



بررسی و ارزیابی تأثیرات رطوبت سطحی خاک بر داده‌های تصاویر چندطیفی ماهواره سنیتل ۲ و ارائه الگوریتمی برای برآورد مقدار رطوبت خاک

سامان ربیعی^۱، مسعود تجربی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مدیریت منابع آب دانشگاه صنعتی شریف

۲- استاد تمام دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف

Rabieisaman1374@gmail.com

خلاصه

رطوبت سطحی خاک نقش مهمی در مدیریت منابع آب و خاک، کشاورزی و زراعت، اقلیم‌شناسی و هواشناسی دارد. هدف از این پژوهش ارائه الگوریتمی برای برآورد میزان رطوبت سطحی خاک با استفاده از تصاویر اپتیکی ماهواره سنیتل-۲ است. این مطالعه به بررسی ارتباط میان نمودارهای بازتاب طیفی خاک در رطوبت‌های مختلف در محدوده طول موج ۴۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر می‌پردازد و با استفاده از تکنیک یادگیری ماشین مدلی برای تخمین رطوبت خاک ارائه می‌دهد. با انتخاب پنج زمین کشاورزی در شهرستان‌های ورامین و کرج و برداشت ۱۱۰ نقطه و اندازه‌گیری رطوبت خاک هم‌زمان با گذر ماهواره، ارتباط رطوبت با بازتاب طیفی خاک بررسی شد. مقدار میانگین مربعات خطا مدل برازش شده برابر ۲/۹٪ رطوبت وزنی است.

کلمات کلیدی: رطوبت سطحی خاک، سنجش ازدور، ماهواره سنیتل-۲، شهرستان ورامین و کرج

۱. مقدمه

رطوبت خاک به میزان آب موجود در ناحیه غیراشباع خاک گفته می‌شود (Hillel, 1998). رطوبت لایه سطحی خاک، نقش بسیار مهمی در مدیریت منابع آب و خاک (Mekonnen, 2005)، کشاورزی و زراعت (Baghdadi et al., 2007)، اقلیم‌شناسی و هواشناسی (Lunt et al., 2005) دارد. اطلاع دقیق و پیوسته از میزان رطوبت خاک در مزارع کشاورزی، کمک شایانی به تنظیم برنامه زمانی آبیاری می‌کند. آبیاری زمین‌های کشاورزی باید به گونه‌ای باشد تا همواره میزان رطوبت خاک به اندازه نیاز آبی گیاه باشد که نتیجه آن افزایش بازدهی کشت از لحاظ تولید محصول بیشتر و باکیفیت بالاتر است. آبیاری باید زمانی انجام شود که رطوبت خاک به نقطه تنش آبی گیاه^۱ یا نقطه پژمردگی^۲ رسیده باشد و پس از آبیاری میزان رطوبت خاک نباید از حد ظرفیت زراعی زمین^۳ تعدی کند (مزایای برنامه‌ریزی آبیاری و تعیین مقدار آب، ۱۳۹۳).

رطوبت لایه سطحی خاک تحت تأثیر شرایط محیطی، تابش خورشید، بارندگی و تبخیر-تعرق به سرعت تغییر می‌کند. همچنین به دلیل تغییرات توپوگرافی سطح زمین در سطح مکانی نیز میزان رطوبت خاک متفاوت خواهد بود (Brocca et al., 2007; Seneviratne et al., 2010; Vereecken et al., 2014). روش‌های معمول اندازه‌گیری رطوبت خاک مانند روش وزنی و روش‌های نوترون‌متر علی‌رغم سادگی برای درک رفتار رطوبت خاک در مقیاس مکانی و زمانی مناسب نیستند (Mekonnen, 2005). اندازه‌گیری غیرمستقیم میزان رطوبت خاک از جمله اهداف مطالعات دهه اخیر بوده است. در روش غیرمستقیم اندازه‌گیری رطوبت خاک، ابتدا یک عامل دیگر اندازه‌گیری شده و سپس به واسطه ارتباط آن با عوامل رطوبت خاک، مقدار رطوبت خاک تخمین زده می‌شود (Patel et al., 2009; Prakash et al., 2011).

