

Validation and Downscaling of SMAP Satellite Soil Moisture Data by the SMBDA Method Using Sentinel 1 Radar Products and Ground Data in SalehAbad Region of Ilam

M. Saboori Noghabi¹, M.M. Rajabi^{2*}, and E. Asadi Oskouei³

Abstract

Microwave remote sensing soil moisture data have a high ability to provide soil moisture information due to their spatial-temporal coherence. NASA SMAP satellite is one of the most important methods for preparing soil moisture data within the microwave spectrum (L-band) and spatial separation of about 40 km. The low spatial resolution of the soil moisture data of this satellite causes limitations in practical applications and at local scales. In the present study, to subscale daily surface soil moisture data from SMAP 4 level satellite products (with a resolution of 9 km) and increase its resolution to one kilometer, a downscaling algorithm using SMBDA downscaling method, satellite radar image Sentinel 1, and ground observations were developed. For this purpose, 1037 soil samples of soil moisture in 32 different days (autumn and winter of 1399) were measured simultaneously with the passage of time of Sentinel 1 satellite from SalehAbad plain (Ilam). The results showed that the square root of the error between the values of downscale soil moisture with ground observations is $0.085 (m^3.m^{-3})$, which has good accuracy compared to similar studies. The effect of the challenges of vegetation change and rainfall on the accuracy of the algorithm results used was investigated. The temporal-spatial extension of field measurements due to the greater variability and dispersion of the measured values as well as the implementation of the algorithm using non-classical methods (soft computing) can improve the results of downscaling.

Keywords: Soil Moisture, Downscaling, SMAP, Sentinel 1, Ilam.

Received: October 12, 2021

Accepted: February 2, 2022

اعتبارسنجی و ریزمقیاس سازی داده‌های رطوبت خاک ماهواره SMAP به روش SMBDA با استفاده از محصولات رادار Sentinel 1 و داده‌های زمینی در منطقه صالح‌آباد ایلام

مسعود صبوری نوقابی^۱، محمد مهدی رجبی^{۲*} و ابراهیم اسعدی اسکویی^۳

چکیده

داده‌های رطوبت خاک سنسور از دور مایکروویو به دلیل پیوستگی زمانی-مکانی، توانایی بالایی برای فراهم نمودن اطلاعات رطوبتی خاک دارند. ماهواره SMAP ناسا در محدوده طیف مایکروویو (باند L-) و تفکیک مکانی حدود ۴۰ کیلومتر از مهم‌ترین روش‌های تهیه داده‌های رطوبت خاک است. پایین بودن تفکیک مکانی داده‌های رطوبت خاک این ماهواره، سبب محدودیت در کاربردهای عملی و در مقیاس‌های محلی می‌گردد. در مطالعه حاضر به منظور ریزمقیاس‌سازی داده‌های روزانه رطوبت خاک سطحی از محصولات سطح ۴ ماهواره SMAP (با قدرت تفکیک ۹ Km) و افزایش قدرت تفکیک آن به ۱ کیلومتر، یک الگوریتم ریزمقیاس‌سازی با استفاده از روش ریزمقیاس‌سازی SMBDA و تصویر رادار ماهواره Sentinel 1 و مشاهدات زمینی توسعه داده شد. برای این منظور ۱۰۳۷ نمونه زمینی رطوبت خاک در ۳۲ روز مختلف (پاییز و زمستان ۱۳۹۹) همزمان با محدوده گذر زمانی ماهواره Sentinel 1 از منطقه دشت صالح‌آباد (ایلام) اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که ریشه مربعات خطا بین مقادیر رطوبت خاک ریزمقیاس شده با مشاهدات زمینی $0.085 (m^3.m^{-3})$ است که درمقایسه با تحقیقات مشابه از صحت خوبی برخوردار است. تأثیر چالش‌های تغییرات پوشش گیاهی و بارندگی بر صحت نتایج الگوریتم استفاده شده بررسی شد. تطویل زمان-مکانی اندازه‌گیری‌های میدانی به دلیل ایجاد تنوع و پراکندگی بیشتر در مقادیر اندازه‌گیری شده و همچنین پیاده‌سازی الگوریتم با استفاده از روش‌های غیر کلاسیک (محاسبات نرم) می‌تواند به بهبود نتایج ریزمقیاس‌سازی بینجامد.

کلمات کلیدی: رطوبت خاک، ریزمقیاس‌سازی، SMAP، Sentinel 1، ایلام.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۱۳

1- M.Sc. of Environmental Engineering, Civil & Environmental Engineering Department, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran. Email: m_saboori@modares.ac.ir

2- Assistant Professor, Civil & Environmental Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: mmrajabi@modares.ac.ir

3- Assistant Professor of Institute for Atmospheric Sciences and Meteorology Research Center.

*- Corresponding Author

DOI: [20.1001.1.17352347.1400.17.4.9.6](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1400.17.4.9.6)

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و محیط زیست، گروه مهندسی و محیط زیست، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس.

۲- استادیار گروه مهندسی عمران و محیط زیست، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس.

۳- استادیار گروه پژوهشی هواشناسی کشاورزی، پژوهشگاه هواشناسی علوم جو.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۴۰۱ امکانپذیر است.



۱- مقدمه

رطوبت خاک سطحی یک متغیر کلیدی در کنترل تبادل آب و انرژی بین زمین و اتمسفر (Ochsner et al., 2013)، و یک عامل تأثیرگذار در مدل‌های مورد استفاده در هیدرولوژی، هواشناسی، اکولوژی و زراعت است (Das et al., 2014; Haji Maleki et al., 2020). رطوبت خاک در سال ۲۰۱۰ به عنوان یک متغیر اساسی اقلیمی^۱ (ECV) از سوی سازمان جهانی هواشناسی^۲ (WMO)، سامانه اقلیمی مشاهدات جهانی^۳ (GCOS) و کمیته ماهواره‌های مشاهداتی زمین^۴ (CEOS) معرفی گردید (Mason et al., 2010).

در مقابل روش‌های اندازه‌گیری میدانی (مانند روش‌های ترموگراویمتری، بازتاب سنجی زمانی-مکانی یا TDR^۵ و غیره) که اغلب پرهزینه بوده و برای سنجش رطوبت خاک در مقیاس‌های کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرند، سنجش از دور مایکروویو به عنوان روشی ترجیحی برای پایش کم‌هزینه رطوبت خاک سطحی در مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی پذیرفته شده است. چندین محصول جهانی رطوبت خاک مایکروویو با در دسترس بودن حسگرهای مایکروویو فعال و غیرفعال مبتنی بر ماهواره تولید شده‌اند، که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از: رادیومتر پوشش مایکروویو پیشرفته برای سیستم رصد زمین^۶ AMSR-E (Njoku et al., 2003)، پراکندگی سنج پیشرفته^۷ ASCAT (Bartalis et al., 2007)، مأموریت رطوبت خاک و شوری اقیانوس‌ها^۸ SMOS (Merlin et al., 2010)، مأموریت رطوبت خاک فعال و غیرفعال^۹ SMAP (Entekhabi et al., 2010) و مأموریت Sentinel-1 (Torres et al., 2012). در میان سنجنده‌های مذکور، سنجنده‌های مایکروویو غیرفعال مانند محصولات مأموریت ماهواره SMAP برآورد مطلوب رطوبت خاک را با تفکیک مکانی چند ده کیلومتر (عمدتاً ۴۰ کیلومتر) فراهم می‌نمایند، که این برآوردها برای کاربردهای مرتبط با آب و هواشناسی، هیدرولوژی و کشاورزی که به تفکیک مکانی پایین نیاز دارند، مناسب نمی‌باشد (Leese et al., 2001). از این رو ریزمقیاس‌سازی مکانی برای بسیاری از کاربردهای هیدرولوژیکی و کشاورزی مورد نیاز است.

طی چند دهه گذشته روش‌های متنوعی برای ریزمقیاس‌سازی محصولات رطوبت خاک ماهواره‌ای غیرفعال با مقیاس بزرگ پیشنهاد شده است (Das et al., 2018; Merlin et al., 2010; Piles et al., 2016). دو روش کلی و پرکاربرد استفاده از ماهواره کمکی برای بهبود وضوح مکانی، الگوریتم‌های ریزمقیاس‌سازی ترکیبی غیرفعال و نوری-حرارتی^{۱۰} و الگوریتم‌های ریزمقیاس‌سازی ترکیبی فعال و غیرفعال^{۱۱} می‌باشد (Peng et al., 2016). پایه و اساس الگوریتم‌های

غیرفعال و نوری-حرارتی بر مبنای ارتباط میان پارامترهای گیاهی و دمای سطح خاک با رطوبت خاک است. حساسیت تغییر دمای سطحی در پاسخ به رطوبت خاک، بسته به شرایط سطحی (نوع پوشش گیاهی، تراکم پوشش گیاهی و غیره)، متفاوت خواهد بود. پژوهشگران زیادی به منظور ترکیب دو سنجنده از این مفهوم استفاده کرده‌اند (Carlson et al., 2009; Fang et al., 2013; Merlin et al., 2013). در سوی دیگر الگوریتم‌های ریزمقیاس‌سازی ترکیبی فعال-غیرفعال بر مبنای استفاده از مقادیر بازخوش رادار با تفکیک مکانی خوب، جهت بهبود وضوح تصاویر رادیومتری پایه‌ریزی شده‌اند. الگوریتم‌های ریزمقیاس‌سازی که بر مبنای داده‌های رادار توسعه داده شدند در مقایسه با روش‌های ترکیبی غیرفعال و نوری-حرارتی، در شرایط آب و هوایی مختلف (ابری) عملکرد بهتری داشته و این روش‌ها فارغ از اطلاعات هواشناسی و سطح زمین (پارامترهای گیاهی، دمای سطح خاک و غیره) می‌باشند. به علت تأثیر زیاد پوشش ابر و گیاه بر مشاهدات نوری با قدرت تفکیک بالا، استفاده از تکنیک‌های نوری-حرارتی کاربرد محدودی دارند. از طرفی هر دو سنسور رادار و رادیومتر به تغییر در ویژگی‌های دی‌الکتریک خاک پاسخ‌های یکسانی می‌دهند. از این رو می‌توان روش‌های مبتنی بر رادار-رادیومتر را بر سایر روش‌ها ارجح دانست (Djamai et al., 2016; Ghafari et al., 2021; Peng et al., 2016; Malbêteau et al., 2016).

