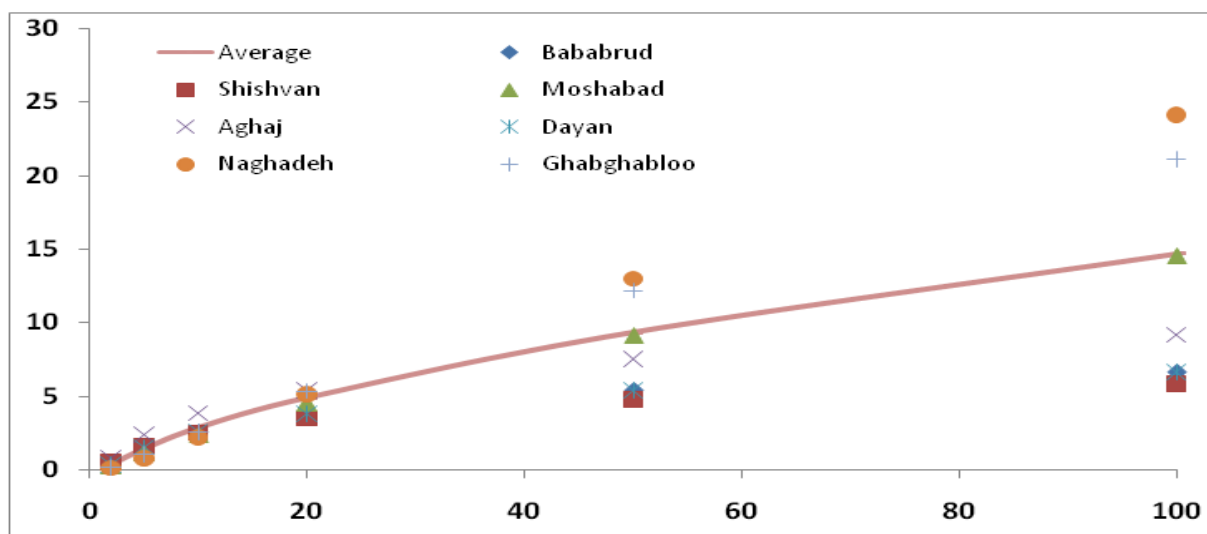
$$T_D = \frac{E(L)}{1-F_S(s)} \quad , \quad T_S = \frac{E(L)}{1-F_D(d)} \quad (۱-۴)$$

در این روابط $E(L)$ مقدار متوسط زمان بین دو خشکسالی و از طریق مشاهدات قابل برآورد است. برای داده‌های ایستگاه‌های منتخب متوسط مقادیر مربوط در جداول ۴-۵ و ۴-۶ ارائه شده‌اند. بدین ترتیب با توجه به رابطه (۴-۱) دوره بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ ساله برای مدت و شدت خشکسالی در ایستگاه‌ها محاسبه و در اشکال (۴-۱۱) تا (۴-۱۴) ارائه شده است. اشکال هم مقادیر هر ایستگاه را نشان می‌دهند و هم متوسط ایستگاه‌ها را در مجموع می‌توانند گویا مقادیر مدت و شدت خشکسالی در دوره بازگشت‌های مختلف و بطور متوسط در حوضه باشند. در خصوص DI لازم به ذکر است که مقادیر کمبود در ایستگاه‌ها نسبت به میانگین آنها استاندارد شده تا قرار گرفتن آنها در کنار هم مقدور و مفهوم باشد.



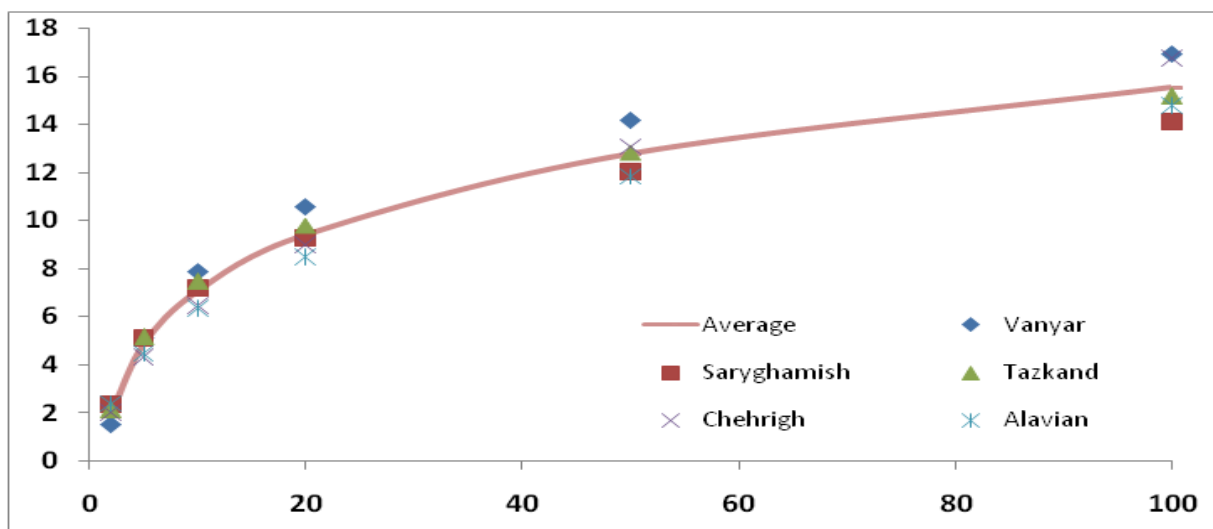
دوره بازگشت

شکل ۴-۱۱: دوره برگشت مدت خشکسالی (ماه) در ایستگاه‌های منتخب حوضه ارومیه و منحنی متوسط آن بر اساس شاخص SPI شش ماهه

