



دانشکده عمران  
گروه آب و محیط زیست

پایان نامه کارشناسی ارشد

استخراج و روندیابی رطوبت خاک با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنجش از دور

عبدالعزیز رحمانی کم

استاد راهنما  
دکتر سعید گلیان

استاد مشاور  
D.r Luca Brocca

شهریور ۱۳۹۴

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده : عمران  
گروه : آب و محیط زیست

استخراج و روندیابی رطوبت خاک با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنجش از دور

عبدالعزیز رحمانی کم

استاد راهنما  
دکتر سعید گلیان

استاد مشاور  
Luca Brocca

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۹۴

## دانشگاه شاهرود

دانشکده : عمران

گروه : آب و محیط زیست

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای / خانم ..عبدالعزیز رحمانی کم..... به شماره دانشجویی: .....۹۲۰۶۶۸۴.....

تحت عنوان: استخراج و روندیابی رطوبت خاک با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنجش از دور

در تاریخ ...۱۳۹۴/۰۶/۲۸..... توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه ..... مورد پذیرش قرار گرفت.

| امضاء | اساتید مشاور                     | امضاء | اساتید راهنما                        |
|-------|----------------------------------|-------|--------------------------------------|
|       | نام و نام خانوادگی : Luca Brocca |       | نام و نام خانوادگی : دکتر سعید گلپان |
|       | نام و نام خانوادگی :             |       | نام و نام خانوادگی :                 |

| امضاء | نماینده تحصیلات تکمیلی              | امضاء | اساتید داور                                     |
|-------|-------------------------------------|-------|-------------------------------------------------|
|       | نام و نام خانوادگی : دکتر مهدی عجمی |       | نام و نام خانوادگی : دکتر سید فضل الله ساغروانی |
|       |                                     |       | نام و نام خانوادگی : دکتر جعفر یزدی             |
|       |                                     |       | نام و نام خانوادگی :                            |
|       |                                     |       | نام و نام خانوادگی :                            |

## تشکر و قدردانی

خداوند بزرگ را سپاس می‌گوییم که توفیق انجام این پژوهش علمی را به ما اعطا نمود. از خانواده گرامی‌ام که در طی انجام این تحقیق، فضای مناسبی را برای من فراهم نموده و مشوق من بودند تشکر می‌کنم. همچنین از آقای دکتر سعید گلیان استاد راهنمای پر تلاش و دلسوز که سوالات من را در کمترین زمان و با اشتیاق جواب می‌دادند کمال تشکر را دارم. و جا دارد از استاد مشاور این پایان نامه آقای دکتر لوکا بروکا جهت راهنمایی‌های ارزنده‌شان قدردانی نمایم.

## تعهد نامه

اینجانب ...عبدالعزیز رحمانی کم... دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ..عمران- آب... دانشکده ...عمران.....  
دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه ....استخراج و روندیابی رطوبت خاک با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنجش از دور .....تحت راهنمایی.....دکتر سعید گلیان.....متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه شاهرود » و یا « Shahrood University » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

### تاریخ

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

\* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد.

## چکیده

رطوبت خاک نقش اساسی را در بسیاری از کاربردهای مرتبط با آب شامل مدیریت منابع آب، تحلیل خشکسالی، کشاورزی و مطالعات تغییر اقلیم بازی می‌کند. در غالب مناطق ایران، اساساً مقادیر رطوبت خاک با روش‌های معمول نیز اندازه‌گیری نمی‌شوند و در صورت اندازه‌گیری نیز پوشش زمانی و مکانی لازم برای اکثر کاربردها را فراهم نمی‌آورند. در نتیجه استفاده از تکنیک‌های مبتنی بر سنجش از دور به دلیل استفاده عملیاتی آسان، پوشش جهانی و دقت نشان داده شده تقریباً تنها روش برای فهم تغییرات زمانی و مکانی رطوبت خاک در ایران هستند. در پژوهش حاضر، داده‌های رطوبت خاک از دو محصول میکروویو ماهواره‌ای SMOSL3 و ESA CCI SM و دو محصول باز تحلیل شده ERA-Interim و ERA-I/Land و همچنین داده‌های دما و بارش از سازمان هواشناسی ایران در شش منطقه با شرایط اقلیمی متفاوت در ایران استخراج شدند. سری‌های زمانی ماهانه محصولات رطوبت خاک و متغیرهای اقلیم شناسی دما و بارش در شش منطقه مورد مطالعه به دست آمدند. در تمام مناطق مورد مطالعه، تطابق خوبی بین محصولات رطوبت خاک مختلف با ضرایب همبستگی بیشتر از ۰/۵ به دست آمد. بهترین تطابق‌ها در مناطق شمال شرقی و جنوب غربی به ترتیب با مقادیر همبستگی میانگین ۰/۸۸ و ۰/۹۱ مشاهده شدند. با توجه به این که طول دوره‌های زمانی محصولات رطوبت خاک متفاوت می‌باشند بنابراین، نتایج باید با احتیاط ارزیابی شوند. علاوه بر این، محصولات رطوبت خاک با دماهای حداکثر، حداقل و میانگین ماهانه و همچنین با مجموع بارش ماهانه همبستگی قوی‌ای را نشان دادند. همچنین، با مقایسه همبستگی‌های محاسبه شده بین محصولات رطوبت خاک مختلف و متغیرهای دما و بارش در مناطق مورد مطالعه نتیجه‌گیری شد که محصول رطوبت خاک ERA-I/Land نتایج قابل اعتماد تری را نسبت به محصولات الگوریتم‌های دیگر نشان می‌دهد. نتایج تحلیل روند مشخص کرد که در بین تمام مناطق مورد مطالعه فقط در منطقه جنوب شرقی برای محصول ERA-Interim و در مناطق مرکز و شمال غربی برای محصول ESA CCI SM در دوره ۲۰۱۴-۲۰۰۰ روند منفی مشاهده شده است. همچنین، شاخص رطوبت خاک استاندارد به دست آمده

از محصولات ERA-Interim، ERA-I/Land و ESA CCI SM نشان داد که مناطق مرکز و جنوب شرقی از وقایع خشکسالی شدید و بلند مدت در دهه اخیر متحمل ضرر و زیان شده‌اند. سرانجام، مقادیر رطوبت خاک در چهار ایستگاه با وضعیت اقلیمی متفاوت با استفاده از مدل بیلان آب-خاک شبیه سازی و با مقادیر رطوبت خاک ERA-I/Land به عنوان داده مشاهداتی مقایسه شدند. همچنین با مشاهده مقادیر شاخص‌های سنجش خطا در ایستگاه‌های مرطوب و معتدل گرگان و رشت و در ایستگاه نیمه خشک شاهرود، نتیجه گیری می‌شود که رطوبت خاک شبیه سازی شده توسط مدل یکپارچه بیلان آب-خاک در ایستگاه‌های معتدل و نیمه خشک کشور، همبستگی خوبی را با رطوبت خاک ERA-I/Land دارد.

**کلمات کلیدی:** سنجنده‌های سنجش از دور، رطوبت خاک، همبستگی، تحلیل خشکسالی، شبیه سازی، ایران



## لیست مقالات ژورنال

| عنوان مقاله                                                                                             | نام مجله                                                              | نوع مقاله (ISI/ علمی پژوهشی/ علمی ترویجی) | پذیرش قطعی | چاپ (سال نشر) |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|------------|---------------|
| Multiyear monitoring of soil moisture over Iran through satellite and reanalysis soil moisture products | International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation | ISI                                       | بله        | 2015          |
|                                                                                                         |                                                                       |                                           |            |               |

## لیست مقالات کنفرانس

| عنوان مقاله                                                         | نام کنفرانس                                                                | ملی/ بین المللی | شرکت در همایش و نوع ارائه؟ (شفاهی/ پوستر) | در مجموعه مقالات چاپ شده؟ |
|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------------------------------|---------------------------|
| مقایسه خروجی الگوریتم‌های ماهواره‌ای رطوبت خاک در مناطق مختلف ایران | دهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران (10icce)، دانشگاه تبریز، اردیبهشت ۱۳۹۴ | بین المللی      | پوستر                                     | بله                       |
|                                                                     |                                                                            |                 |                                           |                           |

## فهرست مطالب

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| فصل اول: مقدمه                                                        | ۱  |
| ۱-۱ اهمیت رطوبت خاک، متغیر ضروری اقلیم                                | ۲  |
| ۲-۱ ضرورت و اهداف تحقیق                                               | ۲  |
| ۳-۱ خلاصه‌ای از کارهای انجام شده در فصول بعدی                         | ۴  |
| فصل دوم: تاریخچه مطالعات انجام شده در داخل و خارج کشور                | ۷  |
| فصل سوم: منطقه تحقیق و داده‌ها                                        | ۱۳ |
| ۱-۳ مناطق مورد مطالعه                                                 | ۱۴ |
| ۲-۳ ایستگاه‌های مورد مطالعه برای شبیه سازی رطوبت خاک                  | ۱۵ |
| ۳-۳ مجموعه داده‌های رطوبت خاک مورد استفاده                            | ۱۶ |
| ۱-۳-۳ SMOSL3                                                          | ۱۷ |
| ۲-۳-۳ ESA CCI SM                                                      | ۱۸ |
| ۳-۳-۳ ERA-Interim و ERA-I/Land                                        | ۱۸ |
| ۴-۳ داده‌های دما و بارش مشاهداتی                                      | ۱۹ |
| فصل چهارم: روش تحقیق                                                  | ۲۳ |
| ۱-۴ روش‌های مورد استفاده به منظور پایش رطوبت خاک در مناطق مورد مطالعه | ۲۴ |
| ۱-۱-۴ محاسبه سری‌های زمانی نرمال شده                                  | ۲۴ |
| ۲-۱-۴ تحلیل روند                                                      | ۲۴ |
| ۳-۱-۴ شاخص‌های مقایسه‌ای                                              | ۲۶ |

|       |                                                              |    |
|-------|--------------------------------------------------------------|----|
| ۴-۱-۴ | تحلیل خشکسالی بر اساس محصولات رطوبت خاک                      | ۲۷ |
| ۴-۲   | شبیه سازی رطوبت خاک با استفاده از مدل بیلان آب-خاک           | ۲۹ |
| ۴-۲-۱ | روش انجام کار                                                | ۲۹ |
| ۴-۲-۲ | معیارهای سنجش عملکرد مدل بیلان آب-خاک                        | ۳۰ |
|       | فصل پنجم: نتایج                                              | ۳۳ |
| ۵-۱   | نتایج حاصل از پایش رطوبت خاک در مناطق مورد مطالعه            | ۳۴ |
| ۵-۱-۱ | تحلیل روند برای سری‌های زمانی رطوبت خاک                      | ۳۴ |
| ۵-۱-۲ | مقایسه سری‌های زمانی نرمال شده داده‌های رطوبت خاک ماهانه     | ۳۵ |
| ۵-۱-۳ | نتایج تحلیل خشکسالی                                          | ۴۷ |
| ۵-۲   | نتایج حاصل از شبیه سازی رطوبت خاک در ایستگاه‌های مورد مطالعه | ۵۳ |
| ۵-۲-۱ | نتایج به دست آمده از شاخص‌های سنجش عملکرد مدل                | ۵۳ |
| ۵-۲-۲ | مقایسه سری‌های زمانی رطوبت خاک مشاهداتی و شبیه سازی شده      | ۵۴ |
|       | فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات                              | ۵۹ |

## **فصل اول: مقدمه**

## ۱-۱ اهمیت رطوبت خاک، متغیر ضروری اقلیم<sup>۱</sup>

رطوبت خاک یک متغیر کلیدی زیست محیطی است که به عنوان یکی از محرک‌های اصلی چرخه‌های آب، انرژی و کربن شناخته شده است. در نتیجه نقش کنترلی روی اجزای چرخه آب مانند رواناب سطحی و تبخیر و تعرق و هم چنین بازخورد مستقیم با بارش و دما دارد [۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶]. بنابراین رطوبت خاک نقش حیاتی را در بیشتر کاربردهای علمی و اجرایی شامل منابع آب، تحلیل خشکسالی، کشاورزی و سیستم اقلیمی بازی می‌کند [۱، ۲ و ۳].

در کاربردهای کشاورزی، دانستن مقدار رطوبت خاک پارامتر اساسی برای آبیاری و داشتن محصولات پر بازده است [۴]. هم چنین، رطوبت خاک یک متغیر مفید در مطالعات تغییر اقلیم و شدت و مدت وقایع خشکسالی می‌باشد [۷]. خشکسالی پدیده‌ای است که به صورت تدریجی نمایان می‌شود که می‌تواند منجر به تلفات قابل توجهی برای جوامع شود و ممکن است جنبه‌های گوناگون زندگی بشر مثل کشاورزی، امنیت حوضه‌های آبریز و پایداری محیط زیست را تحت تاثیر قرار دهد [۸].

با توجه به اهمیت رطوبت خاک در کاربردهای گوناگون هیدرولوژیکی و کشاورزی، سیستم نظارت بر اقلیم جهانی<sup>۲</sup> رطوبت خاک را به عنوان یک متغیر ضروری اقلیم برای مطالعه سیستم اقلیم جهانی توصیه کرده است [۲، ۴، ۵ و ۷]. بنابراین، بازیابی دقیق مقادیر رطوبت خاک برای اکثر مطالعات زیست محیطی مرتبط با آب، امری حیاتی است [۱، ۹ و ۱۰].

## ۱-۲ ضرورت و اهداف تحقیق

با توجه به مطالب گفته شده در بخش قبل، اهمیت اندازه‌گیری رطوبت خاک بیش از پیش نمایان می‌شود. روش‌های معمول اندازه‌گیری رطوبت خاک به طور کلی به دو دسته مستقیم و غیر

---

<sup>۱</sup> Essential Climate Variable

<sup>۲</sup> Global Climate Observing System

مستقیم تقسیم بندی می‌شوند و عبارتند از: ۱- روش اندازه‌گیری مستقیم: در این شیوه رطوبت خاک به روش وزنی و از طریق خشک کردن نمونه در دستگاه آون با میزان حرارت ۱۰۵ درجه سانتی گراد تعیین می‌شود. ۲- روش‌های غیر مستقیم: در این روش‌ها با استفاده از دستگاه‌های مختلف، مقدار رطوبت خاک به صورت غیر مستقیم تعیین می‌شود که مهم‌ترین این روش‌ها عبارتند از: نوترون متر، بلوک گچی و تانسیومتر.

روش‌های معمول اندازه‌گیری رطوبت خاک مثل روش وزنی و روش نوترون متر، رطوبت خاک را به صورت نقطه‌ای اندازه می‌گیرند و برای فهم رفتار رطوبت خاک در مقیاس مکانی وسیع مناسب نیستند. همچنین، پایش مستقیم رطوبت خاک و استخراج داده‌های رطوبت به صورت نقطه‌ای نه تنها پرهزینه و وقت گیر است، بلکه در سطوح وسیع غیر عملی می‌باشد [۱۱].

متأسفانه، در غالب مناطق ایران، اساساً داده‌های رطوبت خاک با روش‌های معمول نیز استخراج نمی‌شوند و در صورت استخراج نیز پوشش زمانی و مکانی لازم برای اکثر کاربردها را فراهم نمی‌آورند. لذا یافتن جایگزینی برای رفع این نقیصه بسیار راهگشا خواهد بود. بنابراین، اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای رطوبت خاک در صورت وجود نیز کافی نبوده و نیاز به ابزاری برای افزایش دامنه داده‌ها و کاهش هزینه‌ها وجود دارد. در نتیجه، نیاز به ابزاری برای پایش رطوبت در مقیاس زمانی و مکانی است تا علاوه بر دقت مناسب، امکان کاربرد عملیاتی آن در مناطق مختلف وجود داشته باشد [۱۱].

در این میان، تکنیک‌های مبتنی بر سنجش از دور<sup>۱</sup> در مقایسه با اندازه‌گیری نقطه‌ای و یا مدل‌های شبیه‌سازی به دلیل استفاده عملیاتی آسان، دقت مناسب و پوشش مکانی گسترده دارای برتری هستند [۱ و ۱۱].

همچنین، در مناطقی از جهان که اندازه‌گیری‌های ایستگاهی و نقطه‌ای رطوبت خاک با دقت

---

<sup>۱</sup> Remote Sensing

زیاد وجود دارد، باز هم به دلیل تغییرات مکانی زیاد رطوبت خاک و تراکم کم ایستگاه‌های اندازه‌گیری نقطه‌ای، این داده‌ها برای بررسی رطوبت خاک در مقیاس منطقه‌ای مناسب نیستند. روش کاربردی برای تخمین رطوبت خاک در مقیاس مکانی گسترده، بر روش‌های سنجش از دور متکی است که با استفاده از سنجنده‌های میکروویو فعال یا غیرفعال<sup>۱</sup>، پوشش مکانی در مقیاس جهانی و بازه زمانی مناسب را ارائه می‌کنند [۱].

هدف اصلی تحقیق حاضر، پایش رطوبت خاک و تحلیل خشکسالی در ایران است، جایی که محصولات رطوبت خاک سنجش از دور و باز تحلیل شده<sup>۲</sup> تنها منبع موجود، برای فهم تغییرات زمانی و مکانی رطوبت خاک هستند.

### ۳-۱ خلاصه‌ای از کارهای انجام شده در فصول بعدی

در این مطالعه، محصولات رطوبت خاک سطحی ماهواره‌ای از مشاهدات مایکروویو سنجنده غیر فعال SMOS و از سنجنده‌های فعال + غیر فعال ESA CCI SM، و دو محصول رطوبت خاک باز تحلیل شده ERA-Interim و ERA-Interim/Land (ERA-I/Land) در شش منطقه از ایران با شرایط اقلیمی متفاوت، به دست آمده‌اند. تاریخچه مطالعات انجام شده در فصل دوم بیان شده است و در فصل سوم محدوده مناطق مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان داده شده و خصوصیات اقلیمی هر منطقه مثل مجموع بارش سالانه و دمای میانگین و همچنین مجموعه داده‌های رطوبت خاک و متغیرهای هواشناسی بارش و دما مورد استفاده معرفی شده‌اند.

فصل چهارم با عنوان روش تحقیق می‌باشد که در این فصل روش‌های مورد استفاده در دو بخش اصلی بیان شده‌اند. بخش اول روش‌ها و محاسبات انجام شده به منظور پایش رطوبت خاک در مناطق مورد مطالعه می‌باشد که شامل محاسبات نرمال سازی، بررسی روند، شاخص‌های آماری و

---

<sup>۱</sup> Passive or Active Microwave Sensors

<sup>۲</sup> Reanalysis

تحلیل خشکسالی است. بخش دوم روش‌ها و محاسبات مربوط به شبیه‌سازی رطوبت خاک با استفاده از مدل بیلان آب-خاک است که در این بخش، الگوریتم مدل و شاخص‌های سنجش عملکرد مدل بیان شده‌اند.

در فصل پنجم نتایج حاصل از دو بخش اصلی پایان‌نامه در جداول و اشکال مرتبط ارائه شده‌اند. نتیجه‌گیری و بحث پیرامون نتایج به دست آمده در این پژوهش و همچنین پیشنهادات برای مطالعات آینده در فصل ششم آمده است.





## **فصل دوم: تاریخچه مطالعات انجام شده در داخل و خارج کشور**

سنجنده‌ها از دیدگاه منبع انرژی به دو دسته تقسیم می‌شوند: سنجنده‌های فعال<sup>۱</sup> و غیر فعال<sup>۲</sup>. سنجنده‌های غیر فعال آن دسته از سنجنده‌ها هستند که از خورشید به عنوان منبع انرژی استفاده می‌کنند. این سنجنده‌ها وابستگی زیادی به پارامترهای مرتبط با خورشید نظیر زاویه ارتفاعی آن، شرایط اتمسفری و طول موج‌های ارسالی توسط آن دارند. در مقابل این سیستم‌ها که حضور ابر یکی از جدی‌ترین مشکلات استفاده از تصاویر آنهاست، سیستم‌های فعال قرار می‌گیرند این سیستم‌ها منبع انرژی را به همراه دارند و به همین خاطر از وابستگی به خورشید رها شده و از اتمسفر تاثیر بسیار کمی می‌پذیرند [۱۲].

