




Investigate the potential of satellite altimeters in estimating surface soil moisture in semi-arid areas

Mardoukhi, M.¹  | Emadi, S. R.¹  | Agar, P.² 

1. Department of Geodesy Engineering, South Tehran, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2. Department of Geodesy, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: mohamadmardookhi75@gmail.com

(Received: 2 April 2024, Revised: 7 May 2024, Accepted: 11 Aug 2024, Published online: 5 Oct 2024)

Summary

Surface soil moisture is an important variable in the climate system, controlling the exchange of water, energy and carbon, between the Earth's surface and the atmosphere. Also, the quantification of surface soil moisture is necessary for the simulation of climate change, the prediction of floods and droughts and the optimal irrigation of agricultural land. Satellite altimeters are often used to monitor water levels (ocean and inland waters such as lakes, rivers and dams) and the dynamics of ice sheets. However, due to the influence of surface roughness on the return waveforms captured by altimeters, they can also be used to estimate surface features such as surface soil moisture. Against this backdrop, the main objective of this study is to investigate the potential of conventional altimeters (Low Resolution Mode (LRM) satellite altimeters such as Jason series satellites, Envisat, Saral and...) and new generation altimeters (synthetic aperture radar (SAR) satellite altimeters such as Cryosat-2, Sentinel-3 and Sentinel-6) in the estimation of surface soil moisture in the semi-arid region of Spain over the period from 2016 to 2023. To achieve this goal, level 2 (L2) data from the SRAL altimeter sensor of Sentinel-3A satellite along the pass of 644 and geophysical data record (GDR) from the Poseidon-3B altimeter sensor of Jason-3 satellite along the pass of 213 were used. In addition to the different acquisition geometry of these two altimetry satellites, the effectiveness of the re-tracking algorithms used in them in estimating soil surface moisture, was also questioned in this study. The relationships between the observed backscattering coefficients derived from 4 re-tracking algorithms (re-tracker: Ocean re-tracker, OCOG re-tracker, Sea-ice re-tracker and Ice-sheet re-tracker) in the L2 data of the Sentinel-3A satellite additionally 3 re-tracking algorithms (re-tracker: MLE-4 re-tracker, MLE-3 re-tracker and Ice re-tracker) in the GDR data of the Jason-3 satellite and the surface soil moisture obtained from ground stations (the closest ground station to the satellite pass was selected) were investigated. The results of the analysis, demonstrate a strong linear relationship between the scattering coefficients derived from the satellite data and the corresponding soil moisture measurements obtained from ground stations along the coverage of the two satellites. The best results (the highest correlation coefficient) for the Sentinel-3A and Jason-3 satellites were achieved with the Ocean Re-tracker (with a correlation coefficient of 0.75), and the Ice Re-tracker (with a correlation coefficient of 0.7), respectively. MLE-3 re-tracker in Jason-3 Satellite has also obtained a result almost similar to ICE re-tracker in one of the ground stations. While the results express the high performance of the Sentinel-3A and Jason-3 satellites in estimating surface soil moisture, they show the superiority of synthetic aperture radar altimeters over the conventional altimeters in estimating surface soil moisture in the area studied.

Keywords: surface soil moisture, altimetry satellites, Sentinel-3A, Jason-3, dispersion coefficient.

Cite this article: Mardoukhi, M., Emadi, S. R., & Agar, P. (2024). Investigate the potential of satellite altimeters in estimating surface soil moisture in semi-arid areas. *Journal of the Earth and Space Physics*, 50(3), 637-654. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2024.373283.1007595>

E-mail: (1) sr_emadi@azad.ac.ir (2) parisaagar1995@email.kntu.ac.ir



Publisher: University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2024.373283.1007595>

Print ISSN: 2538-371X
Online ISSN: 2538-3906

بررسی پتانسیل ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی در برآورد رطوبت سطحی خاک در مناطق نیمه خشک

محمد مردوخ^۱ | سید روح اله عمادی^۱ | پریسا آگار^۲

۱. گروه ژئودزی، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۲. گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: mohamadmardookhi75@gmail.com

(دریافت: ۱۴۰۳/۱/۱۴، بازنگری: ۱۴۰۳/۲/۱۸، پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۵/۲۱، انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۷/۱۴)

چکیده

ارتفاع‌سنج‌های ماهواره‌ای به‌طور متداول در پایش ارتفاعی آب‌های کره‌زمین و همچنین صفحات یخی استفاده می‌شوند. اما با توجه به تأثیر ناهمواری سطح بر شکل موج‌های بازگشتی ارتفاع‌سنج‌ها، آنها را می‌توان در تخمین ویژگی‌های سطح نظیر رطوبت سطحی خاک نیز به‌کار گرفت. هدف اصلی این پژوهش بررسی پتانسیل ارتفاع‌سنج‌های نسل قدیم و جدید (ارتفاع‌سنج‌های رادار با دهانه ترکیبی) در برآورد رطوبت سطحی خاک در قسمت نیمه‌خشک کشور اسپانیا در بازه زمانی ۲۰۱۶ الی ۲۰۲۳ است. جهت نیل به این هدف، گذر ۶۴۴ ماهواره سنتینل-۳ آ و گذر ۲۱۳ ماهواره جیسون-۳ انتخاب شدند. علاوه بر هندسه برداشت متفاوت این دو ماهواره ارتفاع‌سنجی، کارایی بازتعقب‌گرهای مورد استفاده در آنها در برآورد رطوبت سطحی خاک نیز در این پژوهش به چالش کشیده شدند. روابط بین ضرایب پراکنش به‌دست‌آمده از بازتعقب‌گرهای موجود در داده‌های سطح دو ماهواره سنتینل-۳ آ، جیسون-۳ و رطوبت سطحی خاک حاصل از داده‌های میدانی بررسی شدند. نتایج یک رابطه خطی دقیق را بین ضرایب پراکنش و رطوبت سطحی خاک اندازه‌گیری شده در دو ایستگاه زمینی مختلف در امتداد برداشت در هر دو ماهواره نشان دادند. بهترین نتایج برای ماهواره‌های سنتینل-۳ آ و جیسون-۳ به‌ترتیب با بازتعقب‌گرهای اقیانوسی (با ضریب همبستگی ۰/۷۵) و آیس (با ضریب همبستگی ۰/۷) حاصل شد. نتایج ضمن بیان قابلیت بالای هر دو ماهواره سنتینل-۳ آ و جیسون-۳، برتری ارتفاع‌سنج‌های رادار با دهانه ترکیبی را نسبت به ارتفاع‌سنج‌های نسل قدیم در برآورد رطوبت سطحی خاک در منطقه مورد مطالعه نشان داد.

واژه‌های کلیدی: رطوبت سطحی خاک، ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی، سنتینل-۳ آ، جیسون-۳، ضریب پراکنش.

۱. مقدمه

اندازه‌گیری رطوبت سطحی خاک در سراسر جهان محدود است. تغییرات مکانی-زمانی رطوبت سطحی خاک نیز بسیار زیاد است و عوامل متعددی مانند تغییرات توپوگرافی، نوع خاک، پوشش گیاهی و آب‌وهوا بر آن تأثیر می‌گذارند. از این‌رو مشاهدات زمینی اطلاعات دقیق و جامعی در مورد توزیع مکانی-زمانی رطوبت سطحی خاک ارائه نمی‌دهند. لذا روش‌های سنجش‌ازدوری برای اندازه‌گیری رطوبت سطحی خاک در مقیاس مکانی بزرگ می‌توانند مفید باشند. به‌طور معمول از ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی در پایش آب‌های کره‌زمین و صفحات یخی استفاده می‌شود.