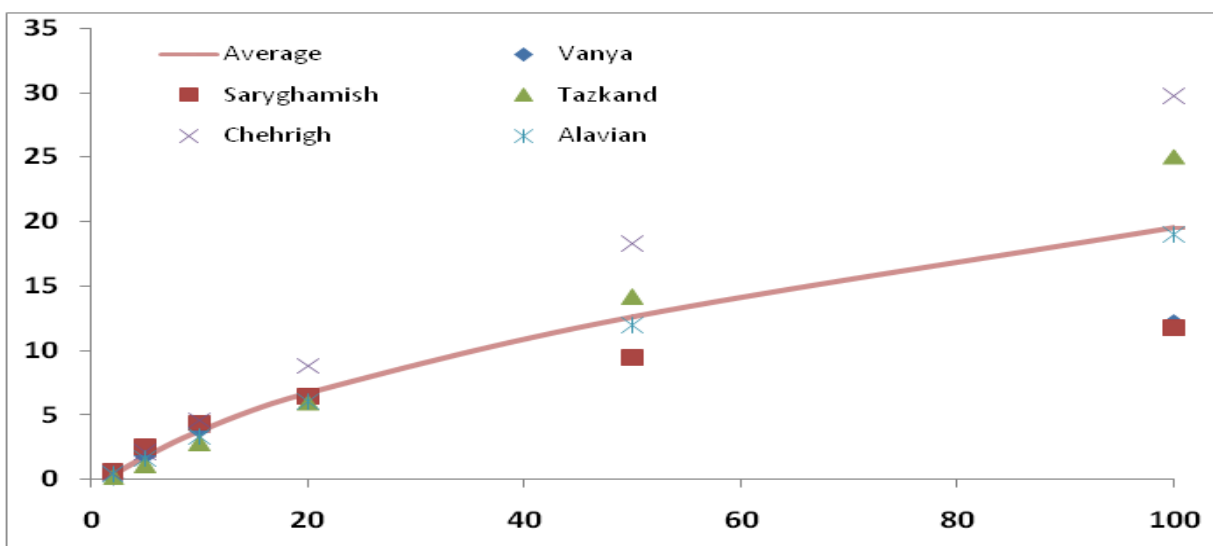


دوره بازگشت

شکل ۴-۱۲: دوره برگشت شدت خشکسالی در ایستگاه‌های منتخب حوضه ارومیه و منحنی متوسط آن بر اساس شاخص SPI شش ماهه



شکل ۴-۱۳: دوره برگشت مدت خشکسالی در ایستگاه‌های منتخب حوضه ارومیه و منحنی متوسط آن بر اساس شاخص DI



شکل ۴-۱۴: دوره برگشت شدت خشکسالی در ایستگاه‌های منتخب حوضه ارومیه و منحنی متوسط آن بر اساس شاخص DI

۴-۷- بررسی تغییرات بیان آب در حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از داده‌های

ماهواره GRACE^۱

برای بررسی تغییرات موجودی آب در حوضه در این بخش از فن آوری جدیدی استفاده شد که مربوط به ماهواره GRACE است.^۲ این ماهواره توسط ناسا^۳ و مرکز هوا-فضای آلمان^۴ (DLR) در سال ۲۰۰۲ به فضا پرتاب شد. مأموریت آن نیز اندازه‌گیری تغییرات زمانی میدان گرانش زمین است که می‌تواند برای برآورد تغییرات ذخیره آب زمینی^۵ (TWS) بکار می‌رود.

TWS عبارتست از مجموع آب موجود در سطح و زیر سطح زمین که شامل آب زیرزمینی، رطوبت موجود در خاک، آب‌های سطحی، برف و یخ و همچنین آب موجود در بافت‌های موجودات زنده می‌باشد. برآورد دقیق آن در مقیاس‌های مکانی بزرگ به دلیل کم بودن اطلاعات مورد نیاز معمولاً با چالش‌های فراوانی روبرو می‌باشد.

روش‌های معمول اندازه‌گیری TWS عبارتند از اندازه‌گیری چاه‌های گمانه، اندازه‌گیری رطوبت خاک و همچنین ثبت تغییرات تراز دریاچه‌ها. بدیهی است که این روش‌های دقت مناسبی دارند، اما در ابعاد وسیع

^۱ Gravity Recovery and Climate Experiment

^۲ این بخش جزء شرح ختمات این طرح نبوده و مشاور جهت معرفی این امکانات و نتایج آن در حوضه، آن را اضافه کرده است.

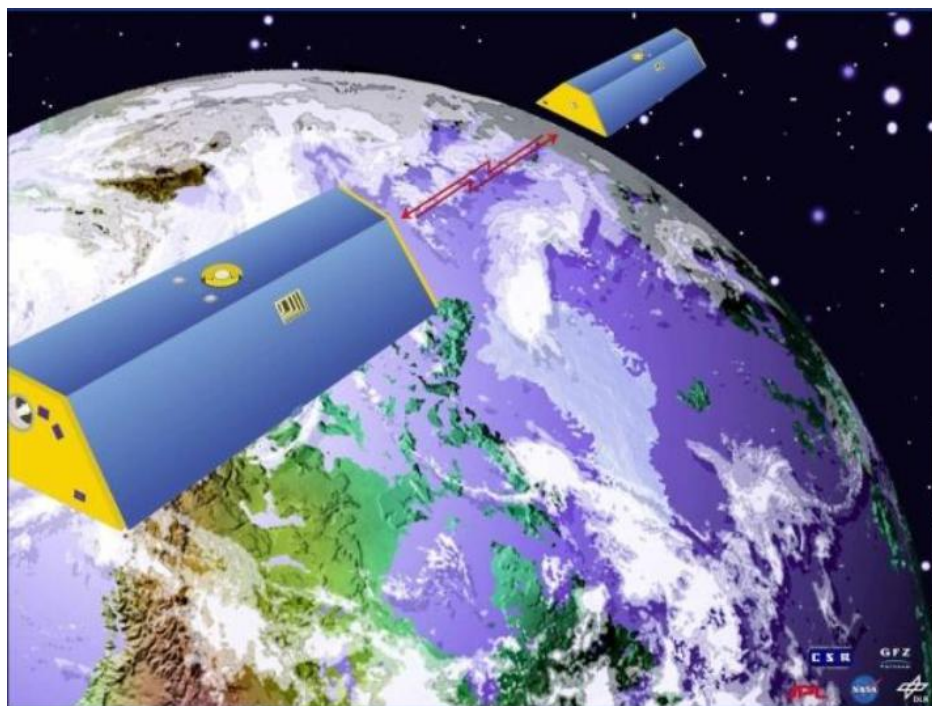
^۳ NASA

^۴ German Aerospace Centre

^۵ Terrestrial Water Storage

بسیار هزینه‌بر خواهند بود. اما داده‌های ماهواره‌ای GRACE فرصت مناسبی را برای برآورد TWS در اندازه‌های مکانی بالا ایجاد می‌نماید و بخصوص در ارزیابی تغییرات آب زیرزمینی بسیار کاربرد دارد.