یک رویکرد برای بازیابی رطوبت خاک با وضوح بالا در مأموریت SMAP، جایگزینی سنجنده رادار از کار افتاده ماهواره SMAP با باند C ماهواره Santinel-1 آژانس فضایی اروپا (ESA) و اعمال الگوریتم‌های ریزمقیاس‌سازی فعال-غیرفعال پیشنهادی می‌باشد (Yueh et al., 2016). داده‌های SAR Sentinel-1 برای ترکیب با داده‌های رادیومتر SMAP به دو دلیل توجیه‌پذیر هستند (Das et al., 2016): (۱) این دو ماهواره دارای پیکربندی (وضعیت یا موقعیت) مدار مشابه هستند که اجازه می‌دهد تا نوار پایش (Swath) خود را با حداقل تفاوت زمانی همپوشانی کنند و (۲) ماهواره Sentinel-1 می‌تواند مشاهدات دو قطبی یا دوگانه (VV/VH or HH/HV) را ارائه دهد. در این ماهواره مدار قطبی بودن و قابلیت قطبش دوگانه باعث تحویل سریع داده‌ها از ماهواره به ایستگاه‌های زمینی شده است. در پژوهش حاضر، قطبش خطی عمودی (VV) به دلیل میزان انرژی در دسترس بیشتر و توانایی بهتر جهت تفکیک مناطق آبی و غیرآبی مورد استفاده قرار گرفت (Twele et al., 2016; Kazemi et al., 2019). تلاش زیادی برای افزایش وضوح مکانی داده‌های رادیومتر باند L با استفاده از داده‌های رادار باند C انجام شده است. برای مثال Rüdiger et al. (2016) از داده‌های رادار SAR و رادیومتر باند L برای دستیابی به پارامتر دمای درخشندگی با وضوح بالا (۱ تا ۲

کیلومتر) به منظور برآورد رطوبت خاک استفاده نموده‌اند و نتیجه گرفتند که استفاده از داده‌های راداری باند C با وضوح بالا برای ریزمقیاس کردن داده‌های رادیومتری باند L امیدوارکننده است. Santi et al. (2016) از طریق روش افزایش قدرت تفکیک مکانی SFIM پیشنهاد شده توسط (Liu, 2000) تلاش کردند تا وضوح رادیومتری SMAP را تا وضوح راداری Sentinel-1 افزایش دهند. Das et al. (2016) نشان داد که نتایج ترکیب SMAP و Sentinel برای جبران مأموریت شکست خورده رادار SMAP به دلیل از بین رفتن سنجنده رادار ماهواره نویدبخش است.

هدف ما در این پژوهش بهبود وضوح مکانی داده‌های رطوبت خاک ماهواره SMAP به کمک تصاویر ماهواره راداری Sentinel 1 و ارزیابی نقشه‌های رطوبت خاک تهیه شده توسط داده‌های رطوبت خاک زمینی در منطقه مورد مطالعه (اراضی دشت صالح‌آباد) است. در ایران سازمان هواشناسی کشور در برخی از ایستگاه‌ها داده‌های رطوبت خاک را در اعماق مختلف و به روش‌های متفاوت اندازه‌گیری می‌کند که این داده‌ها در بعضی از مطالعات ریزمقیاس‌سازی استفاده شد. اما پراکنش و فاصله ایستگاه‌ها، روش‌های متفاوت نمونه‌برداری، ساعات اندازه‌گیری غیرمنظم و عدم تطبیق زمان نمونه‌برداری با گذر ماهواره‌ها عواملی هستند که استفاده از این داده‌ها برای انجام ریزمقیاس‌سازی را تحت شعاع قرار می‌دهند. در فرآیند ریزمقیاس‌سازی لازم است داده‌های زمینی با فواصل مکانی کوچک‌تری از قدرت تفکیک مکانی ورودی (۹ کیلومتر) و خروجی (۱ کیلومتر) تهیه و استفاده گردد. به این منظور در تحقیق انجام گرفته برخلاف مطالعات گذشته، در هر پیکسل ۱ کیلومتری حدود ۳ تا ۵ نمونه رطوبت خاک برداشت گردیده و با روش میان‌گیری وزنی به پیکسل‌های ۱ کیلومتری تعمیم داده شده است. از این رو برخلاف پژوهش‌های قبلی که از داده‌های این سازمان به منظور اعتبارسنجی و ریزمقیاس‌سازی داده‌های ماهواره‌ای استفاده شده است، تلاش شد تا مشاهدات زمینی در محدوده زمانی گذر هر دو ماهواره از منطقه مورد مطالعه با صحت بالا و عمق موردنظر انجام شود. از طرفی از آنجا که روابط الگوریتم ریزمقیاس‌سازی در مناطق مختلف (براساس اقلیم و پوشش گیاهی) متفاوت بوده (Das et al., 2019) و در منطقه مورد مطالعه تحقیق مشابهی صورت نگرفته، داده‌های میدانی از این منطقه برداشت شد. بنابراین هدف این مطالعه بررسی قابلیت‌های ترکیب سنجنده راداری Sentinel-1 و رادیومتر SMAP توسط الگوریتم ریزمقیاس‌سازی رادار-رادیومتر بر مبنای رطوبت خاک (Das et al., 2011) می‌باشد. این کار با استفاده از سری داده‌های جمع‌آوری شده هر دو ماهواره در منطقه جنوب غربی شهرستان ایلام مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مشاهدات رادیومتری

SMAP با استفاده از داده‌های Sentinel-1 با وضوح بالا به وضوح مکانی ۱ کیلومتر ریزمقیاس گردید. محصولات و نقشه‌های بدست آمده از طریق مقایسه با اندازه‌گیری‌های زمینی جمع‌آوری شده در محدوده مطالعاتی ارزیابی شدند.

۲- داده‌ها و روش شناسی

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

اراضی مورد مطالعه میان دو بخش ریکا و کلک در منطقه صالح آباد و در فاصله حدود ۳۰ کیلومتری جنوب غربی ایلام در محدوده ۴۵ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۳۰ دقیقه طول‌های شرقی جغرافیایی و عرض‌های شمالی ۳۰ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۵۰ دقیقه واقع شده است (شکل ۱). میانگین درجه حرارت سالانه ۲۴ درجه سانتی‌گراد، و ارتفاع از سطح دریا حدود ۷۰۰ متر می‌باشد. کاربری اراضی منطقه عموماً کشاورزی (زراعی و باغی) است. محصولات عمده زراعی منطقه شامل گندم، جو و ذرت آبی و دیم، و در سطوح کوچک، یونجه، گوجه فرنگی، بادمجان، بامیه و محصولات باغی شامل خرما، مرکبات و زیتون است (Technical Report of Soil Science, 2016). با توجه به اینکه در منطقه صالح‌آباد ایستگاه هواشناسی وجود ندارد، ایستگاه ریکا به عنوان نزدیکترین ایستگاه باران‌سنجی که با وضعیت آب و هوایی منطقه طرح مطابقت دارد، انتخاب شده و آمار ده ساله هواشناسی و بارندگی مربوط به سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۴ در آن مورد استفاده قرار گرفته است. منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم گرم بیابانی با تابستان‌های گرم و نسبتاً طولانی و زمستان‌های کوتاه و معتدل می‌باشد.

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

۲-۱-۲- داده‌های زمینی رطوبت خاک

برداشت نمونه‌های رطوبت عمق ۵ سانتی متری خاک به روش ترموگراویمتری در نقاط مشخص یک شبکه نیمه منظم متناسب با موقعیت پیکسل‌های ماهواره سنتینل ۱ بگونه‌ای که در هر پیکسل بطور متوسط ۴ مشاهده زمینی برداشت شود، انجام شد. این عملیات شامل ۳۲ مرحله نمونه‌برداری و تعداد ۱۰۳۷ عدد برداشت نمونه طی یک دوره زمانی حدوداً ۶ ماهه از تاریخ ۲۹ مهر تا ۲۳ اسفند سال ۱۳۹۹ بر روی ۴۲ نقطه (شامل ۳۷ نقطه ثابت و ۶ نقطه سیار) انجام گرفت. در شکل ۲ مرز ناحیه و موقعیت نقاط در محدوده مطالعاتی مشخص شده است. در برخی تاریخ‌های نمونه‌برداری به دلیل آبیاری مزارع منطقه توسط تجهیزات آبیاری و تأثیر قابل توجه آن بر رطوبت خاک در نزدیکی شعاع این تجهیزات، نقاط بسیاری انتخاب شد.

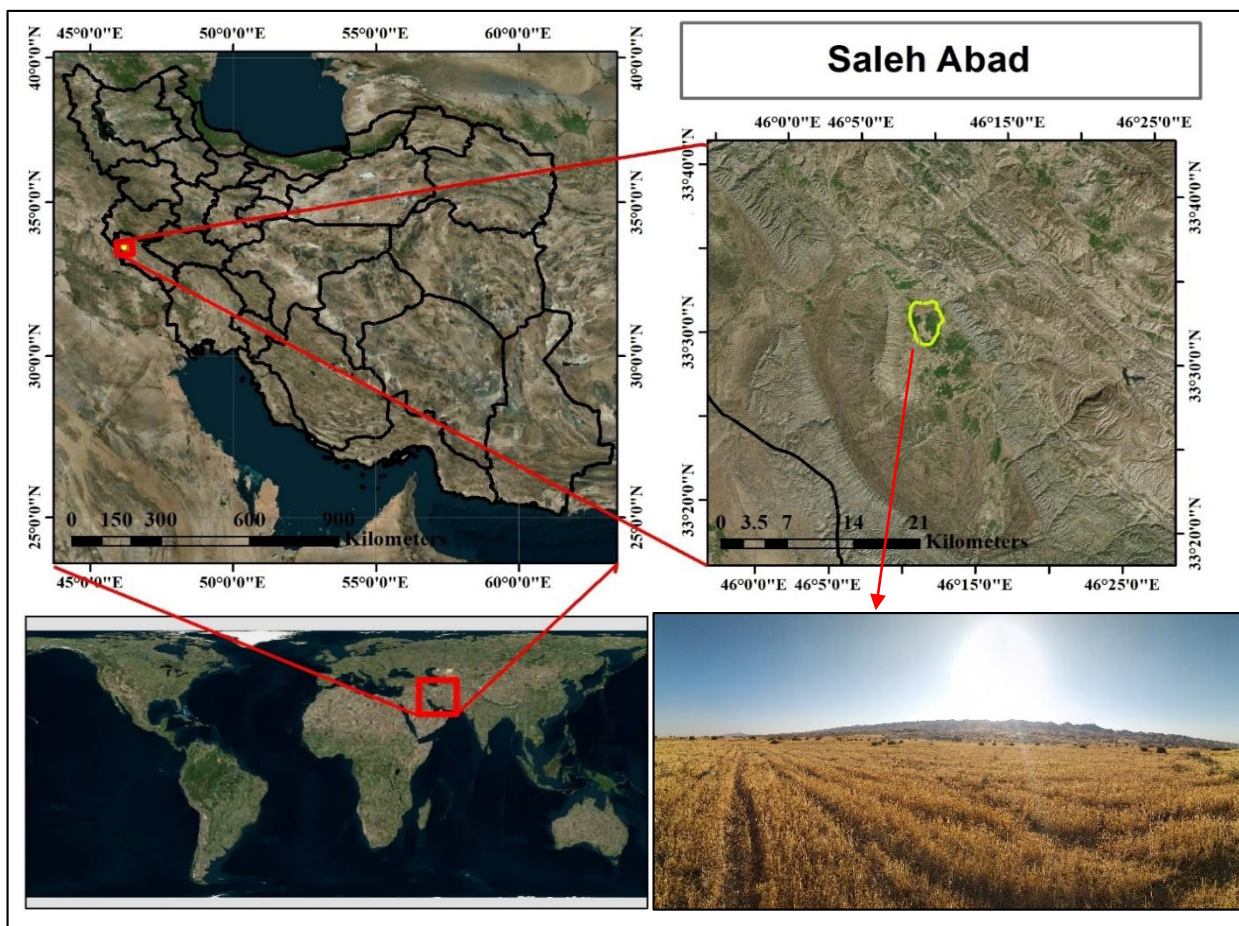
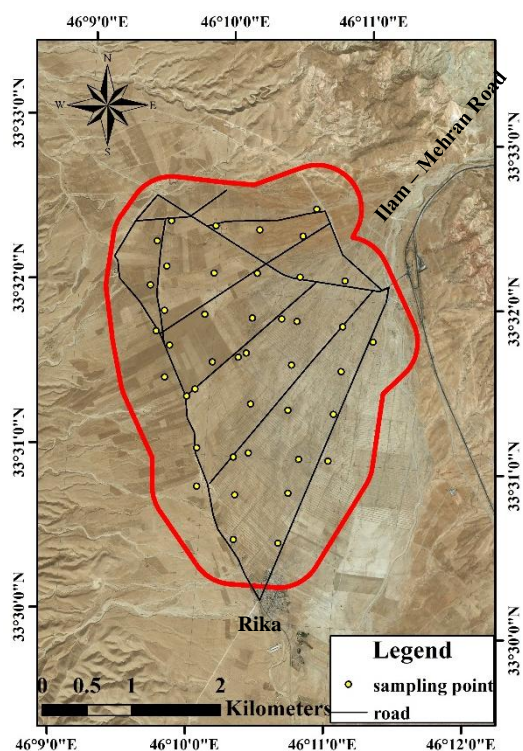