سنجش‌ازدور را می‌توان تکنولوژی کسب اطلاعات و تصویربرداری از زمین با استفاده از تجهیزات هوانوردی مثل هواپیما، بالن یا تجهیزات فضایی مثل ماهواره نامید. سنجش‌ازدور علم هنر اکتساب اطلاعات در مورد هر موضوع تحت مطالعه به وسیله ابزاری است که در تماس فیزیکی با آن

¹ Stress Point

² Wilting Point

³ Field Capacity

نباشد. به کارگیری فناوری دورسنجی و داده‌های ماهواره‌ای، اغلب موجب کاهش هزینه و افزایش دقت و سرعت می‌گردد. ماهواره‌ها با تصویربرداری پیوسته از سطح زمین اطلاعات جامعی را در محدوده وسیعی از زمین و در بازه‌های زمانی متداوم در اختیار ما قرار می‌دهند (علوی‌پناه، ۱۳۸۲). ماهواره سنتینل-۲ بخشی از برنامه Copernicus سازمان آژانس فضایی اروپا در سال ۲۰۱۵ با هدف مشاهده پیوسته و دقیق زمین به فضا پرتاب شد. همکاری دو ماهواره سنتینل-۲A و سنتینل-۲B امکان تصویربرداری از سطح زمین در شرایط جوی مناسب با وضوح بالا (۱۰ متری) و خورشید آهنگ^۱ ۵ روز در استوا را دارا است. این ماهواره در ۱۳ باند طیفی در محدوده‌های مرئی، مادون‌قرمز نزدیک و مادون‌قرمز طول‌موج کوتاه (۴۰۰ - ۲۵۰۰ نانومتر) تصویربرداری می‌کند (ESA, 2014).

میزان رطوبت، بافت و ساختمان خاک بسیار پیچیده و وابسته به یکدیگر است. رطوبت خاک، موجب کاهش بازتاب در بخش مرئی و مادون‌قرمز می‌شود. در خاک خشک فضای بین ذرات خاک با هوا اشغال شده‌است. با افزایش رطوبت خاک، آب جای هوا را اشغال می‌کند و بازتاب خاک کاهش می‌یابد (علوی‌پناه، ۱۳۸۲). مطالعه آقای لوبل در سال ۲۰۰۲ کاهش بازتاب امواج اپتیکی را با افزایش میزان رطوبت سطحی خاک با انجام آزمایش طیف‌سنجی^۲ نشان داد (Lobell and Asner, 2002). تأثیرپذیری امواج اپتیکی در شرایط ابری اتمسفری، پدیده پخش‌شدگی^۳ و عدم نفوذ این امواج از جمله دلایلی است که پژوهش‌های متعددی از امواج ماکروویو برای تخمین رطوبت سطحی خاک استفاده کرده‌اند (Oliver and (Muller and Decamps, 2001). استفاده از امواج ماکروویو می‌تواند به دو گروه فعال (رادار) و غیرفعال (رادومتر) تقسیم شود. رادیومترهای (سنجنده‌های غیرفعال) ماکروویو که توسط ماهواره حمل می‌شوند این مزیت را دارند که از هر منطقه تقریباً به‌صورت روزانه عبور می‌نمایند اما از طرفی دقت مکانی پایین (که در مرتبه چند ده کیلومتر است) از معایب جدی این سنجنده‌ها است (Karthikeyan et al., 2017). در حالی که سنسورهای غیرفعال انرژی ساطع شده از سطح اجسام که منبع انرژی آن خورشید است را دریافت می‌کنند، سنسورهای فعال یا رادار خود موجی از طیف الکترومغناطیس را ارسال کرده و بازتاب آن را دریافت می‌کنند (Jackson, 1996). استفاده از سنجنده‌های فعال (رادار) با استفاده از تکنیک روزنه مصنوعی^۴ توانایی ایجاد تصویر با اندازه پیکسل در مرتبه چند ده متر را دارد. وابستگی قابل توجه میزان ثابت دی‌الکتریک خاک در فرکانس‌های مربوطه به محتوای رطوبتی جسم قابل مشاهده است که تخمین مستقیم رطوبت خاک را ممکن می‌سازد (Ulaby et al., 1986) اما علاوه بر ثابت دی‌الکتریک، شرایط فیزیکی جسم از جمله زبری سطح و زاویه فرود محلی به شدت بر میزان قدرت سیگنال موج بازگشتی تأثیرگذار است (Leckie and Ranson, 1998). تأثیرگذاری این عوامل بر امواج راداری سبب ایجاد خطای زیادی در تخمین رطوبت سطحی خاک می‌گردد.

