

## مدل‌سازی سطوح مختلف رطوبت خاک سطحی در گستره‌ی داده‌های حرارتی و انعکاسی

ابوالقاسم دادرسی سبزوار\* - دانشجوی دکتری هیدرولوژی و منابع آب دانشگاه شهید چمران اهواز  
علی محمد آخوندعلی - استاد دانشگاه شهید چمران اهواز  
فریدون رادمنش - استادیار دانشگاه شهید چمران اهواز  
علی اکبر نوروزی - استادیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور

پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۴/۰۹      تأیید نهایی: ۱۳۹۴/۱۰/۱۹

### چکیده

رطوبت خاک یکی از مهم‌ترین متغیرهای محیطی است و شناخت تغییرات مکانی و زمانی آن، بینش ارزشمندی را در مطالعه مراحل مختلف هیدرولوژیکی و مدل‌های آب و هوایی به همراه دارد. هدف از پژوهش، دسترسی به پایگاه‌های دور یا بیرون از دست رطوبت خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. داده‌های ماهواره‌ای لندست ۸ در منطقه‌ی خشک و نیمه‌خشکی از استان خراسان رضوی تهیه و پس از آماده‌سازی و پیش پردازش، به همراه مقادیر محاسبه‌شده‌ی چندین نمایه‌ی طیفی، تجزیه‌ی مؤلفه‌های اصلی و تبدیل داده‌ی تسلدکپ، به‌عنوان متغیرهای پیش‌بینی کننده، مورد استفاده قرار گرفتند. به روش آمار مکانی شاخص مورانز توأم با شاخص خوشه‌بندی حداقل - حداکثر، همبستگی جغرافیایی داده‌ها بررسی شد. همبسته‌ترین متغیرها نیز به روش رگرسیون اکتشافی و روش همبستگی دومتغیره، با محاسبه‌ی عامل تورم واریانس، ضریب پیرسون و ضریب تعیین، در سه سطح رطوبتی مساوی یا بیشتر از ۵٪، ۴ تا ۵ درصد و مساوی یا کمتر از ۴٪، مشخص شدند. پی‌ریزی توابع تخمین رطوبت سطحی خاک نیز، با هفت روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR)، رگرسیون چندگانه‌ی گام‌به‌گام، رگرسیون چندگانه‌ی پس حذف‌رو، رگرسیون چندگانه‌ی پیش‌رو، رگرسیون چندگانه‌ی وارد شونده، رگرسیون چندگانه‌ی عزل و آزمون اعتبار متقاطع درختی (M5P) انجام گرفت. ۱۸۸ نمونه خاک هم‌زمان با گذر ماهواره از منطقه برداشت و ۲۵ درصد آن‌ها با انتخاب تصادفی، در مرحله اعتبارسنجی استفاده شدند. بررسی دقت توابع و معرفی دقیق‌ترین مدل‌ها، با محاسبه‌ی ۵ معیار خطاسنجی انجام شد که نتایج حاصل از مقایسه‌ی آماره‌های خطاسنجی در گام نهایی، به معرفی سه مدل برای سه سطح رطوبتی مورد نظر ختم گردید. نتایج نشان دادند که تصاویر ماهواره، توانایی مناسبی برای تخمین رطوبت سطحی خاک دارند و مدل‌های معرفی‌شده، از ضریب همبستگی مناسب بیشتر از  $0/5$  ( $0/504$  تا  $0/618$ ) برخوردارند. نتایج اعتبارسنجی مدل نیز نشان داد که روش تحقیق از دقت مناسبی ( $1/425$  تا  $0/585$ ،  $RMSE=$  و خطای نسبی ۵ درصد)، در تخمین رطوبت سطحی خاک برخوردار است. میانگین خطای اریب در مدل‌های معرفی‌شده غالباً کمتر از یک است، با این وجود مقدار این آماره تمایل به بیش برآوری را در مدل معرفی‌شده برای سطح رطوبتی  $5\% \geq$  و تمایل به کم برآوری را برای دو مدل معرفی‌شده‌ی دیگر نشان می‌دهد. نسبت انحراف کارایی مدل‌ها (RPD) نیز با احتساب انحراف معیار ( $1/158$  تا  $0/221$ )،  $SD=$  تا  $0/38$  برآورد شد.

واژگان کلیدی: هیدرولوژی، خشک و نیمه‌خشک، سنجش از دور، شاخص‌های طیفی، سبزوار.

## مقدمه

رطوبت خاک یکی از اجزاء مهم مدل‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی است، (راینسون<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۸: ۳۵۹؛ بلوم<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۹: ۱۲۱۶؛ زیه<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۰: ۳۵۲؛ زی<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۰۲)، که بخش قابل توجهی از مطالعات مربوط به خشکسالی را نیز به خود اختصاص داده است. این پارامتر، به شدت در زمان‌ها و مکان‌های مختلف متنوع و مقدار آن در هر منطقه نسبت به زمان و مکان تغییر می‌کند (روزنباوم<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۲: ۲). به دلیل دشواری در اندازه‌گیری‌های پیوسته‌ی رطوبت خاک به لحاظ مکانی و زمانی و پرهزینه و وقت‌گیر بودن اندازه‌گیری‌های میدانی که عملاً انجام آن را به‌ویژه در مناطق صعب‌العبور، کوهستانی و وسیع، غیرعملی می‌سازد، تاکنون به‌طور گسترده در مدل‌های آب و هوایی استفاده نشده است (بابازاده و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۲۱؛ ویلسون<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۰۳: ۲۵۵). چنانچه بتوان ارتباطی بین داده‌های رطوبت خاک برقرار نمود، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای قادر خواهد بود، تخمین رطوبت خاک در سطح حوزه را تسهیل و دسترسی به نقاط دور یا خارج از دسترس را فراهم کند. این پژوهش به دنبال یافتن این ارتباط است. داده‌های سنجنش‌ازدور که بر مبنای تباين زياد بين خواص دي‌الکتريک آب‌وخاک خشک عمل می‌کنند و دید گسترده، تصویربرداری منظم، رؤیت مناطق غیرقابل دسترس و سرعت بالای دسترسی به اطلاعات از ویژگی‌های مهم آن‌ها به شمار می‌آید، پتانسیل بالایی برای تخمین ناحیه‌ای رطوبت خاک، نسبت به اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای دارند (انگمن و گودنی، ۱۳۸۳: ۸۶؛ لگتس<sup>۷</sup>، ۲۰۰۰: ۲۳۴-۲۳۵).

روش‌های متعددی برای تخمین رطوبت خاک در سطح وسیع و به روش سنجنش‌ازدور وجود دارد. استفاده از ابزارهای سنجنش با کمک امواج نوری (وانگ و همکاران، ۲۰۰۷ و لیونز و وهاست<sup>۸</sup>، ۲۰۱۲)؛ ماکروویو (فترس<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۱۲ و شامپین<sup>۱۰</sup> و همکاران، ۲۰۱۱)؛ الکترومغناطیس رادیویی (شتک و همکاران، ۲۰۰۸ و زی و همکاران، ۲۰۱۳) و یا استفاده از ابزار نانو تکنولوژی و حسگرهای میکروالکترومکانیک (جکسون<sup>۱۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۸ و ای دی و سیفاک<sup>۱۲</sup>، ۲۰۰۹) از آن جمله‌اند. باین‌حال، وجود ظرفیت‌های بالقوه در روش‌های سنجنش‌ازدور انعکاسی و حرارتی، پژوهشگران زیادی را به تلاش و تحقیق بر روی تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک، با استفاده از این روش ترغیب کرده است. سؤالات این پژوهش عمدتاً در خصوص توانایی داده‌های انعکاسی و حرارتی ماهواره در تخمین رطوبت سطحی خاک و اشتقاق الگوریتمی برای توزیع مکانی رطوبت سطحی خاک، در سطوح رطوبتی مختلف، مرتبط با تصاویر ماهواره‌ای، در مناطق خشک و نیمه‌خشک متمرکز است.

پژوهش‌های ارزشمندی در زمینه‌ی تخمین رطوبت خاک با استفاده از داده‌های دورسنجی انجام شده است و روش‌های متعددی ایجاد یا بهبود یافته‌اند، باین‌وجود، بررسی در منابع قابل دسترس، تنها وجود تعدادی محدود تحقیق مرتبط را در کشور نشان می‌دهد. نوروزی اقدم و همکاران (۱۳۸۷) در مراتع خراسان رضوی رابطه‌ی رطوبت میدانی سطحی خاک، با  $NDVI^{13}$ ‌های تأخیری و هم‌زمان، حاصل از تصاویر سنجنده  $MODIS^{14}$  را به روش استفاده از رگرسیون ساده خطی

1 Robinson

2 Blume

3 Zhao

4 Zhe

5 Rosenbaum

6 Wilson

7 Legates

8 Lievens &amp; Verhoest

9 Fatras

10 Champagne

11 Jackson

12 Ayday &amp; Safak

13. Normalized Difference Vegetation Index

2. Moderate Resolution Imaging Spectrometer

مطالعه کردند و همبستگی معنی‌داری بین رطوبت لایه‌ی سطحی خاک و NDVI تأخیری ۱۵ روزه تصاویر مودیس، به دست آوردند. در تحقیق کشاورز و همکاران (۱۳۹۰)، شاخص خیسی<sup>۱</sup> SWI مورد استفاده قرار گرفته و با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای مادیس، روند تغییرات رطوبت خاک طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۵ در سطح استان اصفهان، مطالعه شده است. این محققین نتیجه‌گیری کرده‌اند که پایش رطوبت از طریق تصاویر ماهواره به منظور بررسی روند تغییرات رطوبتی در مناطقی مانند اکثر مناطق ایران که پیشینه تاریخی رطوبتی ثبت نشده است، می‌تواند جایگزین مناسبی برای نمونه‌برداری مستقیم رطوبت باشد. بابازاده و همکاران (۱۳۹۱) روش تحقیق نوروزی اقدام و همکاران (۱۳۸۷) را بهبود بخشیده و با اضافه نمودن شاخص دما در تحقیق،<sup>۳</sup> شاخص NDVI، دمای درخشندگی<sup>۲</sup> و دمای سطح زمین<sup>۳</sup> را از تصاویر مودیس استخراج و امکان برآورد رطوبت سطحی خاک با استفاده از آن‌ها در استان خراسان رضوی را مطالعه کردند. نتایج این تحقیق همبستگی معنی‌داری را بین NDVI و دمای سطح زمین با رطوبت سطحی خاک نشان داد، به‌گونه‌ای که تخمین قابل قبولی از رطوبت لایه‌ی سطحی خاک با استفاده از تصاویر سنجنده‌ی مودیس در اراضی مرتعی مناطق خشک و نیمه‌خشک، امکان‌پذیر گشت. بابائیان و همکاران (۱۳۹۲) برای حذف تاثیر شرایط اتمسفری، داده‌های میکروموج هشت تصویر از باند C سنجنده‌ی ASAR<sup>۴</sup> با روش تصویربرداری حالت جهانی<sup>۵</sup> در پلاریزاسیون HH (وضوح ۳۰ تا ۱۵۰ متر) را برای تخمین رطوبت خاک در بخشی از حوزه آبخیز زنجانرود، استفاده کردند. نتایج تحقیق نشان داد که حالت GM داده‌های ENVIAT<sup>۶</sup>/ASAR، می‌تواند در مناطق نیمه‌خشک و در شرایط عدم وجود پوشش گیاهی، در برآورد رطوبت سطحی خاک مورد استفاده قرار گیرد.