Fig. 1- Location of the study area
شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه



نمونه‌های خاک پس از برداشت از محل مورد مطالعه به آزمایشگاه انتقال داده شدند. این نمونه‌ها به منظور اندازه‌گیری درصد رطوبت پس از توزین داخل دستگاه آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. پس از گذشت ۲۴ ساعت نمونه‌های خشک از داخل دستگاه آون به جهت توزین مجدد بیرون آورده شدند. پس از نمونه‌ها از منطقه مورد مطالعه و محاسبه درصد وزنی رطوبت، این داده‌ها با توجه به رابطه (۱) تبدیل به درصد رطوبت حجمی شدند:

$$m_{\theta} = m_g \cdot \frac{\rho_{\text{soil}}}{\rho_{\text{water}}} \quad (1)$$

Fig. 2- Location of the boundary and soil moisture sampling points in the study area

شکل ۲- موقعیت مرز و نقاط برداشت نمونه رطوبت خاک در محدوده مطالعاتی

در این پژوهش ۳۲ داده Sentinel-1 از سنجنده A و B با فرمت محدوده شناسایی شده زمین^{۱۳} (GRD) و در حالت IW در سراسر منطقه شامل ۹ تصویر نزولی و ۲۳ تصویر صعودی با قطبش VV از پایگاه داده سایت ESA Copernicus^{۱۴} جمع‌آوری شد (جدول ۱). پس از دریافت این محصولات پیش‌پردازش‌های زیر با استفاده از نرم‌افزار SNAP بر روی تصاویر خام Sentinel 1 صورت گرفت (Das et al., 2014; Filipponi, 2019; Sutariya et al., 2021)

- (۱) تنظیم ویژگی‌های مدار،
- (۲) واسنجی رادیومتریک و تبدیل مقادیر رقومی^{۱۵} به بازپخش رادار^{۱۶} σ^0 ،
- (۳) رفع نویزهای حرارتی^{۱۸}،
- (۴) تبدیل پیکسل تصویر به حالت مربع شکل^{۱۹}،
- (۵) کاهش اثرات لکه‌ای^{۲۰}،
- و (۶) تصحیح هندسی و پستی بلندی^{۲۱}

در شکل ۳ تصویر رادار ماهواره سنتینل ۱ قبل و بعد از این پیش‌پردازش‌ها نشان داده شده است. در نهایت پس از اعمال مراحل فوق، مقادیر بازپخش رادار σ^0 در دو مرحله با میانگین‌گیری از پیکسل‌های اصلی تصویر رادار ($20 \times 5 \text{ m}^2$) به پیکسل‌هایی با مقیاس ۹ و ۱ کیلومتر تبدیل شده و به ترتیب به عنوان پارامترهای پس‌پراکنش رادار $\sigma_{pp}^0(F_j)$ و $\sigma_{pp}^0(C)$ بدست آمدند (He et al., 2018; Mirsoleimani et al., 2019).

۳-۲- روش شناسی

روش الگوریتم ریزمقیاس‌سازی بر مبنای رطوبت خاک^{۲۳} (SMBDA) یکی از رهیافت‌های اصلی در ریزمقیاس‌سازی رطوبت خاک ماهواره‌ای است. این روش با استفاده از یک رابطه شبه خطی^{۲۳} بین رطوبت خاک در مقیاس بزرگ ماهواره‌ای و مقادیر بازپخش رادار σ^0 بدست می‌آید (رابطه ۲). مزیت روش SMBDA، واسنجی بر اساس مشاهدات زمینی رطوبت خاک و عدم نیاز به داده‌های اضافی با وضوح بالا مانند دمای زمین و درصد رطوبت گیاهی^{۲۴} (VWC)، که معمولاً سخت بدست می‌آیند، می‌باشد (He et al., 2018).

در رابطه فوق m_g رطوبت حجمی خاک که بر حسب $\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}$ رطوبت جرمی خاک بر حسب $\frac{\text{kg}}{\text{kg}}$ و ρ_{soil} و ρ_{water} به ترتیب چگالی آب و خاک نقطه محل برداشت می‌باشد (Singh et al., 2020). این داده‌ها برای اعتبارسنجی صحت نتایج الگوریتم ریزمقیاس‌سازی به کار گرفته شد.

۲-۲-۲- داده‌های رطوبت خاک ماهواره SMAP

از تاریخ ۲۹ مهر تا ۲۳ اسفند (2020-October-20 to 2021-March-13) تعداد ۳۲ محصول رطوبت خاک SMAP Level - 4 منطبق بر زمان نمونه‌برداری‌های میدانی با قدرت تفکیک مکانی ۹ کیلومتر از وبگاه رسمی مجموعه داده ناسا به آدرس <https://search.earthdata.nasa.gov/search> دریافت و سپس تغییر سیستم مختصات تصاویر به سیستم مختصات جغرافیایی برای انجام ریزمقیاس‌سازی انجام شد (Chan et al., 2016). مشخصات محصول رطوبت خاک ماهواره SMAP استفاده شده در جدول ۱ آورده شده است.

۲-۲-۳- داده‌های ماهواره Sentinel-1

Sentinel-1 بخشی از برنامه ESA Copernicus، شامل دو ماهواره (A و B) است که به ترتیب در تاریخ ۳ آوریل ۲۰۱۴ و ۲۲ آوریل ۲۰۱۶ راه اندازی شد. ماهواره‌ها در ارتفاع ۶۹۳ کیلومتر با چرخه تکراری از ۱-۲ هفته می‌باشند. سیستم این ماهواره از نوع SAR^{۱۲} در باند C با فرکانس (۵/۴۰۵ گیگاهرتز) بوده که قابلیت اخذ داده در یکی از چهار حالت (SM) StripMap، (EW) Extra Wide Swath و (IW) Interferometric Wide Swath را دارا می‌باشد. IW حالت اصلی عملیاتی بر روی سطح زمین و مناطق ساحلی است از این رو برای پژوهش حاضر از این حالت استفاده شده است. تصویر در این حالت داده‌ها را در عرض پوشش ۲۵۰ کیلومتری و زاویه فرود امواج ۲۹/۱ تا ۴۶ درجه و رزولوشن مکانی ۵ متر \times ۲۰ متر فراهم می‌کند (Torres et al., 2012).

Table 1- Data used in SMAP soil moisture downscaling of SalehAbad region

جدول ۱- داده‌های استفاده شده در ریزمقیاس‌سازی رطوبت خاک SMAP منطقه صالح آباد

Data	Temporal resolutions	Spatial resolutions	Time coverage	Product	Source	Number
SMAP - Level 4	Daily	9 Km	2020-October-20 to 2021-March-13	L4_SM_AUP	NASA	32
Sentinel 1	6-12 day	20 m ² ×5		GRD-HD_IW	ESA	32

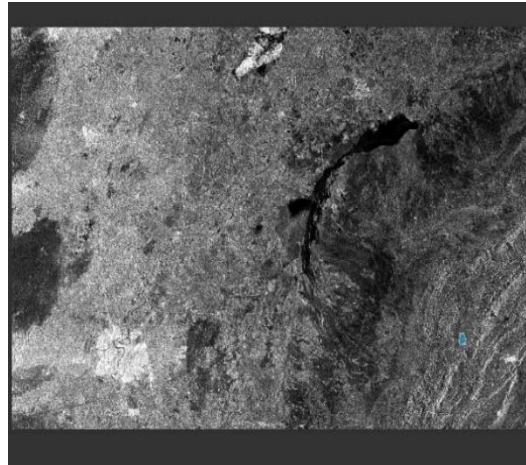
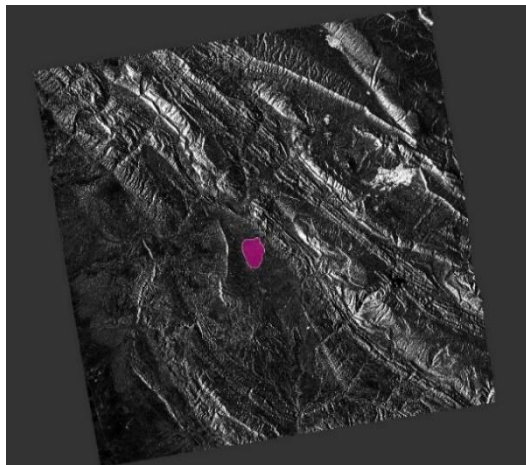


Fig. 3- Right: Radar image before preprocessing; Left: Radar image after preprocessing
 شکل ۳- راست: تصویر رادار قبل از انجام پیش پردازش؛ چپ: تصویر رادار بعد از انجام پیش پردازش

به همین منظور برداشت ۱۰۳۷ نمونه مشاهداتی به روش ترموگراویمتری با صحت بسیار مناسب در مطالعه حاضر صورت پذیرفته است.

فلوچارت مراحل توسعه الگوریتم ریزمقیاس سازی SMBDA، شامل تهیه و آماده سازی داده های زمینی، دریافت و پردازش تصاویر ماهواره ای، برآورد ضریب β و ارزیابی نتایج نهایی در شکل ۴ نشان داده شده است.

روابط (۲) و (۳) به ترتیب رابطه پایه و نهایی ریزمقیاس سازی براساس رطوبت خاک SMBDA می باشد (Das et al., 2011). رابطه پایه اساس روش تلفیق رادار-رادایومتر برای بدست آوردن داده های رطوبت خاک در مقیاس مشخص می باشد. در رابطه پایه ضرایب $\alpha(C)$ و $\beta(C)$ محاسبه شده و با قرار دادن این ضرایب در رابطه نهایی، الگوریتم ریزمقیاس سازی توسعه داده شد. در رابطه نهایی پارامتر Γ نشان دهنده میزان تأثیرپذیری ضرایب الگوریتم در هر پیکسل به دلیل تغییرات پوشش گیاهی است:

به همین منظور برداشت ۱۰۳۷ نمونه مشاهداتی به روش ترموگراویمتری با صحت بسیار مناسب در مطالعه حاضر صورت پذیرفته است.