رطوبت خاک به مقدار آب موجود در خاک اشاره دارد و تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله نوع خاک، تبخیر و تعرق می‌باشد (کیم و چاپل، ۲۰۱۰). رطوبت سطحی خاک یک متغیر اصلی در سیستم آب‌وهوایی است که تبادل آب، انرژی و کربن بین سطح زمین و جو را کنترل می‌کند. همچنین یکی از پارامترهای کلیدی مربوط به وقوع سیل، نفوذپذیری خاک و تغذیه آب‌های زیرزمینی است. لذا کمی‌سازی رطوبت سطحی خاک برای شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی، پیش‌بینی سیل، خشک‌سالی و مدیریت بهینه آبیاری در مزارع کشاورزی ضروری است. با وجود اهمیت رطوبت سطحی خاک، توزیع مکانی ایستگاه‌های زمینی

استناد: مردوخ، محمد؛ عمادی، سید روح اله و آگار، پریسا (۱۴۰۳). بررسی پتانسیل ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی در برآورد رطوبت سطحی خاک در مناطق نیمه‌خشک. مجله فیزیک

زمین و فضا، ۵۰(۳)، ۶۳۷-۶۵۴. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2024.373283.1007595>

رایانامه: (۱) parisaagar1995@email.kntu.ac.ir (۲) sr_emadi@azad.ac.ir



ارتفاع‌سنج راداری انویست برای برآورد رطوبت سطحی خاک در مناطق نیمه‌خشک شمال مالی در بازه زمانی ۲۰۰۲ الی ۲۰۱۰ مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، روابط بین ضرایب پراکنش به‌دست‌آمده از بازتعقیب‌گرهای موجود در داده‌های سطح دو و داده‌های میدانی، از جمله نوع خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و رطوبت سطحی خاک بررسی شدند. نتایج یک رابطه خطی قوی بین ضرایب پراکنش و رطوبت سطحی خاک اندازه‌گیری شده در شش ایستگاه مختلف را در امتداد مسیر ماهواره نشان دادند و بهترین نتایج با الگوریتم‌های بازتعقیب آیس-۱ و آیس-۲ حاصل شد (فتراس و همکاران، ۲۰۱۲). مقایسه‌ای بین ارتفاع‌سنج‌های راداری انویست و جیسون-۲ و حس‌گرهای پراکنش‌سنج برای برآورد رطوبت سطحی خاک در غرب آفریقا انجام شد. نتایج نشان دادند که هر دو ارتفاع‌سنج راداری در هر دو باند Ku و C در مقایسه با حس‌گر پراکنش‌سنج نسبت به رطوبت سطحی خاک حساس‌تر هستند و همچنین تأثیر پوشش گیاهی بر این ارتفاع‌سنج‌ها کمتر است (فتراس و همکاران، ۲۰۱۵). تأثیر تغییرات مکانی-زمانی رطوبت سطحی خاک و ناهمواری خاک بر شکل موج‌های بازگشتی ارتفاع‌سنج‌های انویست (باند Ku) و سارال (باند Ka) و به‌دنبال آن ضرایب پراکنش به‌دست‌آمده از شکل موج‌های بازگشتی در یک منطقه نیمه‌خشک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که افزایش رطوبت سطحی خاک سبب افزایش ضریب پراکنش می‌شود (اسمیت و جانسون، ۲۰۲۰).

در پژوهش حاضر عملکرد ارتفاع‌سنج رادار با دهانه ترکیبی (SAR) ماهواره سنتینل-۳ آ با مزیت قدرت تفکیک مکانی بالا (۳۰۰ متر) در امتداد برداشت و همچنین ماهواره جیسون-۳ که در حالت قدرت تفکیک مکانی پایین (LRM) به برداشت داده می‌پردازد، در برآورد رطوبت سطحی خاک، مورد ارزیابی قرار گرفته است. هدف از این مطالعه مقایسه ارتفاع‌سنج‌های ماهواره سنتینل-۳ آ و جیسون-۳ با در نظر گرفتن دو کلید اصلی برداشت هندسی متفاوت و استفاده از بازتعقیب‌گرهای مختلف در برآورد سری زمانی رطوبت سطحی خاک در مناطق نیمه‌خشک

ارتفاع‌سنج‌های ماهواره‌ای پالس‌هایی منظم با توان معین، در محدوده الکترومغناطیس را به‌صورت پیوسته به سطح زمین ارسال می‌کنند و توان‌های منعکس‌شده از سطح را توسط آنتن تحت عنوان شکل موج دریافت می‌کنند. لذا شکل موج‌های بازگشتی مشاهدات اصلی در ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای می‌باشند که از آنها می‌توان فاصله ارتفاع‌سنج تا سطح و اطلاعات مختلفی درباره ماهیت و خصوصیات فیزیکی سطح بازتاب‌دهنده، مانند ارتفاع موج، ضریب پراکنش و سرعت سطحی باد را استخراج کرد (گومنگینگر و همکاران، ۲۰۱۱).

ضریب پراکنش نسبت توان سیگنال دریافتی در آنتن و توان سیگنال ارسالی از آنتن است. پس از آن که سیگنال‌ها ارسال می‌شوند، توسط جو تضعیف می‌شوند و سپس به سطح زمین می‌رسند. مقداری از توان منعکس و بخشی از آنها توسط سطح جذب می‌شود. قسمت منعکس‌شده در هنگام عبور از جو مجدداً تضعیف می‌شود و بقیه توسط آنتن رادار دریافت می‌شود (روحی، ۲۰۱۵). از این رو ضریب پراکنش ارتفاع‌سنج‌های راداری، که به ناهمواری سطح و محتوای آب نیز بستگی دارد، می‌تواند با ویژگی‌های سطحی مانند رطوبت سطحی خاک مرتبط باشد (اسمیت و جانسون، ۲۰۲۰). ارتفاع‌سنج‌های ماهواره‌ای در تخمین رطوبت سطحی خاک در مناطق نیمه‌خشک دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشد که می‌توان به وجود آب‌های سطحی در رد پای ماهواره و متعاقباً رفتار نویزی ضریب پراکنش، ناهمواری سطح زمین و همچنین گوناگونی پوشش گیاهی و تأثیر آنها بر بازتاب سیگنال‌های ارتفاع‌سنج، نیاز به درون‌یابی بین‌گذرهای ماهواره‌ای در بعضی موارد و همچنین کافی نبودن رزولوشن زمانی داده‌های بعضی از ارتفاع‌سنج‌ها در برخی از کاربردها اشاره کرد. همچنین برآورد رطوبت سطحی خاک با استفاده از ارتفاع‌سنجی بسیار متأثر از الگوریتم‌های بازتعقیب شکل موج است (یوینگ و همکاران، ۲۰۱۷ و نبابان و همکاران، ۲۰۱۸).

تا به امروز مطالعات اندکی در زمینه استفاده از ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی در برآورد رطوبت سطحی خاک انجام شده است که در ادامه به تعدادی از آنها اشاره می‌شود. پتانسیل

می‌باشد.

ارتفاع‌سنج‌های نسل قدیم که اندازه ردپا آنها بالای ۲ کیلومتر است، کاهش می‌دهند. از دیگر ویژگی‌های ارتفاع‌سنج‌های رادار با دهانه ترکیبی می‌توان به فرکانس تکرار پالس بالاتر و برداشت چندمنظری اشاره کرد که در این صورت تعداد اندازه‌گیری‌ها افزایش یافته لذا دقت اندازه‌گیری نیز افزایش می‌یابد. جدول ۱ برخی از مشخصات ارتفاع‌سنج SRAL را بیان می‌کند (ادریس و همکاران، ۲۰۲۱؛ آگار و همکاران، ۲۰۲۳).