سنجنده‌های میکروویو غیر فعال قبل از سنجنده‌های میکروویو فعال توسعه یافتند، که با کاوش رادار سنج میکروویو چند کاناله (SMMR<sup>۳</sup>) در دامنه C بین سال‌های ۱۹۷۸ تا ۱۹۸۷ و سنجنده مخصوص تصویر بردار میکروویو (SSM/I<sup>۴</sup>) در دامنه K<sub>u</sub> از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۲ شروع بکار کردند. سنجنده‌های غیر فعال بعدی شامل تصویر بردار میکروویو در دامنه X از سال ۱۹۹۸ با ماموریت اندازه‌گیری بارش مناطق استوایی (TRMM<sup>۵</sup>)، رادارسنج کاوشی میکروویو پیشرفته برای سیستم نظارت زمین (AMSR-E<sup>۶</sup>) در دامنه C بین سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۱۱ و سنجنده کوریولیس وایندست<sup>۷</sup> که در سال ۲۰۰۳ در دامنه C شروع شد، هستند [۱].

اخیراً، آژانس فضایی اروپا (ESA<sup>۸</sup>) ماموریت رطوبت خاک و درجه شوری اقیانوس (SMOS<sup>۹</sup>) را که مجهز به رادار سنج از نوع غیر فعال در دامنه L است در سال ۲۰۰۹ شروع کرد. SMOS اولین

<sup>۱</sup> Active

<sup>۲</sup> Passive

<sup>۳</sup> Scanning Multichannel Microwave Radiometer

<sup>۴</sup> Special Sensor Microwave Imager

<sup>۵</sup> Tropical Rainfall Measuring Mission

<sup>۶</sup> Advanced Microwave Scanning Radiometer on Earth Observing System

<sup>۷</sup> Coriolis Windsat

<sup>۸</sup> European Space Agency

<sup>۹</sup> Soil Moisture and Ocean Salinity

ماهواره‌ای است که به طور خاص برای اندازه‌گیری رطوبت خاک سطحی و درجه شوری سطح دریا در مقیاس جهانی و به صورت مستقیم، طراحی و اختصاص داده شده است. به تازگی نسخه جدیدی از داده جهانی رطوبت خاک سطح ۳ برای SMOS ارائه شده است که به اختصار SMOSL3 نامیده می‌شود [۱] و به عنوان یکی از منابع داده رطوبت خاک در این مطالعه استفاده شده است.

در میان سنجنده‌های میکروویو فعال، مشاهدات پراکنش سنج<sup>۱</sup> در دامنه C شامل دستگاه میکروویو فعال (AMI<sup>۲</sup>) بر روی ماهواره‌های سنجش از دور اروپایی (ERS<sup>۳</sup>) ۱ و ۲، و پراکنش سنج پیشرفته (ASCAT<sup>۴</sup>) بر روی ماهواره عملیاتی هواشناسی (MetOp<sup>۵</sup>) هستند [۲].

درباره مطالعات انجام شده مربوط به محصولات رطوبت خاک میکروویو و بازتحلیل شده در داخل کشور اطلاعاتی در دسترس نیست ولی در سطح بین‌المللی، تحقیقات زیادی در مورد استفاده از داده‌های رطوبت خاک به دست آمده از الگوریتم‌های ماهواره‌ای مختلف انجام گرفته است. مطالعات زیادی به مزایا و معایب محصولات رطوبت خاک میکروویو فعال و غیر فعال بر روی انواع پوشش گیاهی متفاوت اشاره کرده‌اند. به طور کلی، سنجنده‌های غیر فعال در نواحی خشک و سنجنده‌های فعال در نواحی با پوشش گیاهی متراکم عملکرد بهتری داشته‌اند، در حالی که هر دو سنجنده فعال و غیر فعال در نواحی نیمه خشک عملکرد یکسانی داشته‌اند [۱، ۵ و ۱۰].

لی یو<sup>۶</sup> و همکاران تلاش کردند تا با استفاده از ترکیب کردن محصولات میکروویو فعال و غیر فعال متفاوت، آن‌ها را به صورت یک منبع داده با دوره آماری چند دهه تبدیل کنند [۱۳ و ۱۴]. محصول رطوبت خاکی که در ابتدا تحت پروژه استراتژی نظارت چند هدفه چرخه آب (WACMOS<sup>۷</sup>)

---

<sup>۱</sup> Scatterometer

<sup>۲</sup> Active Microwave Instrument

<sup>۳</sup> European Remote Sensing Satellites

<sup>۴</sup> Advanced SCATterometer

<sup>۵</sup> Meteorological Operational Satellite

<sup>۶</sup> Liu

<sup>۷</sup> Water Cycle Multi-Mission Observation Strategy

آژانس فضایی اروپا (ESA) ایجاد شد و اکنون توسط پروژه پیشگیری تغییر اقلیم (CCI<sup>۱</sup>) آژانس فضایی اروپا توسعه و بهبود یافته است و به اختصار محصول ESA CCI SM<sup>۲</sup> نامیده می‌شود [۲].

دوریگو<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۲ بررسی روند<sup>۴</sup> را در دوره ۱۹۸۸-۲۰۱۰ برای محصول ESA CCI SM انجام دادند و روندهای حاصل از این محصول را با روندهای به دست آمده از محصولات رطوبت خاک شبیه سازی شده مدل سیستم جهانی جذب داده زمین (GLDAS<sup>۵</sup>) و مدل‌های سطح زمین ERA-Interim و همچنین با روندهای به دست آمده از محصولات ماهواره‌ای شاخص پوشش گیاهی متفاوت نرمال شده (NDVI<sup>۶</sup>) و محصول بارش GPCP<sup>۷</sup> مقایسه کردند [۷]. در تحقیق دیگری دوریگو و همکاران محصولات رطوبت خاک ماهواره‌ای ESA CCI SM را با داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی در ۵۹۶ ایستگاه در سرتاسر جهان و برای دوره زمانی ۱۹۷۹-۲۰۱۰ واسنجی کردند و میانگین ضریب همبستگی اسپیرمن بین داده‌های ESA CCI SM و داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی را برابر با ۰/۴۶ به دست آوردند و همچنین دریافتند که کیفیت محصولات ESA CCI SM روندی صعودی را در طی زمان نشان می‌دهد، اما برای دوره ۲۰۰۷-۲۰۱۰ یک کاهش ثابت در همه معیارهای عملکرد مشاهده شده است [۲].

ال یاری<sup>۸</sup> و همکاران محصولات رطوبت خاک SMOSL3 و ASCAT را با مرجع در نظر گرفتن داده‌های رطوبت خاک شبیه‌سازی شده MERRA-Land در مقیاس جهانی مقایسه کردند و مشاهده شد که هر دو الگوریتم در مناطقی با اقلیم‌های بین خشک و مرطوب، عملکرد یکسان و خوبی را با همبستگی بیشتر از ۰/۷ با داده‌های MERRA-Land دارند [۵]. در پژوهشی دیگر، ال یاری و

---

<sup>۱</sup> Climate Change Initiative

<sup>۲</sup> Soil Moisture

<sup>۳</sup> Dorigo

<sup>۴</sup> Trend

<sup>۵</sup> Global Land Data Assimilation System

<sup>۶</sup> Normalized Difference Vegetation Index

<sup>۷</sup> Global Precipitation Climatology Project

<sup>۸</sup> Al-Yaari

همکاران محصولات رطوبت خاک ماهواره‌ای دو الگوریتم SMOSL3 و AMSR-E را با مرجع در نظر گرفتن داده‌های از نوع سیستم جذب داده زمین<sup>(۱)</sup> (LDAS) سازمان ECMWF<sup>(۲)</sup> با نام SM-DAS-2 مقایسه کردند و دریافتند که داده‌های هر دوی SMOSL3 و AMSR-E از نظر تغییرات زمانی و مکانی با داده‌های ECMWF در اکثر مناطق با اقلیم‌های متفاوت، مطابقت خوبی دارند و همچنین نشان دادند که محصولات هر دوی SMOSL3 و AMSR-E در مناطق مختلف به شدت تحت تاثیر شاخص سطح برگ (LAI<sup>(۳)</sup>) قرار دارند، به طوری که در نواحی با پوشش گیاهی پراکنده و برای مقادیر LAI کوچکتر مساوی یک، همبستگی خوبی را با داده‌های مرجع دارند. و در مناطقی که LAI بین ۱ تا ۶ قرار دارد، داده‌های SMOSL3 در مقایسه با AMSR-E، همبستگی بهتری را با داده‌های مرجع نشان می‌دهند [۱].

بروکا<sup>(۴)</sup> و همکاران با استفاده از محصولات رطوبت خاک ماهواره‌ای ASCAT، AMSR-E و SMOS و الگوریتم SM2RAIN، داده‌های بارش را برای مناطق مختلف جهان تخمین زدند و برای واسنجی و صحت‌سنجی تخمین‌ها از داده‌های بارش ماهواره‌ای GPCC<sup>(۵)</sup> استفاده کرده‌اند که مقادیر جهانی میانگین ضریب همبستگی پیرسون را برای ASCAT، AMSR-E و SMOS به ترتیب برابر با ۰/۵۴، ۰/۲۸ و ۰/۳۱ به دست آوردند [۹].

---

<sup>(۱)</sup> Land Data Assimilation System

<sup>(۲)</sup> European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

<sup>(۳)</sup> Leaf Area Index

<sup>(۴)</sup> Brocca

<sup>(۵)</sup> Global Precipitation Climatology Centre

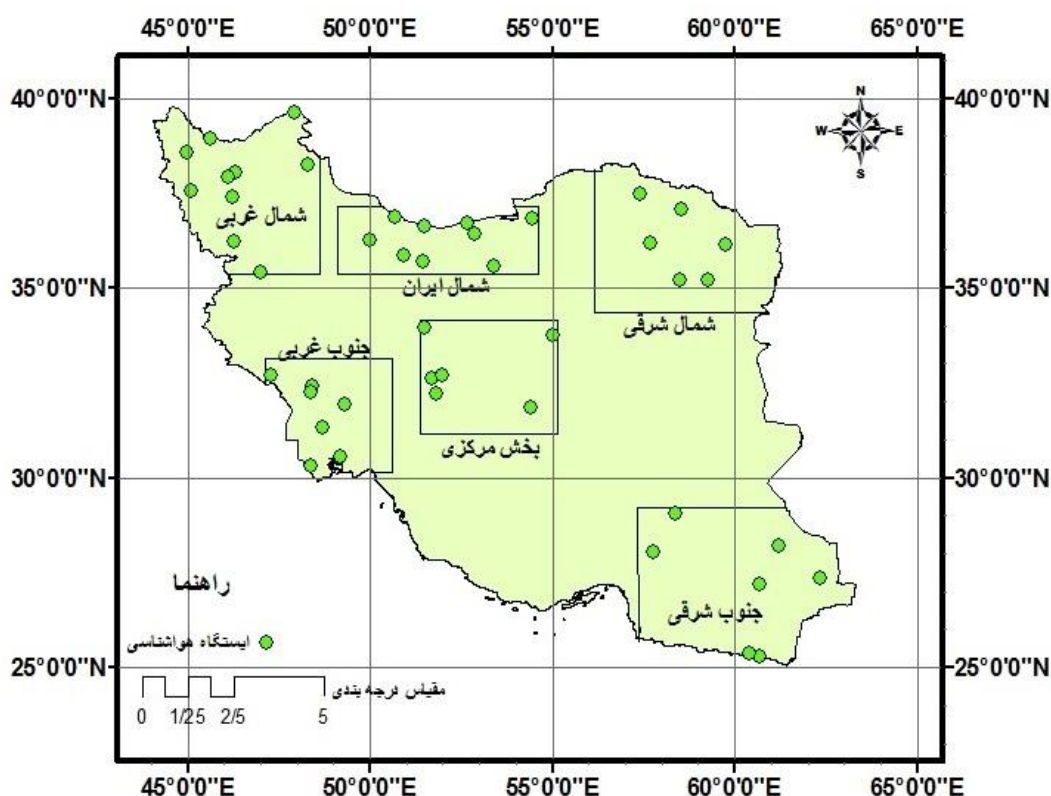


## **فصل سوم: منطقه تحقیق و داده‌ها**



### ۱-۳ مناطق مورد مطالعه

به منظور مقایسه نمودن سری‌های زمانی رطوبت خاک به دست آمده از الگوریتم‌های مختلف، شش منطقه از ایران با شرایط اقلیمی متفاوت در نظر گرفته شده‌اند. شکل ۱-۳ محدوده مناطق مورد مطالعه و همچنین موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در داخل هر منطقه را نشان می‌دهد. به طور کلی، ایران به عنوان کشوری با اقلیم خشک یا نیمه خشک با بارش میانگین سالانه ۲۵۰ میلیمتر شناخته شده است، اما اقلیم در مناطق مختلف آن از مرطوب نیمه استوایی تا خشک، با محدوده بارش سالانه و دماهای حداقل و حداکثر به ترتیب از ۰ تا ۲۰۰۰ میلیمتر و ۲۰- تا ۵۰+ درجه سانتیگراد تغییر می‌کند. بیشترین مقادیر این محدوده بارش، در مناطق شمال و شمال غربی کشور مشاهده شده است [۱۵].



شکل ۱-۳: محدوده مناطق مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در داخل هر منطقه

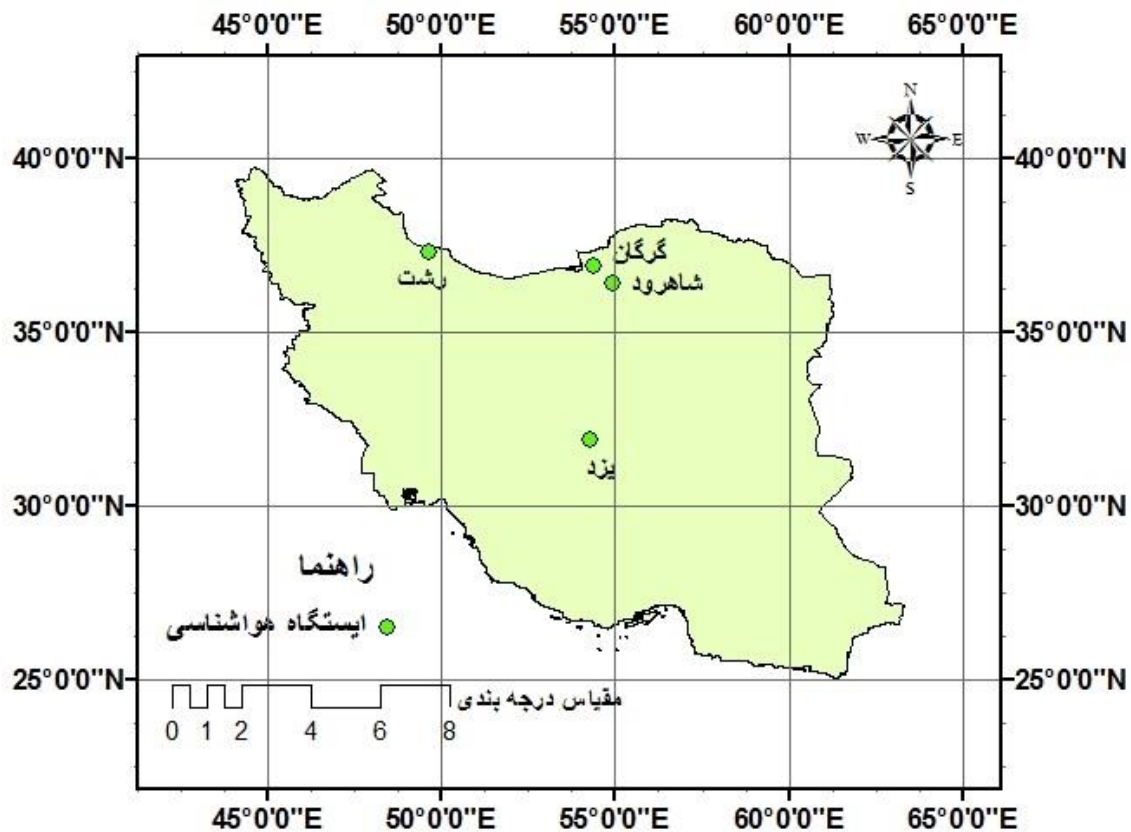
مناطق انتخاب شده دارای وضعیت اقلیمی متفاوت هستند. ناحیه شمال ایران یک منطقه نیمه استوایی است، در حالی که، منطقه جنوب شرقی یک منطقه خشک تا بسیار خشک می باشد. منطقه شمال غربی، ناحیه ای با اقلیم کوهستانی است که دارای زمستان های سرد و تابستان های گرم می باشد. بخش جنوب غربی، دارای آب و هوای نیمه مرطوب و شرجی با تابستان های داغ است در حالی که مناطق مرکزی و شمال شرقی دارای اقلیم خشک و نیمه خشک هستند [۸]. بازه بارش سالانه و دمای میانگین سالانه در مناطق مورد مطالعه که از سازمان هواشناسی ایران به دست آمده اند در جدول ۱-۳ گزارش شده اند.

جدول ۱-۳: حدود بارش و دمای میانگین سالانه در مناطق مورد مطالعه

| منطقه مورد مطالعه | حدود بارش سالانه (میلیمتر) | حدود دمای میانگین سالانه (درجه) |
|-------------------|----------------------------|---------------------------------|
| جنوب غربی         | ۱۵۰-۴۵۰                    | ۱۵/۸-۳۳                         |
| جنوب شرقی         | ۵۰-۱۹۰                     | ۱۲/۵-۳۴/۳                       |
| بخش مرکزی         | ۵۰-۱۴۰                     | ۶/۲-۲۷/۱                        |
| شمال ایران        | ۱۴۵-۱۳۰۰                   | ۶/۹-۲۳/۸                        |
| شمال غربی         | ۲۰۰-۴۷۰                    | ۳-۲۱/۶                          |
| شمال شرقی         | ۱۹۰-۳۲۰                    | ۶/۱-۲۴/۳                        |

## ۲-۳ ایستگاه های مورد مطالعه برای شبیه سازی رطوبت خاک

موقعیت ایستگاه های مورد مطالعه برای شبیه سازی رطوبت خاک با استفاده از مدل بیلان آب- خاک در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. ایستگاه های مورد مطالعه شامل گرگان، رشت، شاهرود و یزد هستند که دارای وضعیت اقلیمی متفاوت می باشند. ایستگاه های گرگان و رشت دارای آب و هوای مرطوب و معتدل هستند در حالی که ایستگاه های شاهرود و یزد به ترتیب دارای آب و هوای نیمه خشک و خشک می باشند.



شکل ۳-۲: موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه برای شبیه سازی رطوبت خاک

### ۳-۳ مجموعه داده‌های رطوبت خاک مورد استفاده

از میان محصولات رطوبت خاک مختلف موجود در جهان، محصولاتی انتخاب شده‌اند که اولاً از لحاظ مکانی کشور ایران را پوشش داده باشند و ثانیاً دسترسی به آن‌ها برای عموم محققان امکان پذیر باشد. جدول ۳-۲ مشخصات اصلی چهار محصول رطوبت خاک مورد استفاده در این مطالعه یعنی SMOSL3، ESA CCI SM، ERA-Interim و ERA-I/Land را به طور خلاصه بیان می‌کند.

جدول ۳-۲: مشخصات اصلی محصولات SMOSL3، ESA CCI SM، ERA-Interim، ERA-I/Land

| مرجع     | بازه زمانی در این مطالعه (ماه) | عمق نمونه برداری (سانتیمتر) | نوع داده و فرکانس                              | مجموعه داده رطوبت خاک |
|----------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------|-----------------------|
| [۵ و ۱۶] | ۲۰۱۰/۰۱ - ۲۰۱۳/۱۲              | ۰-۳                         | سنجش از دور (دامنه L، مایکروویو غیر فعال)      | SMOS level 3 (SMOSL3) |
| [۷]      | ۱۹۸۴/۰۱ - ۲۰۱۳/۱۲              | ۰-۲                         | سنجش از دور (مجموعه مایکروویو فعال و غیر فعال) | ESA CCI SM            |
| [۱۷]     | ۱۹۸۰/۰۱ - ۲۰۱۳/۱۲              | ۰-۷                         | باز تحلیل شده                                  | ERA-Interim           |
| [۱۸]     | ۱۹۸۰/۰۱ - ۲۰۱۰/۱۲              | ۰-۷                         | باز تحلیل شده سطح زمین                         | ERA-I/Land            |

### ۳-۳-۱ SMOSL3

ماهواره SMOS در ماه نوامبر سال ۲۰۰۹ به منظور پایش رطوبت خاک در مقیاس جهانی در عمق تقریبی ۰-۳ سانتیمتر، با هدف دقت ۰/۰۴ و دوره تناوب پایش سه روزه بر روی مدار خط استوا راه اندازی گردید. SMOS در دامنه L، با اندازه گیری<sup>۱</sup> در زمان روز<sup>۲</sup> با زمان خورشیدی محلی<sup>۳</sup> ۰۶:۰۰ و در زمان شب<sup>۴</sup> با زمان خورشیدی محلی ۱۸:۰۰ فعالیت می کند [۵، ۱۶].