فلوچارت مراحل توسعه الگوریتم ریزمقیاس سازی SMBDA، شامل تهیه و آماده سازی داده های زمینی، دریافت و پردازش تصاویر ماهواره ای، برآورد ضریب β و ارزیابی نتایج نهایی در شکل ۴ نشان داده شده است.

ضریب β به عنوان شیب معادله خط بین مقادیر بازپخش رادار (σ^0) و رطوبت خاک (θ) در طول یک سری زمانی محاسبه می شود. به منظور برآورد ضریب β مشاهدات رادار داده های Sentinel-1 از قدرت تفکیک مکانی اصلی خود به شبکه های ۹ km $\sigma^0(C)$ بازنمونه برداری^{۲۵} شدند. در هر پیکسل بزرگ ۹×۹ کیلومتر مربع، ارتباط خطی بین گروه زمانی داده های رطوبت خاک ماهواره 4-level-SMAP $\theta(C)$ و مقادیر $\sigma^0(C)$ برقرار و ضرایب α و β مطابق با رابطه رگسیون (۲) محاسبه شد. مقادیر بازپخش رادار با قدرت تفکیک ۱ و ۹ کیلومتری به ترتیب به عنوان ورودی های $\sigma_{pp}^0(C)$ و $\sigma_{pp}^0(F_j)$ در الگوریتم ریزمقیاس سازی قرار گرفت. سپس با دراختیار داشتن مقادیر پارامترهای لازم رابطه (۳) (شامل داده های رطوبت خاک SMAP $\theta(C)$ ، اختلاف مقادیر بازپخش $\sigma_{pp}^0(F_j) - \sigma_{pp}^0(C)$ و ضریب β برآورد شده از رابطه (۲))، الگوریتم ریزمقیاس سازی بر مبنای رطوبت خاک SMBDA بکار گرفته شد (He et al., 2018). در نهایت از داده های زمینی برداشت شده در این پروژه برای اعتبارسنجی و صحت سنجی نتایج داده های ریزمقیاس شده استفاده شد.

روابط (۲) و (۳) به ترتیب رابطه پایه و نهایی ریزمقیاس سازی براساس رطوبت خاک SMBDA می باشد (Das et al., 2011). رابطه پایه اساس روش تلفیق رادار-رادایومتر برای بدست آوردن داده های رطوبت خاک در مقیاس مشخص می باشد. در رابطه پایه ضرایب $\alpha(C)$ و $\beta(C)$ محاسبه شده و با قرار دادن این ضرایب در رابطه نهایی، الگوریتم ریزمقیاس سازی توسعه داده شد. در رابطه نهایی پارامتر Γ نشان دهنده میزان تأثیرپذیری ضرایب الگوریتم در هر پیکسل به دلیل تغییرات پوشش گیاهی است:

$$\theta(C) = \alpha(C) + \beta(C) \cdot \sigma^0(C) \quad (2)$$

$$\theta(F_j) = \theta(C) + \beta(C) \cdot \{[\sigma_{pp}^0(F_j) - \sigma_{pp}^0(C)] + \Gamma \cdot [\sigma_{pq}^0(C) - \sigma_{pq}^0(F_j)]\} \quad (3)$$

$$\Gamma = \frac{\partial \sigma_{pp}^0}{\partial \sigma_{pq}^0} \quad (4)$$

در رابطه فوق $\theta(C)$: داده رطوبت خاک در پیکسل با تفکیک مکانی ۹km برحسب $(\text{Cm}^3/\text{Cm}^3)$ ، $\alpha(C)$ و $\beta(C)$: عرض از مبدا و شیب رابطه در پیکسل با تفکیک مکانی ۹ km (ضرایب رابطه)، $\sigma^0(C)$: مقادیر بازپخش رادار در پیکسل با تفکیک مکانی ۹ km

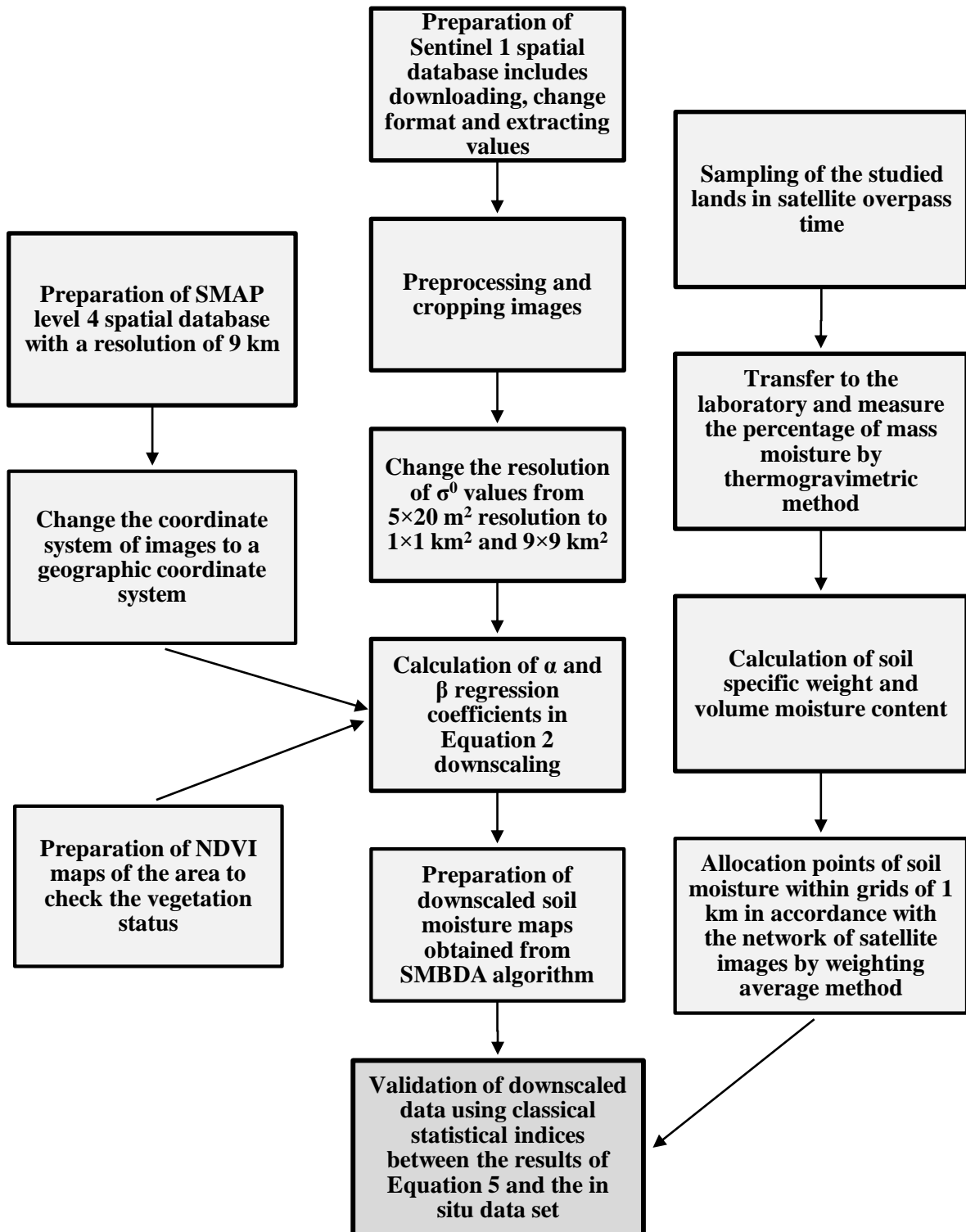


Fig. 4- Flowchart of the different stages of the algorithm used to downscale satellite soil moisture data

شکل ۴- فلوجارت مراحل مختلف الگوریتم بکار گرفته جهت ریزمقیاس سازی داده‌های رطوبت خاک ماهواره‌ای

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نقشه رطوبت خاک مشاهدات میدانی

به منظور بررسی ۱۰۳۷ نمونه اندازه‌گیری شده در منطقه مورد مطالعه، نقشه‌های رطوبت خاک حجمی در دوره زمانی نمونه‌برداری تهیه شد. ۲ تاریخ ۱۸ آبان و ۲۳ بهمن ۱۳۹۹ (2020-Nov-08 و 2021-Feb-11) به ترتیب به عنوان نماینده خاک با رطوبت بسیار پایین و بالا انتخاب شد. در شکل (۵) محدوده تغییرات رطوبت خاک در تاریخ‌های ذکر شده قابل مشاهده است. همانطور که در این شکل مشخص است در تاریخ ۱۸ آبان (شکل سمت چپ) فاصله زیاد آخرین بارندگی در منطقه و دمای بالا موجب شده تا مقدار رطوبت حجمی خاک اکثر نقاط نمونه‌های برداشت شده (به جز ۸ نقطه) کمتر از ۱۰ درصد باشد. به دلیل آبیاری توسط تجهیزات آبیاری مزارع این منطقه، در برخی نقاط (۸ نقطه زرد رنگ) درصد رطوبت حجمی خاک در محدوده بالاتری بوده است. در تاریخ ۲۳ بهمن نیز به دلیل بارندگی در صبح روز نمونه‌برداری و دمای پایین، مقدار رطوبت حجمی خاک بطور محسوسی افزایش یافته است (شکل ۵ سمت راست).

۳-۲- نقشه‌های پوشش گیاهی NDVI

مقدار ضریب β از سری زمانی σ^0 و θ در پیکسل ۹ کیلومتر برآورد می‌شود و انتظار می‌رود که در صورت تغییرات کم پوشش گیاهی، افزایش طول دوره سری زمانی به دلیل ایجاد تنوع و پراکندگی بیشتر در مقادیر اندازه‌گیری شده به افزایش سطح معناداری رابطه رگرسیون خطی منجر شود. با این حال اگر افزایش طول دوره سری زمانی منجر به تغییر قابل توجه وضعیت پوشش سطح زمین (بخصوص وضعیت پوشش گیاهی) شود، به کاهش کارایی معادله و صحت ضریب β خواهد انجامید (Wu et al., 2014; Leroux et al., 2016; Das et al., 2014). در این صورت می‌بایست برای برآورد این ضریب در هنگام استفاده از الگوریتم ریزمقیاس‌سازی یک پنجره متحرک کوتاه مدت را در طول دوره سری زمانی طولانی بررسی کرد (He et al., 2018).

به منظور بررسی اثر پوشش گیاهی بر ضریب β در این تحقیق تغییرات پوشش گیاهی منطقه با استفاده از شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده NDVI از محصولات سنجنده MODIS در سری زمانی ۱۶ روزه مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۶ الف).