در سایر نقاط دنیا تحقیقات بیشتری در این زمینه انجام شده است. در چین، تحقیقی توسط وانگ و همکاران (۲۰۱۰) با کاربرد داده‌های دو سنجنده TM<sup>۷</sup> و ETM<sup>۸</sup> و استفاده از دو شاخص NDVI و TVDI<sup>۹</sup> انجام و تغییرات رطوبت سطح خاک طی ۱۸ سال دیده‌بانی شد. نتایج تحقیق منجر به مدلی گردید که ارتباط مستقیم خطی بین TVDI و رطوبت سطح خاک را نشان می‌داد. ژائو<sup>۱۰</sup> و همکاران (۲۰۱۰) در چین از مقایسه‌ی نتایج میدانی رطوبت خاک با مقادیر تخمین زده‌شده و کاربرد تصاویر ماهواره مودیس، به یک مدل لگاریتمی دست یافتند که قادر است در اراضی با پوشش گیاهی فقیر، رطوبت را با کمک LST<sup>۱۱</sup> و NDVI تصاویر مودیس، با دقت قابل قبولی تخمین بزند. نتایج تحقیق انجام‌شده توسط لی<sup>۱۲</sup> و همکاران (۲۰۱۱)، که با استفاده از دو سنسور فعال و غیرفعال و اندازه‌گیری شاخص BT انجام گردید، نشان داد که امواج مایکروویو پتانسیل بالایی در تخمین رطوبت خاک دارند. روش برای دیده‌بانی رطوبت خاک شامل ۲ روش مبتنی بر استفاده از امواج مایکروویو ماهواره فعال AMSR-E<sup>۱۳</sup> و روش مبتنی بر استفاده از داده‌های اقلیمی، توسط شامپاین<sup>۱۴</sup> و همکاران (۲۰۱۱) در استرالیا مورد مطالعه قرار گرفت. محققین دریافتند چنانچه داده‌های مایکروویو ماهواره در فواصل زمانی کوتاه‌تری در دسترس باشند، نتایج پایش رطوبت خاک قابل‌اعتمادتر خواهد بود. انتخاب

1. Soil Moisture Index

4. Brightness Temperature (BT)

5. Land Surface Temperature (LST)

6. Advanced Synthetic Aperture Radar

5. Global Mode (GM)

6. Environmental Satellite

7. Thematic Mapper

8. Enhanced Thematic Mapper plus

9. Temperature Vegetation Dryness Index

10. Zhao

11. Land Surface Temperature

12. Li

13. Advanced Microwave Scanning Radiometer - Earth Observing System

14. Champagne

داده‌های سنجنده مودیس، LST، NDVI و TVDI، الگوریتم تحقیق انجام‌گرفته‌ی چن<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۱) در دلنای مکنونگ ویتنام را تشکیل می‌داد. در این بررسی شاخص TVDI با آنالیز پارامتری بین درجه حرارت سطح خاک (LST) و NDVI حاصل از تصاویر مودیس محاسبه و رطوبت خاک در منطقه‌ی موردپژوهش با آن تخمین زده شد. ارزیابی صحت روش از مقایسه‌ی نتایج با داده‌های میدانی رطوبت خاک میسر گشت و نتایج نشان داد، استفاده از داده‌های مودیس و به‌کارگیری شاخص‌های منتخب، برای تخمین رطوبت سطح خاک، با دقت قابل قبولی امکان‌پذیر است. توسط لو<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۲) در فلات تبت، داده‌های میکروویو امواج الکترومغناطیسی AMSR-E و شاخص BT استفاده و نتایج منجر به ارائه‌ی مدلی برای شبیه‌سازی رطوبت خاک گردید. در هلند سری داده‌های میکروویو رادارست ۲ در منطقه‌ای تقریباً لخت استفاده و تغییرات زمانی و مکانی رطوبت خاک موردبررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که ارتباط محکمی بین داده‌های رطوبت خاک و امواج میکروویو به‌ویژه در مناطقی با زبری سطح متوسط، وجود دارد (لیونز و ورهاست<sup>۳</sup>، ۲۰۱۲). توسط رحیم‌زاده<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۳) داده‌های باند حرارتی مودیس و برخی EF<sup>۵</sup> در بخشی از کانادا به کار گرفته شد و با توجه به درجه حرارت سطح خاک و فاکتور پوشش گیاهی، رطوبت سطح خاک مطالعه گردید. داده‌ها با داده‌های مرجع مقایسه و نتیجه‌ی تحقیق منجر به رابطه‌ی آماری قابل‌پذیرشی بین رطوبت خاک و حالات موردبررسی گردید، به‌گونه‌ای که تخمین رطوبت خاک با روش استفاده از EF، با دقت قابل قبولی تأیید شد. گائو<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۳) در کشور چین، داده‌های باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک سنجنده‌های TM<sup>+</sup> و ETM<sup>+</sup> را در یک مزرعه آزمایشی برای تخمین رطوبت سطح خاک از پوشش گیاهی استفاده کردند. نتایج تحقیق این پژوهشگران نشان داد که امواج الکترومغناطیس در محدوده‌ی مادون قرمز نزدیک، همخوانی بیشتری با رطوبت سطح خاک، در مقایسه با امواج باند قرمز دارد. در مطالعه‌ی توسط گوا<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۳)، تلفیقی از سنجش‌ازدور فعال و سنسور غیر تماسی، برای بررسی تغییرات مکانی رطوبت و شوری خاک در یک منطقه‌ی ساحلی از کشور چین به کار گرفته شد. نتایج بررسی‌های این پژوهشگران نشان داد که این تلفیق، مؤثر و قابل‌پذیرش برای تخمین رطوبت خاک در مناطق ساحلی می‌باشد. الگوریتمی برای تخمین رطوبت سطحی خاک بر اساس ترکیبی از داده‌های SMOS<sup>۸</sup> و امواج میکروویو AMSR-E توسط فانگ و لاکشمی<sup>۹</sup> (۲۰۱۴) در ایالت اکولاهومای امریکا ارائه شد و از مقایسه‌ی نتایج مدل با داده‌های میدانی، نتایج دلگرم‌کننده‌ای برای امکان تخمین رطوبت خاک با روش تحقیق انجام‌شده، به دست آمد. در تحقیق دیگری، ۵ شاخص NDVI<sup>۱۰</sup>، NDMI<sup>۱۱</sup>، NDWI<sup>۱۱</sup>، LST و BT با کمک ترکیبی از دو سری داده دورسنجی شامل داده‌های میکروویو SMOS و داده‌های مادون قرمز کوتاه و مادون قرمز نزدیک از سنجنده مودیس محاسبه و برای تخمین رطوبت سطحی خاک در منطقه‌ای از اسپانیا مورد استفاده قرار گرفت. نتیجه‌ی این بررسی منجر به ارتباط قابل قبولی بین رطوبت خاک و داده‌های سنجش‌ازدور شد (سانچز<sup>۱۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۴).

همان‌گونه که از سابقه تحقیق ملاحظه می‌شود، تمامی پژوهش‌های گذشته در سه دسته‌ی غیرمستقیم، مستقیم و ترکیبی قابل تقسیم‌بندی هستند. در روش‌های غیرمستقیم بیشتر از تصاویر مادون قرمز برای تخمین استفاده شده است و

1 Chen

2 Lu

3 Lievens &amp; Verhoest

4 Rahimzadeh

5 Evaporative Fraction

6 Gao

7 Guo

8 Soil Moisture and Ocean Salinity

9 Fang &amp; Lakshmi

10 Normalized Difference Moisture Index

11 Normalized Difference Water Index

12 Sanchez

بر اساس دمای سطح زمین یا برخی دیگر از خصوصیات این امواج، رطوبت سطحی خاک تخمین زده شده است، اما در روش‌های مستقیم، میکروویو غیرفعال استفاده شده است. در روش ترکیبی، هر دو روش یعنی استفاده از داده‌های مادون قرمز با قدرت تفکیک زمانی بالا، در کنار داده‌های میکروویو غیرفعال که علیرغم پایین بودن قدرت تفکیک زمانی، امکان عبور از ابر برایشان فراهم است، توأم به کار گرفته شده‌اند. در بسیاری از پژوهش‌های گذشته، تعداد شاخص‌هایی که توأم در تحقیق به کار گرفته شده است، معمولاً از شش متغیر کمتر بوده‌اند. در بررسی حاضر، افزون بر استفاده توأم از ۷ نمایه‌ی طیفی<sup>۱</sup>، EVI، NDMI، NDVI، SAVI<sup>۲</sup>، NDWI، MSAVI<sup>۳</sup> و MNDWI<sup>۴</sup>، از دو تکنیک پایش انتقال طیفی تسلدکپ<sup>۵</sup> و تجزیه‌ی مؤلفه‌های اصلی<sup>۶</sup> نیز هم‌زمان استفاده شده است به طوری که تعداد متغیرهای دخیل در تحقیق را به ۱۳ متغیر رسانده است. گستره‌ی طول موج مورداستفاده در تحقیقات گذشته، از حداقل ۷۲۰ نانومتر در مادون قرمز نزدیک تا حداکثر ۱۱۰۰۰ نانومتر برای مادون قرمز حرارتی و امواج میکروویو استوار بوده است، که در تحقیق حاضر از ۴۳۳ تا ۱۲۵۰۰ نانومتر، بهبود یافته است. و بالاخره از دیگر نوآوری‌های تحقیق حاضر، تخمین رطوبت خاک از تصاویر ماهواره در چند سطح رطوبتی است، که در هیچ‌کدام از پژوهش‌های قبلی انجام نشده است. تحقیق حاضر به دنبال مدل‌سازی سطوح مختلف رطوبت خاک سطحی در گستره‌ی داده‌های حرارتی و انعکاسی از ۴۳۳ تا ۱۲۵۰۰ نانومتر، توأم با ۱۳ نمایه‌ی طیفی و شاخص عددی، در منطقه‌ای خشک و نیمه‌خشک از استان خراسان رضوی می‌باشد.

### معرفی منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه‌ی مورد مطالعه در ۴۳ کیلومتری غرب شهر سبزوار و ۳۲ کیلومتری شرق شهر داورزن از شهرستان‌های خراسان رضوی (شکل ۱)، در حاشیه جاده ترانزیتی مشهد به تهران، بین دو طول جغرافیایی ۳۸° ۴۸' ۵۶" و ۵۶° ۲۶' ۵۷" و دو عرض جغرافیایی ۱۶° ۹' ۳۶" و ۱۸° ۲۳' ۳۶"، قرار گرفته است. این منطقه در لیست حوزه‌های آبخیز درجه‌بندی شده‌ی تماب (موسسه تحقیقات آب کشور)، با کد ۴۷۶۴۲۲ و نام ریوند درج شده است. ارتفاع نواحی مختلف این منطقه از ۱۰۵۰ متر در خروجی حوزه تا ۲۸۰۰ متر در منتهی الیه شمال شرقی، تغییر می‌کند. بر اساس نقشه رژیم رطوبتی خاک‌های ایران که بر مبنای اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی کشور در سال ۱۳۵۶ و با مقیاس ۱/۴۰۰۰۰۰، توسط موسسه تحقیقات خاک و آب تهیه شده است، محدوده مورد مطالعه دارای رژیم رطوبتی اریدیک می‌باشد. اقلیم در منطقه، خشک و نیمه‌خشک است. از مجموع ۳۵۲۷۱ هکتار مساحت زیر حوزه‌ها، ۲۲۱۷۱ هکتار کوهستان و تپه و الباقی با حدود ۱۳۱۰۰ هکتار، آبرفت می‌باشد. سطح پژوهش بخش آبرفت منطقه است که در شیب جنوبی ارتفاعات کوه‌های جغتای، سفید مهر، شملق و گر، به صورت شرقی غربی واقع شده و امکان اندازه‌گیری مستقیم رطوبت خاک در این بخش از حوزه فراهم است.