۳-۲. ماهواره ارتفاع‌سنجی جیسون-۳

ماهواره جیسون-۳ یک مأموریت ارتفاع‌سنجی بین‌المللی است که با همکاری سازمان ملی هوانوردی و فضایی آمریکا (NASA)، اداره ملی اقیانوسی و جوی آمریکا (NOAA)، سازمان اروپایی بهره‌برداری از ماهواره‌های هواشناسی (EUMETSAT) و مرکز ملی فرانسه (d'Etudes spatiales) در ۱۷ ژانویه ۲۰۱۶ به فضا پرتاب شد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۱). این ماهواره ارتفاع‌سنج دو فرکانسه (باند Ku و C) پوزیدون-۳، که در حالت LRM برداشت می‌کند را با خود حمل می‌کند. ارتفاع‌سنج پوزیدون-۳ می‌تواند ارتفاع آب، ارتفاع موج و همچنین سرعت باد را در اقیانوس جهانی با دوره تکرار ۱۰ روزه اندازه‌گیری کند (مصطفوی و همکاران، ۲۰۲۱).

در این پژوهش برای بررسی پتانسیل ارتفاع‌سنج‌های ماهواره‌های سنتینل-۳ آ و جیسون-۳ در برآورد رطوبت سطحی خاک در کشور اسپانیا، از داده‌های سطح دو ماهواره سنتینل-۳ آ (SR_2_LAN) و داده‌های GDR ماهواره جیسون-۳ استفاده شده است. همانطور که در شکل ۱ نمایش داده شده است، گذر ۶۴۴ ماهواره سنتینل-۳ آ و گذر ۲۱۳ ماهواره جیسون-۳ در این پژوهش انتخاب شده‌اند.

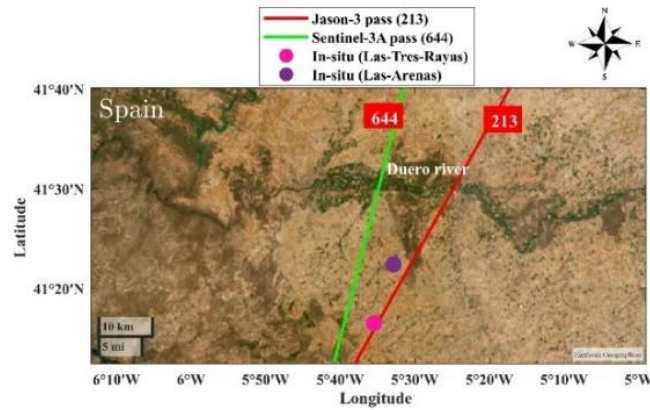
۲. منطقه مطالعاتی و داده‌ها

۱-۲. منطقه مطالعاتی

مطالعه حاضر در یک ناحیه نسبتاً مسطح (شیب کمتر از ۱۰ درصد) در حوضه رودخانه دورو در کشور اسپانیا انجام شده است. بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی، این منطقه دارای آب و هوای مدیترانه‌ای نیمه‌خشک با تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های خنک و مرطوب بوده و متوسط دمای سالانه آن ۱۲ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالانه ۳۸۵ میلی‌متر می‌باشد. پوشش اراضی این منطقه را اراضی زراعی و بوته‌زارها تشکیل می‌دهد و میانگین ارتفاع منطقه حدود ۶۵۰ متر از سطح دریا است (سانچز و همکاران، ۲۰۱۲ و پنگ و همکاران، ۲۰۱۵). وجود سطوح همگن و مسطح، این منطقه را به‌ویژه برای توسعه روش‌شناسی و اهداف اعتبارسنجی محصولات سنجش‌ازدوری مناسب می‌سازد. شکل ۱ موقعیت گذرهای انتخابی ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی سنتینل-۳ آ و جیسون-۳ را در منطقه مورد پژوهش نشان می‌دهد.

۲-۲. ماهواره ارتفاع‌سنجی سنتینل-۳ آ

ماهواره سنتینل-۳ آ یکی از مهم‌ترین مأموریت‌های خانواده سنتینل برای برنامه پایش کره‌زمین کوپرنیک کمیسیون اروپا است که توسط ایسا توسعه یافته و به‌وسیله اومیتست اداره می‌شود و در ۱۶ فوریه ۲۰۱۶ به فضا پرتاب شده است. ماهواره سنتینل-۳ آ ارتفاع‌سنج سرال (SRAL) که از ارتفاع‌سنج‌های نسل جدید است را با خود حمل می‌کند. SRAL یک ارتفاع‌سنج راداری دوفرکانسه است که هم در حالت رادار دهانه ترکیبی (SAR) و هم حالت رزولوشن پایین (LRM) برداشت می‌کند. ارتفاع‌سنج‌های رادار با دهانه ترکیبی که به ارتفاع‌سنج‌های تأخیر داپلر نیز شناخته می‌شوند با پردازش داپلر در امتداد برداشت، اندازه ردپا در امتداد برداشت (۳۰۰ متر) را نسبت به



شکل ۱. موقعیت گذرهای انتخابی ماهواره سنتینل-۳ آ و جیسون-۳ و همچنین ایستگاه‌های اندازه‌گیری رطوبت سطحی خاک.

جدول ۱. مشخصات ارتفاع‌سنج SRAL.

SRAL	ارتفاع‌سنج
۸۱۵٫۵	ارتفاع مداری (کیلومتر)
۲۷	دوره تکرار مداری (روز)
C (۵٫۴) و Ku (۱۳٫۶)	باند (فرکانس گیگاهرتز)
۳۰۰	قدرت تفکیک در امتداد برداشت (متر)
>۲	قدرت تفکیک در عرض برداشت (کیلومتر)

۳. روش پژوهش

۳-۱. مراحل برآورد سری‌های زمانی رطوبت سطحی خاک از پردازش داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای و ارزیابی آنها با داده‌های میدانی برای ایجاد سری‌های زمانی از رطوبت سطحی خاک با استفاده از پردازش داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای و ارزیابی آنها با سری‌های زمانی رطوبت سطحی خاک به‌دست آمده از مشاهدات میدانی مراحل ۱ الی ۷ در این پژوهش انجام شده است.

۲-۴. داده‌های میدانی

در این پژوهش جهت بررسی پتانسیل ارتفاع‌سنج‌های ماهواره سنتینل-۳ آ و جیسون-۳ در برآورد رطوبت سطحی خاک از داده‌های دو ایستگاه اندازه‌گیری رطوبت سطحی خاک متعلق به شبکه REMEDHUS که بخشی از شبکه بین‌المللی رطوبت خاک است، استفاده شده است (سانچز و همکاران، ۲۰۱۲ و پنگ و همکاران، ۲۰۱۵). جدول ۲ مشخصات مربوط به دو ایستگاه زمینی رطوبت سطحی خاک مورد استفاده در این پژوهش را بیان می‌کند.

جدول ۲. مشخصات ایستگاه‌های زمینی رطوبت سطحی خاک استفاده شده در این پژوهش.