اخیراً، مرکز<sup>۵</sup> CATDS، محصولات رطوبت خاک را در مقیاس جهانی و با دوره های زمانی مختلف روزانه، سه روزه، ده روزه و میانگین ماهانه فراهم کرده است که محصولات سطح سه

<sup>۱</sup> Overpass

<sup>۲</sup> Ascending

<sup>۳</sup> Local Solar Time (LST)

<sup>۴</sup> Descending

<sup>۵</sup> Centre Aval de Traitement des Donnees

(SMOSL3) نامیده می‌شوند [۱۹]. این محصولات با فرمت NetCDF روی شبکه<sup>۱</sup> EASE با وضوح مکانی ۲۵ کیلومتر ارائه شده‌اند [۱].

در این مطالعه، محصول رطوبت خاک میانگین ماهانه SMOSL3 با اندازه‌گیری در زمان روز استفاده شده است. برای دوره ۲۰۱۳-۲۰۱۰، داده‌های میانگین ماهانه رطوبت خاک برای تمام پیکسل‌های هر منطقه استخراج شده و سری‌های زمانی ماهانه رطوبت خاک به دست آمده است.

### ۲-۳-۳ ESA CCI SM

محصول رطوبت خاک ESA CCI SM بر اساس چهارچوب پروژه‌های WACMOS و CCI آژانس فضایی اروپا توسعه یافته است. نسخه ۲ محصول ESA CCI SM با یک روش هم‌افزایی بازایی‌های رطوبت خاک از سنجنده‌های مایکروویو شش سنجنده غیر فعال (SSM/I، SMMR، TMI، AMSR2، AMSR-E و Windsat) و دو سنجنده فعال (ERS AMI و ASCAT) به داخل گستره مجموعه داده جهانی در دوره ۲۰۱۳-۱۹۷۹ حاصل می‌شود [۲، ۱۳، ۱۴ و ۲۰].

این محصول در فرمت NetCDF با وضوح مکانی  $0.25^\circ$  و دوره تناوب روزانه ارائه شده است [۲۱]. در این مطالعه، داده‌های رطوبت خاک روزانه جهانی ESA CCI SM در دوره ۲۰۱۳/۱۲/۳۱-۱۹۸۴/۰۱/۰۱ دریافت و برای تمام پیکسل‌های هر منطقه مقادیر میانگین ماهانه رطوبت خاک محاسبه شده است.

### ۲-۳-۳ ERA-I/Land و ERA-Interim

ERA-Interim یک محصول باز تحلیل شده اتمسفریک جهانی است که توسط مرکز اروپایی برای پیش‌بینی‌های هواشناسی در محدوده متوسط (ECMWF) ایجاد شده است. محصول رطوبت خاک ERA-Interim به وسیله توانایی یک مدل سطح زمین و همچنین با توانایی هواشناسی از

---

<sup>۱</sup> Equal Area Scalable Earth Grid

ERA-Interim بازتحلیل شده اتمسفریک ایجاد شده است. داده‌ها از سال ۱۹۷۹ تا زمان فعلی در دسترس هستند که به طور پیوسته در زمان به روز می‌شوند [۱۷]. سیستم جذب داده برای ایجاد ERA-Interim بر اساس مدل ارائه شده سال ۲۰۰۶ مربوط به سیستم پیش بینی یکپارچه<sup>۱</sup> مرکز ECMWF استفاده شده است (Cy31r2).

ERA-I/Land، یک مجموعه داده جهانی باز تحلیل شده سطح زمین از سال ۱۹۷۹-۲۰۱۰ است که نتیجه ۳۲ سال شبیه سازی با آخرین مدل سطح زمین ECMWF به دست آمده از توانایی هواشناسی ERA-Interim و تنظیمات بارش بر اساس نسخه ۲/۱ مدل GPCP می‌باشد [۱۸].

ERA-Interim و ERA-I/Land یک وضوح مکانی تقریباً ۸۰ کیلومتر دارند و از لحاظ زمان محلی به چهار صورت با ساعات ۰۰:۰۰، ۰۶:۰۰، ۱۲:۰۰ و ۱۸:۰۰ در دسترس هستند. این محصولات برای چهار لایه از خاک با اعماق ۰-۷، ۷-۲۸، ۲۸-۱۰۰ و ۱۰۰-۲۸۹ سانتیمتر مقدار رطوبت خاک را ارائه می‌دهند [۳]. در این مطالعه، محصولات روزانه با ساعت محلی ۱۲:۰۰ و فرمت NetCDF از ERA-Interim در دوره ۱۹۸۰-۲۰۱۳ و از ERA-I/Land در دوره ۱۹۸۰-۲۰۱۰ برای لایه اول خاک (۰-۷ سانتیمتر) استفاده شده‌اند. سرانجام در هر منطقه مورد مطالعه، مقادیر میانگین ماهانه رطوبت خاک محاسبه شده‌اند.

### ۳-۴ داده‌های دما و بارش مشاهداتی

داده‌های دما و بارش مشاهداتی از سازمان هواشناسی ایران به دست آمده‌اند [۲۲]. در این مطالعه، مجموع بارش ماهانه، دمای حداکثر ماهانه، دمای حداقل ماهانه و دمای میانگین ماهانه به عنوان متغیرهای اقلیمی استفاده شده‌اند. در هر منطقه مورد مطالعه، ایستگاه‌های هواشناسی انتخاب شده‌اند که از سال ۱۹۸۰ تا سال ۲۰۱۴ دارای آمار باشند و در صورت نبود ایستگاهی با این دوره آماری، ایستگاه‌هایی که حداقل از سال ۱۹۹۰ تا سال ۲۰۱۴ آمار داشته باشند انتخاب شده‌اند.

---

<sup>۱</sup> Integrated Forecast System (IFS)

موقعیت ایستگاه‌های مورد استفاده در هر منطقه مورد مطالعه، در شکل ۳-۱ نشان داده شده‌اند. در

جدول ۳-۳ مشخصات آماری ایستگاه‌های هواشناسی آورده شده است.

جدول ۳-۳: مشخصات آماری ایستگاه‌های هواشناسی استفاده شده در مناطق مورد مطالعه

| ایستگاه‌های هواشناسی در منطقه شمال غربی | مجموع بارش سالانه (میلیمتر) | میانگین دمای حداقل سالانه (درجه سانتیگراد) | میانگین دمای حداکثر سالانه (درجه سانتیگراد) |
|-----------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------|
| اردبیل                                  | ۲۸۷                         | ۳                                          | ۱۵/۵                                        |
| پارس آباد مغان                          | ۲۷۳                         | ۹/۸                                        | ۲۰/۵                                        |
| تبریز                                   | ۲۵۴                         | ۷                                          | ۱۸/۲                                        |
| سهند                                    | ۲۲۳                         | ۷/۸                                        | ۱۶/۸                                        |
| جلفا                                    | ۲۱۰                         | ۹/۱                                        | ۲۰/۸                                        |
| مراغه                                   | ۲۹۶                         | ۷/۸                                        | ۱۸/۶                                        |
| ارومیه                                  | ۳۱۳                         | ۵/۴                                        | ۱۷/۷                                        |
| خوی                                     | ۲۷۵                         | ۵/۵                                        | ۱۸/۶                                        |
| سنندج                                   | ۴۲۶                         | ۵/۶                                        | ۲۱/۶                                        |
| سقز                                     | ۴۶۲                         | ۳/۳                                        | ۱۹/۱                                        |
| ایستگاه‌های هواشناسی در منطقه شمال      | مجموع بارش سالانه (میلیمتر) | میانگین دمای حداقل سالانه (درجه سانتیگراد) | میانگین دمای حداکثر سالانه (درجه سانتیگراد) |
| گرگان                                   | ۵۴۱                         | ۱۲/۷                                       | ۲۲/۹                                        |
| بابلسر                                  | ۹۵۲                         | ۱۳/۳                                       | ۲۰/۸                                        |
| قائم‌شهر                                | ۷۳۶                         | ۱۲/۵                                       | ۲۱/۵                                        |
| نوشهر                                   | ۱۲۸۱                        | ۱۲/۸                                       | ۱۹/۶                                        |
| رامسر                                   | ۱۱۷۶                        | ۱۲/۷                                       | ۱۹/۴                                        |
| تهران                                   | ۲۴۳                         | ۱۲                                         | ۲۲/۸                                        |
| کرج                                     | ۲۵۷                         | ۸/۹                                        | ۲۱/۴                                        |
| سمنان                                   | ۱۴۵                         | ۱۲/۵                                       | ۲۳/۸                                        |
| قزوین                                   | ۳۲۹                         | ۶/۹                                        | ۲۱/۳                                        |
| ایستگاه‌های هواشناسی در منطقه شمال شرقی | مجموع بارش سالانه (میلیمتر) | میانگین دمای حداقل سالانه (درجه سانتیگراد) | میانگین دمای حداکثر سالانه (درجه سانتیگراد) |
| مشهد                                    | ۲۵۴                         | ۷/۳                                        | ۲۱/۲                                        |
| تربت حیدریه                             | ۲۶۱                         | ۷/۴                                        | ۲۱/۲                                        |

|                                                |                                               |                                |                                            |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------|
| ۱۹/۴                                           | ۶/۱                                           | ۳۱۱                            | قوچان                                      |
| ۲۳/۷                                           | ۱۲                                            | ۱۹۰                            | کاشمر                                      |
| ۲۴/۳                                           | ۱۰/۷                                          | ۱۹۳                            | سبزوار                                     |
| ۱۹/۸                                           | ۶/۹                                           | ۲۵۷                            | بجنورد                                     |
| میانگین دمای حداکثر<br>سالانه (درجه سانتیگراد) | میانگین دمای حداقل<br>سالانه (درجه سانتیگراد) | مجموع بارش سالانه<br>(میلیمتر) | ایستگاه‌های هواشناسی در<br>منطقه مرکزی     |
| ۲۳/۵                                           | ۹/۱                                           | ۱۲۸                            | اصفهان                                     |
| ۲۴                                             | ۶/۸                                           | ۱۱۲                            | کیوتراآباد                                 |
| ۲۶/۱                                           | ۱۲/۱                                          | ۱۳۴                            | کاشان                                      |
| ۲۷/۱                                           | ۱۳/۸                                          | ۸۲                             | خور و بیابانک                              |
| ۲۴                                             | ۶/۲                                           | ۱۰۴                            | شرق اصفهان                                 |
| ۲۶/۶                                           | ۱۱/۹                                          | ۵۶                             | یزد                                        |
| میانگین دمای حداکثر<br>سالانه (درجه سانتیگراد) | میانگین دمای حداقل<br>سالانه (درجه سانتیگراد) | مجموع بارش سالانه<br>(میلیمتر) | ایستگاه‌های هواشناسی در<br>منطقه جنوب غربی |
| ۳۳                                             | ۱۸/۱                                          | ۱۵۶                            | آبادان                                     |
| ۳۳                                             | ۱۷/۹                                          | ۲۲۷                            | اهواز                                      |
| ۳۲/۵                                           | ۱۸/۵                                          | ۱۹۳                            | بندر ماهشهر                                |
| ۳۲/۳                                           | ۱۶/۱                                          | ۳۸۵                            | دزفول                                      |
| ۳۱/۶                                           | ۱۹/۲                                          | ۴۲۱                            | مسجد سلیمان                                |
| ۳۲                                             | ۱۵/۸                                          | ۳۱۸                            | صفی دزفول                                  |
| ۳۱/۹                                           | ۱۹/۸                                          | ۲۶۱                            | دهلران                                     |
| میانگین دمای حداکثر<br>سالانه (درجه سانتیگراد) | میانگین دمای حداقل<br>سالانه (درجه سانتیگراد) | مجموع بارش سالانه<br>(میلیمتر) | ایستگاه‌های هواشناسی در<br>منطقه جنوب شرقی |
| ۳۴/۳                                           | ۱۹/۳                                          | ۱۱۰                            | ایران‌شهر                                  |
| ۳۰                                             | ۲۲/۵                                          | ۱۲۲                            | چابهار                                     |
| ۲۷/۶                                           | ۱۲/۵                                          | ۱۵۳                            | خاش                                        |
| ۲۹/۷                                           | ۱۴/۶                                          | ۱۱۰                            | سراوان                                     |
| ۳۲/۷                                           | ۲۰/۵                                          | ۱۰۴                            | کنارک چابهار                               |
| ۲۹/۳                                           | ۱۶/۸                                          | ۵۵                             | بم                                         |
| ۳۳/۹                                           | ۱۹/۹                                          | ۱۸۴                            | کهنوج                                      |





## **فصل چهارم: روش تحقیق**

## ۱-۴ روش‌های مورد استفاده به منظور پایش رطوبت خاک در مناطق مورد

### مطالعه

#### ۱-۱-۴ محاسبه سری‌های زمانی نرمال شده

تمام مجموعه داده‌های رطوبت خاک مختلف با استفاده از مقادیر حداقل و حداکثر هر مجموعه داده در هر منطقه نرمال شده‌اند. مقدار نرمال شده رطوبت خاک  $SM'_i$  توسط رابطه (۱-۴) محاسبه شده است.

$$SM'_i = \frac{[SM_i - \min(SM_i)]}{[\max(SM_i) - \min(SM_i)]} \quad (1-4)$$

مرحله نرمال سازی به منظور مقایسه معتبرتر و دقیق‌تری بین سری‌های زمانی رطوبت خاک مختلف انجام شده است. در این مطالعه، توانایی محصولات رطوبت خاک در نشان دادن تغییرات زمانی به جای مقادیر مطلق رطوبت خاک بررسی شده است. به علاوه، دانستن تغییرات زمانی رطوبت خاک در کاربردهای هیدرولوژیکی و اقلیمی ضروری است [۱۰، ۱۳ و ۲۳].

#### ۲-۱-۴ تحلیل روند<sup>۱</sup>

چنانچه سری زمانی داده‌های هیدرولوژی به صورت یکنواخت سیر صعودی یا نزولی داشته باشند، داده‌ها دارای روند هستند. هر گونه تغییرات طبیعی و غیر طبیعی مانند قطع درختان جنگل، احداث شهرک‌ها و یا زمین لغزه‌های بزرگ باعث تغییر در روند داده‌ها می‌شوند [۲۴]. روندهای رطوبت خاک در مناطق مورد مطالعه بررسی شده است. آزمون غیر پارامتری من-کندال<sup>۲</sup> به منظور بررسی وجود روند در سری‌های زمانی رطوبت خاک استفاده شده است. برای اولین بار من این تست را توسعه داد و سپس کندال توزیع شاخص‌های آماری آزمون را به دست آورد. فرض صفر ( $H_0$ ) بیان

---

<sup>۱</sup> Trend

<sup>۲</sup> Mann-Kendall

می‌کند که در سری‌های زمانی مورد بررسی روند قابل توجهی وجود ندارد.

در آزمون من-کندال، هر مقدار  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$  از یک سری زمانی با  $n$  مقدار، با هر یک از مقادیر دیگر مقایسه می‌شود. برای یک تفاضل مثبت بین دو داده، بیان می‌شود که شاخص آماری  $S$  به اندازه  $+1$  افزایش داشته است، همچنین برای یک تفاضل منفی، شاخص آماری  $S$  به اندازه  $-1$  کاهش داشته است. شاخص آماری  $S$  برای یک تفاضل صفر، بدون تغییر باقی می‌ماند. (روابط (۲-۴) و (۳-۴)):

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (2-4)$$

$$\text{where } \text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (3-4)$$

بنابراین، مقادیر بزرگ مثبت و منفی  $S$  به ترتیب بیان کننده‌ی روند افزایشی شدید و روند کاهشی شدید هستند. آزمون غیر پارامتری من-کندال برای یک سری زمانی با تعداد زیادی از مقادیر، این امکان را فراهم می‌کند تا از آزمون منظم برای تعیین این که روند قابل توجه وجود دارد یا خیر استفاده شود.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=1}^q t_j(t_j-1)(2t_j+5)}{18}}}, & \text{if } S > 0 \\ 0, & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=1}^q t_j(t_j-1)(2t_j+5)}{18}}}, & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (4-4)$$

که  $n$  تعداد داده‌های نمونه است،  $q$  تعداد گروه‌های دارای تفاضل صفر در مجموعه داده است و

$t_j$  تعداد داده‌ها در  $j$  امین گروه تفاضل صفر می‌باشد. در طی این مطالعه، مقدار معیار از درجه  $\alpha =$

0.05 (سطح اطمینان ۹۵٪) به عنوان معیاری برای قابل توجه بودن روند از لحاظ آماری استفاده شده است. اگر مقدار  $Z$  محاسبه شده بزرگتر از  $+1/96$  و یا کوچکتر از  $-1/96$  باشد داده‌ها در سطح ۵ درصد دارای روند می‌باشند و فرض صفر رد می‌شود. در غیر این صورت داده‌ها تصادفی و بدون روند هستند.

به منظور بررسی وجود روند، دوره ۱۹۸۰-۲۰۱۴ را به دو دوره ۱۹۸۰-۱۹۹۹ و ۲۰۰۰-۲۰۱۴ تقسیم کرده‌ایم. آزمون من-کندال برای داده رطوبت خاک ERA-Interim در هر دو دوره و برای داده رطوبت خاک ESA CCI SM فقط برای دوره دوم (۲۰۰۰-۲۰۱۴) انجام شده است زیرا داده ESA CCI SM در دوره اول (۱۹۸۴-۱۹۹۹) دارای تعدادی گپ می‌باشد. همچنین این آزمون برای داده رطوبت خاک ERA-I/Land در دوره ۱۹۸۰-۱۹۹۹ به کار برده شده است.

ترکیبی از چند سنجنده مختلف بودن محصول رطوبت خاک ESA CCI SM ممکن است اثراتی را در تحلیل روند داشته باشد. اگرچه انتظار می‌رود که شدت این تاثیر در تولید محصول ESA CCI SM ناچیز باشد زیرا هدف از ایجاد این محصول بررسی و حفاظت اقلیم و روند است [۱۳]. علاوه بر این، دوریگو و همکاران (۲۰۱۲) و لواو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۳) محصول رطوبت خاک ESA CCI SM را به طور موفقیت آمیز برای تحلیل روند به کار گرفته‌اند [۶ و ۷].

#### ۳-۱-۴ شاخص‌های مقایسه‌ای

تعدادی شاخص‌های آماری توصیفی شامل میانگین ( $\overline{SM}$ )، انحراف از معیار ( $\sigma$ ) و ضریب چولگی ( $G_s$ ) برای هر کدام از مجموعه داده رطوبت خاک محاسبه شده‌اند. علاوه بر این، معادله همبستگی پیرسون<sup>۲</sup> ( $R$ ) برای محاسبه ضریب همبستگی بین مجموعه داده‌های رطوبت خاک مختلف با همدیگر و همچنین بین مجموعه داده‌های رطوبت خاک و متغیرهای اقلیمی استفاده شده است.

<sup>۱</sup> Loew

<sup>۲</sup> Pearson correlation equation

$$\overline{SM} = \frac{\sum_{i=1}^n SM_i}{n} \quad (5-4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n (SM_i - \overline{SM})^2)} \quad (6-4)$$

$$C_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{SM_i - \overline{SM}^3}{\sigma} \quad (7-4)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (SM_{a(i)} - \overline{SM}_a)(SM_{b(i)} - \overline{SM}_b)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (SM_{a(i)} - \overline{SM}_a)^2 \sum_{i=1}^n (SM_{b(i)} - \overline{SM}_b)^2}} \quad (8-4)$$

که در روابط فوق  $n$  تعداد نمونه‌ها است و در رابطه ۷-۴ عبارت‌های  $\overline{SM}_a$  و  $\overline{SM}_b$  به ترتیب میانگین رطوبت خاک الگوریتم‌های  $a$  و  $b$  می‌باشند.