1 Enhanced Vegetation Index

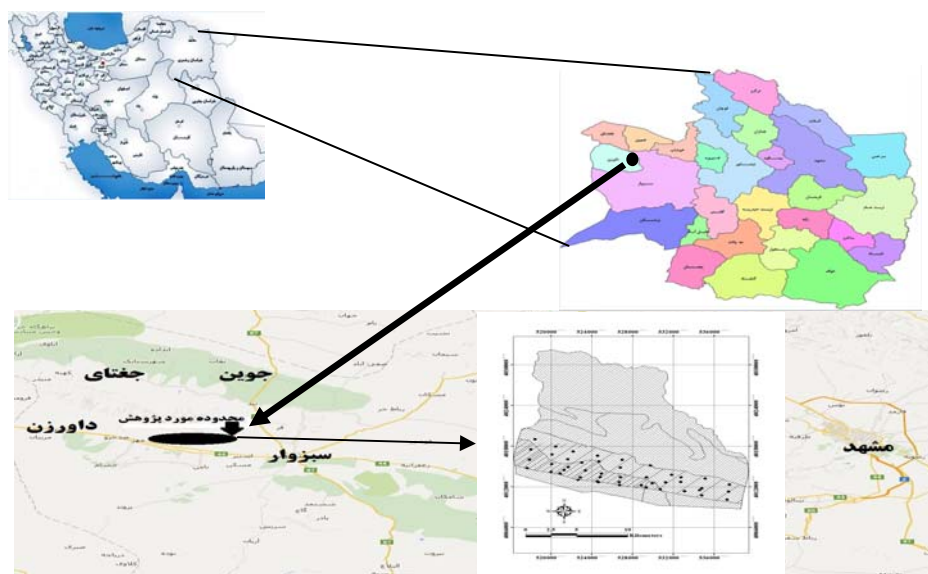
2 Soil-Adjusted Vegetation Index

3 Modified Soil Adjusted Vegetation Index

4 Modified Normalized Difference Water Index

5 Tasseled Cap Transformation

6 Principal Components Analysis



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد تحقیق

## مواد و روش‌ها

### داده‌های ماهواره‌ای

ماهواره‌های سنجنش‌ازدور، امواج الکترومغناطیس بازتابی از عوارض سطح زمین را اندازه‌گیری و امکان دسترسی به بسیاری از اطلاعات سطح زمین را فراهم می‌آورند. در این پژوهش، داده‌های چند طیفی از ماهواره لندست ۸، مربوط به مسیر ۱۶۱ و ردیف ۳۵ در ۴ زمان به تاریخ‌های ۵ فوریه ۲۰۱۵، ۲۶ آوریل ۲۰۱۵، ۳۱ جولای ۲۰۱۵ و ۱۹ اکتبر ۲۰۱۵ استفاده شده است. این ماهواره، که تداوم مأموریت تصویربرداری لندست‌های قبلی<sup>۱</sup> (LDCM) برای توسعه‌ی بیش از ۴۰ سال تصویربرداری زمینی را به عهده دارد، جدیدترین ماهواره سری لندست سازمان فضایی امریکا (ناسا) است، که در ۱۱ فوریه سال ۲۰۱۳ به فضا پرتاب شد و اولین تصویر آن در ۱۸ مارس ۲۰۱۳ اخذ گردید. دو سنسور، یکی سنسور عملیاتی تصویرساز زمین<sup>۲</sup> و دیگری سنسور حرارتی مادون‌قرمز<sup>۳</sup> به ترتیب امکان تهیه‌ی اطلاعات تصویر برای نه باند موج کوتاه و دو باند طول موج حرارتی ماهواره‌ی لندست ۸ را فراهم می‌سازند. امکان تهیه‌ی هم‌زمان داده‌های لندست ۸ با تاریخ عملیات میدانی تعیین رطوبت خاک، وجود تکنولوژی پیشرفته‌تر این ماهواره نسبت به سایر ماهواره‌های سری خود که با بهبود نسبت سیگنال به نویز<sup>۴</sup> و افزایش تعداد آشکارسازها، کیفیت تصویر را بهبود بخشیده است، قابلیت تفکیک مکانی، زمانی و طیفی مناسب و سابقه‌ی استفاده از سنجنده‌های لندست‌های گذشته در تحقیقات مرتبط که به لحاظ هندسه‌ی اخذ داده، کالیبراسیون، خصوصیات پوشش، ویژگی‌های طیفی و در دسترس بودن داده، مشابه لندست ۸ می‌باشند، دلایل اصلی انتخاب این ماهواره در پژوهش فعلی است. محصول با تصحیحات هندسی است و تصحیحات رادیومتریک مربوط به سنجنده و اتمسفر به‌عنوان پیش‌پردازش توسط ENVI5.1، صورت گرفت. اصلاح مربوط به تغییر ولتاژ به<sup>۵</sup> DN برای تبدیل داده‌های رادیانس<sup>۶</sup>، توسط فایل کالیبراسیون سنجنده و اصلاح رادیومتریک داده‌ها، با استفاده از روش دامنه مسطح انجام شد.<sup>۷</sup>

1 Landsat Data Continuity Mission

2Operational Land Imager (OLI)

3Thermal InfraRed Sensor (TIRS)

4Signal to Noise Ratio (SNR)

5Digital Numbers

6Radiance

7ENVI5.1 - File-Open - ....MLT- Open - Data Manager - Band Selection - TCC(RGB) - Load Data - Region of Interest - Accept -

### فرآیند محاسبات شاخص‌های طیفی

در پژوهش حاضر، از شاخص‌های متعددی استفاده شد، تا تأثیر منفی کمبود پوشش گیاهی بر تصاویر ماهواره کاهش یابد. ۱۳ شاخص ماهواره‌ای و ۱۱ باند تصویر ماهواره لندست ۸، مجموعاً ۲۴ متغیر، مندرج در جدول ۱، در تحقیق به کار گرفته شدند.

### داده‌های زمینی

تعداد و انتخاب موقعیت نقاط نمونه‌برداری میدانی رطوبت خاک در سطح منطقه‌ی مورد تحقیق، با روش تصادفی طبقه‌بندی شده و به روش سیستماتیک و با ایجاد شبکه‌های ۱۸۰۰ متری، نهایی شدند. ۱۸۸ نقطه (در ۴ تکرار) به این ترتیب انتخاب شد و مقادیر رطوبت وزنی لایه‌ی سطحی خاک (۰-۱۵ سانتی‌متر) در آن‌ها به صورت مقدار متوسط در یک شعاع ۳۰ متری به روش مستقیم وزنی- حرارتی، که به عنوان روشی دقیق جهت واسنجی سایر ابزارهای اندازه‌گیری رطوبت خاک مطرح است (گرینوف و نابو، ۱۹۸۷: ۸۱)، تعیین شد. نمونه‌ها در ۱۳۹۳/۱۱/۱۶، ۱۳۹۴/۲/۶، ۱۳۹۴/۵/۹ و ۱۳۹۴/۷/۲۷ و هم‌زمان با گذر ماهواره از منطقه (۵ فوریه ۲۰۱۵، ۲۶ آوریل ۲۰۱۵، ۳۱ جولای ۲۰۱۵ و ۱۹ اکتبر ۲۰۱۵)، برداشت شدند. ۲۵ درصد داده‌ها به طور تصادفی به عنوان سری داده‌های اعتبار سنجی، در مرحله‌ی استخراج مدل، مورد استفاده قرار گرفتند. مختصات جغرافیایی نقاط مورد نظر از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۰۰۰۰ منطقه یادداشت‌برداری و در عملیات صحرائی با مکان‌یابی نقاط از پیش تعیین شده توسط یک دستگاه GPS<sup>۱</sup> (موقعیت‌یاب جهانی)، نمونه‌برداری خاک، انجام شد. شکل ۲، موقعیت داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی را در سطح منطقه‌ی تحقیق، نشان می‌دهد.

### ارتباط بین مقادیر واقعی رطوبت سطحی و نمایه‌های طیفی و آزمون دقت

توسعه‌ی دانش تجربی با استفاده از تحلیل داده‌های میدانی یا تجربی، نتیجه‌ی علم آمار است که برخورداری از زمینه‌های رو به افزون نرم‌افزارهای رایانه‌ای، توسعه‌ی این علم پر سابقه را موجب شده است. در حال حاضر دو شیوه برای انجام تحلیل‌های آماری وجود دارد. یکی آمار مبتنی بر سامانه‌های اطلاعات مکانی که از سال ۲۰۱۲ به کمک نرم‌افزارهای GIS قابل انجام است و دیگری آمار کلاسیک که نرم‌افزارهای متعددی جهت انجام آن توسعه یافته است. گرچه نتایج منتج از محاسبات آماری به خاطر ناکاملی اطلاعات، همیشه احتمالی‌اند، با این وجود استفاده‌ی توأم از این دو روش در پژوهش حاضر، تحلیل‌ها را کامل‌تر ساخته و نتایج را قابل اعتمادتر می‌سازد.

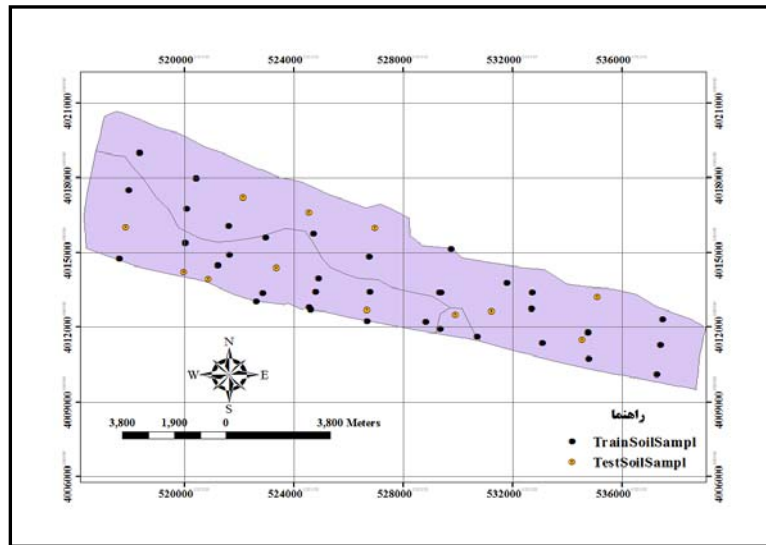
جدول ۱: نمایه‌های رطوبتی، نسبت‌گیری‌های باندی، باندهای طیفی و شاخص‌های گیاهی مورد استفاده