ایستگاه	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	ارتفاع (متر)	فاصله مستقیم تا گذر ماهواره (کیلومتر)	تاریخ داده
Las-Tres-Rayas	-۵٫۵۹	۴۱٫۲۸	۸۷۰	۰٫۰۷ (گذر ۲۱۳)	۲۰۱۶/۰۲/۱۵ ۲۰۲۰/۰۸/۱۸
Las-Arenas	-۵٫۵۵	۴۱٫۳۷	۷۴۵	۱۰ (گذر ۶۴۴) ۸ (گذر ۲۱۳)	۲۰۱۶/۰۵/۰۱ ۲۰۲۱/۱۰/۲۰

۳-۱-۱. استخراج داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای در منطقه مورد مطالعه

در داده‌های سطح دو ارتفاع‌سنج‌های سنتینل-۳ آ و جیسون-۳ پارامترهایی نظیر موقعیت دقیق ماهواره (طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی و ارتفاع مدارای ماهواره)، زمان برداشت، رنج (فاصله ارتفاع‌سنج تا سطح برداشت)، تصحیح‌های ابزاری، محیطی و ژئوفیزیکی و چندین پارامتر دیگر مانند ضریب پراکنش وجود دارد. از این‌رو پلی‌گونی مستطیل شکل با فرمت KML به طول تقریبی ۵ کیلومتر در امتداد گذرهای ماهواره‌ای در منطقه مورد پژوهش با استفاده از نرم‌افزار گوگل ارث تهیه شد و بر اساس طول و عرض جغرافیایی پلی‌گون تهیه‌شده و گذرهای ماهواره‌ای، پارامترهای ۲۰ هر تیز زمان و ضرایب پراکنش به دست آمده از بازتعقیب گرهای موجود در داده‌های دو ماهواره مذکور که در داخل پلی‌گون بودند، استخراج شدند. در این پژوهش از اندازه‌گیری‌های باندهای Ku ماهواره‌های سنتینل-۳ آ و جیسون-۳ استفاده شده است. داده‌های سطح دو ارتفاع‌سنج ماهواره سنتینل-۳ آ چهار ضریب پراکنش حاصل از الگوریتم‌های بازتعقیب Ice-Ocean, OCOG, Ocean sheet و Sea-ice را ارائه می‌دهند. بازتعقیب گر Ocean مدل ریاضی حاصل از برداشت چند منظری ارتفاع‌سنج‌های رادار با دریچه مصنوعی را توصیف می‌کند. مدل مذکور با در نظر گرفتن خصوصیات سطح بازتاب دهنده و مشخصات ارتفاع‌سنج تعریف می‌شود و در نهایت با انطباق این مدل به شکل موج‌های بازگشتی پارامترهای شکل موج استخراج می‌شود. الگوریتم OCOG با تعریف یک مستطیل حول مرکز ثقل شکل موج و یافتن مرکز ثقل هر شکل موج به بازتعقیب شکل موج می‌پردازد. الگوریتم‌های بازتعقیب Ice-sheet و Sea-ice به ترتیب برای شکل موج‌های منعکس از صفحات یخی و مناطق یخی-آبی طراحی شده‌اند. این الگوریتم‌ها بر اساس برازش کمترین مربعات یک مدل نیمه تحلیلی با فرم گوسی اصلاح شده بر شکل موج، به بازتعقیب شکل موج می‌پردازند (اگار و همکاران، ۱۴۰۱) داده‌های GDR مأموریت جیسون-۳، ۳ ضریب

پراکنش حاصل از بازتعقیب گرهای Ice, MLE3 و MLE4 را ارائه می‌دهند. بازتعقیب گر Ice برای برآورد ارتفاع سطوح یخی در قطب توسعه یافته است. این الگوریتم را می‌توان بازتعقیب گر حد آستانه با آستانه ۳۰٪ دانست. الگوریتم MLE3 بر اساس برازش مدل تحلیلی مرتبه اول براون به شکل موج و الگوریتم MLE4 بر اساس برازش مدل نیمه تحلیلی مرتبه دوم براون و هاین به بازتعقیب شکل موج می‌پردازد (مصطفوی و همکاران، ۲۰۲۱ و نبابان و همکاران، ۲۰۱۸).

۳-۱-۲. تشکیل سری زمانی لحظه‌ای ضریب پراکنش سری‌های زمانی لحظه‌ای ضرایب پراکنش حاصل از الگوریتم‌های بازتعقیب ذکر شده برای گذرهای ماهواره سنتینل-۳ آ و ماهواره جیسون-۳ در هر دوره برداشت تشکیل شد.

۳-۱-۳. حذف مشاهدات اشتباه در سری زمانی لحظه‌ای ضریب پراکنش

با استفاده از مقدار میانگین سری زمانی لحظه‌ای ضریب پراکنش در هر دوره و با سطح اطمینان ۹۵ درصد، مشاهدات اشتباه ضریب پراکنش از سری زمانی لحظه‌ای خارج شدند. به این صورت که ابتدا یک مقدار میانگین از تمامی ضرایب پراکنش ($\bar{\sigma}_0$) در هر دوره محاسبه و سپس اختلاف میانگین از هر ضریب پراکنش (σ_0) لحظه‌ای در هر دوره محاسبه شد. ضرایب پراکنشی که اختلاف آنها از میانگین، خارج از محدوده خطای ارائه شده در رابطه (۱) بود به عنوان مشاهدات اشتباه از مجموعه داده‌های سری زمانی لحظه‌ای ضریب پراکنش کنار گذاشته شدند. در رابطه زیر: $k_{\alpha/2}$ مقدار بحرانی که برای سطح اطمینان ۹۵٪، مقدار ۱/۹۶ در نظر گرفته می‌شود و σ انحراف معیار اختلافات در هر دوره است. این روش در حذف مشاهدات اشتباه، نسبت به مشاهدات با خطاهای بزرگ حساس است (توریان، ۲۰۱۲).

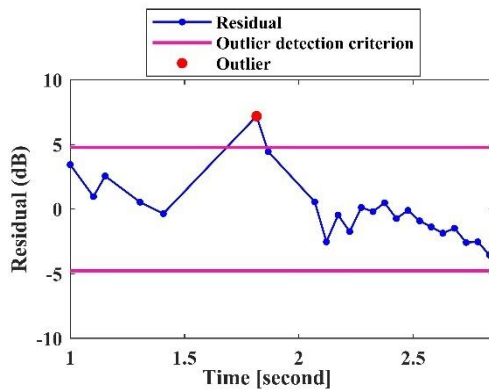
$$-k_{\alpha/2} < \frac{\sigma_0 - \bar{\sigma}_0}{\sigma} < k_{\alpha/2} \quad (1)$$

اقیانوس و آب‌های درون سرزمینی از داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای استفاده می‌شود (آگار و همکاران، ۲۰۲۳ و روحی و همکاران، ۲۰۱۹). در رویکرد اول با کنار هم قرار دادن مقدار میانه سری زمانی لحظه‌ای ضریب پراکنش متناظر با هر دوره، سری زمانی نهایی ضریب پراکنش هر گذر تشکیل شد. در رویکرد دوم از تمامی مقادیر سری زمانی لحظه‌ای ضریب پراکنش در هر دوره میانگین گرفته شد و مقادیر میانگین ضریب پراکنش متناظر با هر دوره کنار هم گذاشته شد و سری زمانی نهایی ضریب پراکنش برای هر گذر برآورد شد.

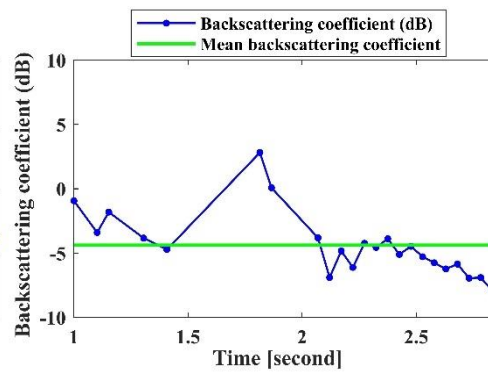
شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب سری زمانی لحظه‌ای ضریب پراکنش برای گذر ماهواره سنتینل-۳ آ و جی‌سون-۳ را نمایش می‌دهند که مشاهدات اشتباه با روش فوق در آنها شناسایی و حذف شدند.