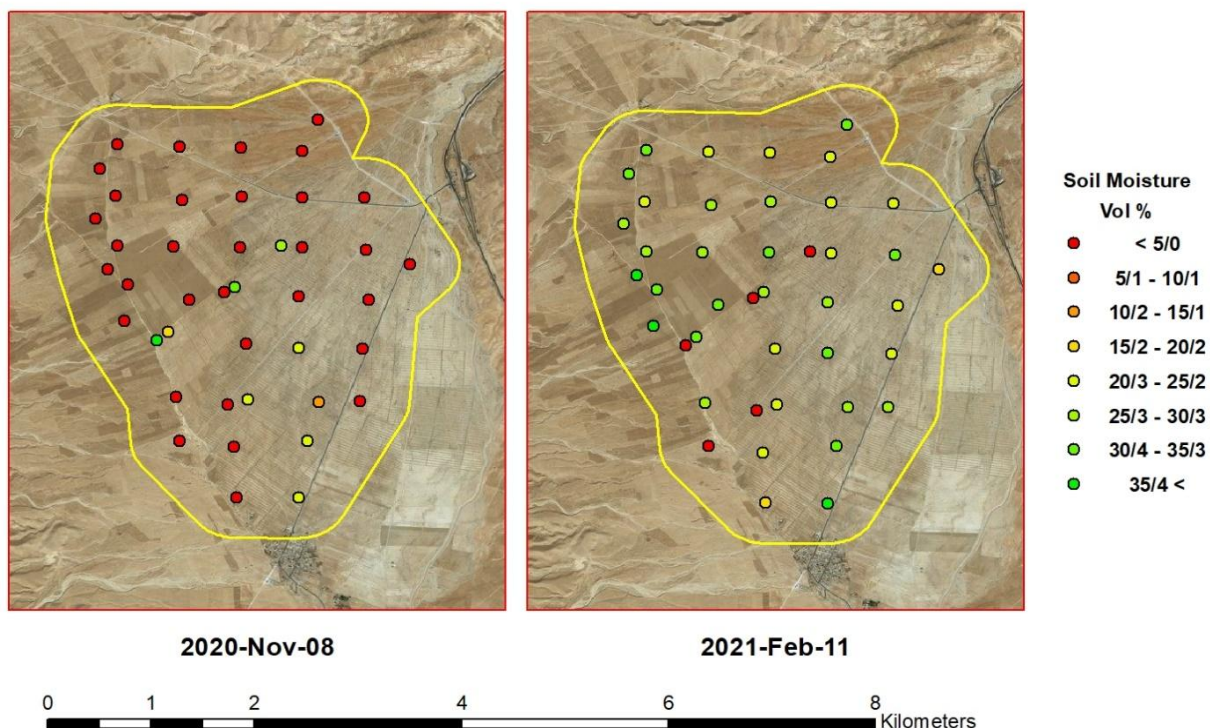


Fig. 5- Variation of the volumetric soil moisture at ground sampling points on 2020-Nov-08 and 2021-Feb-11

شکل ۵- درصد رطوبت حجمی خاک نقاط نمونه‌برداری زمینی در تاریخ‌های 2020-Nov-08 و 2021-Feb-11

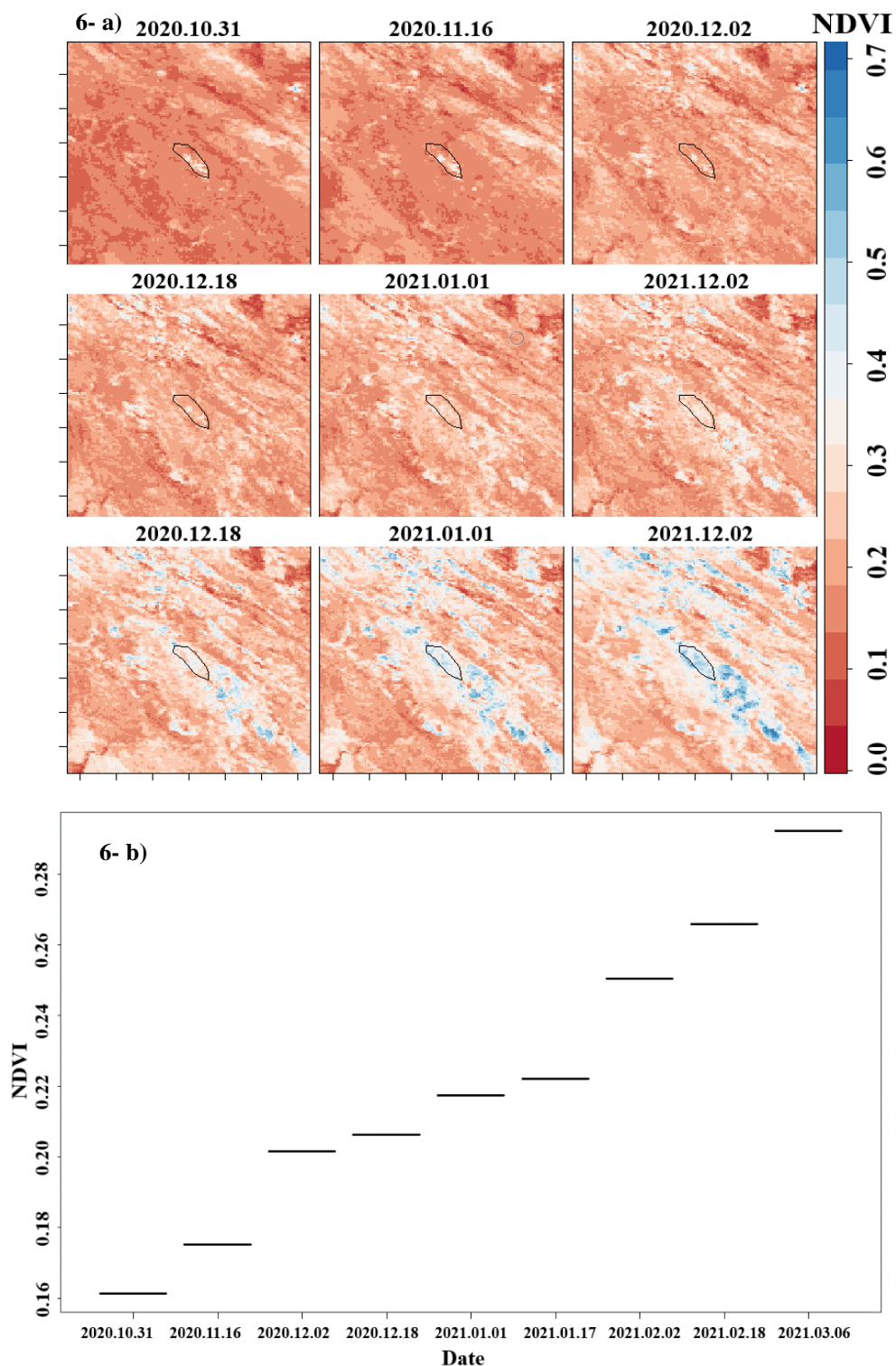


Fig. 6- a) Map of NDVI index values in SalehAbad plain b) Changes in NDVI index in the region from the beginning to the end of the sampling period (9 time series of 16 days)

شکل ۶- الف) نقشه مقادیر شاخص NDVI در دشت صالح آباد ب) تغییرات شاخص NDVI در منطقه از ابتدا تا انتها دوره نمونه برداری (۹ سری زمانی ۱۶ روزه)

خاک، ضریب تبیین ۰/۳ را برای روش SMBDA در محدوده مناسبی دانستند. از این رو می‌توان صحت قابل قبولی برای ضریب تبیین بدست آمده در این پژوهش در نظر گرفت. بالا بودن دامنه تغییرات مقادیر رطوبت خاک یک منطقه می‌تواند اثر مثبتی بر افزایش ضریب تبیین معادله داشته باشد؛ زیرا تنوع مقادیر مشاهداتی موجب می‌شود که مدل تصویر جامع‌تری از رفتارهای محتمل متغیرها را ارائه کند (Das et al., 2014). بنابراین از آنجاییکه دامنه تغییرات رطوبت خاک در طول دوره مطالعاتی نسبتاً کم (حدود $0.25 \text{ cm}^3 / \text{cm}^3$) بوده، افزایش طول دوره ممکن است به مقادیر ضریب تبیین بهتر نیز منجر شود.

۳-۴- تولید نقشه رطوبت خاک ریزمقیاس

رابطه بدست آمده با استفاده از زبان برنامه‌نویسی R برای تمامی تاریخ‌های نمونه‌برداری پیاده‌سازی گردید. شکل ۸ نشان‌دهنده دو نمونه از تاریخ‌های ریزمقیاس شده در ۱۳۹۹/۰۸/۱۸ و ۱۳۹۹/۱۱/۲۳ است که به ترتیب به عنوان نماینده روز با خاک مرطوب و خشک انتخاب شده‌اند. در این شکل نقشه‌های رطوبت خاک تاریخ‌های فوق از ماهواره SMAP (۹ km) پیش از ریزمقیاس‌سازی و پس از ریزمقیاس‌سازی (۱ km) مشاهده می‌شود. همانطور که در این نقشه‌ها مشخص است، مقادیر رطوبت خاک این منطقه در روزهای مرطوب و خشک کاملاً از یکدیگر متمایز شده است. از طرفی با توجه به نقشه‌های فوق می‌توان اثر ریزمقیاس‌سازی بر افزایش قدرت تفکیک مکانی (۱ Km) داده‌های اصلی SMAP را به خوبی مشاهده کرد.

تغییرات میانگین منطقه‌ای شاخص NDVI در دشت صالح‌آباد از ابتدا تا انتها دوره نمونه‌برداری (۲۹ مهر تا ۲۳ اسفند سال ۱۳۹۹) کمتر از ۰/۲ (بیشترین مقدار حدود ۰/۲۹ و کمترین مقدار ۰/۱۶) بوده است که براساس تحقیقات (He et al., 2018) مؤید عدم تغییرات معنادار ضریب β در طول زمان نمونه‌برداری میدانی است (شکل ۶ ب). مشاهدات عینی در طول دوره نمونه‌برداری (پاییز و زمستان) نیز نشان‌دهنده عدم وجود پوشش گیاهی متراکم در اکثر سطح اراضی این منطقه می‌باشد. بنابراین با توجه به عدم وجود پوشش گیاهی متراکم و همچنین عدم تغییرات محسوس در پوشش گیاهی موجود در طول دوره نمونه‌برداری، باند هم قطب Co-polarized (VV یا HH) بوده و در عمل می‌توان اندازه‌گیری‌های رادار با باند غیر هم قطب Cross-polarized (σ_{pq}^0) در معادله (۳) را نادیده گرفت، یا اساساً مقدار $\Gamma = 0$ در نظر گرفته شود (Das et al., 2014). بنابراین رابطه (۳) به فرم معادله (۵) تبدیل می‌شود:

$$\theta(F_j) = \theta(C) + \beta(C) \cdot [\sigma_{pp}^0(F_j) - \sigma_{pp}^0(C)] \quad (5)$$

۳-۳- شیب خط رگرسیونی β

شکل ۷ ضریب تبیین (R^2) و ضریب β را طی سری زمانی نمونه‌برداری در سراسر منطقه مورد مطالعه برای الگوریتم ریزمقیاس‌سازی SMBDA نشان می‌دهد. مقدار شیب رابطه یا همان ضریب β حدوداً برابر با ۰/۹۴- و ضریب تبیین (R^2) بین σ^0 و θ حدود ۰/۴۱ حاصل شد. (Lian et al., 2018) با مطالعه بر روی ضریب β بدست آمده از روش‌های مختلف ریزمقیاس‌سازی داده‌های ماهواره‌ای رطوبت