ردیف	نمایه	دامنه <sup>۱</sup>	ملاحظات	منبع
۱	NDWI	$(\rho \text{ Green} - \rho \text{ NIR}) / (\rho \text{ Green} + \rho \text{ NIR})$	آب دارای ارزش مثبت	Gao(1996)
۲	MNDWI	$(\rho \text{ Green} - \rho \text{ MIR}) / (\rho \text{ Green} + \rho \text{ MIR})$	آب دارای ارزش مثبت	Xu, Hanqiu (2006)
۳	SAVI	$((\rho \text{ NIR} - \rho \text{ Red}) / (\rho \text{ NIR} + \rho \text{ Red} + L)) * (1 + L)$	مناطق با پوشش گیاهی بالا $L=0$ سطوح فاقد پوشش گیاهی $L=1$ برای اغلب اراضی $L=0.5$	Huete (1988)
۴	MSAVI	$(1/2) * (2 \rho \text{ NIR} + 1) - \text{SquareRoot}((2 \rho \text{ NIR} + 1)^2 - 8(\rho \text{ NIR} - \rho \text{ Red}))$	MSANI <sub>n</sub>	Qi, J. et al., 1994
۵	EVI	$G * ((\rho \text{ NIR} - \rho \text{ Red}) / (\rho \text{ NIR} + C_1 * \rho \text{ Red} - C_2 * \rho \text{ Blue} + L))$	$G=2.5, C1=6.0, C2=7.5, L=1$ Huete et.al.(1997)	Liu & Huete (1995)
۶	NDVI	$(\rho \text{ NIR} - \rho \text{ Red}) / (\rho \text{ NIR} + \rho \text{ Red})$	آب دارای ارزش منفی	Rouse, J.W.; Haas, R.H.; Schell, J.A (1973)
۷	NDMI	$(\rho \text{ NIR} - \rho \text{ MIR}) / (\rho \text{ NIR} + \rho \text{ MIR})$	آب دارای ارزش مثبت	Shaunet al., (2003)
۸	PCA	PCA1	بالا ترین تغییرات	Karl Pearson(1901)
۹		PCA2	دامنه تغییرات بینابینی	
۱۰		PCA3	پایین ترین تغییرات	
۱۱	TAS	Brightness (TAS1)	شفافیت خاک	Kauth & Thomas (1976)
۱۲		Greenness (TAS2)	سبزی‌نگی پوشش گیاهی	
۱۳		Wetness (TAS3)	روابط متقابل پوشش گیاهی و رطوبت خاک	
۱۴	Band <sup>2</sup> 1	$0.451 - 0.435(\mu\text{m})$	ساحلی	NASA, (2015)
۱۵	Band 2	$0.512 - 0.452(\mu\text{m})$	آبی	
۱۶	Band 3	$0.590 - 0.525(\mu\text{m})$	سبز	
۱۷	Band 4	$0.673 - 0.636(\mu\text{m})$	قرمز	
۱۸	Band 5	$0.879 - 0.851(\mu\text{m})$	مادون قرمز نزدیک	
۱۹	Band 6	$1.651 - 1.566(\mu\text{m})$	مادون قرمز طول موج کوتاه	
۲۰	Band 7	$2.194 - 2.107(\mu\text{m})$	مادون قرمز طول موج کوتاه	
۲۱	Band 8	$0.676 - 0.502(\mu\text{m})$	پانکروماتیک	
۲۲	Band 9	$1.384 - 1.363(\mu\text{m})$	سیروس	
۲۳	Band 10	$11.19 - 10.60(\mu\text{m})$	مادون قرمز طول موج بلند	
۲۴	Band 11	$12.51 - 11.50(\mu\text{m})$	مادون قرمز طول موج بلند	

<sup>۱</sup>  $\rho \text{ Green}$ ،  $\rho \text{ NIR}$ ،  $\rho \text{ MIR}$ ،  $\rho \text{ Red}$  و  $\rho \text{ Blue}$  به ترتیب نشان دهنده‌ی مقادیر هر پیکسل در بازتاب طول موج سبز (۰/۵۲ تا ۰/۵۹۰  $\mu\text{m}$ )، مادون قرمز نزدیک (۰/۷۷ تا ۰/۸۸  $\mu\text{m}$ )، مادون قرمز میانی (۱/۱۰۷ تا ۱/۵۵  $\mu\text{m}$ )، قرمز (۰/۶۲ تا ۰/۶۸  $\mu\text{m}$ ) و آبی (۰/۴۵۲ تا ۰/۵۱۲  $\mu\text{m}$ ) می‌باشند.

<sup>۲</sup> مربوط به ماهواره لندست ۸





شکل ۲: موقعیت داده‌های واسنجی و اعتبارسنجی در سطح منطقه‌ی تحقیق

درجه‌ی ارتباط و شدت همبستگی جغرافیایی (فاصله بین نقاط، طول مرز مشترک و گروه‌بندی جهت) میان مشاهداتی که در همسایگی هم قرار دارند، به شیوه‌ی GIS و با استفاده از شاخص خوشه‌بندی حداقل-حداکثر<sup>۱</sup> با فرآیند اقلیدوسی<sup>۲</sup>، انجام شد. (گیتیز و اورد، ۱۹۹۲: ۱۹۴) تأکید دارند که شاخص خوشه‌بندی حداقل-حداکثر بایستی با شاخص مرانز (۱۹۵۰) به‌طور توأم مورد مقایسه قرار گیرد تا هم‌پوشانی کاملی از همبستگی مکانی نقاط، استنتاج شود. در این تحقیق شاخص Moran's I نیز با روش مکانی اقلیدوسی استفاده شد.

شدت و ضعف وابستگی آماری و تعیین جهت روابط بین رطوبت سطحی خاک (متغیر پیش‌بینی) با متغیرهای مستقل یا پیش‌بینی کننده‌ی تعریف‌شده در تحقیق، با روش رگرسیون اکتشافی<sup>۳</sup> در شیوه‌ی GIS و با روش همبستگی دومتغیره<sup>۴</sup>، در شیوه‌ی کلاسیک، انجام شد. به این ترتیب مقادیر عامل تورم واریانس<sup>۵</sup> و ضریب پیرسون<sup>۶</sup> محاسبه و سهم هر یک از متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته، تعیین شد.

به جهت ایجاد مدل و برای الحاق اندازه‌گیری‌های امواج الکترومغناطیس تصویر به‌گونه‌ای که ورودی‌ها مقادیر محاسبه‌شده‌ی شاخص‌های طیفی و خروجی آن رطوبت خاک (SM) باشد و با مشاهدات زمینی نیز همبستگی معنی‌داری داشته باشد، از ۷ روش برقراری رگرسیون در ۳ سطح رطوبتی: مساوی یا بزرگ‌تر از ۵ درصد، ۴ تا ۵ درصد و کوچک‌تر یا مساوی با ۴ درصد، استفاده و مجموعاً ۲۱ تابع استخراج شد. رگرسیون حداقل مربعات جزئی<sup>۷</sup> (PLSR)، رگرسیون چندگانه‌ی گام‌به‌گام<sup>۸</sup>، رگرسیون چندگانه‌ی پس حذف‌رو<sup>۹</sup>، رگرسیون چندگانه‌ی پیش‌رو<sup>۱۰</sup>، رگرسیون چندگانه‌ی وارد شونده<sup>۱۱</sup>، رگرسیون چندگانه‌ی عزل<sup>۱</sup> و آزمون اعتبار متقاطع درختی (M5P)<sup>۲</sup>، ۷ روش برآزش داده در تحقیق بودند. با توجه به نتایج حاصل از اقدامات آماری صدرا اشاره، مدل‌های مناسب جهت ادامه‌ی بررسی انتخاب شدند.

1 High/Low Clustering

2 Euclidean

3 Exploratory Regression

4 Bivariate correlation

5 Variance Inflation Factor (VIF)

6 Pearson Correlation Coefficient

7 Partial Least Square Regression

8 Stepwise

9 Backward Elimination

10 Forward

11 Enter

### اعتبارسنجی

نرمال بودن و مستقل بودن خطاها، مقدمه‌ی اعتبارسنجی مدل است. در اغلب آزمون‌های پارامتری، نرمال بودن خطاها، شایع‌ترین فرض نیکویی مدل به شمار می‌آید (پرهام، ۱۳۹۱: ۴۵ و حسنی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۹۱: ۴۹۷). در این پژوهش، برای بررسی نرمال بودن خطا، به روش محاسبه‌ی شاخص چولگی<sup>۳</sup> (رابطه ۱) و تحلیل توصیفی نتایج و سپس انجام آزمون‌های شاپیرو-ویلک<sup>۴</sup> و کلموگروف-اسمیرنوف<sup>۵</sup> و تحلیل استنباطی آن‌ها در سطح ۵ درصد برای تمامی مدل‌های مورد مطالعه، عمل شد. مستقل بودن خطاها نیز با رسم باقیمانده‌ها برحسب مقادیر برازش شده‌ی آن‌ها در محیط نرم‌افزار آماری Minitab<sup>۱۶</sup>، انجام و الگوی توزیع مربوطه، تحلیل توصیفی شد. و بالاخره به‌منظور دستیابی به الگوریتمی که در مقایسه با مشاهدات میدانی و با توجه به دامنه‌ی پراکنش داده‌ها، از همبستگی و دقت بالاتری در تخمین رطوبت سطحی خاک از تصاویر ماهواره برخوردار باشد، تمام مدل‌ها، مورد آزمون‌های خطا سنجی  $R^2$  (ضریب تبیین)،  $RMSE^6$  (جذر میانگین مربعات خطا)،  $SD^7$  (انحراف معیار)،  $MBE^8$  (میانگین خطای اریب) و  $RPD^9$  (نسبت انحراف کارایی)، قرار گرفتند و معتبرترین مدل در تخمین رطوبت سطحی خاک از تصاویر ماهواره، با تعداد مناسب فاکتورهای دخیل در تحقیق، معرفی شد. معادلات ریاضی آماره‌ها در روابط ۲ تا ۶ و اطلاعات کاملی از آن‌ها در وبستر و اولیور (۲۰۰۷)، قابل مشاهده است.

$$Skew = \frac{N}{(N-1)(N-2)} * \sum \left( \frac{y_i - \bar{y}}{\sigma} \right)^3 \quad (1)$$

$$R^2 = \left[ \sum_{i=1}^N ((y_i - \bar{y}) * (y'_i - \bar{y}')) / \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^N (y'_i - \bar{y}')^2} \right]^2 \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - y'_i)^2} \quad (3)$$

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{N-1}} \quad (4)$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y'_i - y_i) \quad (5)$$

$$RPD = \left[ \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{N-1}} \right] / \left[ \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y - y'_i)^2} \right] \quad (6)$$

در روابط ۱ تا ۶  $\sigma$ ،  $y_i$ ،  $y'_i$ ،  $\bar{y}$  و  $m$  به ترتیب، انحراف معیار، مقادیر مشاهده‌ی رطوبت خاک، مقادیر تخمینی رطوبت خاک، میانگین مشاهدات، تعداد داده‌ها و تعداد فاکتورهای مدل می‌باشند.

در انجام اقدامات مورد نیاز تحقیق، از بسته‌های نرم‌افزاری Arc/Map<sup>۱۰.۲.۲</sup>، SPSS<sup>۲۲</sup>، Weka<sup>۳.۷</sup>، Tanagra<sup>۱.۴</sup> و Minitab<sup>۱۶</sup>، استفاده شد.