۳-۱-۴. سری زمانی نهایی ضریب پراکنش در هر گذر

از دو رویکرد میانه و میانگین سری زمانی لحظه‌ای در هر دوره برای ایجاد سری زمانی نهایی ضریب پراکنش در هر گذر استفاده شده است. رویکردهای به کار گرفته شده مشابه روشی است که برای برآورد سری زمانی ارتفاع آب در

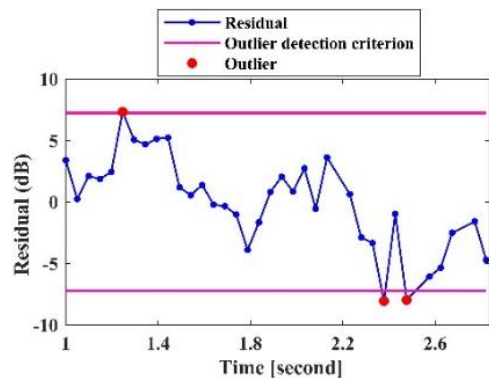


(ب)

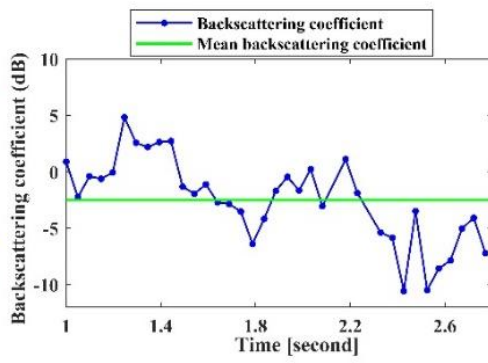


(الف)

شکل ۲. (الف) سری زمانی لحظه‌ای ضریب پراکنش به دست آمده از گذر ۶۴۴ دوره ۱۱ ماهواره سنتینل-۳ آ به همراه میانگین ضریب پراکنش لحظه‌ای (ب) اختلاف میانگین از ضریب پراکنش لحظه‌ای و داده‌های اشتباه شناسایی شده



(ب)



(الف)

شکل ۳. (الف) سری زمانی لحظه‌ای ضریب پراکنش به دست آمده از گذر ۲۱۳ دوره ۲۳ ماهواره جی‌سون-۳ به همراه میانگین ضریب پراکنش لحظه‌ای (ب) اختلاف میانگین از ضریب پراکنش لحظه‌ای و داده‌های اشتباه شناسایی شده

برای هر گذر ماهواره در منطقه مورد پژوهش برآورد شدند.

$$\sigma_0 = aSSM_m + b \quad (۴)$$

$$X = (A^T A)^{-1} \sigma_0 \quad (۵)$$

۳-۱-۷. ارزیابی سری‌های زمانی رطوبت سطحی خاک

هر گذر ماهواره با ایستگاه‌های رطوبت خاک زمینی ارزیابی سری‌های زمانی رطوبت سطحی خاک مشتق شده از داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای در هر گذر نسبت به سری زمانی رطوبت سطحی خاک حاصل از داده‌های میدانی با پارامتر جذر خطای مربعی متوسط (RMSE) به‌عنوان شاخص معرفی کننده صحت نتایج طبق رابطه (۶) صورت پذیرفت.

$$RMSE_{x,y} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (۶)$$

در رابطه فوق: x_i نتایج حاصل (رطوبت سطحی خاک مشتق شده از ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای) و y_i داده‌های مرجع (رطوبت سطحی خاک مشتق شده از ایستگاه زمینی) و n تعداد داده‌ها است.

۴. نتایج عددی

نتایج حاصل به‌صورت مجزا برای هر ماهواره در غالب اشکال و جداول در ادامه ارائه می‌شود.

۴-۱. رابطه بین ضریب پراکنش ارتفاع‌سنج ماهواره سنتینل-۳ آ و رطوبت سطحی خاک حاصل از داده‌های میدانی

نتایج عددی ارزیابی وجود یا عدم وجود رابطه خطی بین سری‌های زمانی ضریب پراکنش حاصل از باز تعقیب‌گرهای موجود در داده‌های سطح دو ماهواره سنتینل-۳ آ و سری زمانی رطوبت سطحی خاک حاصل از ایستگاه زمینی Las-Tres-Rayas که در فاصله تقریبی ۱۰ کیلومتری گذر ۶۴۴ ماهواره سنتینل-۳ آ قرار دارد در جدول (۳) ارائه شده است. در این جدول بیشترین ضریب همبستگی بارنگ قرمز نمایش داده شده است.

۳-۱-۵. بررسی رابطه خطی بین سری زمانی ضریب

پراکنش و رطوبت سطحی خاک داده‌های میدانی

تغییرات زمانی ضریب پراکنش با تغییرات زمانی رطوبت سطحی خاک اندازه‌گیری شده از ایستگاه‌های زمینی نزدیک به گذرهای ماهواره‌ای با استفاده از پارامتر ضریب همبستگی (R) طبق رابطه (۳) که میزان ارتباط مستقیم دو متغیر را نشان می‌دهد، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. هدف از این مرحله بررسی وجود یا عدم وجود رابطه خطی بین ضریب پراکنش به‌دست آمده از ارتفاع‌سنج‌های ماهواره‌ای و رطوبت سطحی خاک حاصل از داده‌های میدانی است.

$$COV(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n} \quad (۲)$$

$$R = \frac{Cov(x,y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (۳)$$

در روابط (۲) و (۳)، x_i نتایج حاصل (در اینجا ضریب پراکنش) و \bar{x} میانگین آنها، y_i داده‌های مرجع (در اینجا رطوبت سطحی خاک اندازه‌گیری شده از ایستگاه‌های زمینی) و \bar{y} میانگین آنها، n تعداد داده‌ها، σ_x انحراف معیار نتایج، σ_y انحراف معیار داده‌های مرجع و $COV(x,y)$ کوواریانس دو سری داده می‌باشد.

۳-۱-۶. استخراج سری زمانی رطوبت سطحی خاک از

داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای

فرم خطی رابطه بین ضریب پراکنش و رطوبت سطحی خاک حاصل از داده‌های میدانی مطابق با رابطه (۴) خواهد بود. در این رابطه σ_0 ضریب پراکنش حاصل از مشاهدات ارتفاع‌سنج، SSM_m رطوبت سطحی خاک حاصل از ایستگاه اندازه‌گیری زمینی و a, b ضرایب رگرسیون خطی می‌باشند. حال با حل یک مسئله کمترین مربعات خطی با ماتریس ضرایب A ، مجهولات $X(a,b)$ از رابطه (۵) برآورد شدند. در نهایت با داشتن ضرایب رگرسیون، سری‌های زمانی رطوبت سطحی خاک مرتبط با داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای با معکوس کردن رابطه خطی بین ضریب پراکنش و رطوبت سطحی خاک داده‌های میدانی

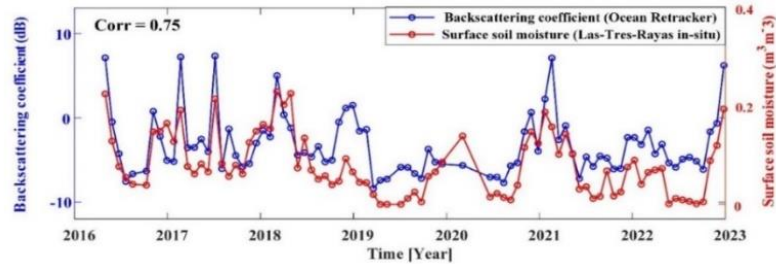
جدول ۳. ضریب همبستگی بین رطوبت سطحی خاک حاصل از داده‌های میدانی و ضریب پراکنش حاصل از بازتعقیب‌گرهای موجود در داده‌های سطح دو ماهواره سنتینل-۳ آ