با جمع‌بندی مطالب فوق، در این پژوهش سعی بر آن شد تا با انتخاب زمین‌های کشاورزی که در مرحله رشد گیاه بوده و پوشش گیاهی فقیری دارند، به‌عنوان مناطق مورد مطالعه و با استفاده از تصاویر اپتیکی و تکنیک یادگیری ماشین، میزان رطوبت سطحی خاک تخمین زده شود و مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲. منطقه مطالعاتی و روش‌شناسی

در این پژوهش دو منطقه مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌است. منطقه اول روستای حسین‌آباد در شهرستان ورامین و منطقه دوم، مزرعه آموزشی پژوهشی دانشگاه تهران واقع در شهرستان کرج است. شهرستان ورامین با مساحت حدود ۱۶۴۰ کیلومتر مربع در جنوب استان تهران بین عرض‌های جغرافیایی ۳۵ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۲۴ دقیقه و طول‌های جغرافیایی ۵۱ درجه و ۲۷ دقیقه تا ۵۲ درجه و ۲ دقیقه واقع شده‌است. شهرستان کرج در استان البرز با مساحت ۵۱۲۵ کیلومتر مربع نیز بین عرض‌های جغرافیایی ۳۶ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۳۲ دقیقه و طول‌های جغرافیایی ۵۰ درجه و ۹ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۲۷ دقیقه قرار دارد (شکل ۱).

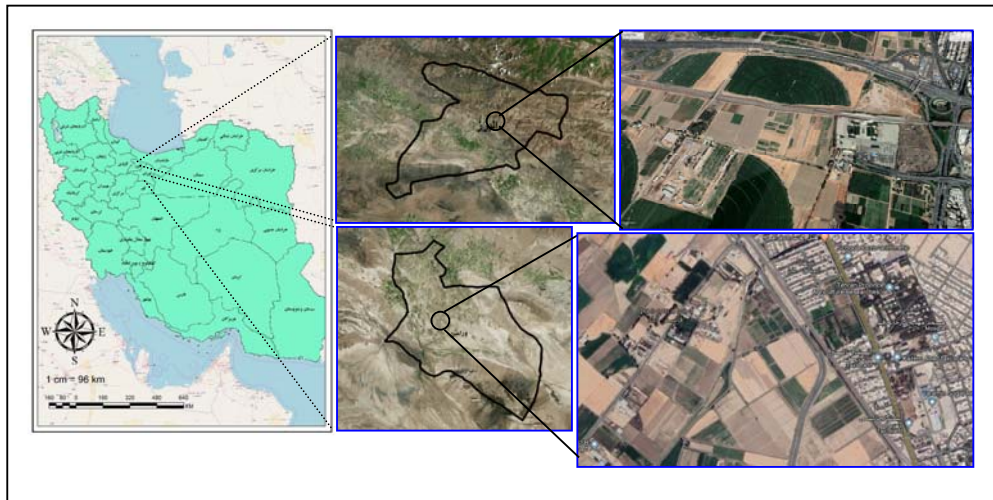
دو زمین کشاورزی در شهرستان ورامین که کشت آن‌ها پنبه و یونجه بود و سه زمین کشاورزی در شهرستان کرج که کشت آنان ذرت و زمین آیش بود انتخاب شد. این اراضی در مرحله رشد گیاه بوده و پوشش گیاهی در آن‌ها اندک بود. مناطق نمونه‌برداری در نرم‌افزار Arc map 10.5 مشخص شده و تاریخ‌های نمونه‌برداری مطابق با جدول ۱ هم‌زمان با عبور ماهواره از منطقه صورت گرفت.