### یافته‌های تحقیق

نتیجه بررسی همبستگی مکانی نقاط مشاهداتی، در شکل ۳ آورده شده است. شاخص حداکثر-حداقل (نمودار الف) با واریانس ۰/۰۰۰۰۴ و p مقدار ۰/۲۴۲۳۵۱، در ناحیه‌ی بحرانی Z برابر ۱/۱۶۹۱۳۱-، همبستگی مکانی و تصادفی بودن

1 Remove

2 M5 model trees (Cross-Validation)

3 Skewness

4 Shapiro-wilk

5 Kolmogorov-Smirnov

6 Root Mean Square Deviation

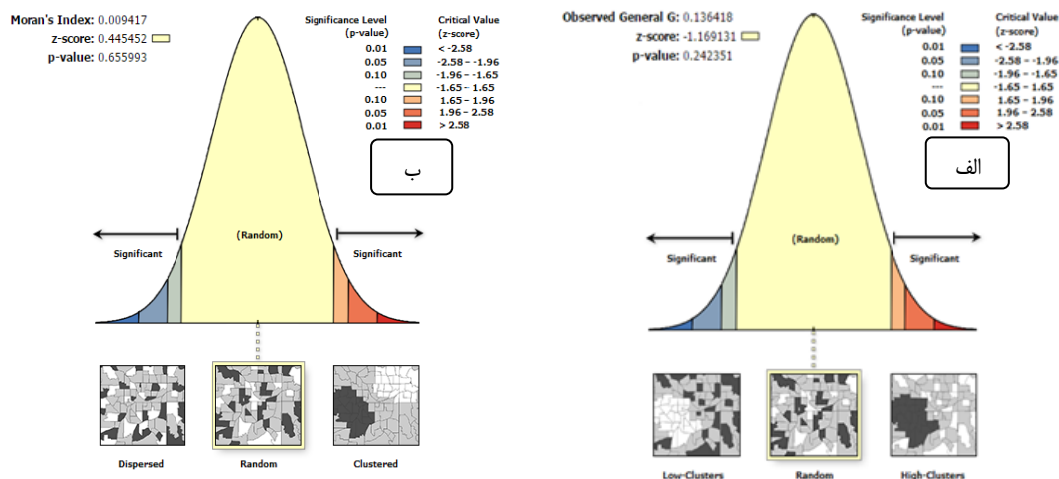
7 Standard Deviation

8 Mean Bias Error

9 Ratio Performance Deviation

داده‌ها را تأیید می‌کند و شاخص Moran's I (نمودار ب) نیز، واریانس  $0/08335$ ، مقدار  $p$  مقدار  $0/655993$  و ناحیه‌ی بحرانی  $0/445452$  برای  $Z$  را در تأیید همبستگی مکانی و توزیع نرمال نمونه‌ها نشان می‌دهد. وابسته‌ترین متغیرهای پیش‌بینی کننده‌ی متغیر پاسخ، متأثر از دو آزمون رگرسیون اکتشافی و همبستگی دو متغیری، به همراه مقادیر عامل تورم واریانس، ضریب همبستگی پیرسون و جهت همبستگی مرتبط با هر کدام از متغیرهای مستقل پیش‌بینی کننده، در جدول ۲ آمده‌اند.

بر پایه‌ی نتایج حاصله، از میان ۲۴ متغیر پیش‌بینی کننده‌ی دخیل در آزمون، ۱۲ متغیر  $MSAVI$ ،  $GI$ ،  $PCA2$ ،  $PCA3$ ،  $NDVI$ ،  $Band11$ ،  $Band10$ ،  $Band2$ ،  $Band1$ ،  $NDWI$ ،  $SAVI$ ،  $EVI$ ،  $0/39$ ،  $0/448$ ،  $0/358$ ،  $0/358$ ،  $0/358$ ،  $0/356$ ،  $0/412$ ،  $0/347$ ،  $0/314$ ،  $0/357$ ،  $0/323$  و  $0/353$ ، تأثیر معنی‌داری در سطح  $0/05$ ، بر تغییرات متغیر پاسخ دارند. همچنین عامل تورم واریانس که برای تعیین وجود هم‌راستایی چندگانه بین متغیرها استفاده شد، در تمامی متغیرها نیز در محدوده‌ی ۱ است و نشان می‌دهد که هر متغیر پیش‌بینی کننده، به صورت خطی رابطه‌ای با سایر متغیرهای پیش‌بینی ندارد. (کاتر و همکاران، ۲۰۰۴: ۴۸-۵۴) معتقدند، اگر بیشترین مقدار عامل تورم واریانس، بزرگ‌تر از ۱۰ باشد، نشانگر جدی بودن مشکل هم‌خطی است و این هم‌خطی اثر نامطلوبی بر تخمین‌گرها دارد، به طوری که عامل، نباید داخل مدل رگرسیون، قرار داده شود.



شکل ۳: نمودار شدت همبستگی مکانی داده‌ها به روش حداکثر-حداقل (الف) و روش Moran's I (ب)

تأیید عدم وجود نقاط پرت<sup>۱</sup>، نرمال بودن و همبستگی داده‌ها و مشخص شدن مناسب‌ترین متغیرهای مؤثر در متغیر هدف، زمینه‌ی ایجاد مدل را فراهم نمود. نتایج کاربرد ۷ روش رگرسیون چندگانه‌ی گام‌به‌گام (Stepwise)، رگرسیون چندگانه‌ی پس حذف رو (Backward)، رگرسیون چندگانه‌ی پیش‌رو (Forward)، رگرسیون چندگانه‌ی وارد شونده (Enter)، رگرسیون چندگانه‌ی عزل (Remove)، آزمون اعتبار مقاطع درختی (M5P) و مدل رگرسیون حداقل مربعات جزئی PLSR، برای سه سطح رطوبتی مورد مطالعه، منجر به ایجاد ۸۴ رابطه بین رطوبت سطحی خاک و تصاویر ماهواره در ۴ تکرار نمونه‌برداری گردید. بر مبنای توصیه‌ی (پرهام، ۱۳۹۱: ۶۱) مبنی بر اینکه تنها توابعی جهت پیش‌بینی قابل اعتماد هستند که ضریب تبیین<sup>۲</sup> ( $R^2$ ) مناسب حداقل بالاتر از ۵۰ درصد داشته باشند، تنها روابطی با ضریب تبیین بالاتر از  $0/5$ ، در ادامه مورد توجه قرار گرفتند. همچنین معادلات استخراج‌شده‌ی تکراری حذف شدند. به این ترتیب از مجموع ۸۴ معادله‌ای که در ۴ تکرار برای ۳ سطح رطوبتی مورد نظر ایجاد شد، تمامی معادلات مربوط به تکرار دوم و

1extreme event

2Coefficient of Determination

سوم حذف و از مجموع معادلات مربوط به تکرار اول (تکرار زمستان) و تکرار چهارم (تکرار پاییز)، مجموعاً ۱۸ رابطه‌ی مندرج در جدول ۳، به‌عنوان مدل‌های نهایی تخمین رطوبت سطحی خاک از تصاویر ماهواره، مورد آزمون نرمال بودن، دقت‌آزمایی و اعتبارسنجی قرار گرفتند.

جدول ۲: وابسته‌ترین متغیرهای پیش‌بینی کننده‌ی متغیر پاسخ و مقادیر شاخص‌های موردبررسی

متغیرهای مؤثر معنی‌دار	ضریب همبستگی پیرسون	جهت همبستگی	متغیرهای مؤثر معنی‌دار	ضریب همبستگی پیرسون	جهت همبستگی
NDVI	۰/۳۵۳	مثبت	GI	۰/۳۵۸	مثبت
NDWI	۰/۴۱۲	منفی	Band1	۰/۳۴۷	منفی
SAVI	۰/۳۵۶	مثبت	Band2	۰/۳۱۴	منفی
EVI	۰/۳۵۸	منفی	Band10	۰/۳۵۷	مثبت
MSAVI	۰/۳۵۸	مثبت	Band11	۰/۳۲۳	مثبت
PCA3	۰/۳۹	منفی	PCA2	۰/۴۴۸	منفی

نتایج مربوط به تحلیل توصیفی و استنباطی آزمون نرمال بودن خطاها برای تکرار زمستان، در جدول ۴ آمده است. یافته‌ها نشان می‌دهند که برای تمامی مدل‌های موردبررسی، مقدار چولگی بین دو مقدار ۲ و ۲- واقع شده (شکل ۴) و در هر دو آزمون شاپیرو-ویلک و کلموگروف-اسمیرنوف، سطح معنی‌داری بالاتر از ۵ درصد است. این نتایج، دلایل خوبی بر نرمال بودن توزیع داده‌ها است. (پرهام، ۱۳۹۱: ۴۵ و حسنی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۹۱: ۴۹۷) معتقدند که واقع شدن آمار توصیفی داده‌ها در دامنه‌ی ۲ تا ۲-، و قرار گرفتن آزمون‌های استنباطی در سطح معنی‌داری بیشتر از ۵ درصد، شاخص‌های مناسبی برای تأیید نرمال بودن خطاها است. نتایج توصیف الگوی توزیع رسم باقیمانده‌ها برحسب مقادیر برازش شده‌ی آن‌ها، جهت تحلیل مستقل بودن خطاها نشان داد که توزیع فوق از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند. این یافته، مستقل بودن خطاها را تأیید می‌کند (شکل ۵). (پرهام، ۱۳۹۱: ۴۶) می‌گوید، چنانچه واریانس باقیمانده‌ها ثابت باشد یا توزیع باقیمانده‌ها برحسب مقادیر برازش شده، از الگوی خاصی پیروی نکند، دلیل کافی بر مستقل بودن خطاها است. تحلیل‌های توصیفی و استنباطی نرمال بودن و مستقل بودن خطاها برای تکرار پاییز نیز نشان دادند که برای تمامی مدل‌های موردنظر، توزیع داده‌ها نرمال و توزیع باقی‌مانده‌ها نیز از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند. نتایج محاسبه‌ی آماره‌های  $R^2$ ، RMSE، SD، MBE و RPD برای انتخاب بهترین مدل‌ها از میان ۱۸ مدل موردبررسی، در جدول ۵ خلاصه شده است.