Ice-sheet	Sea-ice	OCOG	Ocean	بازتعقیب‌گر	ایستگاه زمینی
۰٫۵۹	۰٫۵۷	۰٫۵	۰٫۷۵	ضریب همبستگی (میانه)	Las-Tres-Rayas
۰٫۵۹	۰٫۵۵	۰٫۴۹	۰٫۷۲	ضریب همبستگی (میانگین)	
۵۹	۸۴	۸۴	۸۴	تعداد داده	

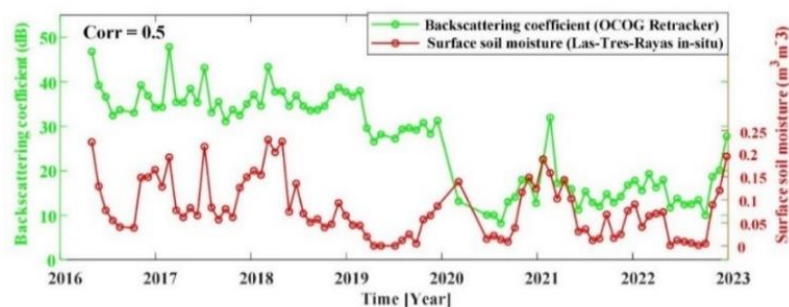
Nan زیادی به‌عنوان ضریب پراکنش برای دوره‌های مختلف ثبت کرده که سبب شده است ضریب پراکنش برای تمامی دوره زمانی (دوره ۱ الی ۸۴) مطالعاتی در این پژوهش در دسترس نباشد. طبق جدول (۳) در ۳ بازتعقیب‌گر مقدار میانه سری زمانی لحظه‌ای با اختلاف کم از میانگین منجر به نتایج بهتر (ضریب همبستگی بالاتر) شده است و در بازتعقیب‌گر Ice-sheet مقدار میانه و میانگین نتایج دقیقاً برابر حاصل کرده‌اند.

شکل‌های ۴ الی ۷ سری‌های زمانی ضریب پراکنش حاصل از بازتعقیب‌گرهای موجود در داده‌های سطح دو گذر ۶۴۴ ماهواره سنتینل-۳ آ در منطقه موردپژوهش به‌همراه سری زمانی رطوبت سطحی خاک حاصل از ایستگاه زمینی Las-Tres-Rayas را نشان می‌دهند.

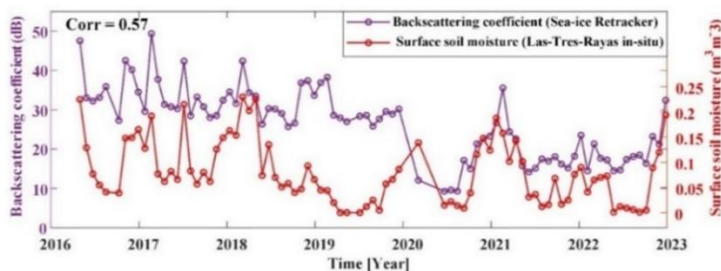
همان‌طور که از نتایج موجود در جدول (۳) مشخص است، بازتعقیب‌گر Ocean نسبت به سایر بازتعقیب‌گرهای موجود در داده‌های سطح دو ماهواره سنتینل-۳ آ مقدار ضریب همبستگی بالاتری (۰٫۷۵) حاصل کرده است که به این معنا است که سری زمانی ضریب پراکنش حاصل از این بازتعقیب‌گر نسبت به سری‌های زمانی ضریب پراکنش حاصل از بازتعقیب‌گرهای دیگر ارتباط مستقیم بالاتری با سری زمانی رطوبت سطحی خاک حاصل از داده‌های میدانی در این پژوهش دارد. باوجود آن‌که بازتعقیب‌گر Ice-sheet از لحاظ عددی (با مقدار ضریب همبستگی ۰٫۵۹) بعد از بازتعقیب‌گر Ocean بهترین نتیجه را حاصل کرده است اما این نتیجه قابل‌قبولی نیست زیرا نرخ داده (۵۹ داده) قابل‌قبولی را ارائه نکرده است. به‌عبارتی دیگر مقادیر



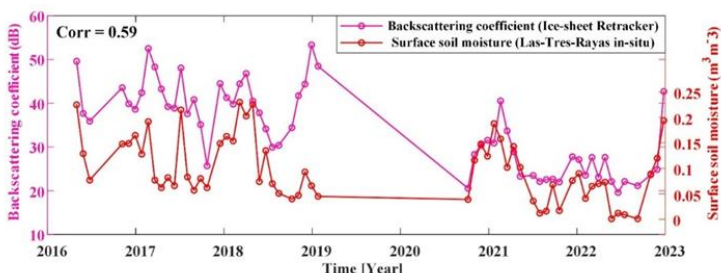
شکل ۴. سری زمانی ضریب پراکنش حاصل از بازتعقیب‌گر Ocean موجود در داده‌های سطح دو گذر ۶۴۴ ماهواره سنتینل-۳ آ و سری زمانی رطوبت سطحی خاک حاصل از داده‌های میدانی در بازه زمانی سال ۲۰۱۶ الی ۲۰۲۳.



شکل ۵. سری زمانی ضریب پراکنش حاصل از بازتعقیب‌گر OCOG موجود در داده‌های سطح دو گذر ۶۴۴ ماهواره سنتینل-۳ آ و سری زمانی رطوبت سطحی خاک حاصل از داده‌های میدانی در بازه زمانی سال ۲۰۱۶ الی ۲۰۲۳.



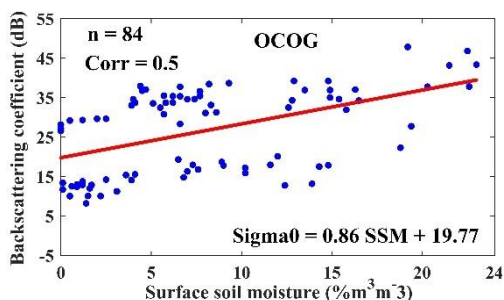
شکل ۶. سری زمانی ضریب پراکنش حاصل از بازتعقیب گر Sea-ice موجود در داده‌های سطح دو گذر ۶۴۴ ماهواره سنتینل ۳ آ و سری زمانی رطوبت سطحی خاک حاصل از داده‌های میدانی در بازه زمانی سال ۲۰۱۶ الی ۲۰۲۳.



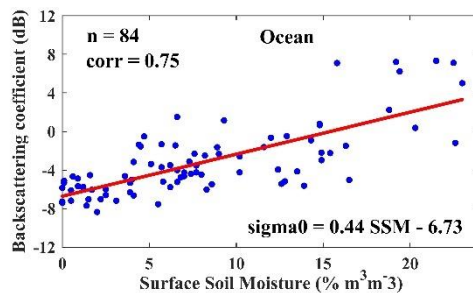
شکل ۷. سری زمانی ضریب پراکنش حاصل از بازتعقیب گر Ice-sheet موجود در داده‌های سطح دو گذر ۶۴۴ ماهواره سنتینل ۳ آ و سری زمانی رطوبت سطحی خاک حاصل از داده‌های میدانی در بازه زمانی سال ۲۰۱۶ الی ۲۰۲۳.