#### ۴-۱-۴ تحلیل خشکسالی بر اساس محصولات رطوبت خاک

خشکسالی وضعیتی از کمبود بارندگی و افزایش دماست که در هر وضعیت اقلیمی ممکن است رخ دهد. خشکسالی غالباً به عنوان یک پدیده خزنده توصیف می‌شود و بر خلاف سیل و بارندگی که شما می‌دانید چه زمانی شروع شده، چه زمانی خاتمه پیدا کرده و در چه محدوده‌ای بوده است توصیف زمانی و مکانی خشکسالی بسیار مشکل است [۲۵]. خشکسالی‌ها به چهار نوع هواشناسی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و اجتماعی-اقتصادی تقسیم بندی می‌شوند. خشکسالی هواشناسی مربوط به دوره‌هایی است که در آن مقدار بارندگی کمتر از میانگین بارندگی در دراز مدت باشد. خشکسالی کشاورزی به معنای کاهش در رطوبت خاک است و خشکسالی هیدرولوژیکی مربوط به دوره‌هایی است که در آن مقدار آب در دسترس (جریان آب سطحی، آب زیر زمینی و تراز مخازن) کمتر از وضعیت نرمال باشد. خشکسالی اجتماعی-اقتصادی به صورت یک عدم تعادل در تقاضا و عرضه تعریف می‌شود [۸ و ۲۵].

به منظور پایش خشکسالی در مناطق مورد مطالعه از شاخص استاندارد شده رطوبت خاک

(SSI<sup>۱</sup>) استفاده شده است. در اول کار، مقادیر رطوبت خاک حجمی الگوریتم‌های مختلف به مقادیر SSI تبدیل شدند. همان روشی که برای محاسبه شاخص استاندارد شده بارش<sup>۲</sup> [۲۶] استفاده شده، برای محاسبه مقادیر SSI از داده‌های رطوبت خاک به کار برده شده است [۸]. در ابتدا تابع توزیع احتمال داده‌های رطوبت خاک با پیروی از توزیع گاما در نظر گرفته شدند. در تمام مناطق مورد مطالعه، توزیع احتمال گاما تطابق خوبی را با آزمون‌های نکوئی برازش مانند آزمون‌های اندرسون-دارلینگ<sup>۳</sup> و کولموگروف-اسمیرنوف<sup>۴</sup> نشان داد. سپس، توزیع احتمال تجمعی، استاندارد سازی شده و به توزیع احتمالاتی نرمال با میانگین صفر و انحراف معیار یک تبدیل شد. هر مقدار رطوبت خاک مشخص برای یک زمان مشخص با یک مقدار SSI خاص در توزیع نرمال منطبق است. مقادیر SSI مثبت به مقادیر رطوبت خاک بزرگتر از میانه داده‌ها و مقادیر SSI منفی به مقادیر رطوبت خاک کوچکتر از میانه داده‌ها اشاره دارند. علاقه مندان برای کسب اطلاعات بیشتر، می‌توانند به مککی<sup>۵</sup> (۱۹۹۳) و هایس<sup>۶</sup> و همکاران (۱۹۹۹) مراجعه کنند [۲۶ و ۲۷]. مقادیر SSI منفی به شرایط خشکسالی و مقادیر مثبت SSI به شرایط ترسالی اشاره دارند.

دو مشخصه مهم هر واقعه خشکسالی عبارتند از مدت<sup>۷</sup> و سختی<sup>۸</sup> خشکسالی. مدت خشکسالی دوره زمانی است که در آن زمان، شاخص خشکسالی (مانند SSI) کمتر از آستانه تعریف شده (مثلاً SSI=-1) باشد و سختی خشکسالی عبارت است از مقدار انحراف از آستانه تعریف شده در هر زیر دوره زمانی. در این مطالعه، SSI با دوره زمانی شش ماهه برای ارزیابی خشکسالی استفاده شده است [۸].

<sup>۱</sup> Standardized Soil Moisture Index

<sup>۲</sup> Standardized Precipitation Index

<sup>۳</sup> Anderson-Darling

<sup>۴</sup> Kolmogorov-Smirnov

<sup>۵</sup> McKee

<sup>۶</sup> Hayes

<sup>۷</sup> Duration

<sup>۸</sup> Severity

## ۲-۴ شبیه سازی رطوبت خاک با استفاده از مدل بیلان آب-خاک

در این بخش رطوبت خاک با استفاده از مدل یکپارچه بیلان آب-خاک و معادله نفوذ گرین-آمپت شبیه سازی شده و با محصول رطوبت خاک ERA-I/Land به عنوان داده مشاهداتی مقایسه شده است.

### ۱-۲-۴ روش انجام کار

بروکا و همکاران (۲۰۰۸) با در نظر گرفتن منطقه ریشه گیاه به عنوان یک چرخه هیدرولوژی، مدل بیلان آب-خاک را ارائه دادند [۲۸] که در ادامه معادلات مربوطه بیان می‌شود:

$$Z \frac{d\theta(t)}{dt} = f(t) - e(t) - g(t) \quad \theta(t) < \theta_s \quad (9-4)$$

$$\theta(t) = \theta_s \quad \theta(t) \geq \theta_s$$

که  $\theta(t)$  میانگین رطوبت خاک حجمی در لایه خاک مورد بررسی و  $Z$  عمق لایه خاک است.  $t$  زمان و  $\theta_s$  مقدار رطوبت خاک در حالت اشباع است. و  $f(t)$  نرخ بخشی از بارش نفوذ یافته به داخل خاک می‌باشد و  $e(t)$  و  $g(t)$  به ترتیب نرخ تبخیر و تعرق و نرخ نفوذ عمقی هستند.

در معادله بیلان آب-خاک به منظور محاسبه نرخ بارش نفوذ یافته به داخل خاک، از معادله گرین-آمپت زیر استفاده شده است:

$$f(t) = K_s \left[ 1 - \frac{\psi_b(\theta_s - \theta_i)}{F} \right] \quad f(t) < r(t) \quad (10-4)$$

$$f(t) = r(t) \quad f(t) \geq r(t)$$

که  $K_s$  هدایت هیدرولیکی در حالت اشباع،  $\psi_b$  مقدار رطوبت جلوی مقطع خاک،  $\theta_i$  مقدار رطوبت خاک در ابتدای واقعه بارندگی،  $F$  عمق نفوذ تجمعی از شروع بارندگی و  $r(t)$  نرخ بارندگی است.



برای بخش نفوذ عمقی رابطه زیر استفاده شده است [۲۹]:

$$g(t) = K_s \left[ \frac{\theta(t) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right]^{3+\frac{2}{\lambda}} \quad (11-4)$$

که  $\lambda$  شاخص توزیع اندازه منافذ و  $\theta_r$  مقدار رطوبت خاک باقیمانده است.

قسمت تبخیر و تعرق، با استفاده از رابطه خطی وابسته به تبخیر و تعرق پتانسیل،  $ET_p(t)$

محاسبه شده است:

$$e(t) = ET_p(t) \left[ \frac{\theta(t) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right] \quad (12-4)$$

تبخیر و تعرق پتانسیل توسط رابطه بلانی-کریدل<sup>۱</sup> اصلاح شده توسط دورنبوس و پرویت<sup>۲</sup>

(۱۹۷۷) برآورد شده است [۳۰]:

$$ET_p(t) = K_c \{-2 + 1.26[E(0.46T_a(t) + 8.13)]\} \quad (13-4)$$

که  $T_a(t)$  دمای هوا با واحد °C،  $E$  کل ساعات روشنایی دوره مورد بررسی (روزانه یا ماهانه) به

کل ساعات روشنایی سال و  $K_c$  فاکتور تصحیح به دلیل طبیعت تجربی معادله ۴-۱۲ می‌باشد.

در این مطالعه، گام شبیه سازی روزانه و دوره کالیبراسیون از روز ۲۰۰۰/۰۱/۰۱ تا

۲۰۰۶/۱۲/۳۱ (هفت سال) و دوره صحت سنجی از روز ۲۰۰۷/۰۱/۰۱ تا ۲۰۱۰/۱۲/۳۱ (چهار سال)

می‌باشد.

## ۲-۲-۴ معیارهای سنجش عملکرد مدل بیلان آب-خاک

با توجه به نتایج قابل قبول مشاهده شده از محصول رطوبت خاک ERA-I/Land، این محصول

<sup>۱</sup> Blaney and Criddle

<sup>۲</sup> Doorenbos and Pruitt

رطوبت خاک، به عنوان داده مشاهداتی در نظر گرفته شده است. منظور از معیارهای سنجش عملکرد مدل همان شاخص‌های خطا می‌باشند که در این مطالعه از سه شاخص خطا استفاده شده است. شاخص‌های نش-شاتکلیف<sup>۱</sup> (NS)، ضریب تعیین<sup>۲</sup> و جذر میانگین مربعات خطا<sup>۳</sup> (RMSE) به عنوان معیار سنجش عملکرد مدل استفاده شده‌اند که روابط مربوط به آن‌ها در زیر بیان شده‌اند:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (SM_{t(o)} - SM_{t(s)})^2}{\sum_{t=1}^T (SM_{t(o)} - \overline{SM}_{t(o)})^2} \quad (۱۴-۴)$$

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (SM_{a(i)} - \overline{SM}_a)(SM_{b(i)} - \overline{SM}_b)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (SM_{a(i)} - \overline{SM}_a)^2 \sum_{i=1}^n (SM_{b(i)} - \overline{SM}_b)^2}} \right]^2 \quad (۱۵-۴)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (SM_{t(o)} - SM_{t(s)})^2}{T}} \quad (۱۶-۴)$$

که  $T$  تعداد کل داده‌ها است و در رابطه ۴-۱۳ عبارتهای  $SM_{t(o)}$  و  $SM_{t(s)}$  به ترتیب رطوبت خاک‌های مشاهداتی و شبیه سازی شده در زمان  $t$  هستند. در رابطه ۴-۱۴ عبارتهای  $\overline{SM}_a$  و  $\overline{SM}_b$  به ترتیب میانگین رطوبت خاک الگوریتم‌های  $a$  و  $b$  می‌باشند.

---

<sup>۱</sup> Nash-Sutcliffe

<sup>۲</sup> Determination Coefficient

<sup>۳</sup> Root Mean Square Error



## فصل پنجم: نتایج

## ۵-۱ نتایج حاصل از پایش رطوبت خاک در مناطق مورد مطالعه

### ۵-۱-۱ تحلیل روند برای سری‌های زمانی رطوبت خاک

نتایج حاصل از بررسی روند آزمون من-کندال که برای داده‌های رطوبت خاک ERA-Interim، ERA-I/Land و ESA CCI SM به کار برده شده بود در جدول ۵-۱ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود برای مجموعه داده ERA-Interim در سطح اطمینان ۹۵٪، در بین مناطق مورد مطالعه فقط در منطقه جنوب شرقی برای دوره ۲۰۱۴-۲۰۰۰ روند وجود داشته است. همچنین، بر اساس رطوبت خاک ERA-I/Land برای دوره ۱۹۹۹-۱۹۸۰ هیچ روندی مشاهده نشده است. برای داده ERA-I/Land در دوره ۲۰۱۴-۲۰۰۰ بررسی روند انجام نشده است زیرا تولید این محصول در سال ۲۰۱۰ متوقف شده است. در مجموعه داده ESA CCI SM در دوره ۲۰۱۳-۲۰۰۰ و در مناطق مرکز و شمال غربی ایران روند منفی مشاهده شده است. همچنین، در مجموعه داده متغیرهای اقلیم شناسی شامل مجموع بارش ماهانه، دمای حداکثر، حداقل و میانگین ماهانه در هر دو دوره ۱۹۹۹-۱۹۸۰ و ۲۰۱۴-۲۰۰۰ هیچ گونه روندی مشاهده نشده است.

جدول ۵-۱: نتایج آزمون روند من-کندال برای سری‌های زمانی رطوبت خاک ERA-Interim، ERA-I/Land و ESA CCI SM در مناطق مورد مطالعه

| ۲۰۰۰-۲۰۱۴     |          |       | ۱۹۸۰-۱۹۹۹ |         |       |            |             |
|---------------|----------|-------|-----------|---------|-------|------------|-------------|
| روند          | مقدار p  | $H_0$ | روند      | مقدار p | $H_0$ |            |             |
| خیر           | 0.594    | غلط   | خیر       | 0.872   | غلط   | شمال شرق   | ERA-Interim |
| خیر           | 0.998    | غلط   | خیر       | 0.093   | غلط   | شمال غرب   |             |
| خیر           | 0.723    | غلط   | خیر       | 0.195   | غلط   | شمال ایران |             |
| خیر           | 0.255    | غلط   | خیر       | 0.790   | غلط   | مرکز       |             |
| بله ( $N^*$ ) | 3.53E-08 | درست  | خیر       | 0.885   | غلط   | جنوب شرق   |             |
| خیر           | 0.746    | غلط   | خیر       | 0.455   | غلط   | جنوب غرب   |             |
|               |          |       |           |         |       |            |             |

| ۲۰۰۰-۲۰۱۴     |          |       | ۱۹۸۰-۱۹۹۹ |         |       |            |              |
|---------------|----------|-------|-----------|---------|-------|------------|--------------|
| روند          | مقدار p  | $H_0$ | روند      | مقدار p | $H_0$ |            |              |
| -             | -        | -     | خیر       | 0.492   | غلط   | شمال شرق   | ERA-I/Land   |
| -             | -        | -     | خیر       | 0.343   | غلط   | شمال غرب   |              |
| -             | -        | -     | خیر       | 0.395   | غلط   | شمال ایران |              |
| -             | -        | -     | خیر       | 0.826   | غلط   | مرکز       |              |
| -             | -        | -     | خیر       | 0.532   | غلط   | جنوب شرق   |              |
| -             | -        | -     | خیر       | 0.904   | غلط   | جنوب غرب   |              |
| ۲۰۰۰-۲۰۱۴     |          |       | ۱۹۸۰-۱۹۹۹ |         |       |            |              |
| روند          | مقدار p  | $H_0$ | روند      | مقدار p | $H_0$ |            |              |
| خیر           | 0.064261 | غلط   | -         | -       | -     | شمال شرق   | ESA CCI SM** |
| بله ( $N^*$ ) | 0.000129 | درست  | -         | -       | -     | شمال غرب   |              |
| خیر           | 0.143071 | غلط   | -         | -       | -     | شمال ایران |              |
| بله ( $N^*$ ) | 0.028224 | درست  | -         | -       | -     | مرکز       |              |
| خیر           | 0.054556 | غلط   | -         | -       | -     | جنوب شرق   |              |
| خیر           | 0.862428 | غلط   | -         | -       | -     | جنوب غرب   |              |

( $N^*$ ) = روند منفی<sup>۱</sup> و ( $ESA CCI SM^{**}$ ) = در دوره ۲۰۰۰-۲۰۱۳

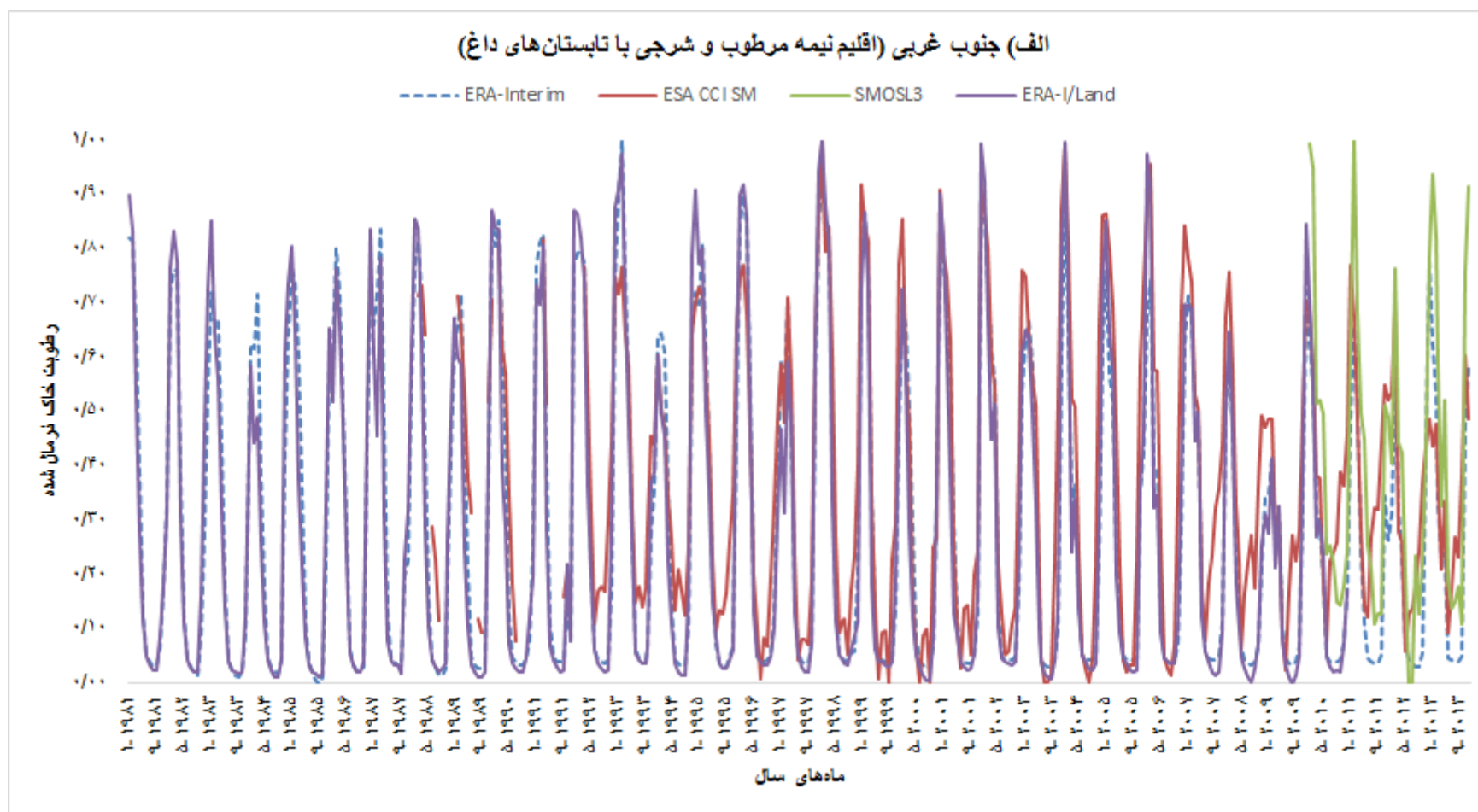
## ۲-۱-۵ مقایسه سری‌های زمانی نرمال شده داده‌های رطوبت خاک ماهانه

در شکل ۱-۵ سری‌های زمانی ماهانه نرمال شده از چهار محصول رطوبت خاک (ERA-Interim, ERA-I/Land, ESA CCI SM و SMOSL3) در شش منطقه ایران مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در شکل‌ها دیده می‌شود از محصول ESA CCI SM در برخی از ماه‌ها خصوصاً در ماه‌های سال‌های آغازین، داده رطوبت خاک برآورد نشده است که به دلیل ضعیف بودن سنجنده SMMR