¹ Sun synchronous orbit

² Spectrometry

³ Scattering

⁴ Synthetic Aperture Radar



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی زمین‌های کشاورزی شهرستان ورامین و کرج

جدول ۱- تاریخ‌های نمونه‌برداری از مزارع کشاورزی

ردیف	نام ماهواره	تاریخ عبور (شمسی)	ساعت عبور (UTC)	مزرعه
۱	Sentinel-2B	۱۳۹۸/۰۳/۲۷	۷:۱۸:۲۱	ورامین
۲	Sentinel-2B	۱۳۹۸/۰۴/۱۶	۷:۱۸:۲۱	ورامین
۳	Sentinel-2A	۱۳۹۸/۰۴/۳۱	۷:۱۸:۲۱	ورامین
۴	Sentinel-2B	۱۳۹۸/۰۵/۰۵	۷:۱۸:۲۱	کرج
۵	Sentinel-2B	۱۳۹۸/۰۵/۱۵	۷:۱۸:۲۱	کرج
۶	Sentinel-2A	۱۳۹۸/۰۷/۱۸	۷:۱۸:۲۱	کرج

نمونه‌برداری خاک باید در شرایطی که آسمان کاملاً صاف و بدون ابر و با دید افقی خوب است انجام شود. برای آگاهی از این شرایط به پیش‌بینی‌هایی که در روز قبل از نمونه‌برداری توسط سازمان هواشناسی اعلام می‌نمود توجه شد. نمونه‌های خاک تا عمق ۱۰ سانتی‌متری و با مختصات معلوم که به وسیله سامانه موقعیت‌یابی جهانی^۱ موقعیت‌یابی شده‌بود، در مرکز پیکسل موردنظر برداشت شد. در هر سری از نمونه‌برداری، نمونه‌های خاک به‌طور متوسط با وزنی حدود ۳۰۰ گرم برداشت و در پلاستیک‌های مخصوص قرار می‌گرفت. پس از انتقال به محیط آزمایشگاه نمونه‌های خاک توزین شده و در ظرف‌های مخصوص درون گرم‌خانه به مدت ۲۴ ساعت با دمای حدود ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. پس از خشک‌شدن کامل نمونه‌ها اختلاف وزن نمونه‌های خاک تر و خاک خشک‌شده محاسبه و مطابق رابطه ۱ مقدار رطوبت وزنی خاک به‌دست آمد.

$$\omega = \frac{M_2 - M_1}{M_1 - M_0} \quad (1)$$

که در آن M_2 وزن خاک تر به‌همراه ظرف، M_1 وزن خاک خشک به‌همراه ظرف و M_0 وزن ظرف خالی است. به‌دلیل حساسیت بازتاب سطح به بافت خاک منطقه، در هر زمین کشاورزی به کمک آزمایش دانه‌بندی خاک، نوع بافت خاک منطقه مشخص گردید. با اندازه‌گیری میزان چگالی تر خاک و اندازه‌گیری رطوبت وزنی خاک، میزان رطوبت حجمی خاک مطابق رابطه ۲ به‌دست آمد.

$$\gamma_a = \frac{\gamma_t}{1 + \omega} \quad (2)$$

که در آن γ_t و γ_d به ترتیب بیان‌گر مقدار چگالی خاک در حالت خشک و تر و ω میزان رطوبت خاک است. شکل ۲ مراحل انتقال نمونه‌های خاک از محل برداشت نمونه تا محیط آزمایشگاه و تعیین درصد رطوبت خاک را نشان می‌دهد.

¹ Global Positioning System (GPS)



شکل ۲- مراحل حمل نمونه‌های برداشت‌شده تا آزمایشگاه

پس از دانلود تصاویر ماهواره‌ای سنتینل از سایت^۱ و انجام پیش‌پردازش‌های رادیومتریک، فرایند دوباره‌سازی تصویر^۲ با الگوریتم مکعبی^۳ انجام گرفت. در این فرایند باندهای مختلف ماهواره سنتینل-۲ که دارای پیکسل سایز بزرگتر از ۱۰ متر هستند، دوباره‌سازی شده و تمامی باندها در پیکسل سایز ۱۰ متری ارائه می‌شود. این فرایند برای تمامی تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ انجام گرفت. با استخراج مقادیر بازتاب در باندهای مختلف ماهواره سنتینل-۲ مطابق جدول ۲، کل نمونه‌های ۱۱۰ رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در چهار دسته طبقه‌بندی گردید و مقادیر میانگین بازتاب از سطح خاک در تمامی باندهای ماهواره سنتینل-۲ ثبت شد.