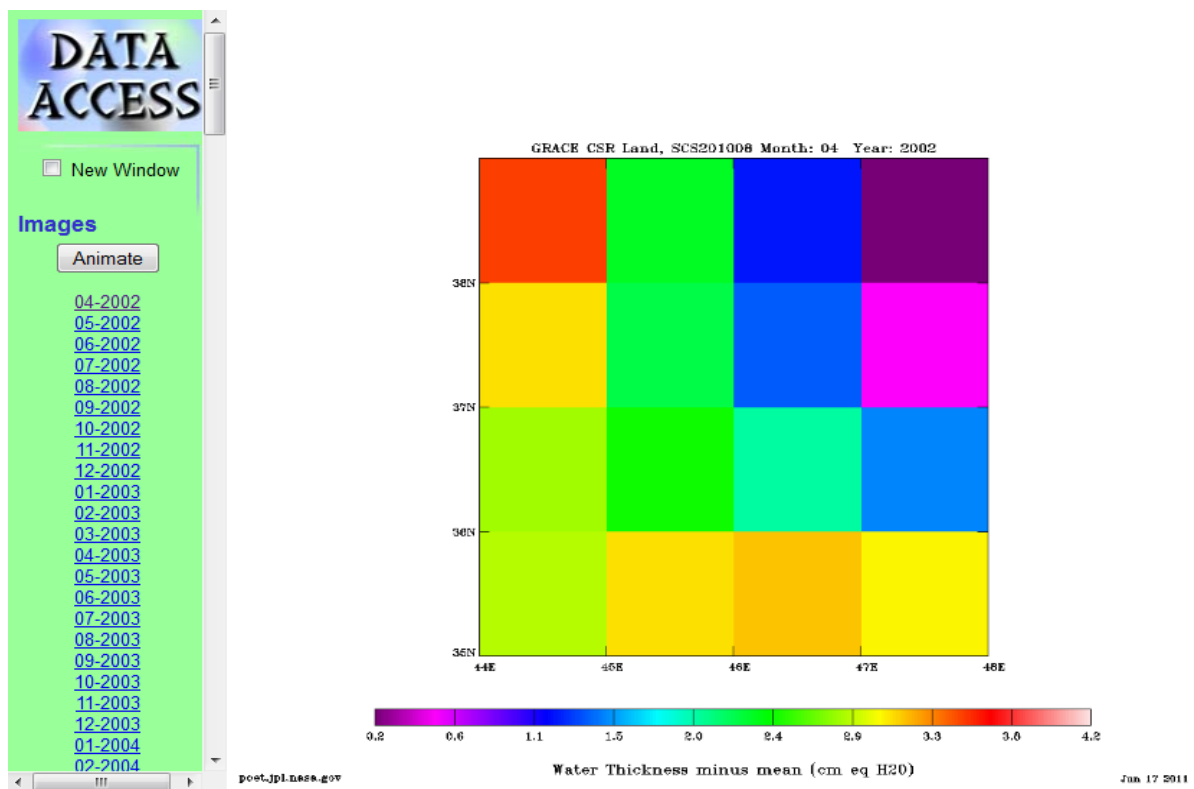
ماهواره GRACE در واقع دو عدد هستند. آنها در ارتفاع ۵۰۰ کیلومتری و با فاصله ۲۲۰ کیلومتر از یکدیگر به دور زمین چرخش می‌کنند. وضعیت آنها که در شکل شماره ۵-۱۵ قابل مشاهده هستند.



شکل ۴-۱۵: ماهواره‌های دو قلوی GRACE در حال حرکت به دور زمین

در ماهواره GRACE بر خلاف سایر ماهواره‌ها که طول موج‌های مختلف برگشتی از زمین را ثبت می‌نمایند، ماهواره مجهز به سنسوری برای پایش سطح زمین نمی‌باشد. بلکه مکانیزم کار آنها ثبت بسیار دقیق سرعت و فاصله بین دو ماهواره همسان، توسط یک سیستم مبتنی بر مایکروویو در باند K می‌باشد، بطوریکه می‌تواند با دقت یک دهم قطر موی انسان نوسانات ماهواره مقابل را ثبت کند. بدین ترتیب تغییرات گرانش زمین که ناشی از تغییرات جرم آن بواسطه تغییرات ذخیره منابع آبی است، ثبت می‌گردد.

اطلاعات ثبت شده از ماهواره GRACE توسط مراکز مختلفی مورد تحلیل قرار گرفته و در دسترس عموم قرار می‌گیرد. در مطالعه حاضر داده‌های مرتبه ۳ ماهواره GRACE (ارتفاع آب معادل^۱ (EWH)) در ابعاد یک درجه در یک درجه از اواسط سال ۲۰۰۲ تا انتهای ۲۰۱۰ از سایت مرکز مطالعات فضایی دانشگاه تگزاس تهیه و مورد استفاده قرار گرفت (www.grace.jpl.nasa.gov). موقعیت این داده‌ها در شکل ۴-۱۶ آمده است.