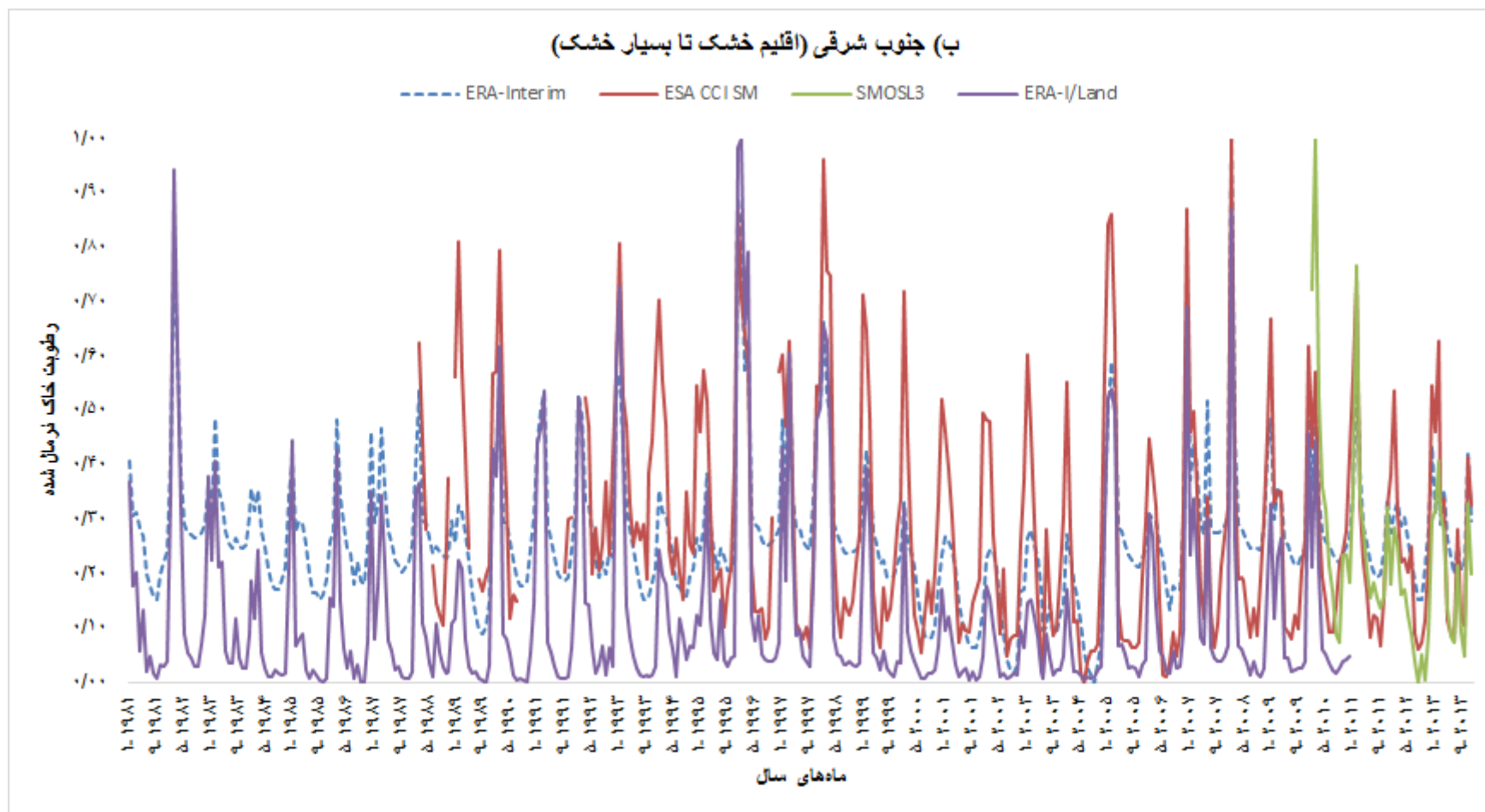
<sup>۱</sup> Negative Trend

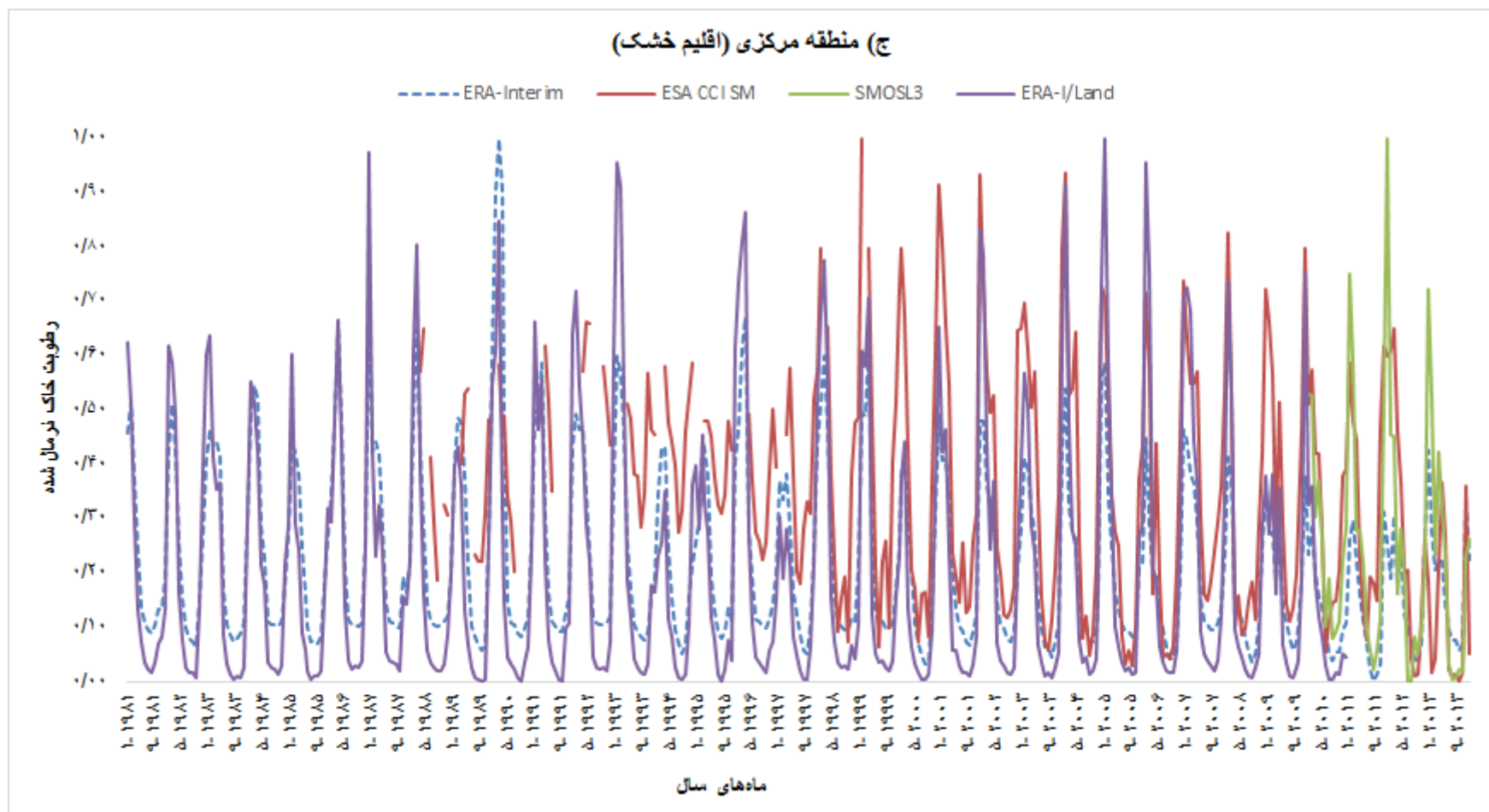
است که در سال‌های ابتدایی محصول ESA CCI SM برای برآورد رطوبت خاک استفاده شده است. با نگاه دقیق‌تر به شکل ۵-۱ مشاهده می‌شود که محصول رطوبت خاک ERA-Interim، در طی زمان با کاهش در محدوده تغییرات یعنی تفاضل مقادیر حداکثر و حداقل هر سال (به طور آشکارتر در سال‌های آخر شکل ۵-۱) الگوی ثابتی ندارد.

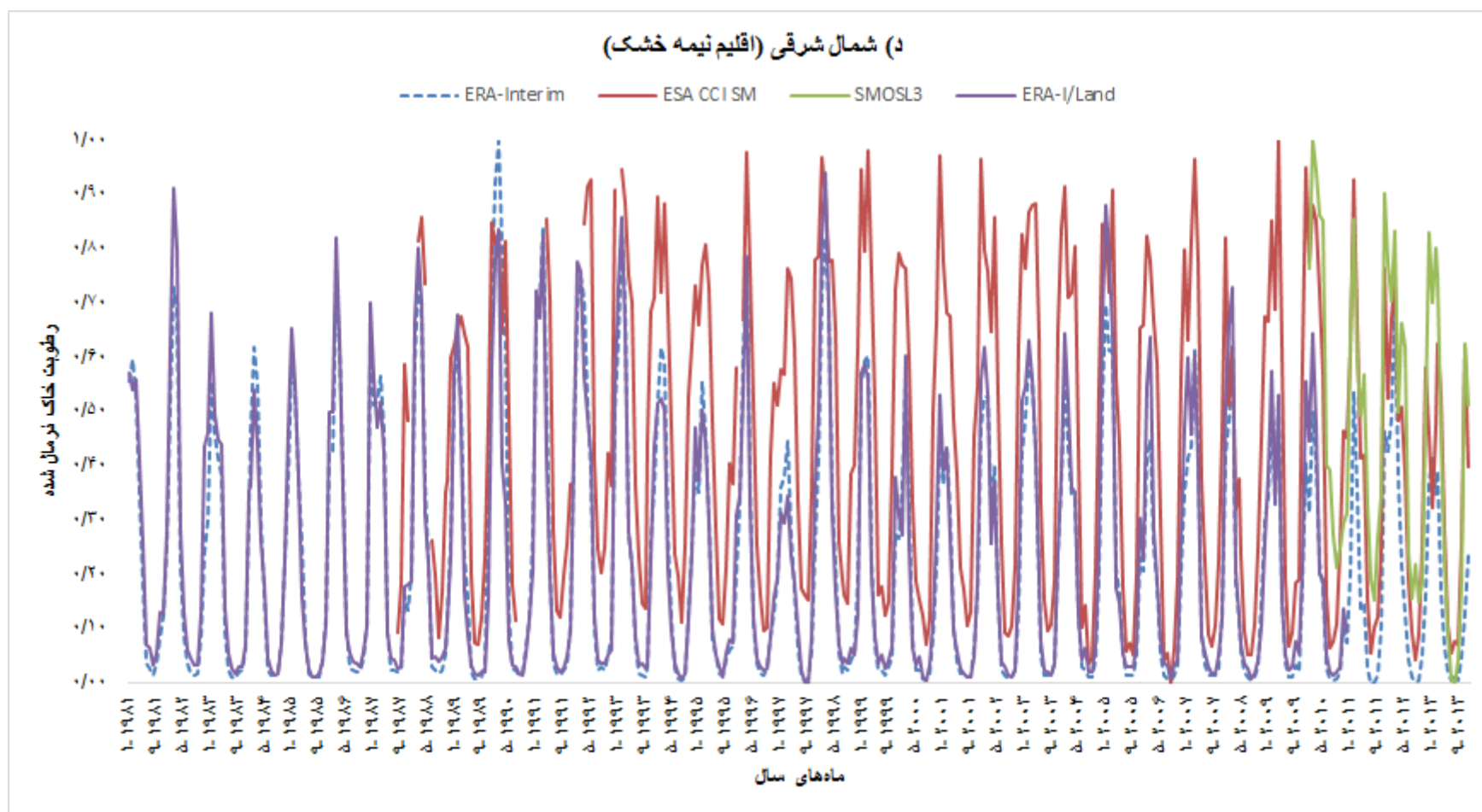
محصول رطوبت خاک ERA-I/Land الگوی ثابت و یکسان‌تر در طی زمان دارد و تطابق بیشتری با محصولات ESA CCI SM و SMOSL3 نشان می‌دهد، در نتیجه این محصول نسبت به محصول رطوبت خاک ERA-Interim می‌تواند قابل اعتماد تر باشد.



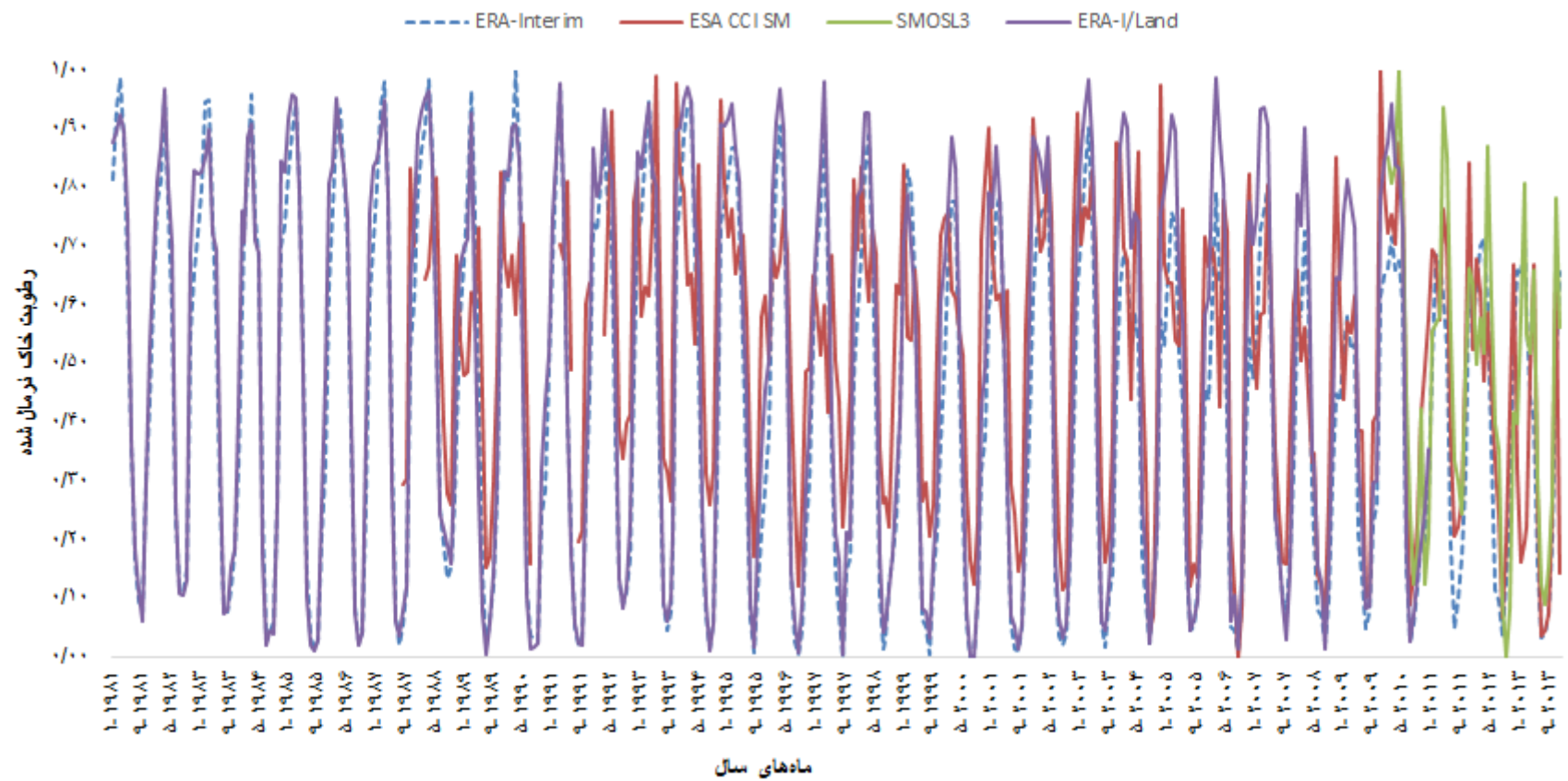


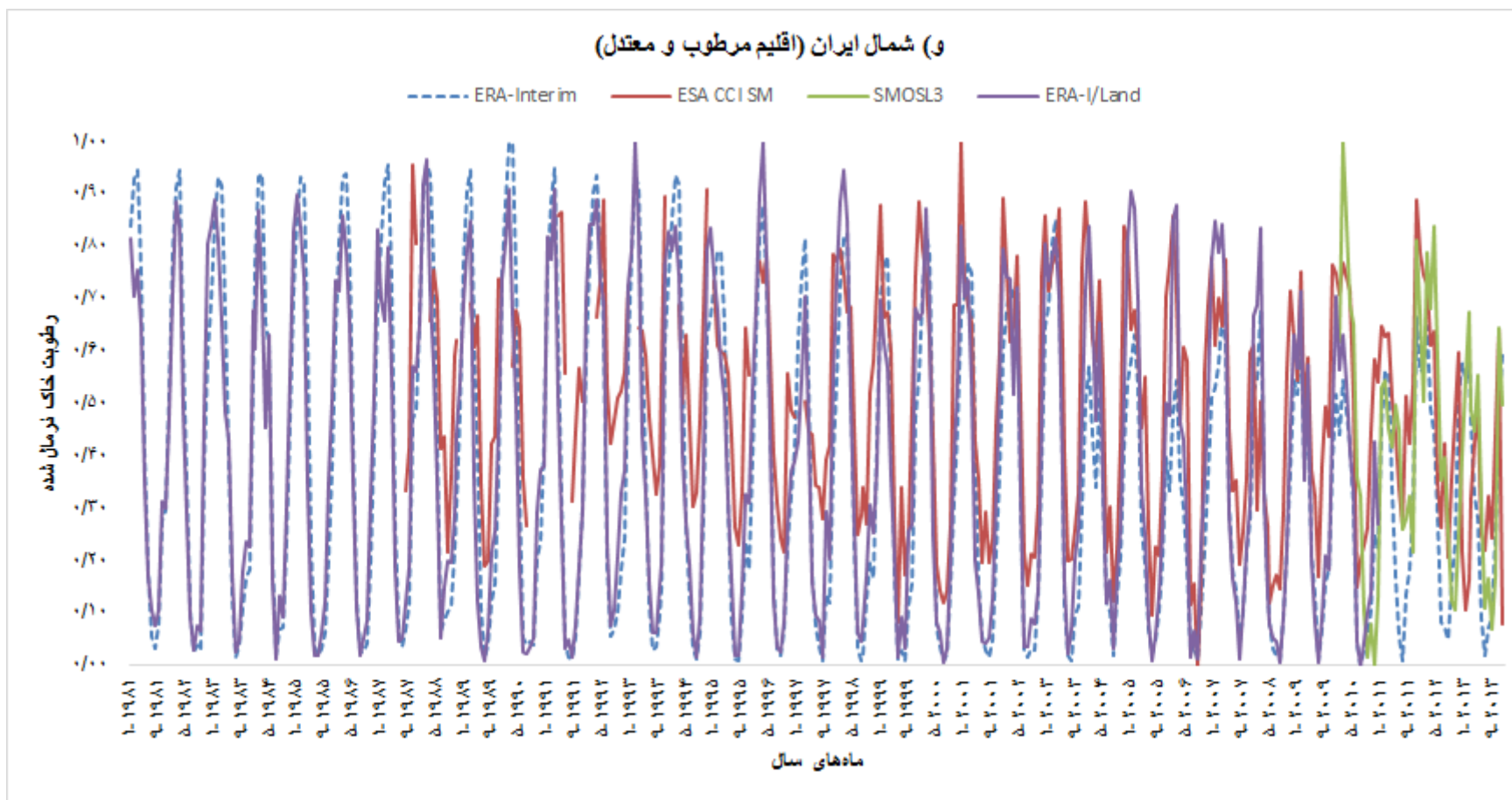






د) شمال غربی (اقلیم کوهستانی با زمستان‌های سرد و تابستان‌های گرم)





شکل ۵-۱: مقایسه سری‌های زمانی ماهانه رطوبت خاک به دست آمده از ERA-Interim (۱۹۸۱/۰۱-۲۰۱۳/۱۲)، ESA CCI SM (۱۹۸۴/۰۱-۲۰۱۳/۱۲)، SMOSL3 (۲۰۱۰/۰۱-۲۰۱۳/۱۲) و ERA-I/Land (۱۹۸۱/۰۱-۲۰۱۰/۱۲) در مناطق مورد مطالعه نشان داده شده در شکل ۳-۱

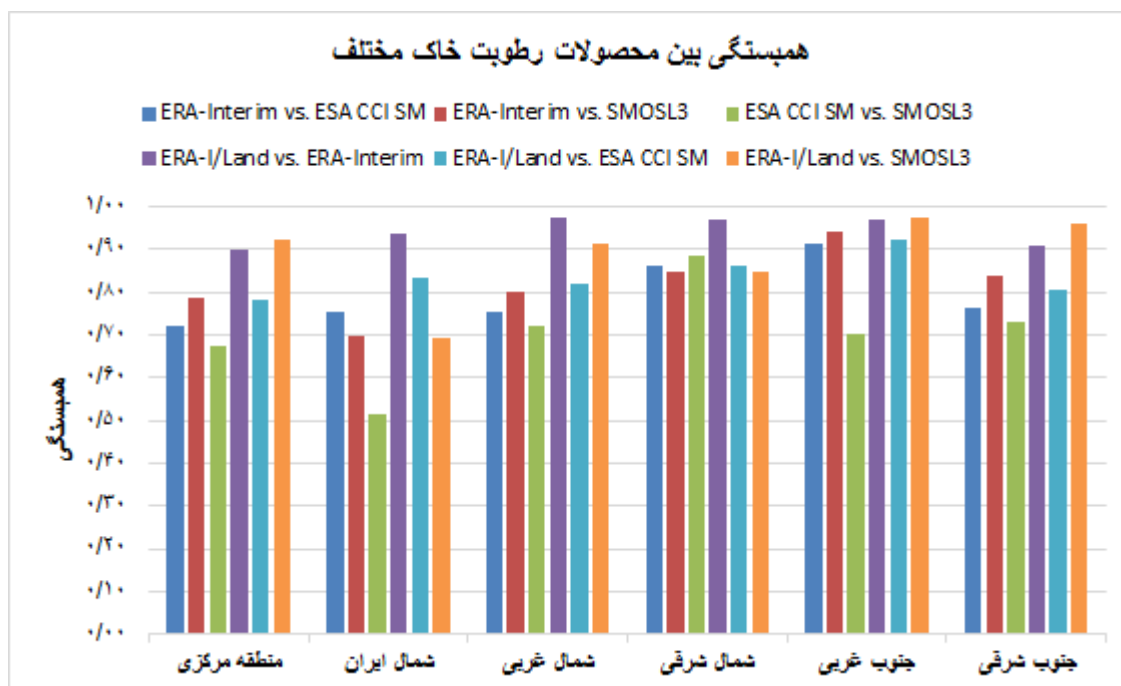
شاخص‌های آماری محاسبه شده برای مجموعه داده‌های رطوبت خاک در جدول ۵-۲ آورده شده است. همان طور که در جدول مشخص است، محصول ESA CCI SM بیشترین مقدار میانگین رطوبت خاک را در منطقه شمال دارا است. این منطقه در شمال ایران قرار دارد و دارای آب و هوای مرطوب و معتدل است که بارش سالانه در نقاط مختلف آن در محدوده  $1300-1450 \text{ mm/year}$  می‌باشد. در حالی که محصول ERA-I/Land بیشترین مقدار میانگین رطوبت خاک را در منطقه شمال غربی برآورد کرده است و محصولات ERA-Interim و SMOSL3 در منطقه شمال ایران مقدار میانگین رطوبت خاک کمتری را به ترتیب در مقایسه با مناطق شمال غربی و جنوب غربی برآورد کرده‌اند. در مقابل، محصولات ERA-I/Land، ERA-Interim و ESA CCI SM کمترین مقدار میانگین رطوبت خاک را در منطقه جنوب شرقی نشان داده‌اند که منطقه‌ای با آب و هوای خشک تا بسیار خشک با میانگین دراز مدت بارش سالانه کمتر از  $120 \text{ mm/year}$  می‌باشد. همچنین محصول ERA-I/Land بیشترین انحراف معیار را در تمام مناطق مورد مطالعه و محصول SMOSL3 کمترین مقدار میانگین رطوبت خاک را در تمام مناطق به جز در منطقه جنوب شرقی در مقایسه با سایر محصولات رطوبت خاک دارا هستند (جدول ۵-۲).