جدول ۲- اطلاعات ثبت شده از باندهای ماهواره سنتینل-۲ با اندازه‌های زمینی رطوبت خاک

رطوبت خاک ۰-۵٪	رطوبت خاک ۵-۱۰٪	رطوبت خاک ۱۰-۱۵٪	رطوبت خاک ۱۵-۲۰٪	
۰/۱۱۱۹۷۵	۰/۱۱۳۳۳۳	۰/۰۸۴۶	۰/۰۸۵۲۷۵	باند ۲-
۰/۱۵۶۹۵	۰/۱۵۸۸۶۷	۰/۱۲	۰/۱۲۵۶	باند ۳-
۰/۱۹۷۹۵	۰/۲۰۰۲	۰/۱۵۱۳۳۳	۰/۱۵۴۴۵	باند ۴-
۰/۲۲۱۰۷۵	۰/۲۲۷۶۶۷	۰/۱۹۱۵۳۳	۰/۱۹۰۵۲۵	باند ۵-
۰/۲۳۱۹۲۵	۰/۲۳۹۰۳۳	۰/۲۰۴۳۶۷	۰/۲۰۱۳۵	باند ۶-
۰/۲۴۳۳۷۵	۰/۲۵۱۳۶۷	۰/۲۱۵۵۳۳	۰/۲۱۳۶	باند ۷-
۰/۲۵۵۹۷۵	۰/۲۶۵۰۳۳	۰/۲۲۰۶۳۳	۰/۲۲۴۹۷۵	باند ۸-
۰/۳۰۲۶۲۵	۰/۳۱۲۸۳۳	۰/۲۷۷۹	۰/۲۷۹۰۲۵	باند ۱۱-
۰/۲۷۲۴۲۵	۰/۲۷۶۹	۰/۲۴۳	۰/۲۴۲۰۵	باند ۱۲-

بررسی ارتباط میان داده‌های تصاویر ماهواره‌ای و میزان رطوبت سطحی خاک با انجام تحلیل واریانس^۴ آزمون مشاهدات مکرر در نرم‌افزار SPSS صورت گرفت و برای مدل‌سازی رطوبت خاک با داده‌های جمع‌آوری شده از تکنیک یادگیری ماشین استفاده شد. در این روش ابتدا باید پیش‌پردازش بر روی داده‌ها صورت گیرد. این پیش‌پردازش شامل حذف داده‌های ازدست‌رفته، حذف داده‌های تکراری و نرمال‌سازی اطلاعات و

¹ <https://scihub.copernicus.eu>

² Resampling

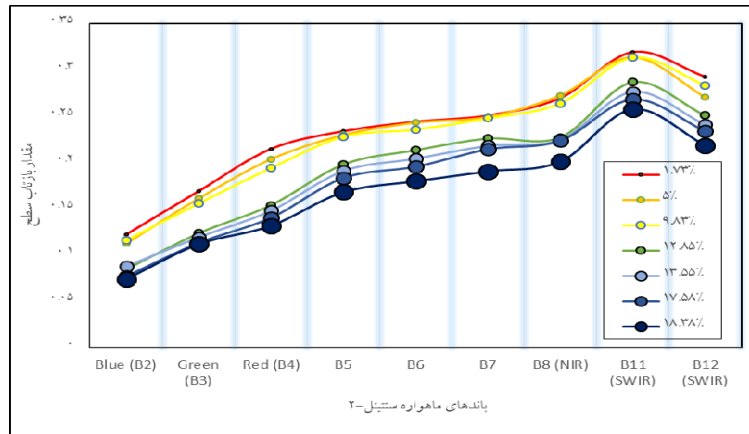
³ Bicubic Resampling

⁴ Analysis Of Variance (ANOVA)