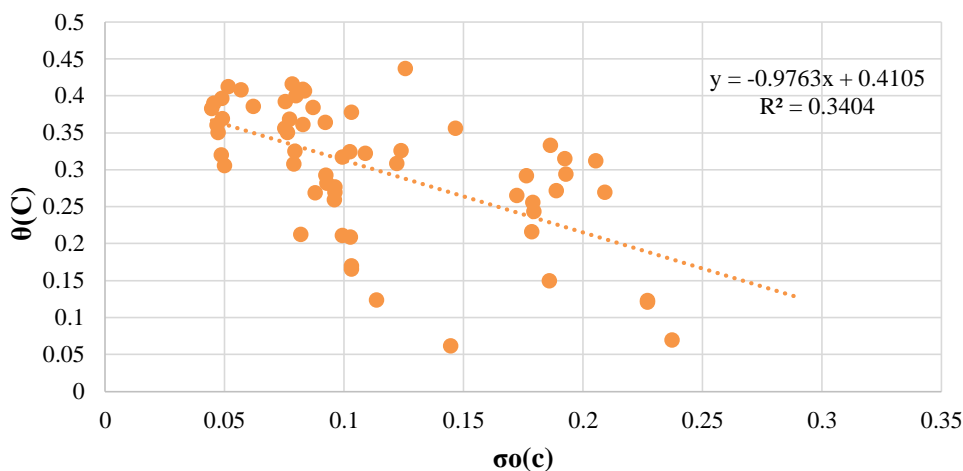


Fig. 7- Correlation coefficient (R^2) and coefficient β during the sampling time series throughout the study area

شکل ۷- ضریب تبیین (R^2) و ضریب β طی سری زمانی نمونه‌برداری در سراسر منطقه مورد مطالعه

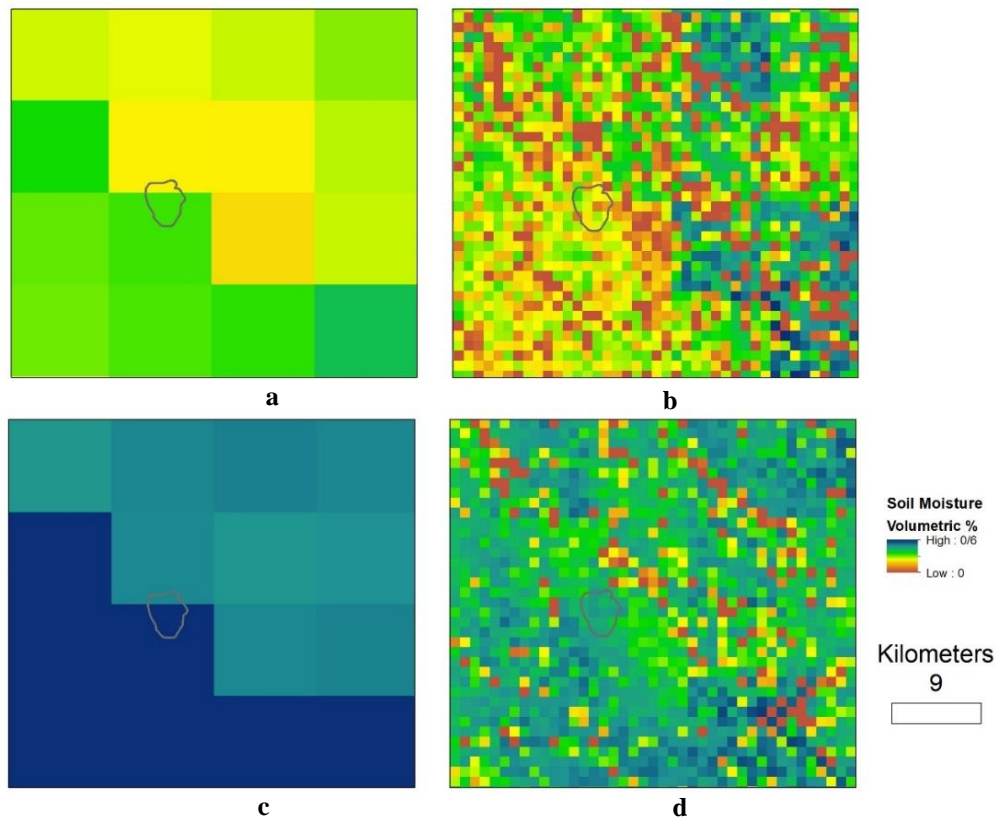


Fig. 8- Map of SMAP soil moisture values with the main scale (9 Km) and the downscaled values by the algorithm (1 Km) in dry Time, respectively; c and d: Map of SMAP soil moisture values with main scale (9 Km) and downscaled values by algorithm (1 Km) in wet Time, respectively

شکل ۸- a و b: به ترتیب نقشه مقادیر رطوبت خاک SMAP با مقیاس اصلی (۹ Km) و ریزمقیاس برآوردشده از الگوریتم (۱ Km) در تاریخ خشک؛

c و d: به ترتیب نقشه مقادیر رطوبت خاک SMAP با مقیاس اصلی (۹ Km) و ریزمقیاس برآوردشده از الگوریتم (۱ Km) در تاریخ مرطوب

یافته و در نتیجه شاخص NDVI کمترین مقدار را دارد. از اواسط ماه بهمن تا انتهای دوره نمونه برداری (محدوده فلش سبز رنگ) گندم زارهای منطقه شروع به سبز شدن کردند و با افزایش پوشش گیاهی NDVI منطقه نسبت به قبل به طور قابل توجهی افزایش پیدا کرده است. با توجه به اینکه سنجنده راداری ماهواره سنتینل به زبری سطح و پوشش گیاهی حساس بوده با افزایش این ویژگی صحت رادار سنج نیز کاهش می یابد. همین مسأله موجب می شود که صحت الگوریتم بکار گرفته شده در فرآیند ریزمقیاس سازی رطوبت خاک با استفاده از تصاویر راداری، تحت تأثیر شرایط سطحی خاک (به خصوص وضعیت پوشش گیاهی) قرار گیرد (He et al., 2018; Ghafari et al., 2021). از این رو علت اختلاف دو نمودار مشکی و قرمز که به ترتیب نشان دهنده مقادیر رطوبت خاک داده های مشاهداتی و الگوریتم ریزمقیاس سازی است می تواند تأثیر تغییرات پوشش گیاهی رخ داده در منطقه مورد مطالعه باشد.

پس از اجرای الگوریتم ریزمقیاس سازی رادار-رادایومتر نمودار نتایج داده های ریزمقیاس شده حاصل از الگوریتم ترسیم شد. در شکل ۹ نمودار مقادیر رطوبت خاک ریزمقیاس شده و داده های بدست آمده از مشاهدات زمینی در محدوده هرپیکسل از منطقه مورد مطالعه نمایش داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است نتایج الگوریتم ریزمقیاس سازی الگوی رفتاری مشابهی با مشاهدات زمینی دارد. با این حال نمودار داده های ریزمقیاس شده تغییرات نرم تری نسبت به نمودار داده های مشاهداتی دارد، که امری طبیعی است.

در شکل ۹ می توان مشاهده کرد که از پیکسل شماره ۲۶۷ یعنی تاریخ ۱۴ بهمن ۱۳۹۹ (2021.02.02) اختلاف دو نمودار قرمز و مشکی نسبت به یکدیگر افزایش یافته است. با بررسی شاخص NDVI (شکل ۶) در منطقه مورد مطالعه می توان دریافت که در اوایل دوره نمونه برداری به هنگام فصل سرما به تدریج پوشش گیاهی کاهش

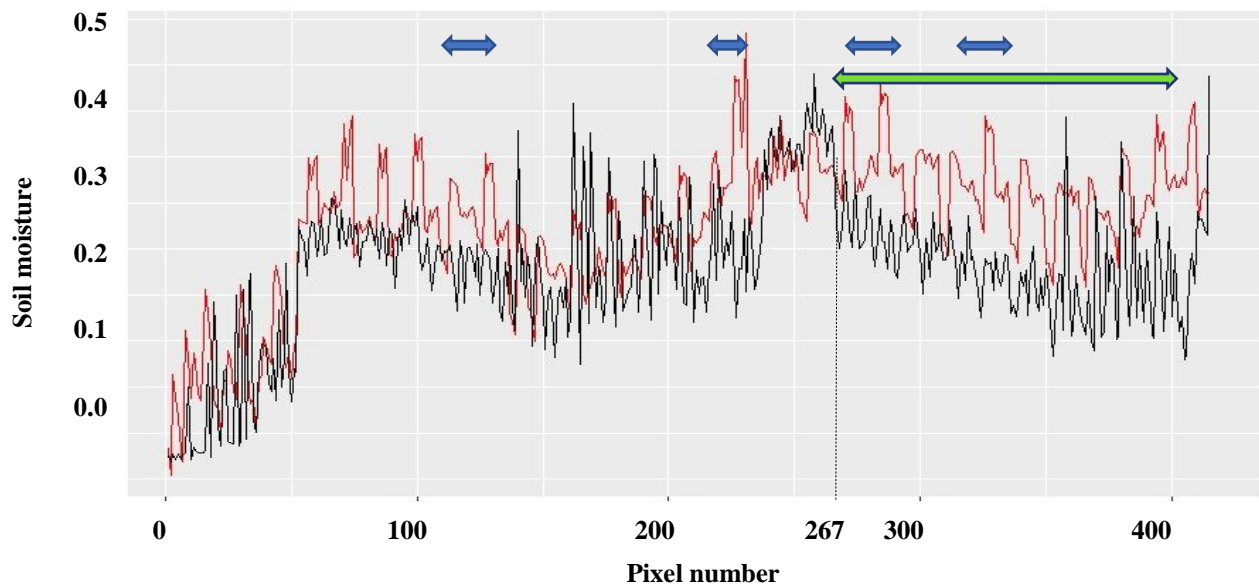


Fig. 9- Chart of pixel-day values of downscaled soil moisture (1 km). Red diagram of the results of radar-radiometer downscaling algorithm and black diagram of changes in observational data of soil moisture
 شکل ۹- نمودار مقادیر پیکسل-روز رطوبت خاک ریزمقیاس شده (1 km). نمودار قرمز رنگ نتایج حاصل از الگوریتم ریزمقیاس سازی رادار-رادایومتر و نمودار مشکی رنگ تغییرات داده‌های مشاهداتی رطوبت خاک

تاریخ‌ها (مثل ۱۳۹۹/۰۹/۱۳، ۱۳۹۹/۱۱/۱۱، ۱۳۹۹/۱۱/۱۷ و غیره) که در شکل ۹ با فلش‌های آبی رنگ مشخص شده است، برداشت نمونه‌های خاک نزدیک به زمان بارندگی یا آبیاری اراضی انجام گرفته است و این مسأله موجب شده تا تغییرات رطوبت خاک از زمان برداشت نمونه تا زمان گذر ماهواره SMAP از منطقه مورد مطالعه تغییراتی داشته باشد. از طرفی تغییرات سریع رطوبت خاک در حد فاصله زمانی بین برداشت نمونه و انجام آزمایش مربوطه به منظور محاسبه درصد رطوبت، می‌تواند عامل اختلاف نتایج حاصل از الگوریتم نسبت به داده‌های مشاهداتی در مقادیر حداکثری رطوبت خاک (بارندگی یا آبیاری) باشد.