جدول ۵-۲: شاخص‌های آماری اصلی محاسبه شده برای سری‌های زمانی ماهانه محصولات رطوبت خاک

| ERA-I/Land |              |            | ERA-Interim |              |            |            |
|------------|--------------|------------|-------------|--------------|------------|------------|
| میانگین    | انحراف معیار | ضریب چولگی | میانگین     | انحراف معیار | ضریب چولگی | مناطق      |
| 0.199      | 0.029        | 0.889      | 0.108       | 0.076        | 0.895      | شمال شرقی  |
| 0.249      | 0.052        | 0.079      | 0.267       | 0.083        | -0.128     | شمال غربی  |
| 0.198      | 0.043        | 0.412      | 0.161       | 0.071        | 0.264      | شمال ایران |
| 0.187      | 0.022        | 1.286      | 0.064       | 0.062        | 1.298      | مرکز       |
| 0.150      | 0.012        | 1.609      | 0.024       | 0.033        | 2.377      | جنوب شرقی  |
| 0.202      | 0.042        | 0.668      | 0.115       | 0.092        | 0.823      | جنوب غربی  |

| SMOSL3  |              |            | ESA CCI SM |              |            |            |
|---------|--------------|------------|------------|--------------|------------|------------|
| میانگین | انحراف معیار | ضریب چولگی | میانگین    | انحراف معیار | ضریب چولگی | مناطق      |
| 0.174   | 0.052        | 0.113      | 0.081      | 0.033        | 0.133      | شمال شرقی  |
| 0.225   | 0.049        | -0.245     | 0.079      | 0.032        | 0.059      | شمال غربی  |
| 0.230   | 0.042        | -0.012     | 0.093      | 0.035        | 0.198      | شمال ایران |
| 0.166   | 0.043        | 0.403      | 0.034      | 0.027        | 1.237      | مرکز       |
| 0.124   | 0.024        | 1.002      | 0.039      | 0.024        | 2.023      | جنوب شرقی  |
| 0.172   | 0.050        | 0.425      | 0.138      | 0.043        | 0.650      | جنوب غربی  |

ضرایب همبستگی محاسبه شده بین محصولات رطوبت خاک مختلف در مناطق مورد مطالعه در شکل ۵-۲ ارائه شده‌اند. همان طور که دیده می‌شود در مناطق مرکزی، شمال غربی، جنوب غربی و جنوب شرقی همبستگی بین ERA-I/Land و SMOSL3 در مقایسه با همبستگی بین سایر محصولات رطوبت خاک، بیشتر می‌باشد. در حالی که در مناطق شمال و شمال شرقی همبستگی بین محصولات رطوبت خاک ERA-Interim و SMOSL3 بیشتر است. اگر چه این نتایج ممکن است تحت تاثیر دوره زمانی محدود محصول SMOSL3 (چهار سال) باشد.

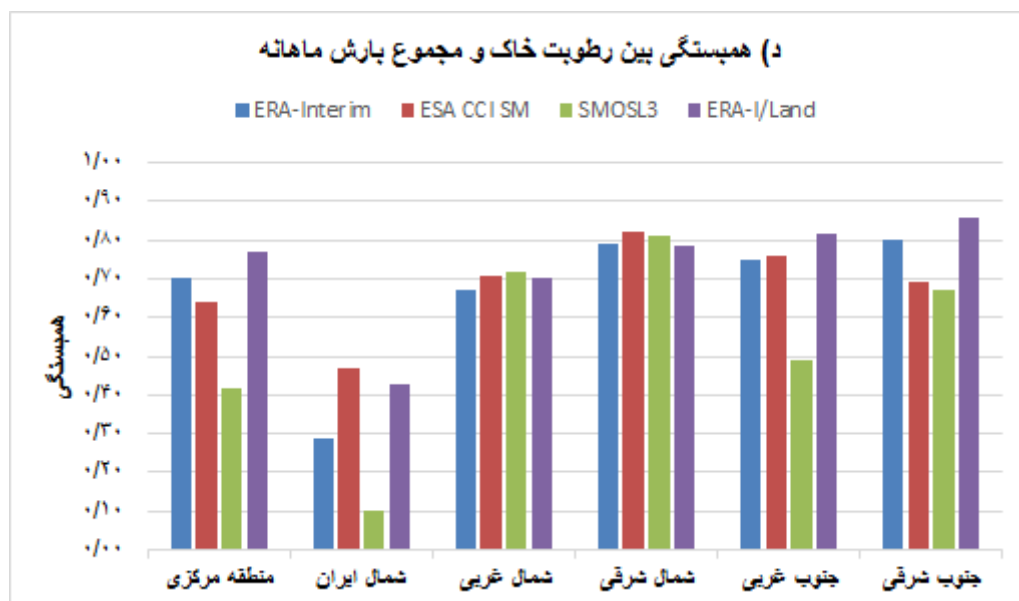


شکل ۵-۲: نتایج مقایسه ضریب همبستگی بین سری‌های زمانی رطوبت خاک ماهانه به دست آمده از ERA-Interim و ERA-I/Land و SMOSL3 (۱۳۸۴/۰۱-۲۰۱۳/۱۲)، ESA CCI SM (۱۳۸۱/۰۱-۲۰۱۳/۱۲) و SMOSL3 (۲۰۱۰/۰۱-۲۰۱۳/۱۲) در مناطق مختلف ایران (۱۳۸۱/۰۱-۲۰۱۳/۱۲)

نتایج ضرایب همبستگی بین محصولات رطوبت خاک و متغیرهای اقلیم شناسی در مناطق مورد مطالعه در شکل ۵-۳ مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل دیده می‌شود که همبستگی‌ها مقادیر بالایی را نشان می‌دهند به جز در شمال ایران که ضریب همبستگی بین محصولات رطوبت خاک و مجموع بارش ماهانه در مقایسه با همبستگی بین محصولات رطوبت خاک و متغیرهای دما کمتر است. این ممکن است به تغییرات زیاد بارش در نقاط مختلف منطقه شمال انتخاب شده در این مطالعه مربوط باشد که در این منطقه وضعیت اقلیمی از مرطوب و معتدل تا نیمه خشک با محدوده بارش سالانه  $1300-1450 \text{ mm/year}$  تغییر می‌کند. در این منطقه انتخاب شده، چهار ایستگاه با اقلیم نیمه خشک و پنج ایستگاه با اقلیم مرطوب و معتدل وجود دارد و بارش در ایستگاه‌های مرطوب و معتدل خیلی بیشتر از ایستگاه‌های نیمه خشک است. در حالی که تفاوت دما بین ایستگاه‌های معتدل و نیمه خشک خیلی زیاد نیست.







شکل ۳-۵: نتایج مقایسه ضریب همبستگی بین رطوبت خاک ماهانه به دست آمده از ERA-Interim (۲۰۱۳/۱۲-۱۹۸۱/۰۱)، ESA CCI SM (۲۰۱۳/۱۲-۱۹۸۴/۰۱)، SMOSL3 (۲۰۱۳/۱۲-۲۰۱۰/۰۱)، ERA-I/Land (۲۰۱۳/۱۲-۲۰۱۳/۱۲) و داده‌های اقلیم‌شناسی (دماهای میانگین، حداکثر، حداقل ماهانه و مجموع بارش ماهانه) (۱۹۸۱/۰۱-۲۰۱۳/۱۲) (۱۹۸۱/۰۱)

### ۳-۱-۵ نتایج تحلیل خشکسالی

مشخصه‌های اصلی وقایع خشکسالی‌ای که از سال ۲۰۰۰ به بعد در مناطق مورد مطالعه رخ داده در جدول ۳-۵ قابل رویت است. بر اساس هر شاخص، زمان شروع، مدت خشکسالی و دو نمونه از شدیدترین وقایع خشکسالی به دست آمده در دوره ۲۰۰۰-۲۰۱۴ در جدول ۳-۵ نمایان است. اگر شاخص کمتر از آستانه خشکی باشد که مطابق با ۰/۵- در مقیاس استاندارد شده است، خشکسالی تعریف می‌شود. همچنین با توجه به جدول ۳-۵ دیده می‌شود که به طور کلی مقادیر SSI به دست آمده از محصولات ERA-Interim و ERA-I/Land در مقایسه با محصول ESA CCI SM وقایع خشکسالی طولانی مدت تری را برآورد کرده‌اند. برای مثال بر اساس محصول ERA-Interim مناطق جنوب شرقی و مرکزی از طولانی مدت ترین وقایع خشکسالی به ترتیب با مدت‌های ۶۰ و ۳۵ ماه متحمل آسیب شده‌اند در حالی که با توجه به محصول ERA-I/Land مشاهده می‌شود که طولانی مدت ترین وقایع خشکسالی در مناطق جنوب شرقی و شمال ایران باعث ضرر و زیان شده‌اند.

همچنین، طبری و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند که در منطقه جنوب شرقی شدیدترین وقایع خشکسالی در بین سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ رخ داده است که با نتایج به دست آمده از محصولات ERA-Interim و ERA-I/Land در پژوهش حاضر مطابق است [۳۱]. طبری و همکاران (۲۰۱۳) در منطقه شمال غربی یکی از شدیدترین وقایع خشکسالی را بر اساس شاخص SDI<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۸ پیدا کردند که نتایج آن‌ها با نتایج حاصل از محصولات ERA-Interim، ERA-I/Land و ESA CCI SM در این مطالعه مطابقت دارد [۳۲]. همچنین هاشمی دوفین و آهنگرزاده (۲۰۱۳) نشان دادند که در منطقه شمال شرقی یکی از شدیدترین وقایع خشکسالی در سال ۲۰۰۸ رخ داده است که با نتایج حاصل از هر دو محصول ERA-Interim و ESA CCI SM مطابق است [۳۳].

جدول ۳-۵: مشخصه‌های دو نمونه از شدید ترین وقایع خشکسالی به دست آمده از محصولات رطوبت خاک مختلف در مناطق مورد مطالعه (دوره ۲۰۰۰-۲۰۱۴)

|             |             | شدید ترین خشکسالی |           |       | دومین خشکسالی شدید |           |       |
|-------------|-------------|-------------------|-----------|-------|--------------------|-----------|-------|
|             | منطقه       | زمان شروع         | مدت (ماه) | سختی  | زمان شروع          | مدت (ماه) | سختی  |
| ERA-Interim | شمال ایران  | Jan. 2010         | 21        | -2.58 | Dec. 2005          | 12        | -1.93 |
|             | شمال شرقی   | Mar. 2008         | 14        | -1.95 | Oct. 2010          | 12        | -2.62 |
|             | شمال غربی   | Jan. 2008         | 10        | -2.32 | Dec. 2005          | 11        | -1.13 |
|             | منطقه مرکزی | Jan. 2010         | 35        | -2.99 | Dec. 2007          | 12        | -1.86 |
|             | جنوب شرقی   | Feb. 2000         | 60        | -2.78 | Feb. 2006          | 7         | -0.83 |
|             | جنوب غربی   | Nov. 2007         | 12        | -2.53 | Nov. 2010          | 12        | -2.07 |
|             |             | شدید ترین خشکسالی |           |       | دومین خشکسالی شدید |           |       |
|             | منطقه       | زمان شروع         | مدت (ماه) | سختی  | زمان شروع          | مدت (ماه) | سختی  |
| ERA-I/Land  | شمال ایران  | Nov 2007          | 21        | -1.94 | Jan 2010           | 7         | -1.29 |
|             | شمال شرقی   | Jan 2010          | 12        | -2.31 | Mar 2001           | 9         | -1.83 |

<sup>۱</sup> Streamflow Drought Index

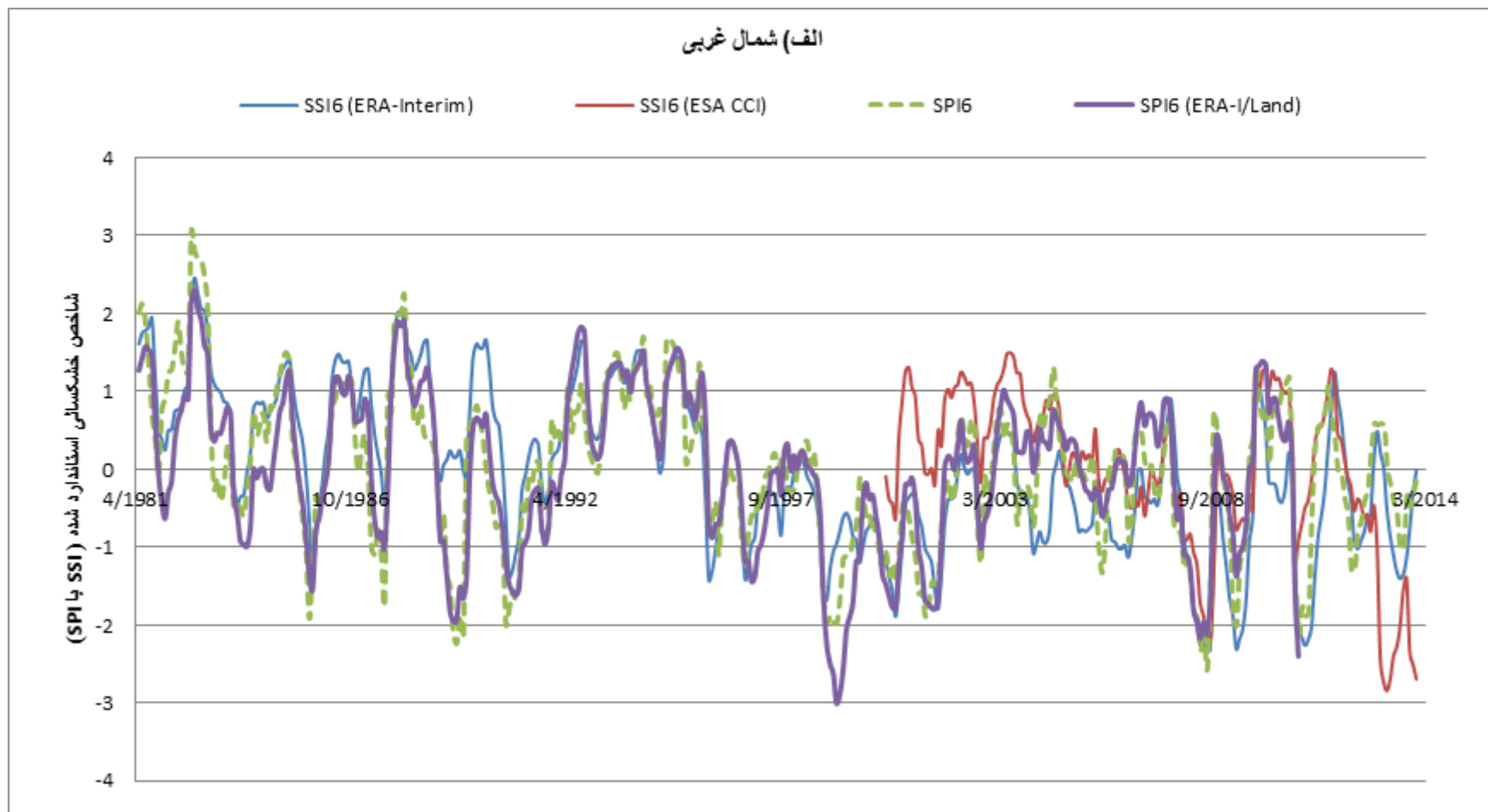
|                    |           |           |                   |           |           |             |            |
|--------------------|-----------|-----------|-------------------|-----------|-----------|-------------|------------|
| -2.13              | 9         | Jan 2008  | -2.17             | 9         | Mar 2001  | شمال غربی   |            |
| -1.01              | 7         | May 2001  | -2.67             | 12        | Jan 2010  | منطقه مرکزی |            |
| -1.71              | 11        | Jan 2004  | -1.39             | 27        | Aug 2000  | جنوب شرقی   |            |
| -2.35              | 9         | Dec 2008  | -2.02             | 12        | Nov 2007  | جنوب غربی   |            |
| دومین خشکسالی شدید |           |           | شدید ترین خشکسالی |           |           |             |            |
| سختی               | مدت (ماه) | زمان شروع | سختی              | مدت (ماه) | زمان شروع | منطقه       |            |
| -2.43              | 12        | Dec. 2007 | -2.78             | 9         | Dec. 2012 | شمال ایران  | ESA CCI SM |
| -2.02              | 13        | Jan. 2008 | -2.47             | 11        | Dec. 2012 | شمال شرقی   |            |
| -2.23              | 10        | Jan. 2008 | -2.84             | 13        | Dec. 2012 | شمال غربی   |            |
| -1.73              | 6         | Apr. 2008 | -3.13             | 16        | Sep. 2013 | منطقه مرکزی |            |
| -2.29              | 15        | Sep. 2005 | -2.73             | 12        | Jan. 2004 | جنوب شرقی   |            |
| -1.87              | 7         | Jan. 2013 | -2.21             | 8         | Jun. 2000 | جنوب غربی   |            |

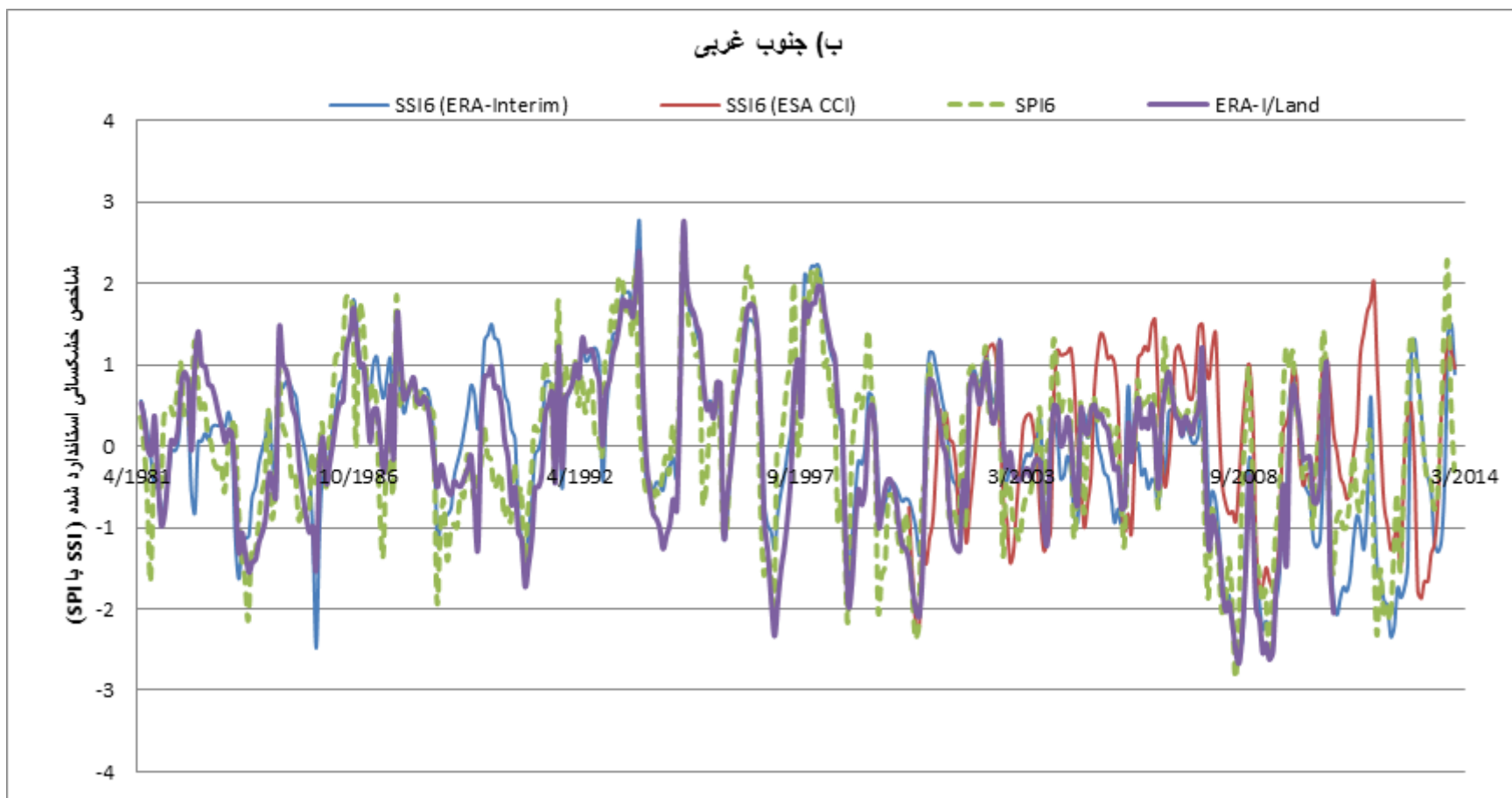
همچنین، نتایج ضریب همبستگی بر اساس سری‌های زمانی SSI6 (SSI ۶ ماهه) به دست آمده از مجموعه داده‌های ERA-Interim، ERA-I/Land و ESA CCI SM در جدول ۵-۴ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۵-۴ مشاهده می‌شود که بیشترین همبستگی بین SSI به دست آمده از محصولات ERA-Interim و ESA CCI SM در مناطق جنوب شرقی و شمال شرقی به دست آمده است و بیشترین همبستگی بین SSI به دست آمده از محصولات ERA-I/Land و ESA CCI SM در مناطق جنوب شرقی و شمال غربی برآورد شده است.