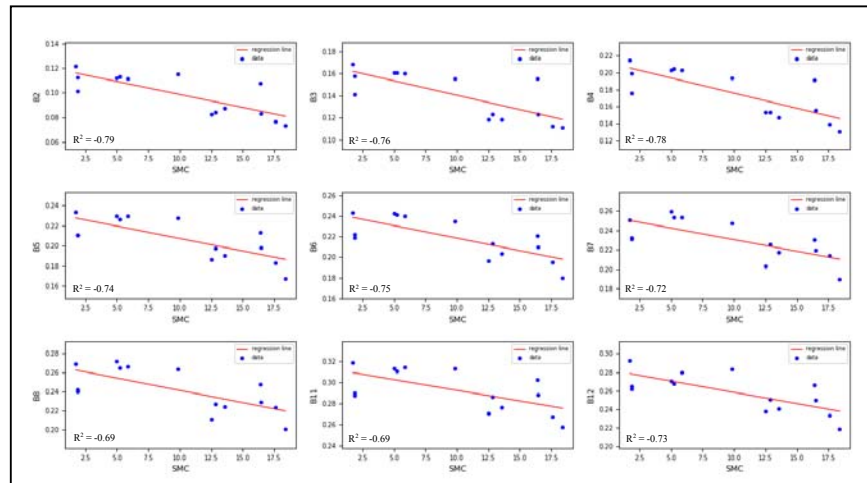
حذف داده‌های پرت است که این کار در زبان برنامه‌نویسی پایتون با استفاده از پکیج Scikit-learn انجام شد. پس از آن برای کاهش اطلاعات ورودی با استفاده از روش تحلیل مؤلفه‌های اساسی، تعداد بعد ورودی‌ها به ۳ بعد کاهش یافت. لازم به ذکر است با کاهش اطلاعات ورودی، سرعت پردازش به مراتب افزایش می‌یابد.

۳. نتایج

ترسیم منحنی بازتاب خاک در میزان رطوبت‌های مختلف مطابق شکل ۳ نشان می‌دهد که همواره در همه باندها با افزایش میزان رطوبت خاک، میزان بازتاب از سطح با کاهش همراه است. این کاهش در تمامی باندهای ماهواره سنتینل-۲ به صورت خطی مشاهده می‌شود (شکل ۴).

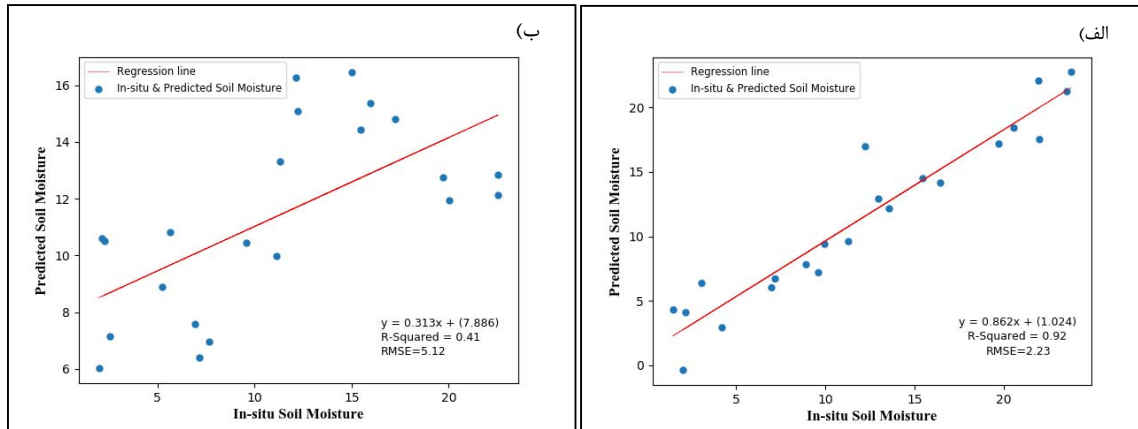


شکل ۳- نمودار تغییرات بازتاب سطح در مقابل باندهای ماهواره سنتینل-۲. میزان رطوبت خاک با رنگ و اندازه دایره نشان داده شده است