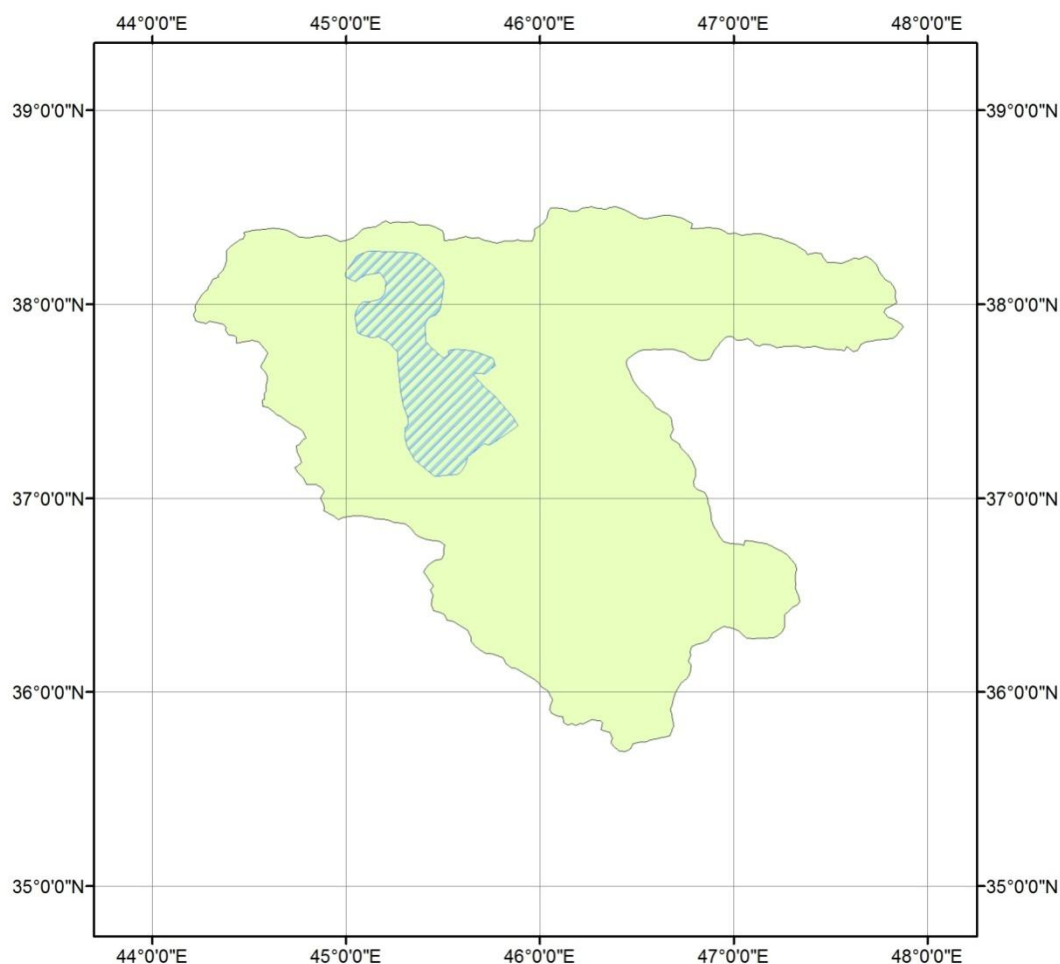


شکل ۴-۱۶: نمایش داده‌های TWS مورد نیاز در حوضه دریاچه ارومیه برای ماه آوریل ۲۰۰۲

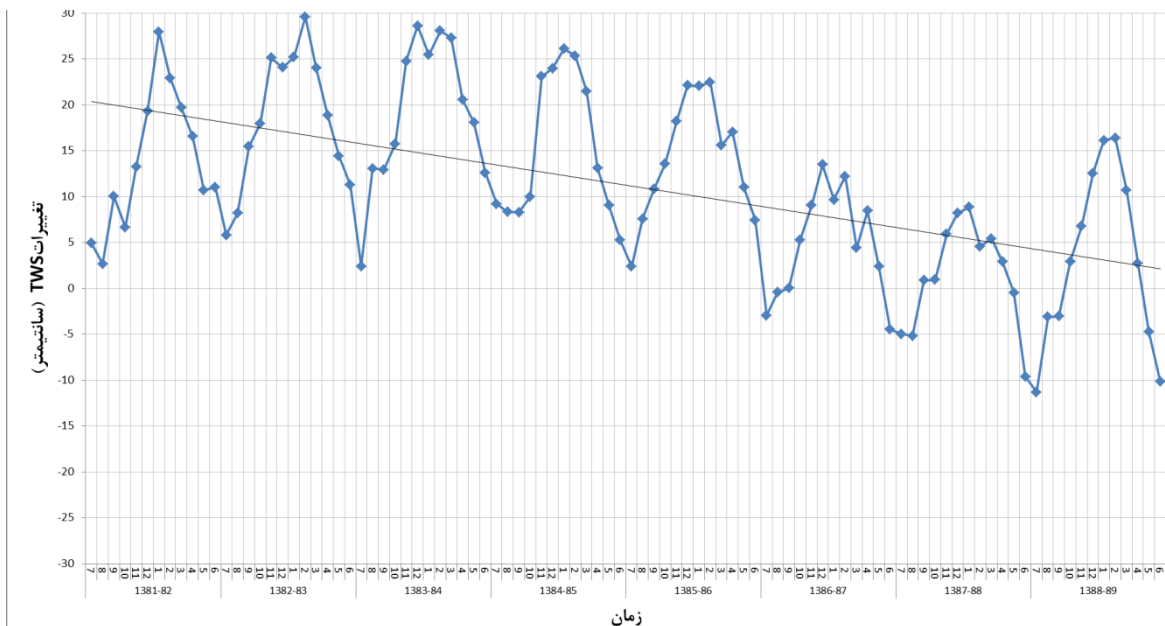
¹ Equivalent Water Height

۴-۷-۱- آماده‌سازی داده‌های TWS برای حوضه دریاچه ارومیه

همانطور که ذکر گردید، داده‌های TWS در ابعاد یک در یک درجه موجود می‌باشند. لذا در ابتدا بایستی مقدار متوسط TWS هر ماه با توجه به نحوه قرارگیری سطح حوضه در شبکه فوق تعیین گردد. بدین منظور سهم هر یک از پیکسل‌های یک در یک درجه در سطح حوضه مشخص (شکل (۴-۱۷) و متوسط وزنی مقادیر پیکسل‌های مختلف به عنوان متوسط TWS حوضه استخراج گردید که در شکل (۴-۱۸) نتایج نهایی نشان داده شده است. روند کاهشی منابع آبی حوضه بخوبی از شکل قابل ملاحظه است.



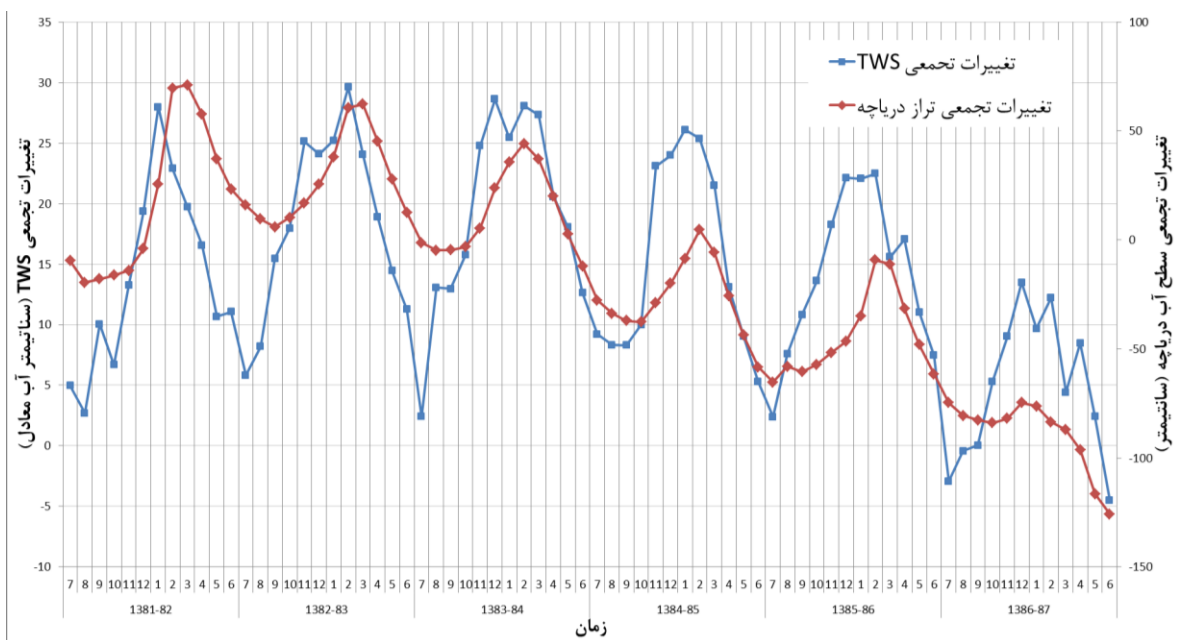
شکل ۴-۱۷: نحوه قرارگیری سطح حوضه دریاچه ارومیه در پیکسل‌های یک در یک درجه داده‌های TWS