جدول ۴-۵: مقادیر ضریب همبستگی بین سری‌های زمانی SSI6 به دست آمده از محصولات رطوبت خاک

| شمال غربی | شمال شرقی | جنوب غربی | جنوب شرقی | منطقه مرکزی | شمال ایران |                            |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|------------|----------------------------|
| 0.49      | 0.55      | 0.38      | 0.61      | 0.30        | 0.50       | ERA-Interim vs. ESA CCI SM |
| 0.68      | 0.49      | 0.54      | 0.69      | 0.37        | 0.65       | ERA-I/Land vs. ESA CCI SM  |

مهم ترین دلیل نتایج مختلف به دست آمده در شناسایی و ثبت وقایع خشکسالی، دوره زمانی متفاوت محصولات رطوبت خاک می‌باشد که برای استخراج SSI استفاده شده است. برای ERA-Interim و ERA-I/Land از سی سال داده ولی برای ESA CCI SM از ۱۴ سال داده استفاده شده است. در شکل ۴-۵ سری‌های زمانی SSI6 و SPI6 به ترتیب به عنوان شاخص‌های کشاورزی و هواشناسی خشکسالی در مناطق شمال غربی و جنوب غربی به عنوان نمونه نشان داده شده‌اند.





شکل ۵-۴: سری‌های زمانی SSI ۶ ماهه محصولات ERA-Interim (۱۹۸۱/۰۱-۲۰۱۳/۱۲)، ERA-I/Land (۱۹۸۱/۰۱-۲۰۱۰/۱۲)، ESA CCI SM (۲۰۰۰/۰۱-۲۰۱۳/۱۲) و SPI (۲۰۱۳/۱۲-۲۰۱۳/۱۲) در مناطق الف) شمال غربی ب) جنوب غربی

## ۲-۵ نتایج حاصل از شبیه سازی رطوبت خاک در ایستگاه‌های مورد مطالعه

### ۱-۲-۵ نتایج به دست آمده از شاخص‌های سنجش عملکرد مدل

به منظور سنجش عملکرد مدل از شاخص‌های نش-شاتکلیف (NS) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) استفاده شده است. نتایج حاصل از شاخص‌های سنجش عملکرد مدل در ایستگاه‌های مورد مطالعه و در هر دو دوره کالیبراسیون و صحت سنجی در جدول ۵-۵ نشان داده شده است. هر چه شاخص‌های نش-شاتکلیف و ضریب تعیین به عدد یک نزدیک تر باشند عملکرد مدل مناسب تر است. همان گونه که در جدول مشاهده می‌شود مدل در ایستگاه گرگان با اقلیم مرطوب و معتدل و در هر دو دوره کالیبراسیون و صحت سنجی عملکرد خوبی نشان داده است. در ایستگاه رشت نیز با اقلیم مرطوب و معتدل در دوره کالیبراسیون، مدل شبیه سازی رطوبت خاک، عملکرد خوبی داشته است. همچنین در ایستگاه شاهرود با اقلیم نیمه خشک برای هر دو دوره کالیبراسیون و صحت سنجی مقادیر شاخص‌های NS و  $R^2$  خوب بوده است.

جدول ۵-۵: نتایج حاصل از شاخص‌های سنجش عملکرد مدل در ایستگاه‌های مورد مطالعه و در دوره‌های کالیبراسیون (۲۰۰۶-۲۰۰۷) و صحت سنجی (۲۰۱۰-۲۰۰۷)

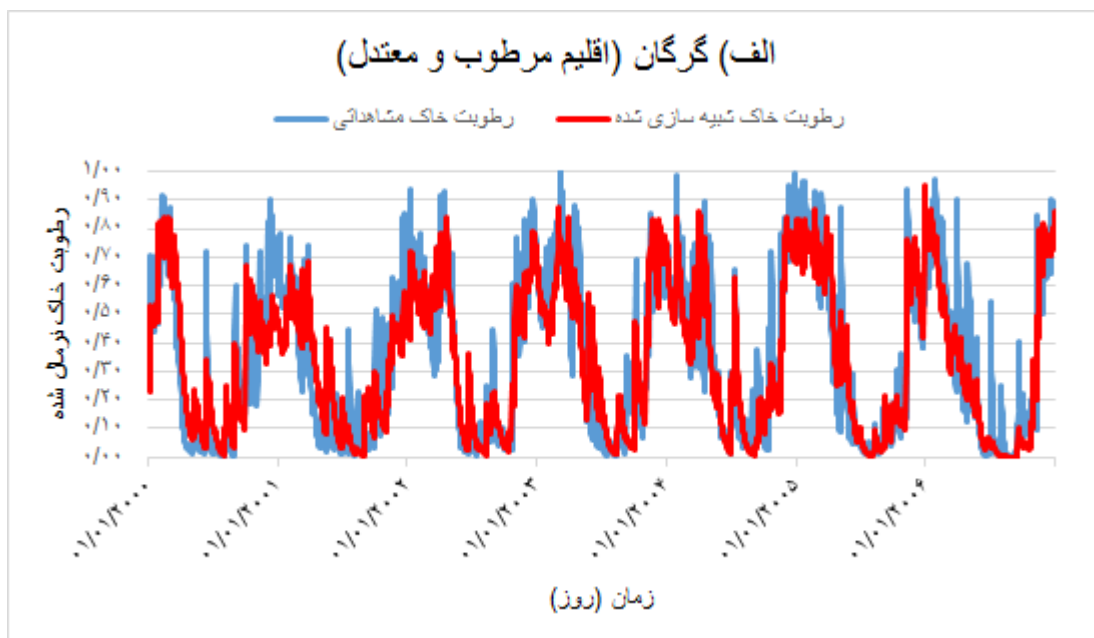
| ایستگاه | اقلیم         | دوره کالیبراسیون |       |       | دوره صحت سنجی |       |       |
|---------|---------------|------------------|-------|-------|---------------|-------|-------|
|         |               | NS               | $R^2$ | RMSE  | NS            | $R^2$ | RMSE  |
| گرگان   | معتدل و مرطوب | 0.820            | 0.820 | 0.118 | 0.807         | 0.818 | 0.124 |
| رشت     | معتدل و مرطوب | 0.844            | 0.844 | 0.118 | 0.525         | 0.666 | 0.204 |
| شاهرود  | نیمه خشک      | 0.741            | 0.777 | 0.128 | 0.695         | 0.735 | 0.151 |
| یزد     | خشک           | 0.676            | 0.690 | 0.109 | 0.460         | 0.503 | 0.133 |



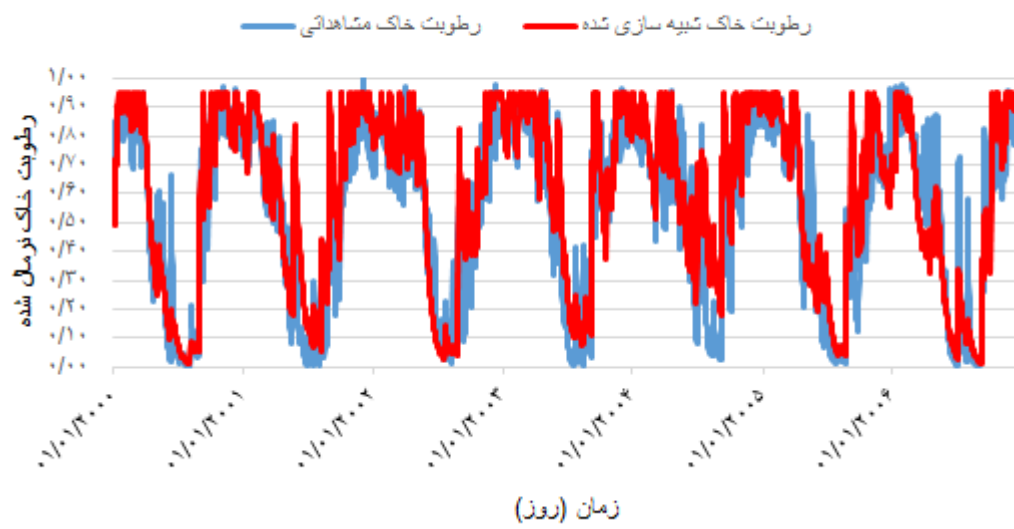
## ۵-۲-۲ مقایسه سری‌های زمانی رطوبت خاک مشاهداتی و شبیه سازی

شده

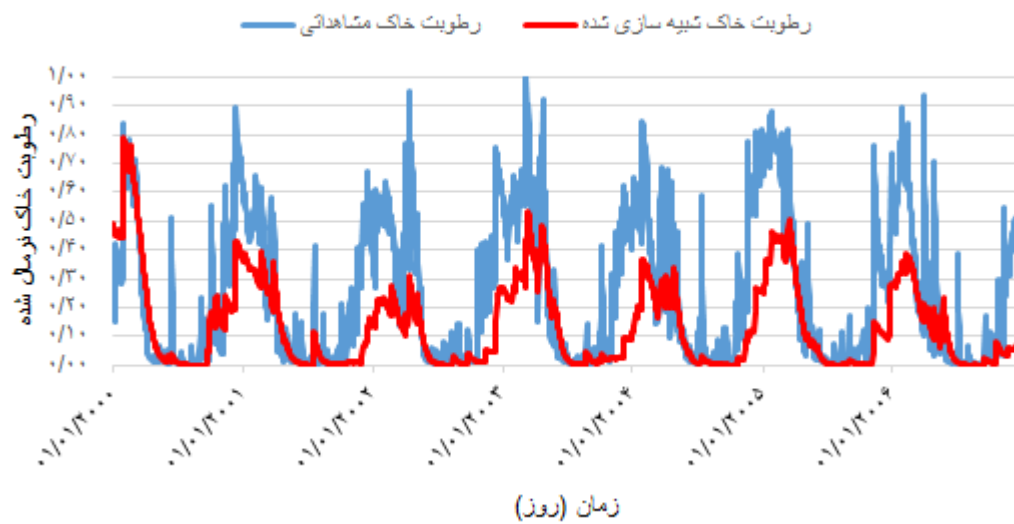
مقایسه سری‌های زمانی شبیه سازی شده و مشاهداتی در ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره کالیبراسیون در شکل ۵-۵ آمده است. طی دوره کالیبراسیون در ایستگاه شاهرود و طی دوره صحت سنجی در ایستگاه‌های رشت و یزد، رطوبت خاک شبیه سازی شده از لحاظ مقدار، اختلاف زیادی را با رطوبت خاک ERA-I/Land نشان می‌دهد (شکل‌های ۵-۵ ج و ۵-۶ د).

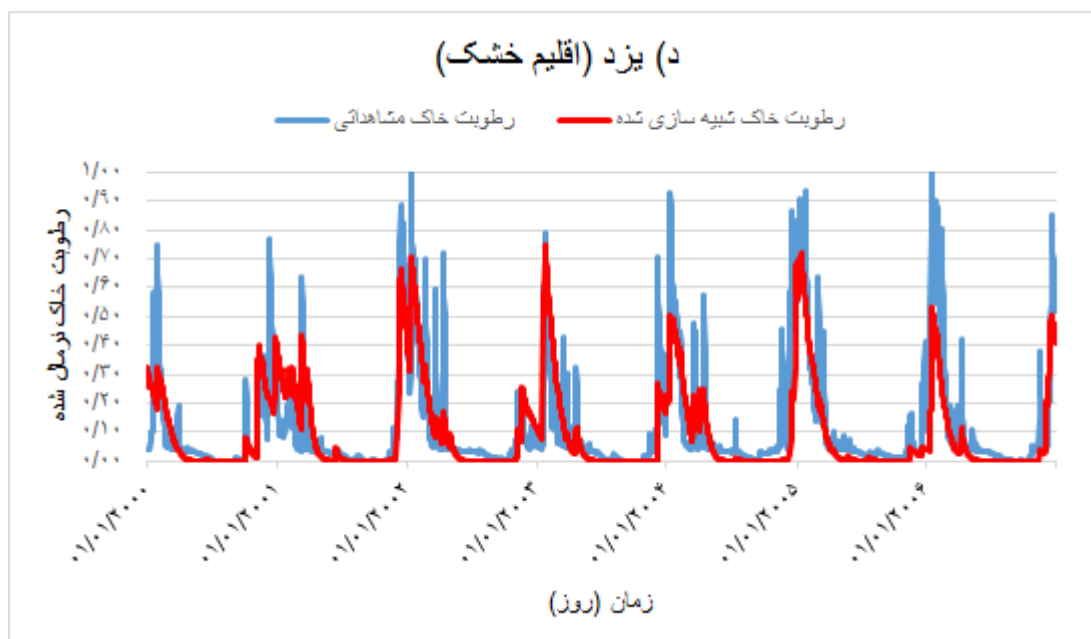


### ب) رشت (اقلیم مرطوب و معتدل)



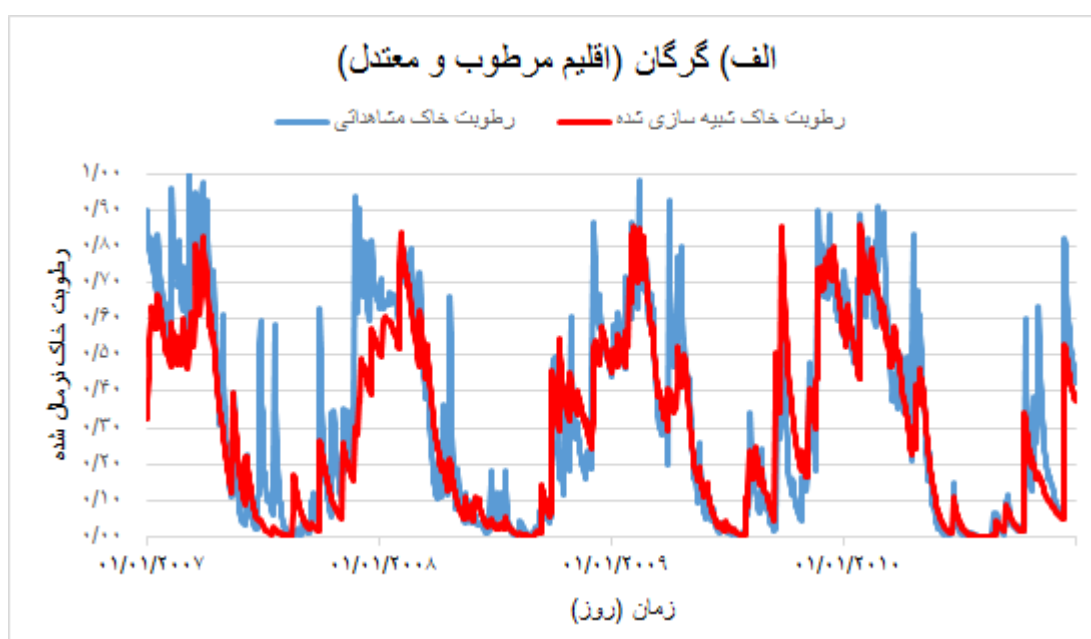
### ج) شاهرود (اقلیم نیمه خشک)



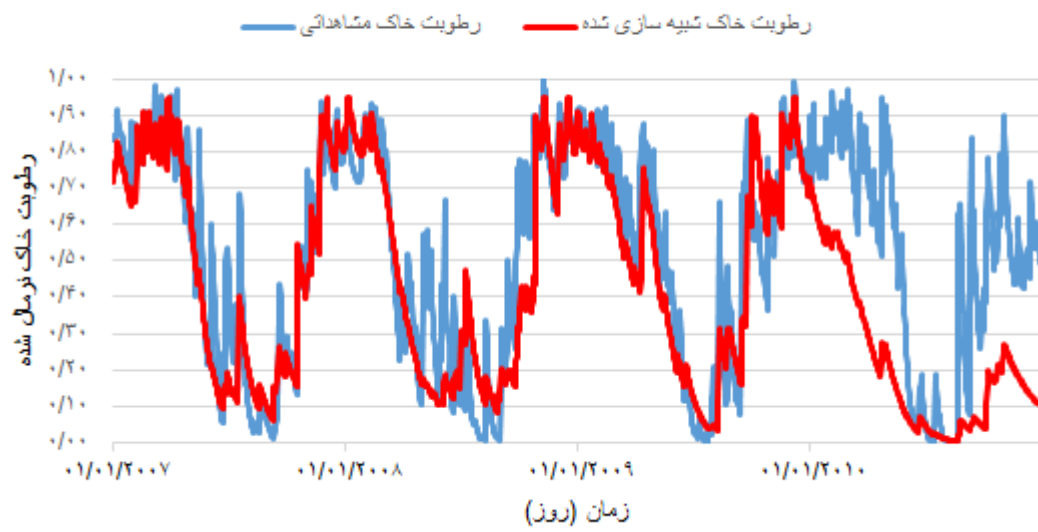


شکل ۵-۵: مقایسه سری‌های زمانی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره کالیبراسیون (۲۰۰۰-۲۰۰۶)

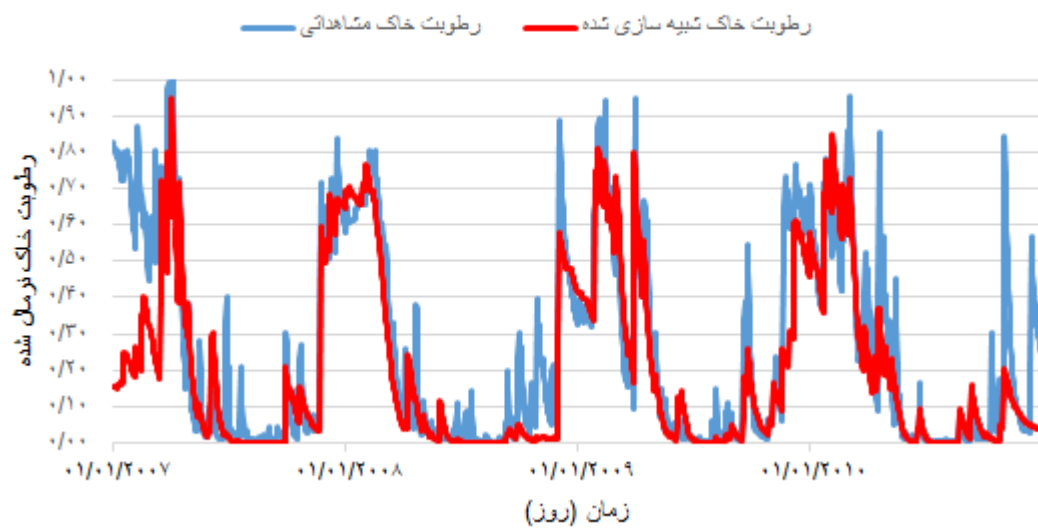
سری‌های زمانی رطوبت خاک در دوره صحت‌سنجی نیز در ایستگاه‌های مورد مطالعه شبیه‌سازی شده و با داده‌های مشاهداتی مقایسه شده‌اند که در شکل ۵-۶ مشاهده می‌شود.