ایستگاه زمینی Las-Tres-Rayas در شکل ۸ نمایش داده شده‌اند. معادله خط محاسبه شده و همچنین تعداد داده‌ها (n) و ضریب همبستگی (Corr) برای هر کدام بر روی نمودارها آورده شده است.

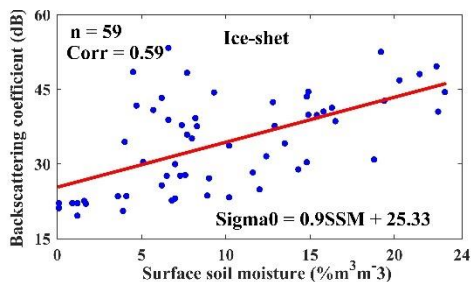
در ادامه نمودارهای پراکنندگی ضرایب پراکنش حاصل از بازتعقیب گرهای (Ocean، OCOG، Sea-ice و Ice-sheet) موجود در داده‌های سطح دو ماهواره سنتینل ۳ آ به‌عنوان تابعی از رطوبت سطحی خاک اندازه‌گیری شده از



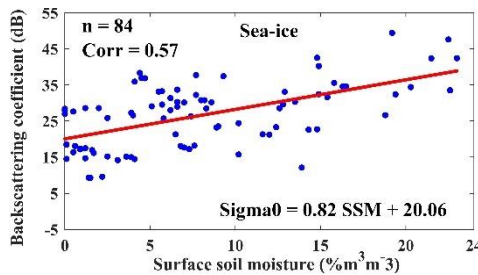
(ب)



(الف)



(ت)



(پ)

شکل ۸. نمودارهای پراکنندگی ضریب پراکنش حاصل از بازتعقیب گر (الف Ocean، ب OCOG، پ Sea-ice، ت Ice-sheet) در مقابل رطوبت سطحی خاک (برحسب درصد) اندازه‌گیری شده از ایستگاه زمینی Las-Tres-Rayas

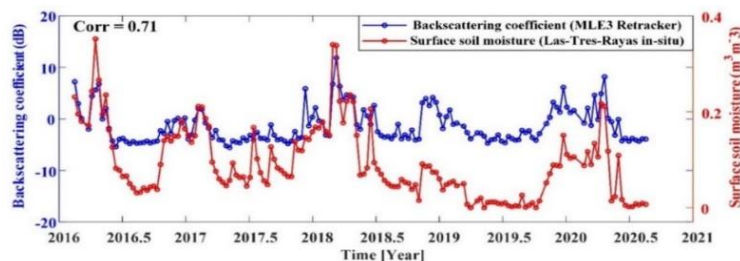
بر اساس نتایج موجود در جدول ۴، سری‌های زمانی ضریب پراکنش حاصل از بازتعقیب گر Ice با ضریب همبستگی به ترتیب ۰/۷ و ۰/۷۱ رابطه خطی دقیق‌تری با سری‌های زمانی رطوبت سطحی خاک حاصل از داده‌های ایستگاه‌های زمینی در هر دو ایستگاه Las-Tres-Rayas و Las-Arenas ایجاد کرده‌اند که این نتیجه در توافق با مطالعات پیشین مبنی بر برتری الگوریتم‌های بازتعقیب تجربی نسبت به الگوریتم‌های فیزیکی در برآورد رطوبت سطحی خاک است (فتراس و همکاران، ۲۰۱۲).

شکل‌های ۹ الی ۱۴ سری‌های زمانی ضریب پراکنش حاصل از بازتعقیب گرهای موجود در داده‌های GDR گذر ۲۱۳ ماهواره جیسون-۳ به همراه سری زمانی رطوبت سطحی خاک حاصل از ایستگاه زمینی Las-Tres-Rayas را در بازه زمانی ۲۰۱۶ الی ۲۰۲۱ نشان می‌دهند.

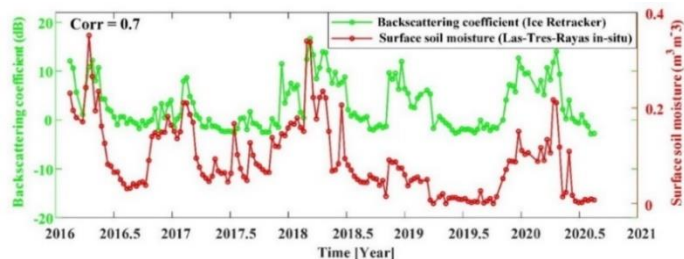
۲-۴. رابطه بین ضریب پراکنش ارتفاع‌سنج ماهواره جیسون-۳ و رطوبت سطحی خاک حاصل از داده‌های میدانی
نتایج عددی ارزیابی وجود یا عدم وجود رابطه خطی بین سری‌های زمانی ضریب پراکنش حاصل از بازتعقیب گرهای موجود در داده GDR ماهواره جیسون-۳ و سری زمانی رطوبت سطحی خاک حاصل از ایستگاه‌های زمینی Las-Tres-Rayas و Las-Arenas که به ترتیب در فاصله تقریبی ۰/۰۷ و ۱۰ کیلومتری گذر ۲۱۳ ماهواره جیسون-۳ قرار دارند در جدول ۴ ارائه شده است. لازم به ذکر است تأثیر فاصله ایستگاه زمینی رطوبت سطحی خاک تا گذر ماهواره بر نتایج اجتناب‌ناپذیر است و در این پژوهش سعی شده است نزدیک‌ترین ایستگاه‌های زمینی به گذرهای ماهواره‌ای انتخاب شوند.

جدول ۴: ضریب همبستگی بین رطوبت سطحی خاک حاصل از داده‌های میدانی و ضریب پراکنش حاصل از بازتعقیب گرهای موجود در داده‌های GDR ماهواره جیسون-۳.

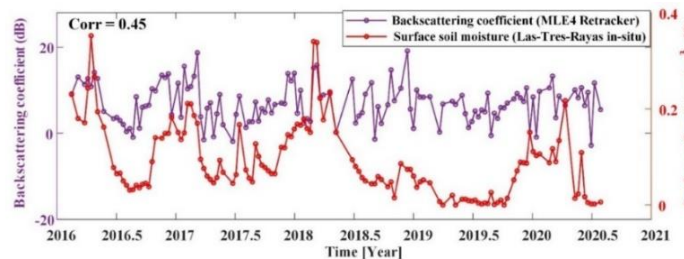
ایستگاه زمینی	بازتعقیب گر	MLE3	Ice	MLE4
Las-Tres-Rayas	کورولیشن (میانه)	۰/۷۱	۰/۷	۰/۴۵
	کورولیشن (میانگین)	۰/۶۹	۰/۶۹	۰/۴۴
	تعداد داده	۱۶۱	۱۶۱	۱۳۱
Las-Arenas	کورولیشن (میانه)	۰/۶۲	۰/۷۱	۰/۰۵۴
	کورولیشن (میانگین)	۰/۵۳	۰/۶۸	-۰/۰۱
	تعداد داده	۱۵۸	۱۵۸	۱۴۱



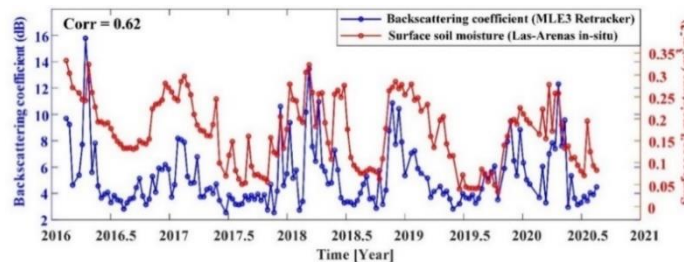
شکل ۹. سری زمانی ضریب پراکنش حاصل از بازتعقیب گر MLE3 موجود در داده‌های GDR گذر ۲۱۳ ماهواره جیسون-۳ و سری زمانی رطوبت سطحی خاک حاصل از داده‌های میدانی ایستگاه Las-Tres-Rayas.