شکل ۴- نمودار میزان ارتباط خطی میان داده‌های ماهواره سنتینل-۲ و میزان رطوبت خاک

فرضیه صفر در تحلیل واریانس داده‌ها، نبود ارتباط معنی‌دار بین داده‌های دریافت‌شده از ماهواره سنتینل-۲ و مقادیر رطوبت سطحی خاک است. نتایج تحلیل واریانس ارتباط بسیار بالایی ($\text{Sig} = 0.0003$) را بیان می‌کند. بر اساس ارتباط گرفته‌شده مدل خطی یادگیری ماشین با یادگیری 80% از داده‌های اولیه و صحت‌سنجی با 20% باقیمانده داده‌ها انجام شد. نتایج این مدل با 100 بار تکرار مدل، مقدار میانگین مربعات خطا $2/9\%$ وزنی به‌دست آمد. شکل ۵ نتیجه این مدل را در حالت کلی و روش استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اساسی نشان می‌دهد.



شکل ۵- نمودار و انسجی مدل رطوبتی خاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ و صحت‌سنجی با 20% داده‌ها. تصویر الف ارزیابی مدل در حالت کلی با در نظر گرفتن تمامی باندهای ماهواره سنتینل و شکل ب ارزیابی مدل پس از کاهش بعد به کمک تحلیل مولفه‌های اساسی

۳. نتیجه‌گیری

با انجام آزمون‌های آماری و رد شدن فرضیه صفر پژوهش (عدم ارتباط میان داده‌های ماهواره‌ای و میزان رطوبت سطحی خاک) ثابت شد که استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به‌عنوان روش غیرمستقیم اندازه‌گیری رطوبت خاک، می‌تواند گزینه مناسبی باشد. تصاویر اپتیک ماهواره سنتینل-۲ مطابق الگوریتم ارائه‌شده می‌تواند میزان رطوبت سطحی خاک را در مناطقی که پوشش گیاهی اندک وجود دارد و گیاه در مرحله رشد است، با دقت مناسبی تخمین بزند. برای به‌کارگیری این مدل برای سایر مناطق کشاورزی، با توجه به حساس بودن این روش به شرایط فیزیکی خاک از جمله (بافت، رنگ، پوشش گیاهی سطح و...) نیاز است تا ابتدا نمونه‌برداری در محل انجام شود و آستانه رطوبت خشک و مرطوب محل به مدل آموزش داده شود.

دقت مدل ارائه‌شده در تصاویر اپتیک برابر $2/9\%$ درصد وزنی رطوبت خاک است این درحالی است که ماهواره رطوبت‌سنج SMAP^1 با اندازه پیکسل سائز 9 کیلومتر دقت رطوبت 4% حجمی را دارا است (Das and Entekhabi, 2018). الگوریتم‌های کاهش سائز تصاویر ماکروویو فعال نیز توسعه یافته‌اند اما بازهم تولید نقشه‌های رطوبتی توسط این ماهواره‌ها در مقیاس‌های بزرگ صورت می‌گیرد. از مزیت‌های مدل ارائه‌شده می‌توان به توان تفکیک مکانی ده متری آن و تداوم زمانی 5 روزه این ماهواره و دقت بالایی که در تخمین رطوبت خاک داشته‌است اشاره نمود.

امروزه دوربین‌های طیف‌سنج در ابعاد کوچک و قابل نصب بر روی پرنده‌های بدون سرنشین (UAV) در اختیار ما قرار دارد. بهره‌گیری از فناوری استفاده از این پرنده‌ها و تصویربرداری با دوربین‌های طیف‌سنج می‌تواند راه حل بهتری برای سنجش رطوبت خاک و بهینه‌سازی سیستم آبیاری مزارع بزرگ باشد. این پرنده‌ها با پرواز در پایین سطح اتمسفر، خطاهای تصاویر اپتیک ماهواره ناشی از پدیده‌های جذب و پخش‌شدگی را ندارد، و در کنار تصویربرداری با دقت تفکیک مکانی بالاتر، می‌تواند در هر زمان مورد نیاز تصویربرداری را انجام دهد.