جدول ۳: مدل‌های برآورد درصد رطوبت سطحی خاک

شماره مدل	روش	سطح رطوبتی	معادله	SE	$R^2$	r
۱	PLSR (تکرار زمستان)	$\geq 5\%$	$(-44/65 * PCA3) + (3337/99 * MSAVI) + (8778/46 * EVI) - (29/56 * SAVI) + (45/05 * NDWI) - (3386/38 * NDVI) + 78/56$ $(100/88)$	۰/۳۱۵	۰/۹۰	۰/۹۵
۲	PLSR (تکرار زمستان)	۴-۵%	$(32/2 * PCA3) - (10749/7 * MSAVI) + (11076/9 * EVI) - 48$ $(39/4 * NDWI) - (7379/5 * NDVI) - 48$ $+ (17370/1)$	۰/۴۴	۰/۷۳	۰/۸۵
۳	PLSR (تکرار زمستان)	$\leq 4\%$	$(29/88 * PCA3) - (2271/08 * MSAVI) + (429/09 * EVI) + (29/56 * SAVI) - (23/56 * NDWI) - (1000/5 * NDVI) - 45/50$ $(3372/69)$	۰/۳۱۳	۰/۹۵	۰/۹۷
۴	Enter (تکرار زمستان)	$\geq 5\%$	$(-61/054 * PCA3) - (27129/597 * EVI) + (56/959 * NDWI) - (1707/710 * NDVI) + 105/362$	۰/۸۳	۰/۵۳	۰/۷۲
۵	Enter	۴-۵%	$(16/280 * PCA3) + (670/714 * EVI)$	۰/۲۵	۰/۵۲	۰/۷۱

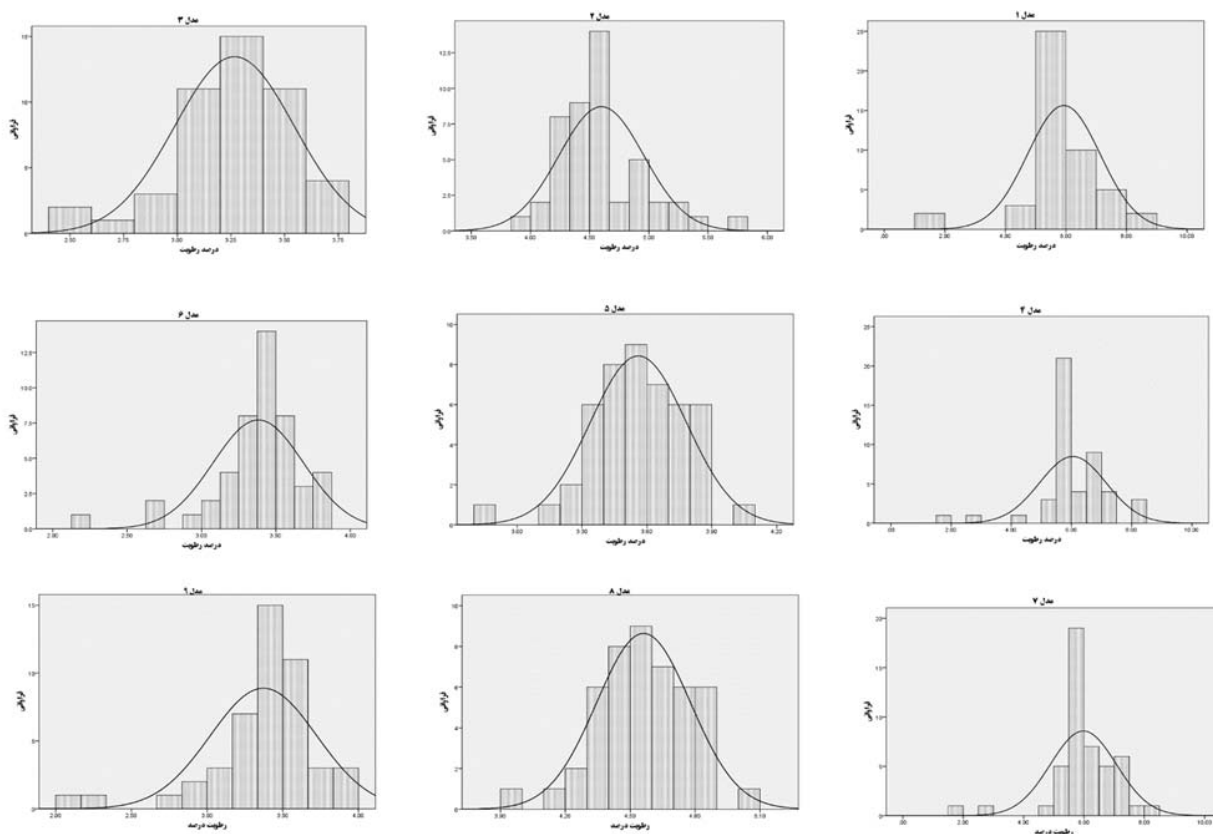
			$+ (21/307 * NDWI) + (103/557 * NDVI) - 22/318$		(تکرار زمستان)	
۰/۷۵	۰/۵۷	۰/۳۶	$(25/306 * PCA3) + (5902/794 * EVI) - (21/297 * NDWI) + (223/975 * NDVI) - 27/865$	$\leq 4\%$	Enter (تکرار زمستان)	۶
۰/۷۰	۰/۵۰	۰/۸۲	$(-30/198 * PCA3) - (20307/084 * EVI) - (1683/226 * NDVI) + 55/286$	$\geq 5\%$	Stepwise (تکرار زمستان)	۷
۰/۷۱	۰/۵۱	۰/۳۴	$(15/372 * PCA3) + (21/553 * NDWI) + (57/301 * NDVI) - 20/835$	$4-5\%$	Stepwise (تکرار زمستان)	۸
۰/۷۱	۰/۵۰	۰/۳۶	$(21/605 * PCA3) + (5942/475 * EVI) + (464/274 * NDVI) - 22/018$	$\leq 4\%$	Stepwise (تکرار زمستان)	۹
۰/۷۸	۰/۵۹	۰/۴	$(-0/6433 * MSAVI) + (5/7180 * GI) - (6/1103 * PCA2) - (71/6101 * BAND11) + (78/9488 * BAND10) + 6/7735$	$\geq 5\%$	PLSR (تکرار پاییز)	۱۰
۰/۷۷	۰/۶	۰/۲۵	$(1/6345 * MSAVI) + (12/9842 * GI) - (7/8142 * PCA2) + (7/2378 * BAND11) + 0/0542$	$4-5\%$	PLSR (تکرار پاییز)	۱۱
۰/۷۴	۰/۵۶	۰/۳	$(1/7013 * MSAVI) - (3/1925 * GI) - (13/8508 * PCA2) + (24/8169 * BAND11) - (16/4171 * BAND10) - (15/1866 * BAND2) - 21/2705$	$\leq 4\%$	PLSR (تکرار پاییز)	۱۲
۰/۷۸	۰/۶۲	۰/۴	$(-0/643 * MSAVI) + (5/718 * GI) - (6/11 * PCA2) - (71/61 * BAND11) + (78/949 * BAND10) + (17/639 * BAND2) - (12/799 * BAND1) + 6/774$	$\geq 5\%$	Enter (تکرار پاییز)	۱۳
۰/۸۲	۰/۶۸	۰/۲۵	$(1/635 * MSAVI) + (12/984 * GI) - (7/814 * PCA2) + (7/238 * BAND11) - (4/979 * BAND10) + (17/737 * BAND2) - (1/357 * BAND1) + 0/054$	$4-5\%$	Enter (تکرار پاییز)	۱۴
۰/۷۷	۰/۵۹	۰/۳	$(1/701 * MSAVI) - (3/192 * GI) - (13/851 * PCA2) + (24/817 * BAND11) - (16/417 * BAND10) - (15/187 * BAND2) + (40/145 * BAND1) - 21/271$	$\leq 4\%$	Enter (تکرار پاییز)	۱۵
۰/۷۸	۰/۶۸	۰/۳۸	$(-0/556 * MSAVI) + (5/24 * GI) - (7/645 * PCA2) - (68/149 * BAND11) + (76/472 * BAND10) + (7/915 * BAND2) + 3/81$	$\geq 5\%$	Backward (تکرار پاییز)	۱۶
۰/۷۴	۰/۶۱	۰/۳۴	$(1/34 * MSAVI) + (12/234 * GI) - (7/121 * PCA2) + (2/556 * BAND11) + (14/631 * BAND2) + 0/982$	$4-5\%$	Backward (تکرار پاییز)	۱۷
۰/۷۷	۰/۵۹	۰/۲۶	$(1/853 * MSAVI) - (13/991 * PCA2) + (22/408 * BAND11) - (13/984 * BAND10) - (11/123 * BAND2) + (37/204 * BAND1) - 20/163$	$\leq 4\%$	Backward (تکرار پاییز)	۱۸

جدول ۴: نتایج مطالعه‌ی توصیفی آزمون نرمال بودن خطاها

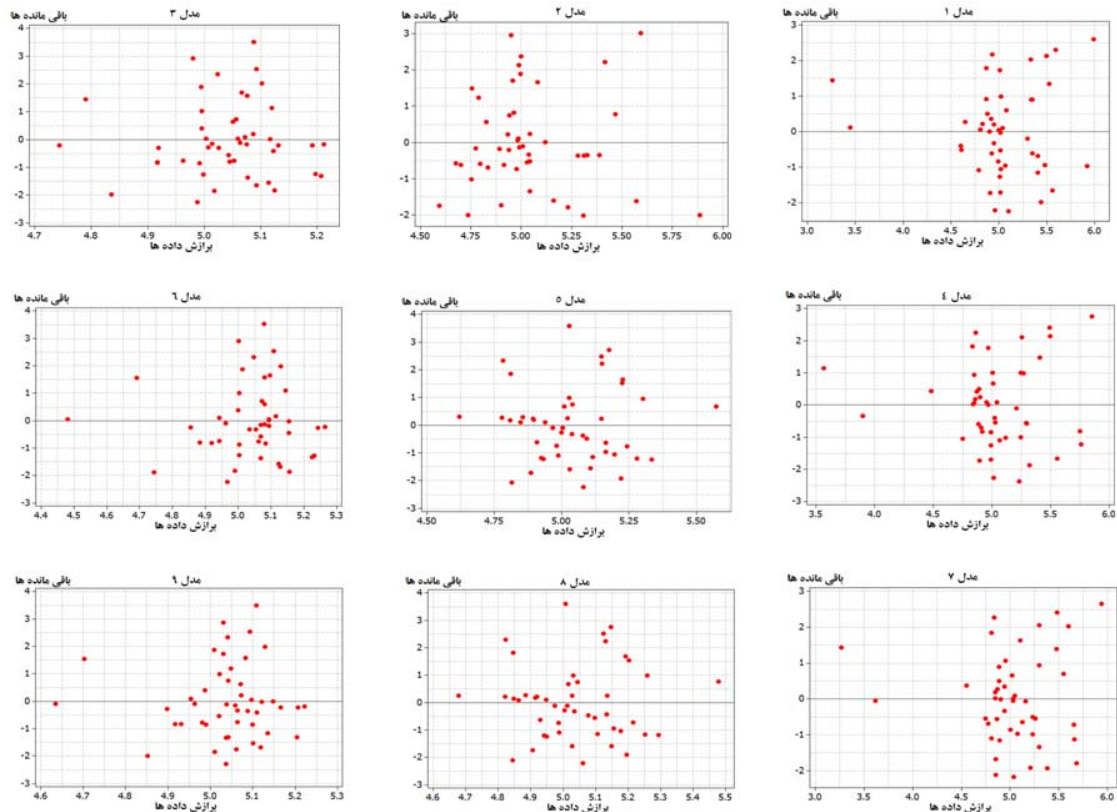
سطح معنی داری شاخص آزمون		چولگی	شماره مدل
شاپیرو-ویلک	کلموگروف-اسمیرنوف		
۰/۲۲	۰/۰۱۲	۰/۶۱۰	مدل ۱
۰/۰۰۵	۰/۰۰۱	۱/۰۵۰	مدل ۲
۰/۶۹۶	۰/۲	۰/۸۸۴	مدل ۳
۰/۰۱	۰/۰۳۷	۰/۱۷۰	مدل ۴
۰/۲۷۷	۰/۲	۰/۳۳۱	مدل ۵
۰/۰۰۲	۰/۰۴۷	۰/۷۴۸	مدل ۶
۰/۰۲۴	۰/۰۸۴	۰/۶۱۰	مدل ۷
۰/۳۱۱	۰/۲	۰/۲۶۲	مدل ۸
۰/۰۰۲	۰/۰۵۳	۰/۶۰۳	مدل ۹