شکل ۴-۱۸: متوسط تغییرات TWS در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه و روند آن

۴-۷-۲- مقایسه تغییرات TWS و تراز سطح آب دریاچه ارومیه

مقایسه بین تغییرات TWS و تغییرات تراز آب دریاچه بر اساس داده‌های سال‌های ۱۳۸۱-۸۲ تا ۱۳۸۶-۸۷ انجام شد. برای درک صحیح‌تر روند تغییرات، مقادیر دو پارامتر بصورت تغییرات تجمعی نسبت به شهریور ۱۳۸۱ محاسبه شد که نتایج در شکل ۴-۱۹ آمده است. با توجه به این شکل و جدول ۱ می‌توان نتیجه گرفت حتی در سال‌هایی که بیلان آب در کل حوضه مثبت بوده کاهش تراز آب در دریاچه اتفاق افتاده است.



شکل ۴- ۱۹: تغییرات تجمعی TWS و تراز دریاچه نسبت به شهریور ۱۳۸۱

فصل پنجم

نتایج و جمع بندی

۵-۱- مقدمه

گزارش حاضر تلاشی بود برای بررسی رفتار خشکسالی در حوضه دریاچه ارومیه بر اساس سوابق آماری. بدین منظور ۳۵ ایستگاه باران سنجی و ۳۲ ایستگاه آبسنجی مورد استفاده قرار گرفت و اطلاعات آنها با استفاده از روش‌های مختلفی مانند استاندارد سازی، خوشه بندی و توابع مفصل برای بررسی شدت و مدت خشکسالی‌ها پردازش شدند. همچنین اطلاعات ماهواره GRACE نیز برای بررسی تغییرات بیلان حوضه بکار گرفته شد. نتایج این گزارش در قالب موارد زیر قابل ارائه هستند:

- ۱- تغییرات بارندگی و دبی طی دوره ۳۵ ساله مطالعات نشان داد که خشکسالی‌ها در منطقه هم به لحاظ شدت و هم به لحاظ مدت در حال افزایش هستند. در شرایطی که قبل از اواسط دهه شصت، مدت خشکسالی عمدتاً یکسال بوده‌اند، پس از این تاریخ رخدادهایی تا ۴ سال تجربه شده است (اشکال ۵-۱ و ۵-۳).
- ۲- علی رقم روند تغییرات نسبتاً یکسان بارندگی و دبی در سطح حوضه، ضریب تغییرات این دو سری متفاوت است. بطوریکه این مقدار بطور متوسط برای بارندگی ۳۳٪ و برای دبی ۴۸٪ می‌باشد. این وضعیت نشان‌دهنده پاسخ غیر خطی دبی به تغییرات بارندگی است.

۳- بررسی سری زمانی شاخص SPI در مقیاس ۳ و ۶ ماه، نشان داد که حوضه در سال‌های ۱۳۵۱، ۱۳۵۷-۵۸، ۱۳۶۷-۶۹ و نیز ۱۳۷۶-۷۹، خشکسالی‌های گسترده‌ای را تجربه کرده است که مورد آخر به لحاظ شدت و مدت بر اساس آمار موجود، استثنایی است. استفاده از این وقایع به عنوان سناریوهای خشکسالی حدی تاریخی در سطح حوضه قابل توصیه می‌باشد (شکل ۱-۵ و ۲-۵).

۴- تغییرات مشاهده شده قبل و بعد از اوسط دهه ۱۳۶۰ نشان‌دهنده مواجهه حوضه با خشکسالی‌های طولانی‌تر است، بطوریکه دوره‌های خشکسالی یک ساله به دوره‌های دو تا چهار ساله تبدیل شده‌اند. در عین حال، ترسالی‌های استثنائی نیز بعد از ۱۳۶۰ در حوضه قابل مشاهده می‌باشد. مانند آنچه در سال‌های ۱۳۷۲ و ۱۳۷۳ تجربه گردید. بنا به مراجع معتبر این تغییرات می‌تواند نشانه‌هایی از تغییر اقلیم در حوضه باشد (شکل ۱-۵ و ۳-۵).

۵- ناحیه بندی ایستگاه‌های مورد مطالعه بر اساس سه بخش شرقی، جنوبی و غربی که تا حدی با مرزهای سیاسی استان‌ها شباهت دارد، نشان داد که بخش جنوبی تا حدی رفتاری متفاوت با دو بخش غربی و شرقی دارد که علت آن می‌تواند به سیستم‌های هواشناسی اثرگذار بر این مناطق مربوط است.

۶- ناحیه‌بندی منطقه با روش‌های خوشه بندی نیز نزدیک به نتیجه بند فوق است. بر اساس تکنیک‌های استفاده شده با شاخص‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی، حوضه به دو بخش شمالی و جنوبی قابل تفکیک است. البته مرزبندی ارائه شده با شاخص‌های هواشناسی نتایج بهتری داشت (اشکال ۶-۵ و ۷-۵).