۱۲. مراجع

- Hillel, D. (1998). Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations: Elsevier.
- Mekonnen, D. F. (2009). Satellite remote sensing for soil moisture estimation: Gumara catchment, Ethiopia.

¹ Soil Moisture Active Passive



3. Baghdadi, N., Aubert, M., Cerdan, O., Franchistéguy, L., Viel, C., Eric, M., . . . Desprats, J. (2007). Operational mapping of soil moisture using synthetic aperture radar data: application to the Touch basin (France). *Sensors*, 7(10), 2458-2483.
4. Lunt, I., Hubbard, S., & Rubin, Y. (2005). Soil moisture content estimation using ground-penetrating radar reflection data. *Journal of Hydrology*, 307(1-4), 254-269.
۵. سلطانهانی، ا.، ۱۳۹۳، "مزیایای برنامه‌ریزی آبیاری و تعیین مقدار آب مورد نیاز محصول، <https://www.isna.ir/news/93011602967>
6. Seneviratne, S. I., Corti, T., Davin, E. L., Hirschi, M., Jaeger, E. B., Lehner, I., . . . Teuling, A. J. (2010). Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, 99(3-4), 125-161.
7. Brocca, L., Morbidelli, R., Melone, F., & Moramarco, T. (2007). Soil moisture spatial variability in experimental areas of central Italy. *Journal of Hydrology*, 333(2-4), 356-373.
8. Vereecken, H., Huisman, J., Pachepsky, Y., Montzka, C., Van Der Kruk, J., Bogena, H., . . . Vanderborght, J. (2014). On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale. *Journal of Hydrology*, 516, 76-96.
9. Patel, N., Anapashsha, R., Kumar, S., Saha, S., & Dadhwal, V. (2009). Assessing potential of MODIS derived temperature/vegetation condition index (TVDI) to infer soil moisture status. *International Journal of Remote Sensing*, 30(1), 23-39.
10. Prakash, R., Singh, D., & Pathak, N. P. (2011). A fusion approach to retrieve soil moisture with SAR and optical data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(1), 196-206.
۱۱. علوی‌پناه، ک.، ۱۳۸۲، سنجش از دور در علوم زمین (علوم خاک). انتشارات دانشگاه تهران. چاپ ششم. ۴۹۵ ص
12. ESA. (2015). Sentinel-2 Mission. from <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>
13. Lobell, D. B., & Asner, G. P. (2002). Moisture effects on soil reflectance. *Soil Science Society of America Journal*, 66(3), 722-727.
14. Oliver, C., & Quegan, S. (2004). *Understanding synthetic aperture radar images*: SciTech Publishing.
15. Loew, A., Ludwig, R., & Mauser, W. (2006). Derivation of surface soil moisture from ENVISAT ASAR wide swath and image mode data in agricultural areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(4), 889-899.
16. Owe, M., de Jeu, R., & Holmes, T. (2008). Multisensor historical climatology of satellite-derived global land surface moisture. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 113(F1).
17. Karthikeyan, L., Pan, M., Wanders, N., Kumar, D. N., & Wood, E. F. (2017). Four decades of microwave satellite soil moisture observations: Part 1. A review of retrieval algorithms. *Advances in water resources*, 109, 106-120.
18. Muller, E., & Decamps, H. (2001). Modeling soil moisture-reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 76(2), 173-180.
19. Jackson, T. J., Schmugge, J., & Engman, E. T. (1996). Remote sensing applications to hydrology: soil moisture. *Hydrological Sciences Journal*, 41(4), 517-530. doi: 10.1080/02626669609491523
20. Ulaby, F. T., Moore, R. K., & Fung, A. K. (1986). *Microwave remote sensing: Active and passive*. Volume 3-From theory to applications.
21. Leckie, D. G., & Ranson, K. (1998). Forestry applications using imaging radar. *Principles and Applications of Imaging Radar*, 2, 435-509.
22. Das, N. N., Entekhabi, D., Dunbar, R. S., Colliander, A., Chen, F., Crow, W., . . . Caldwell, T. (2018). The SMAP mission combined active-passive soil moisture product at 9 km and 3 km spatial resolutions. *Remote Sensing of Environment*, 211, 204-217.