جدول ۵: آماره‌های دقت سنجی در مدل‌های بسط داده‌شده

شماره مدل	RMSE	SD	MBE	RPD	R <sup>2</sup>	شماره مدل	RMSE	SD	MBE	RPD	R <sup>2</sup>	شماره مدل
مدل ۱	۱/۴۰۲	۱/۵۶۸	۰/۷۹۵	۱/۱۲	۰/۱۸	مدل ۱۰	۴/۳۴۲	۴/۴۸۲	-۴/۲۴۵	۱/۰۳۲	۰/۳۶۳	مدل ۱
مدل ۲	۰/۷۷۸	۰/۳۵۳	-۰/۱۰۱	۰/۴۵	۰/۷۱	مدل ۱۱	۱۲/۹۳۶	۱۳/۱۶۴	-۱۲/۸۹۴	-۰/۱۸	۰/۱۰۲	مدل ۲
مدل ۳	۱/۵۳۵	۱/۴۴۸	-۱/۳۷۱	۰/۹۵	۰/۲۷	مدل ۱۲	۴۲/۷۷۲	۴۴/۶۶۰	-۴۲/۷۵۴	۱/۰۴۱	۰/۱۸۹	مدل ۳
مدل ۴	۱/۳۷۹	۱/۴۳۹	۰/۹۱۱	۱/۰۴	۰/۱	مدل ۱۳	۱/۲۵۳	۱/۱۷۷	-۰/۸۹۰	-۰/۹۳۸	۰/۴۳۲	مدل ۴
مدل ۵	۱/۲۳۹	۱/۱۵۷	-۱/۰۹۲	۰/۹۳	۰/۴۷	مدل ۱۴	۰/۹۷۸	۰/۴۶۵	-۰/۲۵۶	-۰/۴۷۶	۰/۱۴۴	مدل ۵
مدل ۶	۱/۴۲۹	۱/۳۲۸	-۱/۲۵۷	۰/۹۳	۰/۲۵	مدل ۱۵	۱/۵۲۶	۱/۲۸۲	-۱/۱۷۰	-۰/۸۳۲	-۰/۱۰	مدل ۶
مدل ۷	۱/۳۴۷	۱/۴۳۲	۰/۷۸۸	۱/۰۶	۰/۲۲	مدل ۱۶	۱/۲۴۸	۱/۱۵۸	-۰/۸۷۸	-۰/۹۲۷	۰/۴۲۰	مدل ۷
مدل ۸	۰/۵۸۵	۰/۲۲۱	-۰/۱	۰/۳۸	۰/۴۸	مدل ۱۷	۰/۹۴۸	۰/۴۱۳	-۰/۲۴۵	-۰/۴۲۵	۰/۲۰	مدل ۸
مدل ۹	۱/۴۲۵	۱/۳۲۲	-۱/۲۵۱	۰/۹۳	۰/۴	مدل ۱۸	۱/۵۰۸	۱/۲۶۶	-۱/۱۴۸	-۰/۸۴۰	۰/۱۰	مدل ۹



شکل ۴: هیستوگرام و منحنی برازش داده‌شده‌ی خطا در هر مدل



شکل ۵: توزیع باقیمانده‌ها برحسب مقادیر برازش شده‌ی آن

در اکثر ۱۸ مدل مورد بررسی، مقدار RMSE قابل قبول و از میانگین مقادیر واقعی کمتر است. این آماره که از صفر در عملکرد عالی تا بی‌نهایت متغیر است، در مدل ۸، با مقدار ۰/۵۸۵، کمتر از سایر مدل‌ها و برای مدل ۱۲، با مقدار ۴۲/۷۷۲، بیشتر از مدل‌های دیگر است. این یافته نشان می‌دهد که تخمین رطوبت سطحی خاک بر اساس مدل ۸، اختلاف کمتری از مقادیر واقعی در مقایسه با سایر مدل‌ها دارد، درحالی‌که این اختلاف برای مدل ۱۲ بیشتر از سایر مدل‌ها است. نتایج برای SD، در اغلب مدل‌ها کمتر از دو انحراف معیار است. در مطالعات علمی، معمولاً داده‌های با انحراف معیار بیشتر از دو به‌عنوان داده‌های پرت در نظر گرفته و از تحلیل، خارج می‌شوند (دودج، ۲۰۰۳: ۳۰۴-۳۰۵). بر اساس نتایج مذکور، انحراف معیار مدل ۸ (۰/۲۲۱)، کمترین مقدار را در بین ۱۸ مدل به خود اختصاص داده است، به این مفهوم که داده‌های منتج از مدل ۸، پراکندگی کمتری از مقدار میانگین، نسبت به سایر روش‌ها دارد. SD با مقدار ۴۴/۶۶۰ انحراف معیار در مدل ۱۲، بالاترین رتبه‌ی انحراف را گرفته است. برای مدل‌های بعدی مقدار SD از ۰/۳۵۳ تا ۱۳/۱۶۴ در تغییر است. مدل ۸ در خصوص آماره‌ی میانگین خطای اریب نیز نتایج مشابهی را داشت و کمترین مقدار آماره را با ۰/۱-، به خود اختصاص داد و بیشترین مقدار این آماره نیز همچنان به مدل ۱۲ تعلق گرفت (۴۲/۷۵۴). مقدار منفی این آماره بیان‌کننده‌ی تمایل به کم‌برآوردی توسط مدل است.

نسبت انحراف کارایی، از آماره‌هایی است که برای مقادیر بزرگ‌تر از ۲، دقت بسیار بالای مدل و برای مقادیر کمتر از ۱، ضعف دقت فرآیند تخمین مدل را نشان می‌دهد (راسل، ۲۰۰۳: ۱۵۶۱). درحالی‌که مقدار این آماره برای مدل‌های ۱، ۷، ۴، ۱۰ و ۱۲ به ترتیب با مقادیر ۱/۱۲، ۱/۰۶ و ۱/۰۳۲ و ۱/۰۴۴ در دامنه‌ی دقتی مناسب قرار دارد و برای مدل‌های ۳، ۵، ۶، ۹، ۱۳، ۱۵، ۱۶ و ۱۸ نزدیک مرز بحرانی یک واقع شده است، مقدار نسبت انحراف کارایی در سایر مدل‌های مورد بررسی، ضعف دقت برآورد را نشان می‌دهد.

اگر بررسی قدرت رابطه خطی بین مقادیر مدنظر باشد،  $R^2$  معیار بسیار خوبی برای مقایسه است، در غیر این صورت به‌تنهایی نمی‌توان مقدار آن را مبنای میزان همبستگی بین داده‌های واقعی و برآوردی در مدل دانست. این آماره درصد نسبی خطا را مورد ارزیابی قرار می‌دهد، درحالی‌که در سایر معیارهای خطاسنجی، میانگین داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. ضریب تبیین معیاری بدون بعد است که مقدار آن در مدل ۲ بیشتر از سایر مدل‌ها است و در مدل‌های ۴، ۱۵ و ۱۸ کمتر از دیگر مدل‌ها است.

به‌این ترتیب با در نظر گرفتن تمامی معیارهای خطاسنجی، سه مدل در سه سطح رطوبتی، مناسب‌تر از سایر روش‌ها می‌باشند و می‌توانند در شرایط خشک و نیمه‌خشک و استفاده از داده‌های سنجنده‌های OLI و TIRS، برای تخمین رطوبت خاک سطحی، مورد استفاده قرار گیرند.

### نتیجه‌گیری

گرچه ایجاد رواناب به عوامل متعددی نظیر جنس سازند، کاربری اراضی، شیب زمین، بافت خاک و ... بستگی دارد، با این وجود رطوبت خاک یکی از عوامل مهم در تولید رواناب می‌باشد (فیض نیا و همکاران، ۱۳۸۴: ۱۶؛ ارشم و همکاران، ۱۳۸۸: ۴۴۶؛ هیولت و هیبرت، ۱۹۶۷: ۲۷۷؛ کارنیل و بن اشتر، ۱۹۹۳: ۱۱) و توزیع آن در لایه سطحی خاک، سرنوشت بارندگی را به‌صورت رواناب سطحی یا تغذیه به داخل خاک مشخص می‌سازد (بداق جمالی و همکاران، ۱۳۸۲: ۳۸۱؛ شریفی و همکاران، ۱۳۸۳: ۳۴). این پژوهش به دنبال آن بود تا با یافتن ارتباطی بین داده‌های انعکاسی و حرارتی ماهواره لندست ۸ با رطوبت خاک، امکان تخمین رطوبت خاک سطحی را فراهم کند. با استفاده از ۷ روش مدل‌سازی و استفاده از ۲۴ متغیر تخمین‌گر، ۸۴ مدل در سه سطح رطوبتی مساوی یا بزرگ‌تر از ۵ درصد، ۵ تا ۴ درصد و مساوی یا کوچک‌تر از ۴ درصد، فراهم گردید که بعد از محاسبه‌ی شاخص‌های همبستگی، آزمون نرمال بودن و مستقل بودن خطاها، مشخص ساختن ضرایب تبیین و آزمون‌های متعدد خطاسنجی، سه مدل برای سه سطح رطوبتی مورد پژوهش، به‌عنوان بهترین توابع تخمین رطوبت سطحی خاک از تصاویر هم‌زمانی ماهواره لندست ۸، شناخته شدند. در توابع اشتقاقی مربوط به سطوح رطوبتی ۴-۵ درصد و کمتر از ۴ درصد، NDVI همبستگی معنی‌دار خود را، حفظ کرده است. این یافته با نتایج تحقیق نوروزی اقدم و همکاران (۱۳۸۷)؛ بابازاده و همکاران (۱۳۹۱)؛ وانگ و همکاران (۲۰۱۰)؛ ژائو و همکاران (۲۰۱۰)؛ شامپاین و همکاران (۲۰۱۱)؛ چن و همکاران (۲۰۱۱) و سانچز و همکاران (۲۰۱۴)، همخوانی دارد. مطلوبیت مدل‌های معرفی‌شده را می‌توان ناشی از ضریب همبستگی مناسب از ۰/۵۰۴ تا ۰/۶۱۸ و دقت مناسب (۱/۴۲۵ تا ۰/۵۸۵)  $RMSE=$  با خطای نسبی ۵ درصد دانست. در اغلب معیارهای خطاسنجی مربوط به  $MBE$ ،  $SD$ ،  $RMSE$  و  $R^2$ ، نتایج منتج از توابع استخراج‌شده از روش رگرسیون چندگانه‌ی گام‌به‌گام، برای سطوح رطوبتی ۴-۵٪ و کمتر از ۴٪، مناسب‌تر از سایر روش‌ها می‌باشد. مقدار RPD نیز غالباً در سطوح رطوبتی متناظر، اختلاف قابل‌توجهی را بین روش‌های مدل‌سازی مورد مطالعه نشان نمی‌دهد. نتایج تحقیق همچنین از تأثیر NDWI بر تخمین رطوبت از داده‌های ماهواره دلالت می‌کند که با نتایج تحقیق سانچز و همکاران، (۲۰۱۴) قابل‌مقایسه است. نتایج این پژوهش، امکان استفاده از داده‌های انعکاسی و حرارتی ماهواره لندست ۸ را به‌عنوان روشی غیرمستقیم و با دقت قابل‌قبول، برای تخمین رطوبت سطحی خاک و پایش منظم ۱۶ روزه‌ی این پارامتر مهم هیدرولوژیکی، تأیید می‌کند. نتایج با یافته‌های کشاورز و همکاران (۱۳۹۰)؛ بابائیان و همکاران (۱۳۹۲)؛ چن و همکاران (۲۰۱۱)؛ رحیم‌زاده و همکاران (۲۰۱۳) و فانک و لاکشمی (۲۰۱۴)، انطباق دارد.