۳-۵- اعتبارسنجی برآورد داده‌های ریزمقیاس شده بر مبنای داده‌های مشاهداتی

داده‌های تصاویر ماهواره‌ای ریزمقیاس شده توسط الگوریتم رادار-رادایومتر با میانگین مقادیر نمونه رطوبت خاک اندازه‌گیری شده میدانی در هر پیکسل مقایسه شد. در طراحی شبکه نمونه‌برداری زمینی تلاش بر این بوده که برای رسیدن به برآورد مناسب از رطوبت خاک در هر پیکسل، چهار نمونه زمینی متقارن در محدوده هر پیکسل برداشت شود. با این حال به دلیل وجود عوارض مصنوعی و طبیعی زمین انجام نمونه‌برداری در یک شبکه کاملاً منظم امکان‌پذیر نمی‌باشد.

از طرفی ۲ عامل بارندگی و آبیاری اراضی کشاورزی باعث افزایش نسبی رطوبت خاک و رسیدن به حد اشباع می‌شود. در مقادیر رطوبت خاک بالا (نزدیک به اشباع) پس از قطع بارندگی (یا آبیاری) رطوبت خاک با سرعت زیادی کاهش می‌یابد که دلیل آن خلل و فرج درشت و نیروی ثقلی حاکم بر خاک سطحی و نفوذ آب به لایه‌های پایینی می‌باشد. اما با گذشت زمان اثر نیروی ثقلی بر کاهش رطوبت خاک در لایه‌های سطحی خاک کم شده و فقط از طریق تبخیر سطحی و جذب گیاهان (حد رطوبت زراعی) تغییر می‌کند. از این رو بهتر است نمونه‌برداری با فاصله زمانی مناسبی از این دو رویداد انجام شود تا تغییرات رطوبت خاک سرعت کمتری داشته باشد (Das et al., 2014; Entekhabi et al., 2010; Walker et al., 2004; International Atomic Energy Agency, 2008). آمار بارندگی روزانه نزدیکترین ایستگاه هواشناسی (روستای ریکا) به منطقه مورد مطالعه جهت بررسی این موضوع تهیه شد. شکل ۱۰ نمودار میله‌ای بارندگی در ماه‌های برداشت نمونه خاک از منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است، در ماه‌های میلادی December و February (حدوداً آذر و بهمن سال ۱۳۹۹) بیشترین بارندگی در منطقه رخ داده است. این نتایج نشان داد که در برخی مراحل نمونه‌برداری بارندگی قابل توجهی با فاصله کم در منطقه رخ داده است. هم‌چنین برای در نظر گرفتن تمامی شرایط از ابتدا تاریخ‌های آبیاری مزارع منطقه یادداشت شد. از این رو به دلیل اهمیت نزدیک بودن زمان گذر ماهواره و نمونه‌برداری در منطقه مورد مطالعه، در برخی

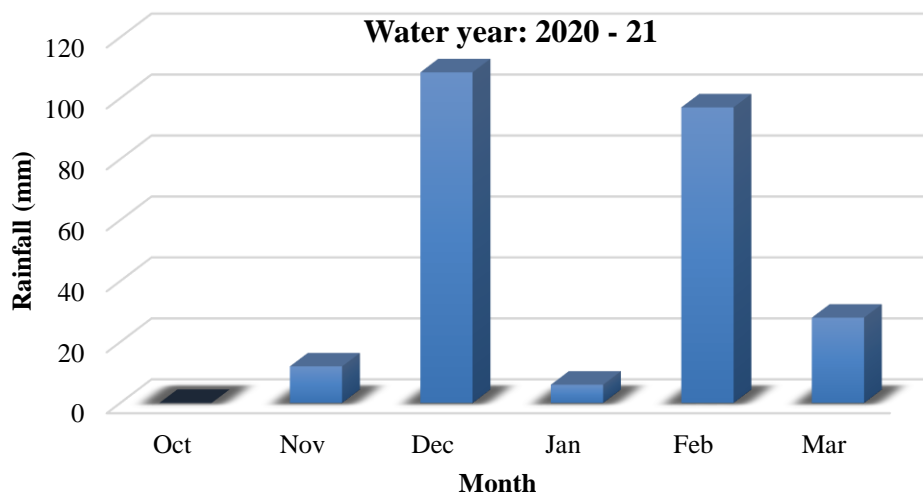


Fig. 10- Bar chart of monthly rainfall in the study area
 شکل ۱۰ - نمودار میله‌ای بارندگی ماهانه در منطقه مورد مطالعه

که در جدول ۲ آمده است، مقادیر ضریب تبیین و خطای جذر میانگین مربعات^{۲۸} (RSME) به ترتیب برابر ۰/۳۸۶ و ۰/۰۸۵ بدست آمد. تلاش Lian et al. (2018) بر روی روش‌های مختلف ریزمقیاس‌سازی داده‌های ماهواره‌ای رطوبت خاک SMAP نشان داد که مقدار RSME و ضریب تبیین به ترتیب برابر با ۰/۳۷ و ۰/۱۰۷ بود که با توجه به ارزیابی آنها در محدوده مناسبی در نظر گرفته شد. از مقایسه ارزیابی نتایج پژوهش صورت گرفته با تحقیقات (He et al., 2018) می‌توان صحت الگوریتم استفاده شده در این پژوهش را قابل قبول دانست.

مقدار میانگین خطای اریبی (Bias) برابر با ۰/۰۵۹- بوده که این مقدار نیز در مقایسه با مقدار خطای اریبی تحقیقات Lian et al. (2018) (۰/۰۱۲) در محدوده مناسبی می‌باشد. چنانچه دوره زمانی اندازه‌گیری ادامه یابد به دلیل امکان رخداد مقادیر متنوع‌تر رطوبت خاک امکان توسعه الگوریتم‌های قوی‌تر و در نتیجه امکان کاهش خطای ریزمقیاس‌سازی بوجود خواهد آمد.

به همین منظور پس از انجام نمونه‌برداری در یک شبکه منظم مقادیر نمونه‌برداری‌های انجام شده در محدوده هر پیکسل از طریق میانگین‌گیری وزنی به مقدار رطوبت خاک زمینی مربوط به هر پیکسل تبدیل شدند. همان‌طور که اشاره شد توزیع نقاط نمونه‌برداری داخل هر پیکسل ۱ کیلومتری به دلایل متعددی (از قبیل وجود عوارض مصنوعی و طبیعی، آبیاری در اراضی کشاورزی و غیره) به صورت یکنواخت نبوده است، از این رو سهم نقاط درون هر پیکسل نباید بصورت مساوی اعمال شود. در روش میان‌گیری وزنی برخلاف میان‌گیری معمولی، سهم هر نقطه داده زمینی دقیقاً با توجه به موقعیت و مقدار رطوبت خاک در آن پیکسل مشخص و اثر رطوبت خاک هر نقطه بر پیکسل‌های مجاور نیز در نظر گرفته می‌شود.

شاخص‌های آماری جهت بررسی این مقایسات محاسبه شد (جدول ۲). تعداد نمونه‌های مورد بررسی (N) در این جدول بیانگر تعداد همه پیکسل‌های ریزمقیاس شده در طول دوره مطالعاتی می‌باشد. همان‌طور

Table 2- Statistics Computed between the results of downscaling algorithm and ground measurements of soil moisture in 1 Km (N number of samples)

جدول ۲- شاخص‌های آماری محاسبه شده بین نتایج الگوریتم ریزمقیاس‌سازی و اندازه‌گیری‌های زمینی رطوبت خاک در ۱ کیلومتر (N تعداد نمونه‌هاست)

Scale	Method	RMSE (cm ³ /cm ³)	Bias (cm ³ /cm ³)	R ²	N
1 Km	SMBDA	0.085	-0.05	0.386	415

۴- جمع بندی

در این تحقیق برای ریزمقیاس سازی داده های روزانه رطوبت خاک از محصولات سطح ۴ ماهواره SMAP (با قدرت تفکیک ۹ کیلومتر) و افزایش قدرت تفکیک آن به یک کیلومتر، با استفاده از رهیافت ریزمقیاس سازی SMBDA و داده های کمکی ماهواره سنتینل ۱ و همچنین ۱۰۳۷ مشاهده زمینی که دارای مشخصه های زمانی و مکانی مناسب باشند استفاده شد. نمونه برداری زمینی در دوره شش ماهه (پاییز و زمستان) در دشت صالح آباد (۳۰ کیلومتری جنوب غربی شهر ایلام) انجام گرفت. زمان انجام اندازه گیری های زمینی منطبق با محدوده زمانی گذر ماهواره سنتینل در منطقه هماهنگ شد و الگوی پراکنش نقاط نمونه برداری به گونه ای بود که در محدوده هر پیکسل به طور تقریبی ۴ مشاهده زمینی برداشت شود.

به دلیل تغییرات اندک پوشش گیاهی در طول دوره نمونه برداری الگوریتم ریزمقیاس سازی با استفاده از β ثابت توسعه داده شد. ارزیابی و مقایسه مقادیر رطوبت خاک به دست آمده از الگوریتم ریزمقیاس سازی با مشاهدات زمینی نشان دهنده رفتار مشابه این ۲ نمودار با یکدیگر بوده که در مقایسه با نتایج سایر مطالعات در مناطق اگر و کلمیایی مشابه اشاره شده از صحت خوبی برخوردار است و می تواند به عنوان ابزاری برای تأمین اطلاعات رطوبت خاک ریزمقیاس در کاربردهایی از قبیل مباحث زیست محیطی، پیش بینی و مدیریت سیلاب، پیش بینی گرد و خاک، کشاورزی و دیم کاری و غیره مورد استفاده قرار گیرد. بررسی شاخص های پوشش گیاهی و بارندگی منطقه نمونه برداری نشان داد که این ۲ عامل اثر نامطلوبی بر نتایج الگوریتم ریزمقیاس سازی گذاشته و بهتر است برای رسیدن به نتایج مطلوب با در نظر گرفتن تطبیق زمانی گذر ماهواره و نمونه برداری، برداشت نمونه ها حتی الامکان در این شرایط صورت نگیرد.

انجام مطالعات آبی با هدف تطویل زمانی مکانی اندازه گیری های میدانی به دلیل ایجاد تنوع و پراکندگی بیشتر در مقادیر اندازه گیری شده و همچنین تکرار آن در سایر مناطق اقلیمی می تواند به تقویت جامعیت الگوریتم ریزمقیاس سازی بیانجامد. پیاده سازی الگوریتم با استفاده از روش های غیر کلاسیک (محاسبات نرم) نیز می تواند در کاهش عدم قطعیت مقادیر ریزمقیاس شده مؤثر واقع شود.