۷- نتایج تحلیل فراوانی شدت- مدت خشکسالی در ایستگاه‌ها نشان داد که ارقام حاصل تا دوره بازگشت‌های ۲۰ سال نتایج نزدیکی دارند، ولی برای دوره بازگشت ۵۰ سال به بالا تفاوت‌ها در ایستگاه‌های حوضه قابل توجه می‌گردند. به‌عنوان مثال مدت خشکسالی برای دوره بازگشت ۲۰ سال با شاخص SPI حدود ۱۶ تا ۲۱

ماه است و همین مقدار برای دوره بازگشت ۱۰۰ سال به ۳۰ تا ۴۵ ماه افزایش پیدا می‌کند. در عین حال

گزارش امکان تولید هرگونه سناریو آماری دیگر را نیز میسر ساخته است (اشکال ۵-۱۱ تا ۵-۱۴).

۸- تلفیق نتایج بند ۳ و ۷ این امکان را فراهم می‌آورد که انواع مختلفی از سناریوهای تاریخی و طراحی شده را

(بر اساس تحلیل‌های آماری مورد استفاده) تولید کرد و برای ارزیابی سیستم حوضه و اقدامات تسکین بکار

گرفت. هر چند در شروع این طرح، استفاده از سناریوهای تاریخی قابل توصیه‌تر می‌باشد.

۹- بررسی اطلاعات ماهواره GRACE نشان می‌دهد که موجودی آب حوضه روند کاهشی مستمری داشته

است. مقایسه این روند با تغییرات تراز دریاچه، شباهت رفتاری آنها را نشان می‌دهد (۵-۱۹). این ماهواره

برای بررسی زمان واقعی بیلان آبی حوضه، توانایی‌های زیادی دارد، هر چند بدلیل سابقه کوتاه، کار مستقلی

برای ارزیابی و نحوه پیش‌پردازش اطلاعات آن مورد نیاز می‌باشد.

منابع و مآخذ

- رضیئی، ط. عزیزی، ق. (۱۳۸۶). منطقه‌بندی رژیم بارشی غرب ایران با استفاده از روش‌های تحلیل مولفه‌های اصلی و خوشه‌بندی. گزارش فنی، تحقیقات منابع آب، سال سوم، شماره دوم، ص ۶۲-۶۵
- اسلامیان، س. مدرس، ر. سلطانی، س. (۱۳۸۴). گروه‌بندی مکانی خشکسالی با استفاده از شاخص استاندارد بارش در استان اصفهان. یادداشت فنی.
- امیدی، م، محمدزاده، م و س. مرید. (۱۳۸۹). تحلیل احتمالاتی شدت-مدت خشکسالی در استان تهران با استفاده از توابع مفصل، مجله تحقیقات آب و خاک ایران.

Karamouz, M., Mahjouri, N. and Kerachian, R. (2004). River Water Quality Zoning: A Case Study of Karoon and Dez River System, Iranian J Env. Health Sci Eng, Vol. 1, No.2, pp.16-27.

Santos, J., Pulido-Calvo, I. and Portela, M. (2010). Spatial and temporal variability of droughts in Portugal, Water Resources Research, Vol. 46.

Byzedi, M. and Saghafian, B. (2009). Regional Analysis of Streamflow Drought: A Case Study for Southwestern Iran, World Academy of Science, Engineering and Technology 57.

Yan Wang, J. and Qingmei, Z. (2010). Evaluation of Water Resources Carrying Capacity in Shandong Province Based on Spatial Cluster, International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence.

Prudhomme, C. and Sauquet, E. (2007), Modelling a Regional Drought Index in France, Centre for Ecology and Hydrology, Natural Environment Research Council.

Gozalez, J. and Valdes, J. B. (2003). Bivariate Drought Recurrence Analysis Using Tree Ring Reconstructions, journal of hydrologic Engineering ASCE, 8(5), 247- 258.

Cancelliere, A. and Salas, J. D. (2004), Drought Length Properties for periodic- stochastic hydrologic data, Water Resources Research. 40, W02503, doi: 10.1029/ 2002WR001750.

Salas, J. D., Fu, C., Cancelliere, A., Dustin, D., Pineda, A. and Vincent, E. (2005), Characterizing the Severity and Risk of Drought in the Poudre River, Colorado, Journal of water Resources Planning and management, ASCE. 131 (5), 383- 393.

Shiau, J. T. (2006), Fitting Drought Duration and Severity with Two Dimensional Copulas, water Resources Management, 20, 795- 815. and hydraulics, 6, 239- 254.

Sklar, A. (1959), Fonctions de Repartition an Dimensions et Leurs Marges, Publications de l'Institute de Statistique de l'Universite de Paris, 8, 229- 231.

Zelenhastic, E. and Salvai, A. (1987), A Method of Streamflow Drought Analysis, water Resources Research 23, 156- 168.

Schweizer, B. and Sklar, A. (1983), Probabilistic Metric Spaces, North- Holland, New York.

Shiau, J. T. 2003, 'Return period of Bivariate Distributed Hydrological events, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 17(1–2), 42– 57.

Shiau, J. T. and Shen, H. W. 2001, *Recurrence Analysis of Hydrologic Droughts of Differing Severity*, *Journal of Water Resources Planning and Management*, 127, 30-4.

پیوست ۱

جدول پ ۱- وقایع خشکسالی در ایستگاه هواشناسی بابرود

شروع		پایان		مدت	شدت
سال	ماه	سال	ماه		
1351	3	1351	3	1	0.07
1351	11	1352	6	8	9.6
1353	1	1353	7	7	6.34
1353	9	1353	9	1	0.02
1354	2	1354	3	2	0.72
1354	7	1354	7	1	0.38
1354	10	1354	12	3	0.57
1355	2	1356	1	12	6.27
1356	7	1356	11	5	1.67
1357	3	1358	12	22	19.49
1359	4	1359	6	3	1.9
1359	8	1359	8	1	0.19
1360	3	1360	4	2	0.9
1360	6	1360	7	2	0.32
1361	7	1361	7	1	0.76
1361	9	1361	12	4	2.2
1362	2	1362	2	1	1.53
1362	4	1362	7	4	3.45
1362	9	1362	9	1	0.19
1363	4	1364	2	11	13.18
1364	4	1364	6	3	1.09
1365	8	1366	1	6	3.41
1366	9	1366	12	4	1.93
1367	8	1368	1	6	3.37
1368	7	1370	2	20	19.5
1372	2	1372	2	1	0.31
1374	3	1374	4	2	0.63
1375	2	1379	2	49	52.68
1379	7	1380	2	8	6.04
1380	4	1380	5	2	0.31
1380	8	1381	2	7	2.89
1381	4	1381	6	3	0.51
1381	9	1381	9	1	0.07
1382	1	1382	2	2	1
1382	5	1382	7	3	1.69
1383	4	1383	4	1	0.15
1383	6	1384	1	8	3.43
1384	3	1384	3	1	0.02
1385	8	1385	9	2	0.86