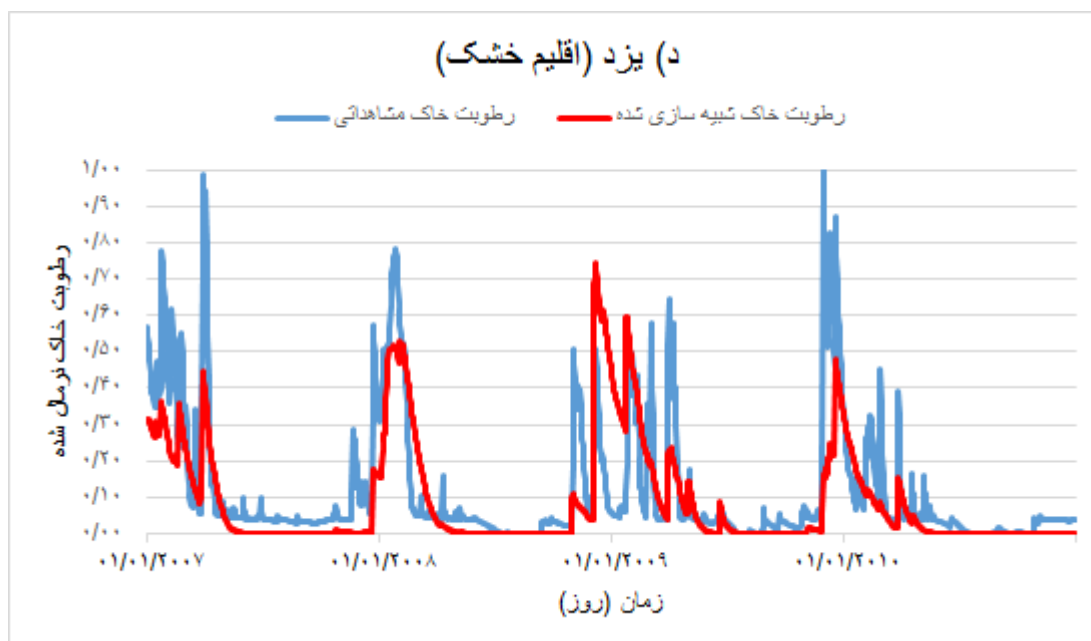


### ب) رشت (اقلیم مرطوب و معتدل)



### ج) شاهرود (اقلیم نیمه خشک)





شکل ۵-۶: مقایسه سری‌های زمانی رطوبت خاک شبیه سازی شده و مشاهداتی در ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره صحت سنجی (۲۰۰۷-۲۰۱۰)

## **فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات**

در این مطالعه، داده‌های رطوبت خاک از دو محصول ماهواره‌ای SMOSL3 و ESA CCI SM و دو محصول باز تحلیل شده ERA-Interim و ERA-I/Land در شش منطقه با شرایط اقلیمی متفاوت در ایران استخراج شدند. آزمون من-کندال به منظور بررسی وجود روند در هر منطقه انجام شد. درجه تطابق بین محصولات رطوبت خاک مختلف و همچنین بین محصولات رطوبت خاک و متغیرهای اقلیم شناسی با استفاده از معادله ضریب همبستگی پیرسون ارزیابی شد. سپس تحلیل خشکسالی در هر منطقه مورد مطالعه بر اساس سری‌های زمانی رطوبت خاک و با استفاده از مشخصات وقایع خشکسالی شامل مدت و سختی خشکسالی انجام شد. سرانجام، داده‌های رطوبت خاک در چهار ایستگاه مورد مطالعه با استفاده از مدل بیلان آب-خاک شبیه سازی و با داده‌های رطوبت خاک ERA-I/Land به عنوان داده مشاهداتی مقایسه شدند.

بر اساس محصولات رطوبت خاک ERA-Interim و ERA-I/Land در تمام مناطق مورد مطالعه برای دوره ۱۹۸۰-۱۹۹۹ روندی پیدا نشد. اگرچه، در دوره ۲۰۱۴-۲۰۰۰ برای منطقه جنوب شرقی بر اساس محصول رطوبت خاک ERA-Interim روند منفی با سطح اطمینان ۹۵٪ مشاهده شده است. همچنین در مناطق شمال غربی و مرکز در دوره ۲۰۱۴-۲۰۰۰ بر اساس محصول ESA CCI SM روند منفی به دست آمده است.

همه محصولات رطوبت خاک با یکدیگر و با متغیرهای اقلیم شناسی بارش و دما مطابقت خوبی نشان دادند. به طور کلی، تطابق بین دو محصول رطوبت خاک ERA-I/Land و SMOSL3 در مقایسه با تطابق بین هر جفت از محصولات رطوبت خاک دیگر، قوی تر است. به عنوان مثال، نتایج نشان دادند که در مناطق شمال غربی، مرکز، جنوب شرقی و جنوب غربی همبستگی بین محصولات رطوبت خاک ERA-I/Land و SMOSL3 به ترتیب برابر ۰/۹۱، ۰/۹۲، ۰/۹۶ و ۰/۹۸ می‌باشد. اگرچه، به این نکته باید توجه کرد که دوره زمانی محصولات رطوبت خاک استفاده شده در این مطالعه بسیار متفاوت است (SMOSL3 با کمتر از ۵ سال داده، ESA CCI SM با ۳۰ سال داده، ERA-Interim با

۳۳ سال داده و ERA-I/Land با ۳۰ سال داده). در این صورت ممکن است که ضرایب همبستگی محاسبه شده برای SMOSL3 خیلی قابل اعتماد نباشد.

به طور کلی، همه متغیرهای اقلیم شناسی به ویژه دمای ماکزیمم ماهانه همبستگی‌های خوبی را (چه مثبت و چه منفی) با محصولات رطوبت خاک نشان دادند. به منظور فهم بهتر اثرات چرخه‌های فصلی بر روی ضرایب همبستگی محاسبه شده بررسی سری‌های زمانی نا هنجاری<sup>۱</sup> رطوبت خاک برای فعالیت پژوهشی آینده توصیه می‌شود. ارزشمند است به این نکته توجه شود که در اکثر مناطق مورد مطالعه، مقادیر همبستگی بین ERA-I/Land و سایر محصولات رطوبت خاک و متغیرهای اقلیم شناسی در مقایسه با ERA-Interim بیشتر است و به نظر می‌رسد که محصول رطوبت خاک ERA-I/Land عملکرد بهتری را از ERA-Interim نشان می‌دهد. در نتیجه، می‌توان استفاده از محصول رطوبت خاک ERA-I/Land را به عنوان یک داده رطوبت خاک مدلسازی شده قابل اطمینان در ایران توصیه نمود.

نتایج تحلیل خشکسالی بر اساس شاخص رطوبت خاک استاندارد شده (SSI) به دست آمده از محصولات رطوبت خاک ERA-Interim و ERA-I/Land، تعدادی وقایع خشکسالی شدید را در مناطق مرکز و جنوب شرقی ایران از سال ۲۰۰۰ به بعد نشان دادند. همچنین بر اساس شاخص SSI به دست آمده از محصول ESA CCI SM یک واقعه خشکسالی شدید از ماه دسامبر سال ۲۰۱۲ در مناطق شمال، شمال غربی و شمال شرقی کشور شروع شده است. این نتایج با واقعیت و همچنین نتایج به دست آمده از تحقیقات دیگر مطابق است [۳۱، ۳۲ و ۳۳]. به عنوان یک نتیجه استنتاج می‌شود که محصولات رطوبت خاک میکروویو ماهواره‌ای و باز تحلیل شده ابزار مفیدی برای پایش خشکسالی در ایران می‌باشند.

همچنین با مشاهده مقادیر شاخص‌های سنجش خطا (NS و  $R^2$ ) در ایستگاه‌های مرطوب و

---

<sup>۱</sup> Anomaly time series



معتدل گرگان و رشت و در ایستگاه نیمه خشک شاهرود، نتیجه گیری می‌شود که رطوبت خاک شبیه سازی شده توسط مدل یکپارچه بیلان آب-خاک در ایستگاه‌های معتدل و نیمه خشک کشور، همبستگی خوبی را با رطوبت خاک ERA-I/Land دارد.

پیوست الف- مقالات مستخرج از پایان نامه

1. Rahmani, A., Golian, S., & Brocca, L. (2015). Multiyear monitoring of soil moisture over Iran through satellite and reanalysis soil moisture products. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, in press.

۲. رحمانی کم، ع. گلیان، س. بروکا، ل. (۱۳۹۴) "مقایسه خروجی الگوریتم‌های ماهواره‌ای رطوبت خاک در مناطق مختلف ایران" دهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، تبریز، دانشگاه تبریز، اردیبهشت ۱۳۹۴.

پیوست ب) پارامترها و حروف بیان شده در متن پایان نامه

| پارامتر                                       | تعریف یا توضیح پارامتر                                                                                                                                                                                                                         |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) | نمایه گیاهی نفاضل نرمال: یکی از نمایه‌های رایج طیفی برای تخمین خصوصیات پوشش گیاهی و برگ گیاهان از قبیل غلظت رنگ‌دانه‌ها و مقدار رطوبت می‌باشد.                                                                                                 |
| ضریب همبستگی اسپیرمن                          | ضریب همبستگی اسپیرمن به صورت ضریب همبستگی پیرسون بین داده‌های رتبه بندی شده تعریف می‌شود. این ضریب میزان همبستگی بین دو متغیر ترتیبی را نشان می‌دهد. در این ضریب همبستگی به جای استفاده از خود مقادیر متغیرها از رتبه‌های آنان استفاده می‌شود. |
| LAI (Leaf Area Index)                         | شاخص سطح برگ: عبارت است از جمع مساحت برگ‌های یک درخت یا پوشش گیاهی تقسیم بر سطح سایه انداز آن پوشش.                                                                                                                                            |

1. Al-Yaari, A., Wigneron, J. P., Ducharne, A., Kerr, Y., de Rosnay, P., de Jeu, R., ... & Mialon, A. (2014). Global-scale evaluation of two satellite-based passive microwave soil moisture datasets (SMOS and AMSR-E) with respect to Land Data Assimilation System estimates. *Remote Sensing of Environment*, 149, 181-195.
2. Dorigo, W. A., Gruber, A., De Jeu, R. A. M., Wagner, W., Stacke, T., Loew, A., ... & Kidd, R. (2015). Evaluation of the ESA CCI soil moisture product using ground-based observations. *Remote Sensing of Environment*, in press.
3. Albergel, C., Dorigo, W., Balsamo, G., Muñoz-Sabater, J., de Rosnay, P., Isaksen, L., ... & Wagner, W. (2013). Monitoring multi-decadal satellite earth observation of soil moisture products through land surface reanalyses. *Remote Sensing of Environment*, 138, 77-89.
4. Brocca, L., Camici, S., Melone, F., Moramarco, T., Martínez-Fernández, J., Didon-Lescot, J. F., & Morbidelli, R. (2014). Improving the representation of soil moisture by using a semi-analytical infiltration model. *Hydrological Processes*, 28(4), 2103-2115.
5. Al-Yaari, A., Wigneron, J. P., Ducharne, A., Kerr, Y. H., Wagner, W., De Lannoy, G., ... & Mialon, A. (2014). Global-scale comparison of passive (SMOS) and active (ASCAT) satellite based microwave soil moisture retrievals with soil moisture simulations (MERRA-Land). *Remote Sensing of Environment*, 152, 614-626.
6. Loew, A., Stacke, T., Dorigo, W., de Jeu, R., & Hagemann, S. (2013). Potential and limitations of multidecadal satellite soil moisture observations for selected climate model evaluation studies. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, 3523-3542.
7. Dorigo, W., Jeu, R., Chung, D., Parinussa, R., Liu, Y., Wagner, W., & Fernández-Prieto, D. (2012). Evaluating global trends (1988-2010) in harmonized multi-satellite surface soil moisture. *Geophysical Research Letters*, 39(18).
8. Golian, S., Mazdiyasni, O., & AghaKouchak, A. (2015). Trends in meteorological and agricultural droughts in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-10.
9. Brocca, L., Ciabatta, L., Massari, C., Moramarco, T., Hahn, S., Hasenauer, S., Kidd, R., Dorigo, W., Wagner, W and Levizzani, V. (2014), "Soil as a natural rain gauge: Estimating global rainfall from satellite soil moisture data," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(9), pp 5128-5141.
10. Albergel, C., de Rosnay, P., Gruhier, C., Muñoz-Sabater, J., Hasenauer, S., Isaksen, L., ... & Wagner, W. (2012). Evaluation of remotely sensed and modelled soil moisture products using global ground-based in situ observations. *Remote Sensing of Environment*, 118, 215-226.

۱۱. کشاورز، م. ر. وظیفه دوست، م. علیزاده، ا. و اسدی، ع. (۱۳۹۰)، "استخراج و روندیابی رطوبت خاک به کمک داده‌های ماهواره‌ای سنجنده مادیس، مطالعه موردی: استان اصفهان"، نشریه آبیاری و زهکشی ایران، شماره ۲، جلد ۵، ص ۲۱۹-۲۰۹.

۱۲. فاطمی، س. ب. رضایی، ی. (۱۳۸۴)، "مبانی سنجش از دور" چاپ اول، انتشارات آزاده، تهران، ص ۴.

13. Liu, Y. Y., Dorigo, W. A., Parinussa, R. M., De Jeu, R. A. M., Wagner, W., McCabe, M. F., ... & Van Dijk, A. I. J. M. (2012). Trend-preserving blending of passive and active microwave soil moisture retrievals. *Remote Sensing of Environment*, 123, 280-297.
14. Liu, Y. Y., Parinussa, R. M., Dorigo, W. A., De Jeu, R. A. M., Wagner, W., Van Dijk, A. I. J. M., ... & Evans, J. P. (2011). Developing an improved soil moisture dataset by blending passive and active microwave satellite-based retrievals. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(2), 425-436.
15. Araghi, A., Baygi, M. M., Adamowski, J., Malard, J., Nalley, D., & Hasheminia, S. M. (2015). Using wavelet transforms to estimate surface temperature trends and dominant periodicities in Iran based on gridded reanalysis data. *Atmospheric Research*, 155, 52-72.
16. Kerr, Y. H., Waldteufel, P., Richaume, P., Wigneron, J. P., Ferrazzoli, P., Mahmoodi, A., ... & Delwart, S. (2012). The SMOS soil moisture retrieval algorithm. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 50(5), 1384-1403.
17. Balsamo, G., Albergel, C., Beljaars, A., Boussetta, S., Brun, E., Cloke, H., Dee, D., Dutra, E., Muñoz-Sabater, J., Pappenberger, F., de Rosnay, P., Stockdale, T., and Vitart, F. (2015). ERA-Interim/Land: a global land surface reanalysis data set. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 389-407.
18. Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., ... & Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), 553-597.
19. CATDS, website: <<http://catds.ifremer.fr/>>.
20. Wagner, W., Dorigo, W., de Jeu, R., Fernandez, D., Benveniste, J., Haas, E., & Ertl, M. (2012). Fusion of active and passive microwave observations to create an essential climate variable data record on soil moisture. In *XXII ISPRS Congress*, Melbourne, Australia, 315-321.
21. ESA CCI, website: <<http://www.esa-soilmoisture-cci.org/>>.
22. Iran meteorological organization, website: <<http://irimo.ir>>.
23. Brocca, L., Moramarco, T., Melone, F., Wagner, W., Hasenauer, S., & Hahn, S. (2012). Assimilation of surface-and root-zone ASCAT soil moisture products into rainfall-runoff modeling. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 50(7), 2542-2555.

۲۴. علیزاده، ا. (۱۳۹۰). "اصول هیدرولوژی کاربردی" چاپ سی و سوم، انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد، ص ۷۹۴.

۲۵. علیزاده، ا. (۱۳۹۰). "اصول هیدرولوژی کاربردی" چاپ سی و سوم، انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد، ص ۲۸۰.

26. McKee TB, Doesken NJ, Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Preprints, Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Anaheim, CA*. 174–184.
27. Hayes, M.J., Svoboda, M.D., Wilhite, D.A., Vanyarkho, O. 1999. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bulletin of the American Meteorological Society* 80(3): 429–438.
28. Brocca, L., Melone, F., & Moramarco, T. (2008). On the estimation of antecedent wetness conditions in rainfall–runoff modelling. *Hydrological Processes*, 22(5), 629–642.
29. Famiglietti, J. S., & Wood, E. F. (1994). Multiscale modeling of spatially variable water and energy balance processes. *Water Resources Research*, 30(11).
30. Pruitt, W. O., & Doorenbos, J. (1977). Background and development of methods to predict reference crop evapotranspiration (ET<sub>o</sub>). *Guidelines for predicting crop water requirements*, (24), 108–119.
31. Tabari H., Abghari H., Hosseinzadeh Talaei P. (2012) Temporal trends and spatial characteristics of drought and rainfall in arid and semiarid regions of Iran, *Hydrological Processes*, 26, 3351–3361.
32. Tabari H., Nikbakht J., Hosseinzadeh Talaei P. (2013) Hydrological Drought Assessment in Northwestern Iran Based on Streamflow Drought Index (SDI), *Water Resources Management*, 27, 137–151.
33. Hashemi Devin M., Ahangarzadeh Z. (2013) Drought Monitoring in North Khorasan using GIS, 1<sup>st</sup> national conference on climatology of Iran, Kerman, Iran, May 2013.

## Abstract

Soil moisture (SM) plays a fundamental role for many hydrological applications including water resources management, drought analysis, agriculture, and climate variability and extremes. SM is not measured in most parts of Iran and limited measurements do not meet required temporal and spatial resolution for many applications. Hence, due to ease of operation, their global coverage and demonstrated accuracy, use of remote sensing SM products is almost the only way for deriving SM information in Iran. In the present research, SM datasets in six subregions of Iran with different climate conditions were extracted from two satellite-based passive (SMOSL3) and active + passive (ESA CCI SM) microwave observations, and two reanalysis (ERA-Interim and ERA-Interim/Land) products. Time series of averaged monthly mean SSM products and in situ ground precipitation and temperature measurements were derived for each subregion. Results revealed that, generally, all SSM products were in good agreement with each other with correlation coefficients higher than 0.5. The better agreement was found in the Northeast and Southwest regions with average correlation values equal to 0.88 and 0.91, respectively. It should be noted that the SSM datasets are characterized by different periods and lengths. Hence, results should be assessed with cautious. Also, trend analysis showed no trend for time series of monthly SSM over all subregions in the two periods 1980-1999 and 2000-2014. The only exceptions were the Southeast subregion for ERA-Interim and Center and Northwest subregions for the ESA CCI SM for which a negative trend was detected for the period 2000-2014. Finally, the Standardized Soil Moisture Index (SSI) calculated from ERA-Interim, ERA-I/Land and ESA CCI SM datasets showed that the Center and Southeast regions suffered from the most severe and longest-lasting drought events in the last decade. Also, SM values at four stations of Iran with different climate conditions were simulated using soil water balance model (SWBM) which were compared with ERA-I/Land SM data as an observed data. Results revealed that time series of simulated SM data using the SWBM model have a good correlation with ERA-I/Land SM data at subtropical and semiarid stations of the country.

**Keywords:** Remote sensing sensors, Soil moisture, Correlation, Drought analysis, Simulation, Iran.



**University of Shahrood**  
**Faculty of Civil Engineering**

**Soil moisture routing using remote sensing products**

**Abdolaziz Rahmani kam**

**Supervisor**  
**Saeed Golian**

**Advisor**  
**Luca Brocca**

**September 2015**