$$\begin{aligned} \%SM &= (-0/556MSAVI) + (5/24GI) - (7/645PCA2) - (68/149BAND11) && \geq \% 5 \\ &+ (76/472BAND10) + (7/915BAND2) + 3/816 \\ \%SM &= (15/372 * PCA_3) + (21/553 * NDWI) + (57/301 * NDVI) - 20/835 && \% 5-4 \\ \%SM &= (21/605 * PCA3) + (5942/475 * EVI) + (464/264 * NDVI) - 32/018 && \leq \% 4 \end{aligned}$$

## منابع

- ارشم، عزیز، علی محمد آخوندعلی و عبدالکریم بهنیا (۱۳۸۸). بررسی اثر رطوبت‌های قبلی خاک بر مقادیر رواناب و رسوب با استفاده از باران شبیه‌سازی‌شده، فصلنامه علمی-پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان ایران، جلد ۱۶، شماره ۴: ۴۴۵-۴۵۵.
- انگمن، ای تی و گودنی، آر جی، (۱۳۸۳). سنجش‌ازدور در هیدرولوژی، ترجمه فاتیح مرچ، احمد و سعید حافظی، انتشارات پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، ۱۹۹ صفحه.
- بابازاده، حسین، الناز، نوروزی اقدم، الناز، حسین عقیقی، سیدامیر، شمس‌نیا، و داود خدادادی دهکردی، (۱۳۹۱). تخمین رطوبت لایه سطحی خاک اراضی مرتعی مناطق خشک و نیمه‌خشک با استفاده از شاخص دما و پوشش گیاهی، مطالعه موردی: استان خراسان، فصلنامه تحقیقات مرتع و بیابان ایران، جلد ۱۹، شماره ۱، ص ۱۲۰-۱۳۲.
- بابائیان، ابراهیم، مهدی، همایی، و علی‌اکبر نوروزی، (۱۳۹۲). برآورد رطوبت خاک سطحی با استفاده از تصاویر رادار *ENVISAT/ASAR*. نشریه پژوهش آب در کشاورزی (ب). جلد ۲۷، شماره ۴: ۶۱۱-۶۲۲.
- پرهام، غلامعلی (۱۳۹۱). مطالب درسی آمار مهندسی پیشرفته، دوره دکتری هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۱۹ صفحه.
- بداق جمالی، جواد، جواد احمدیان، سهیلا، جوانمرد، تکتم، گل‌مکانی، و صفورا ملکی‌زاده، (۱۳۸۲). ضرورت پایش وضعیت رطوبت خاک در افزایش بهره‌وری آب کشاورزی، مجموعه مقالات یازدهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، ۳ و ۴ دی‌ماه ۱۳۸۲، تهران: ۳۷۵-۳۸۹.
- حسنی پاک، علی‌اصغر و محمد شرف‌الدین، (۱۳۹۱). تحلیل داده‌های اکتشافی، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ سوم، ۱۰۱۰ صفحه.
- شریفی، فرود، شبنم صفارپور، سیدعلی، ایوب‌زاده، و جعفر وکیل‌پور، (۱۳۸۳). بررسی عوامل مؤثر در تعیین آستانه شروع رواناب در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور به کمک استفاده از شبیه‌سازی و داده‌های بارش - رواناب. مجله منابع طبیعی ایران، جلد ۵۷، شماره ۱، ص ۳۳-۴۵.
- فیض‌نیا، سادات، منصور خواجه و جعفر غیومیان، ۱۳۸۴. بررسی اثر عوامل فیزیکی، شیمیایی و آب و هوایی در تولید رسوب ناشی از فرسایش سطحی خاک‌های لسی، مطالعه موردی در استان گلستان، فصلنامه پژوهش و سازندگی در تحقیقات آبخیزداری، ۶۶: ۱۴ صفحه.
- کشاورز، محمدرضا، مجید وظیفه دوست، امین، علیزاده، و علی اسدی، (۱۳۹۰). استخراج و روندیابی رطوبت خاک به کمک داده‌های ماهواره‌ای سنجنده مادیس، مطالعه موردی: استان اصفهان. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، جلد ۵، شماره ۲: ۲۰۹-۲۱۹.

- نوروزی اقدم، الناز، سید محمودرضا بهبهانی، علی، رحیمی خوب، و حسین عقیقی، (۱۳۸۷). مدل رطوبتی لایه سطحی خاک با استفاده از شاخص *NDVI*، مطالعه موردی: مراتع استان خراسان رضوی. مجله محیط‌شناسی، سال ۳۴، شماره ۴۸، صص: ۱۲۷-۱۳۶.

- Ayday, C. & Safak S., (2009). *Application of Wireless sensor networks with GIS on the soil moisture distribution mapping*. *GIS Ostrava*, 1: 25-28.
- Blume, T., Zehe, E. & Bronstert, A. (2009). *Use of soil moisture dynamics and patterns at different spatio-temporal scales for investigation of subsurface flow processes*, *Hydro. Earth Syst. Sci.*, 13: 1215-1234.
- Champagne, C., McNairn, H. & Berg, A.A. (2011). *Monitoring agricultural soil moisture extremes in Canada using passive microwave remote sensing*. *Remote Sensing of Environment*, Volume 115, Issue 10, 17: 2434-2444.
- Chen, C.F., Son, N.T., Chang, L.U. & Chen, C.C. (2011). *Monitoring of soil moisture variability in relation to rice cropping systems in the Vietnamese Mekong Delta using MODIS data*. *Applied Geography*, Volume 31, Issue 2,: 463-475.
- Dodge, Y., (2003). *The Oxford Dictionary of Statistical Terms*. Oxford University Press. ISBN 0-19-850994-4, 506 pages.
- Fatras, C., Frappart, F., Mougouin, E., Grippa, M. & Hiernaux, P. (2012). *Estimating surface soil moisture over Sahel using ENVISAT radar altimetry*. *Remote Sensing of Environment*, Volume 123: 496-507.
- Fang, B. & Lakshmi, V. (2014). *Soil moisture at watershed scale: Remote sensing techniques*. *Journal of Hydrology*, Volume 516: 258-272.
- Gao, Z., Xu, X., Wang, J., Yang, H., Huang, W. & Feng, H. (2013). *A method of estimating soil moisture based on the linear decomposition of mixture pixels*. *Mathematical and Computer Modelling*, Volume 58, Issues 3-4: 606-613.
- Getis, Arthur, and J. K. Ord., (1992). *The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics*. *Geographical Analysis* Vol:24, Issue 3: 189-206.
- Gringof, I. G.; Nabiev, Kh R., (1987). *Modern methods of soil moisture measurement: problems and discussion*. *Soviet Meteorology and Hydrology* (10): 79-84.
- Guo, Y., Shi, Z., Zhou, L.Q., Jin, X., Tian, Y.F. & Teng, H.F. (2013). *Integrating Remote Sensing and Proximal Sensors for the Detection of Soil Moisture and Salinity Variability in Coastal Areas*. *Journal of Integrative Agriculture*, Volume 12, Issue 4: 723-731.
- Hewlett, J.D. & Hibbert, A.P., (1967). *Factors Affecting Response of Small Watersheds to Precipitation in Humid Areas*, In *Forest Hydrology*, Edited by W.E. Sopper and H.W. Lull, pp. 275-290, Pergamon, New York.
- Huete, A. R. (1988), *A soil-adjusted vegetation index (SAVI)*. *Remote Sensing of Environment*, Volume 25, Issue 3:295-309.
- Jackson, T., Mansfield, K., Saafi, M., Colman, T., and Romine, P., (2008), *Measuring soil temperature and moisture using wireless MEMS sensors*. *Measurement*, 41 : 381-390.
- Karnieli, A. & Ben-Asher, J. (1993). *A Daily Runoff Simulation in Semi-arid Watersheds Based on Deficit Calculations*, *Journal of Hydrology*, 149: 9-25.
- Kutner, M.H., Nachtsheim, C.J. & Neter, J., (2004). *Applied Linear Regression Models- 4th Edition*. The McGraw-Hill Companies, Inc., New York, 693 pages.

- Legates, D.R. (2000). **Remote sensing hydro climatology: An introduction**. *The professional Geographer*, 52(2): 233-234.
- Li, Q., Zhong, R., Huang, J. & Gong, H. (2011). **Comparison of two retrieval methods with combined passive and active microwave remote sensing observations for soil moisture**. *Mathematical and Computer Modelling*, Volume 54, Issues 3–4: 1181–1193.
- Lievens, H. & Verhoest, N.E.C. (2012). **Spatial and temporal soil moisture estimation from RADARSAT-2 imagery over Flevoland, The Netherlands**, *Journal of Hydrology*, Volumes 456–457: 44–56.
- Lu, H., Koike, T, Yang, K., Hu, Z., Xu, X., Rasmy, M., Kuria, D. & Tamagawab, K. (2012). **Improving land surface soil moisture and energy flux simulations over the Tibetan plateau by the assimilation of the microwave remote sensing data and the GCM output into a land surface model**. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Volume 17: 43-54.
- Rahimzadeh B., P., Berg, A.A., Champagne, C. & Omasa, K. (2013). **Estimation of soil moisture using optical/thermal infrared remote sensing in the Canadian Prairies**. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 83: 94–103.
- Robinson, D.A., Campbell, C.S. Hopmans, J.W., Hornbuckle, B.K., Jones, S.B., Knight, R., Ogden, F., Selker, J. & Wendroth, O. (2008). **Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observation. A review**, *Vadose Zone J.*, 7: 358–389.
- Russell, C.A., (2003). **Sample preparation and prediction of soil organic matter properties by near-infrared reflectance spectroscopy**. *Soil Science and Plant Analysis*, Volume 34, Issue 11-12: 1557–1572.
- Sanchez R., S., Piles, M., Sánchez, N., M.Fernández, J.M., Vlllossera, M.V. & Camps, A. (2014). **Combining SMOS with visible and near/shortwave/thermal infrared satellite data for high resolution soil moisture estimates**. *Journal of Hydrology*, Volume 516: 273–283.
- Scheftic, W. D., Cummins, K. L., Krider, E. P., Sternberg, B. K., Goodrich, D., Moran, S., and Scott, R., (2008), **Wide-area soil moisture estimation using the propagation of lightning generated low frequency electromagnetic signals**. 20th international lightning detection conference.
- Wang, H., Li, X., Long, H., Xu, X. & Bao, Y. (2010). **Monitoring the effects of land use and cover type changes on soil moisture using remote-sensing data: A case study in China's Yongding River basin**. *CATENA*, Volume 82, Issue 3: 135–145.
- Wilson, D., Western, A.W., Greyson, R.B., Berg, A.A., Lear, M.S., Rodell, M., Famiglietti, J.S., Woods, R.A. & McMahon, T.A. (2003). **Spatial distribution of soil moisture over 6 and 30cm depth, Machurangi river catchment, New Zealand**. *Journal of Hydrology*, 276: 254-274.
- Webster, R., and Oliver, M.A. (2007). **Geostatistics for Environmental Scientists**. John Wiley and Sons Ltd., Chichester, UK.:330p.
- Zhao, S., Yang, Y., Qiu, G., Qin, Q., Yao, Y., Xiong, Y. & Li, C. (2010). **Remote detection of bare soil moisture using a surface-temperature-based soil evaporation transfer coefficient**. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Volume 12, Issue 5: 351–358.
- Zhe, Y., Tingwu, L., Qinghong, Y., Zhanpeng, C. & Yuequn, D. (2013). **A near-infrared reflectance sensor for soil surface moisture measurement**. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol, 99: 101-107.