جدول پ ۲- وقایع خشکسالی در ایستگاه هواشناسی شیشوان

شروع		پایان		مدت	شدت
سال	ماه	سال	ماه		
1350	6	1350	7	2	1.12
1351	8	1352	5	10	7.26
1352	12	1354	4	17	13.1
1354	6	1354	7	2	0.61
1355	3	1355	6	4	1.25
1356	3	1356	5	3	0.68
1356	7	1356	8	2	0.42
1356	11	1357	2	4	1.71
1357	9	1358	9	13	12.77
1358	12	1359	7	8	6.05
1360	3	1360	11	9	4.33
1361	7	1362	2	8	10.86
1362	4	1362	12	9	4.79
1363	7	1364	7	13	13
1365	6	1365	12	7	9.19
1367	2	1367	4	3	1.12
1367	7	1368	1	7	6.73
1368	8	1369	10	15	23.07
1369	12	1370	10	11	9.82
1372	5	1372	10	6	2.37
1373	6	1373	9	4	2.41
1374	3	1374	11	9	5.96
1375	5	1375	10	6	4.19
1375	12	1375	12	1	0.02
1377	2	1378	9	20	16.04
1379	2	1379	4	3	0.89
1379	7	1379	12	6	3.43
1380	10	1380	11	2	0.37
1381	1	1381	2	2	1.55
1381	12	1382	1	2	0.33
1382	3	1382	3	1	0.15
1383	8	1383	8	1	0.21
1385	8	1385	8	1	0.28
1385	10	1385	10	1	0.03

جدول پ ۳- وقایع خشکسالی در ایستگاه هواشناسی موش آباد

شروع		پایان		مدت	شدت
سال	ماه	سال	ماه		
1352	2	1352	6	5	6.59
1353	4	1353	10	7	7.86
1354	2	1354	4	3	0.73
1355	2	1355	2	1	0.26
1355	12	1356	1	2	0.16
1356	9	1357	1	5	1.7
1357	8	1357	11	4	0.82
1358	1	1358	7	7	3.51
1359	1	1359	1	1	0.53
1360	2	1360	12	11	3.35
1361	7	1361	12	6	3.85
1362	2	1363	1	12	10.73
1363	8	1363	12	5	1.57
1364	9	1364	9	1	0.07
1364	11	1364	11	1	0.37
1365	6	1366	1	8	5.94
1366	9	1366	12	4	1.92
1367	4	1368	1	10	11.04
1368	8	1369	8	13	14.81
1369	10	1369	10	1	0.04
1369	12	1370	7	8	5.39
1371	2	1371	2	1	0.25
1372	2	1372	2	1	0.31
1374	2	1374	7	6	1.47
1374	10	1375	5	8	2.34
1375	7	1375	10	4	0.85
1375	12	1380	6	55	64.7
1381	1	1381	6	6	5.78
1382	6	1382	7	2	1.2
1383	4	1384	3	12	8.71
1385	8	1385	12	5	5.15

جدول پ ۴- وقایع خشکسالی در ایستگاه هواشناسی یالقوز

شروع		پایان		مدت	شدت
سال	ماه	سال	ماه		
1351	3	1351	3	1	0.07
1351	6	1351	6	1	0.01
1351	10	1352	5	8	4.97
1353	1	1353	2	2	0.67
1353	4	1353	7	4	2.65
1353	10	1353	12	3	0.39
1354	2	1354	2	1	0.26
1354	7	1354	7	1	0.21
1354	9	1355	5	9	6.51
1355	7	1355	7	1	0.17
1355	10	1356	8	11	6.22
1357	3	1357	9	7	4.13
1358	3	1358	7	5	2.76
1360	3	1360	7	5	1.92
1361	6	1361	12	7	4.62
1362	2	1362	8	7	6.94
1362	11	1362	11	1	0.01
1363	1	1363	1	1	0.19
1363	9	1363	11	3	0.53
1365	8	1366	1	6	11.34
1366	9	1366	9	1	0.36
1367	5	1367	5	1	0.32
1367	7	1368	1	7	8.95
1368	8	1369	5	10	15.93
1369	10	1369	10	1	0.03
1369	12	1370	2	3	2.75
1370	7	1370	7	1	0.24
1372	2	1372	3	2	0.98
1372	5	1372	6	2	0.22
1373	6	1374	6	13	8.85
1374	12	1375	2	3	1.64
1375	6	1375	9	4	2.29
1376	4	1376	12	9	4.22
1377	2	1379	1	24	32.25
1379	11	1380	6	8	8.21
1380	12	1381	6	7	5.35
1381	9	1381	9	1	0.12
1381	12	1382	1	2	1.78
1382	6	1382	9	4	0.5
1383	3	1383	12	10	13.88
1384	3	1384	4	2	0.26
1384	6	1384	6	1	0.03
1385	9	1385	9	1	0.02

جدول پ ۵- وقایع خشکسالی در ایستگاه هواشناسی دریان

شروع		پایان		مدت	شدت
سال	ماه	سال	ماه		
1350	6	1350	7	2	1.75
1351	4	1351	4	1	0.04
1351	6	1351	6	1	0.03
1351	8	1352	6	11	10.62
1353	4	1354	7	16	16.31
1355	4	1355	5	2	0.37
1356	7	1356	8	2	0.86
1357	4	1359	6	27	14.39
1360	1	1360	11	11	9.27
1361	6	1361	12	7	6.58
1362	2	1363	1	12	5.8
1363	10	1364	4	7	4.58
1364	6	1364	6	1	0.18
1364	10	1365	1	4	1.37
1365	8	1366	2	7	6.06
1366	9	1366	10	2	0.15
1367	5	1368	1	9	12.95
1368	7	1369	9	15	22.65
1369	12	1370	2	3	2.24
1374	3	1374	6	4	3.24
1375	8	1375	8	1	0.02
1376	6	1378	3	22	33.79
1378	7	1379	4	10	5.19
1379	7	1380	1	7	2.68
1380	4	1380	6	3	0.69
1381	2	1381	2	1	1.03
1382	6	1382	7	2	1.46
1383	4	1383	4	1	0.28
1383	6	1383	6	1	0.29
1384	2	1384	4	3	2.02
1385	8	1385	10	3	1.08