۵- تشکر

بدین وسیله از حمایت پژوهشکده هواشناسی آب و کشاورزی و کارگروه تخصصی آب، خشکسالی، فرسایش و محیط زیست معاونت علمی فناوری ریاست جمهوری در انجام این تحقیق، قدردانی می گردد.

پی نوشت ها

- 1- Essential Climate Variables
- 2- World Meteorological Organization
- 3- Global Climate Observing System
- 4- Committee on Earth Observation Satellite
- 5- Time Domain Reflectometry
- 6- Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth Observing System Sensor
- 7- The Advanced Scatterometer
- 8- Soil Moisture and Ocean Salinity
- 9- Soil Moisture Active Passive
- 10- Optical and Passive Downscaling Approaches
- 11- Active and Passive Downscaling Approaches
- 12- Synthetic Aperture Radar
- 13- Ground Range Detected
- 14- <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>
- 15- Digital Number
- 16- Calibration
- 17- Sigma Nought
- 18- Thermal Noise Removal
- 19- Multilooking
- 20- Speckle-Effect
- 21- Terrain-Correction
- 22- Soil Moisture-Based Downscaling Algorithm
- 23- Near linear
- 24- Vegetation Water Content
- 25- Resample
- 26- Normalized Difference Vegetation Index
- 27- Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
- 28- Root-Mean-Square Error

۶- مراجع

- Bartalis Z, Wagner W, Naeimi V, Hasenauer S, Scipal K, Bonekamp H, Figa J, and Anderson C (2007) Initial soil moisture retrievals from the METOP-A Advanced Scatterometer (ASCAT). *Geophysical Research Letters*, John Wiley & Sons, Ltd 34(20)
- Carlson TN, Gillies RR, and Perry EM (2009) A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. *Taylor & Francis Group* 9(1–2):161–173
- Chan SK, Bindlish R, O’Neill PE, Njoku E, Jackson T, Colliander A, Chen F, Burgin M, Dunbar S, Piepmeier J, ..., and Kerr Y (2016) Assessment of the SMAP Passive Soil Moisture Product. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 54(8):4994–5007
- Das NN, Entekhabi D, Dunbar RS, Chaubell MJ, Colliander A, Yueh S, Jagdhuber T, Chen F, Crow W, O’Neill PE, ..., and Thibeault M (2019) The SMAP and Copernicus Sentinel 1A/B microwave active-passive high resolution surface soil moisture product. *Remote Sensing of Environment*, Elsevier 233:111380
- Das NN, Entekhabi D, Dunbar RS, Colliander A, Chen F, Crow W, Jackson TJ, Berg A, Bosch DD, Caldwell T, ..., and Njoku EG (2018) The SMAP mission combined active-passive soil moisture product at 9□km and 3□km spatial resolutions. *Remote Sensing of Environment*, Elsevier 211:204–217
- Das NN, Entekhabi D, Kim S, Yueh S, and O’Neill P (2016) Combining SMAP and Sentinel data for high-resolution Soil Moisture product. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016-November:129–131
- Das NN, Entekhabi D, and Njoku EG (2011) An algorithm for merging SMAP radiometer and radar data for high-resolution soil-moisture retrieval. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 49(5):1504–1512
- Das NN, Entekhabi D, Njoku EG, Shi JJC, Johnson JT, and Colliander A (2014) Tests of the SMAP combined radar and radiometer algorithm using airborne field campaign observations and simulated data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 52(4):2018–2028
- Djamai N, Magagi R, Goïta K, Merlin O, Kerr Y, and Roy A (2016) A combination of DISPATCH downscaling algorithm with CLASS land surface scheme for soil moisture estimation at fine scale during cloudy days. *Remote Sensing of Environment*, Elsevier 184:1–14
- Entekhabi D, Njoku EG, O’Neill PE, Kellogg KH, Crow WT, Edelstein WN, Entin JK, Goodman SD, Jackson TJ, Johnson J, ..., and van Zyl J (2010) The Soil Moisture Active Passive (SMAP) mission. *Proceedings of the IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* 98(5):704–716
- Fang B, Lakshmi V, Bindlish R, Jackson TJ, Cosh M, and Basara J (2013) Passive microwave soil moisture downscaling using vegetation index and skin surface temperature. *Vadose Zone Journal*, Wiley 12(3):vzj2013.05.0089
- Filipponi F (2019) Sentinel-1 GRD preprocessing workflow. *Proceedings 2019*, Vol. 18, Page 11. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute* 18(1):11
- Ghafari E, Faridhosseini A (2021) Review on Soil Moisture Remote Sensing Techniques and Spatial Resolution Downscaling Methods. *Journal of Water and Sustainable Development*. Ferdowsi University of Mashhad 7(4):61–72 (In Persian)
- Haji Maleki K, Vaezi A, Sarmadian F, Crow WT, and Brocca L (2020) Validation of SMAP satellite-based soil moisture in different land uses of Simineh-Zarrineh (Bokan) Basin. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, University of Tehran 51(5):1317–1329
- He L, Hong Y, Wu X, Ye N, Walker JP, and Chen X (2018) Investigation of SMAP active-passive downscaling algorithms using combined Sentinel-1 SAR and SMAP radiometer data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, IEEE 56(8):4906–4918
- International Atomic Energy Agency (2008) *Field Estimation of Soil Water Content*. Training Course Series
- Karami A, Moradi H, Mousivand A (2020) Improving spatial resolution of SMAP surface soil moisture through the synergy of radar-microwave observations at the Firoozabad watershed, Ardabil. *Watershed Management Research Journal* 33(4):18–31 (In Persian)
- Kazemi M, Nafarzadegan A R, Mohammadi F (2019) Identification of water bodies and flooded areas using data- Sentinel satellite radar. *4th International Congress of Developing Agriculture, Natural Resources, Environment and Tourism of Iran*. Tabriz Islamic Art University in cooperation with Shiraz University and Yasouj University (In Persian)
- Leese J, Jackson T, Pitman A, Dirmeyer P, Leese J, Jackson T, Pitman A, and Dirmeyer P (2001)

- Meeting summary: GEWEX/BAHC international workshop on soil moisture monitoring, analysis, and prediction for hydrometeorological and hydroclimatological applications. *Bulletin of the American Meteorological Society (BAMS)* 82(7):1423–1430
- Leroux DJ, Das NN, Entekhabi D, Colliander A, Njoku EG, Dunbar RS, and Yueh SH (2016) Active-passive disaggregation of brightness temperatures during the SMAPVEX12 campaign. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* 54(12):6859–6867
- Malbêteau Y, Merlin O, Molero B, Rüdiger C, and Bacon S (2016) DisPATCh as a tool to evaluate coarse-scale remotely sensed soil moisture using localized in situ measurements: Application to SMOS and AMSR-E data in Southeastern Australia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Elsevier* 45:221–234
- Mason P, Zillman J, Simmons A, Lindstrom E, Harrison D, Dolman H, et al. (2010) Implementation plan for the global observing system for climate in support of the UNFCCC (2010 Update). Geneva, WMO, IOC, UNEP, ICSU, 180pp. (WMO-TD 1523)
- Merlin O, Al Bitar A, Walker JP, and Kerr Y (2010) An improved algorithm for disaggregating microwave-derived soil moisture based on red, near-infrared and thermal-infrared data. *Remote Sensing of Environment, Elsevier* 114(10):2305–2316
- Merlin O, Escorihuela MJ, Mayoral MA, Hagolle O, Al Bitar A, and Kerr Y (2013) Self-calibrated evaporation-based disaggregation of SMOS soil moisture: An evaluation study at 3 km and 100 m resolution in Catalunya, Spain. *Remote Sensing of Environment, Elsevier* 130:25–38
- Mirsoleimani HR, Sahebi MR, Baghdadi N, and el Hajj M (2019) Bare soil surface moisture retrieval from Sentinel-1 SAR data based on the calibrated IEM and Dubois models using neural networks. *Sensors* 19(14):3209
- Njoku EG, Jackson TJ, Lakshmi V, Chan TK, and Nghiem S v. (2003) Soil moisture retrieval from AMSR-E. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41(2 PART 1):215–228
- Ochsner TE, Cosh MH, Cuenca RH, Dorigo WA, Draper CS, Hagimoto Y, Kerr YH, Larson KM, Njoku EG, Small EE, and Zreda M (2013) State of the art in large-scale soil moisture monitoring. *Soil Science Society of America Journal, John Wiley & Sons, Ltd* 77(6):1888–1919
- Peng J, Loew A, Zhang S, Wang J, and Niesel J (2016) Spatial downscaling of satellite soil moisture data using a vegetation temperature condition index. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* 54(1):558–566
- Piles M, Petropoulos GP, Sánchez N, González-Zamora Á, and Ireland G (2016) Towards improved spatio-temporal resolution soil moisture retrievals from the synergy of SMOS and MSG SEVIRI spaceborne observations. *Remote Sensing of Environment, Elsevier* 180:403–417
- Rudiger C, Su CH, Ryu D, and Wagner W (2016) Disaggregation of low-resolution L-band radiometry using C-band radar data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* 13(10):1425–1429
- Santi E, Paloscia S, Pettinato S, Entekhabi D, Alemohammad SH, and Konings AG (2016) Integration of passive and active microwave data from SMAP, AMSR2 and Sentinel-1 for Soil Moisture monitoring. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* 5252–5255
- Sutariya S, Hirapara A, Meherbanali M, Tiwari M K, Singh V, and Kalubarme M (2021) Soil moisture estimation using Sentinel-1 SAR data and land surface temperature in Panchmahal District, Gujarat State. *International Journal of Environment and Geoinformatics, International Journal of Environment and Geoinformatics* 8(1):65–77
- Torres R, Snoeij P, Geudtner D, Bibby D, Davidson M, Attema E, Potin P, Rommen BÖ, Floury N, Brown M, ..., and Rostan F (2012) GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment, Elsevier* 120:9–24
- Twele A, Cao W, Plank S, and Martinis S (2016) Sentinel-1-based flood mapping: A fully automated processing chain. *Taylor & Francis* 37(13):2990–3004
- V Sharma (2018) Methods and techniques for soil moisture monitoring. University of Wyoming Extension
- Walker JP, Willgoose GR, and Kalma JD (2004) In situ measurement of soil moisture: A comparison of techniques. *Journal of Hydrology, Elsevier* 293(1–4):85–99
- WMO, (UNESCO) United Nations Educational S and CO, Programme (UNEP) United Nations Environment and Science (ICSU) International Council for (2010) Implementation plan for the global observing system for climate in support of the UNFCCC. Geneva: WMO
- Wu X, Walker JP, Das NN, Panciera R, and Rüdiger C (2014) Evaluation of the SMAP brightness

temperature downscaling algorithm using active-passive microwave observations. Remote Sensing of Environment, Elsevier 155:210–221

Yueh S, Entekhabi D, O'Neill P, Njoku E, and Entin J (2016) NASA soil moisture active passive mission status and science performance. International Geoscience and Remote Sensing Symposium

(IGARSS), Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 116–119

Zistab Consulting Engineers Co. (2016) Agricultural development and selection of sprinklers in godarkhosh irrigation and drainage sub-network (SalehAbad). Technical Report of Soil Science 5-10, IR-GK-2-01-01 (In Persian)