جدول پ ۶- وقایع خشکسالی در ایستگاه هواشناسی قیقلو

شروع	پایان	مدت	شدت
------	-------	-----	-----

سال	ماه	سال	ماه		
1350	6	1350	7	2	0.47
1351	6	1351	6	1	0.05
1351	8	1352	5	10	6.01
1352	12	1354	4	17	15.65
1354	6	1354	7	2	0.18
1355	3	1355	3	1	0.50
1355	5	1355	5	1	0.06
1356	3	1356	5	3	0.73
1356	7	1356	9	3	0.82
1356	11	1356	12	2	0.85
1357	2	1357	2	1	0.68
1357	9	1357	12	4	1.73
1358	2	1359	8	19	21.74
1360	3	1360	11	9	5.70
1361	6	1362	11	18	16.59
1363	5	1364	11	19	20.70
1365	1	1365	1	1	0.07
1365	8	1366	1	6	3.15
1367	7	1369	10	28	21.73
1370	1	1370	2	2	0.50
1370	7	1370	7	1	0.32
1370	9	1370	9	1	0.02
1371	2	1371	2	1	0.25
1371	4	1371	6	3	0.62
1372	10	1372	12	3	1.55
1373	10	1373	11	2	0.21
1374	2	1374	8	7	5.16
1375	1	1375	8	8	8.15
1377	2	1378	11	22	25.44
1379	2	1379	4	3	1.03
1379	6	1379	12	7	4.27
1381	1	1381	2	2	0.97
1385	8	1385	8	1	0.09

جدول پ ۷- وقایع خشکسالی در ایستگاه آبسنجی ونبار

شروع		پایان		مدت	شدت
سال	ماه	سال	ماه		
1367	8	67	10	3	274.89
1368	10	68	12	3	2.67
1370	4	70	5	2	28.00
1376	12	77	3	4	7.47
1377	6	77	10	5	610.16
1378	2	78	6	5	244.27
1378	8	80	1	18	1228.40
1380	3	80	7	5	290.62
1380	12	80	12	1	0.07
1381	2	81	5	4	66.09
1382	7	82	7	1	244.12
1383	11	83	11	1	0.53
1384	4	84	4	1	8.28
1384	6	84	7	2	43.18

جدول پ ۸- وقایع خشکسالی در ایستگاه آبرنجی تازه کند

شروع		پایان		مدت	شدت
سال	ماه	سال	ماه		
1366	1	66	1	1	0.04
1367	8	67	8	1	0.16
1374	6	74	6	1	0.80
1375	4	75	6	3	1.09
1375	10	75	10	1	0.02
1377	5	77	11	7	11.68
1378	1	78	10	10	11.37
1379	2	79	4	3	1.32
1379	7	80	3	9	12.22
1380	8	80	8	1	0.46
1380	10	80	11	2	1.05
1381	1	82	1	13	25.56
1382	5	82	5	1	0.87
1383	1	83	1	1	0.04
1383	7	83	8	2	0.45
1384	3	84	4	2	0.79
1384	7	84	7	1	3.41
1384	12	84	12	1	0.23

جدول پ ۹- وقایع خشکسالی در ایستگاه آبرنجی ساریقمیش

شروع		پایان		مدت	شدت
سال	ماه	سال	ماه		
1367	7	67	8	2	51.17
1368	8	68	8	1	17.28
1371	12	71	12	1	2.319
1373	10	73	10	1	0.77
13174	3	74	6	4	14.02
1375	2	75	2	1	12.79
1375	5	75	6	2	8.59
1375	9	75	9	1	2.11
1376	9	76	11	3	31.47
1377	6	78	10	17	870.05
1378	12	80	2	15	509.01
1380	4	80	5	2	11.51
1380	10	80	11	2	8.94
1381	1	81	1	1	11.60
13181	4	81	4	1	1.59
1382	11	82	11	1	3.00
1383	1	83	1	1	15.73
13183	9	83	11	3	6.30
1384	1	84	1	1	1.74
1384	3	84	4	2	9.53
1384	12	84	12	1	16.92

جدول پ ۱۰- وقایع خشکسالی در ایستگاه آبسنجی آباجالو سفلی

شروع		پایان		مدت	شدت
سال	ماه	سال	ماه		
1367	8	67	9	2	1.84
1369	9	69	9	1	1.78
1377	5	77	9	5	68.62
1378	5	78	9	5	69.30
1379	5	79	9	5	72.20
1380	5	80	6	2	4.98
1381	5	81	6	2	5.35
1383	7	83	8	2	32.80
1384	5	84	5	1	0.63

جدول پ ۱۱- وقایع خشکسالی در ایستگاه آبسنجی چهریق علیا

شروع		پایان		مدت	شدت
سال	ماه	سال	ماه		
1367	9	67	9	1	0.09
1369	8	69	8	1	1.53
1376	3	76	3	1	0.22
1376	7	76	10	4	9.22
1376	12	77	10	11	21.71
1377	12	77	12	1	0.18
1378	2	79	1	12	24.57
1379	3	79	5	3	3.86
1379	8	80	6	11	16.07
1381	1	81	2	2	0.66
1381	4	81	4	1	0.19
1383	2	83	2	1	0.42
1383	6	83	7	2	5.51
1383	9	83	9	1	2.72
1383	11	83	11	1	1.64
1384	2	84	2	1	0.11
1384	4	84	7	4	2.76
1384	9	84	9	1	0.81
1384	11	84	12	2	0.78

جدول پ ۱۲- وقایع خشکسالی در ایستگاه آبسنجی تازه کند (علویان)

شروع		پایان		مدت	شدت
سال	ماه	سال	ماه		
1367	8	67	10	3	9.92
1368	4	68	5	2	0.70
1369	6	69	6	1	0.27
1369	12	69	12	1	0.07
1370	6	70	6	1	1.15
1371	5	71	6	2	3.04
1376	3	76	3	1	0.22
1376	7	76	10	4	9.22
1376	12	77	10	11	21.71
1377	12	77	12	1	0.18
1378	2	79	1	12	24.57
1379	3	79	5	3	3.86
1379	8	80	6	11	16.07
1381	1	81	2	2	0.66
1381	4	81	4	1	0.19
1383	2	83	2	1	0.42
1383	6	83	7	2	5.51
1383	9	83	9	1	2.72
1383	11	83	11	1	1.64
1384	2	84	2	1	0.11
1384	4	84	7	4	2.76
1384	9	84	9	1	0.81
1384	11	84	12	2	0.78

پیوست ۲

لوح فشرده شامل مقادیر شاخص‌های SPI و DI