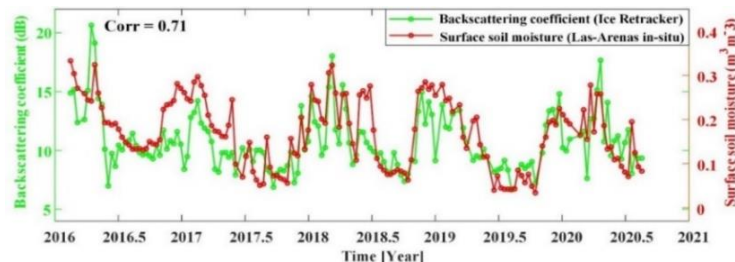
شکل ۱۰. سری زمانی ضریب پراکنش حاصل از بازتعقیب‌گر Ice موجود در داده‌های GDR گذر ۲۱۳ ماهواره جیسون-۳ و سری زمانی رطوبت سطحی خاک حاصل از داده‌های میدانی ایستگاه Las-Tres-Rayas.



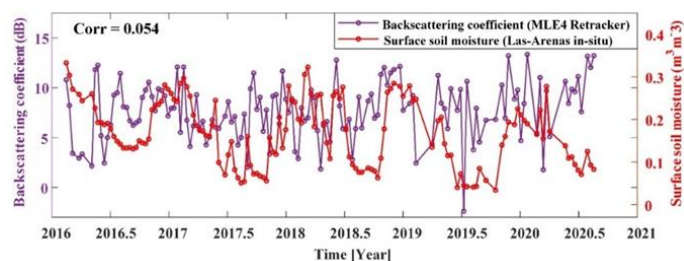
شکل ۱۱. سری زمانی ضریب پراکنش حاصل از بازتعقیب‌گر MLE4 موجود در داده‌های GDR گذر ۲۱۳ ماهواره جیسون-۳ و سری زمانی رطوبت سطحی خاک حاصل از داده‌های میدانی ایستگاه Las-Tres-Rayas.



شکل ۱۲. سری زمانی ضریب پراکنش حاصل از بازتعقیب‌گر MLE3 موجود در داده‌های GDR گذر ۲۱۳ ماهواره جیسون-۳ و سری زمانی رطوبت سطحی خاک حاصل از داده‌های میدانی ایستگاه Las-Arenas.



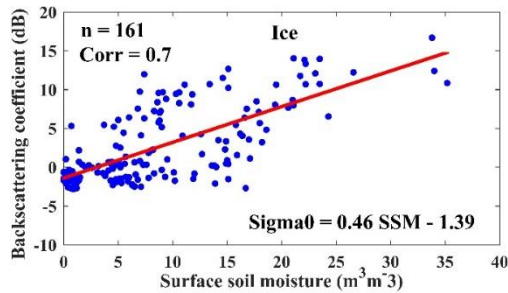
شکل ۱۳. سری زمانی ضریب پراکنش حاصل از بازتعقیب‌گر Ice موجود در داده‌های GDR گذر ۲۱۳ ماهواره جیسون-۳ و سری زمانی رطوبت سطحی خاک حاصل از داده‌های میدانی ایستگاه Las-Arenas.



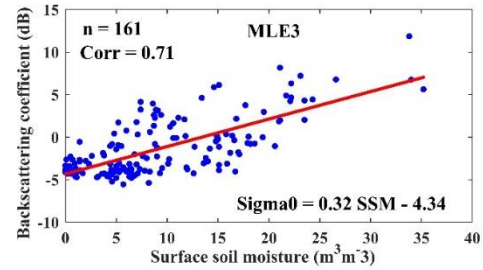
شکل ۱۴. سری زمانی ضریب پراکنش حاصل از بازتعقیب‌گر MLE4 موجود در داده‌های GDR گذر ۲۱۳ ماهواره جیسون-۳ و سری زمانی رطوبت سطحی خاک حاصل از داده‌های میدانی ایستگاه Las-Arenas.

سطحی خاک اندازه‌گیری شده از ایستگاه‌های زمینی Las-Tres-Rayas و Las-Arenas به ترتیب در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نمایش داده شده‌اند.

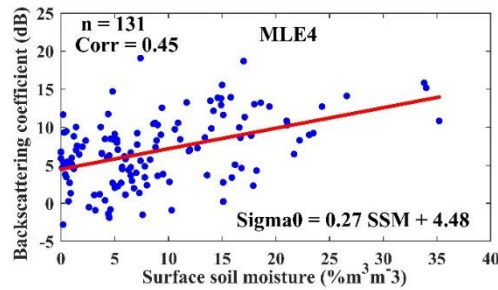
در ادامه نمودارهای پراکندگی ضرایب پراکنش حاصل از بازتعقیب‌گرهای (MLE3، Ice و MLE4) موجود در داده‌های GDR ماهواره جیسون-۳ به‌عنوان تابعی از رطوبت



(ب)

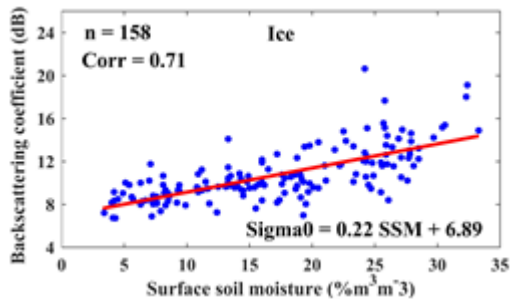


(الف)

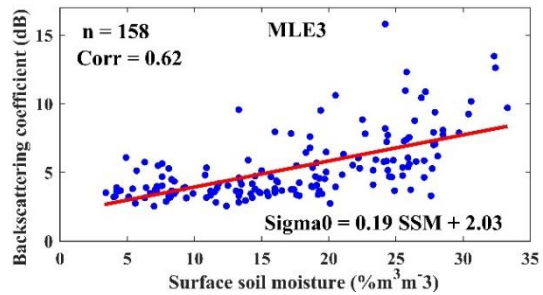


(پ)

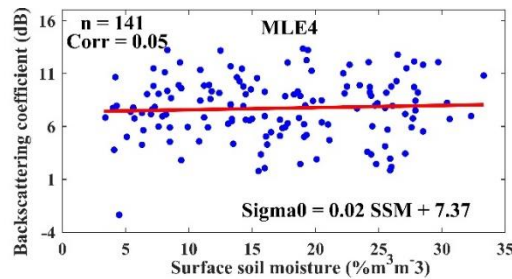
شکل ۱۵. نمودارهای پراکندگی ضریب پراکنش حاصل از بازتعقیب‌گر (الف) MLE3 (ب) Ice (پ) MLE4 در مقابل رطوبت سطحی خاک (برحسب درصد) اندازه‌گیری شده از ایستگاه زمینی Las-Tres-Rayas



(ب)



(الف)



(پ)

شکل ۱۶. نمودارهای پراکندگی ضریب پراکنش حاصل از بازتعقیب‌گر (الف) MLE3 (ب) Ice (پ) MLE4 در مقابل رطوبت سطحی خاک (برحسب درصد) اندازه‌گیری شده از ایستگاه زمینی Las-Arenas

داده‌های سطح دو ماهواره سنتینل-۳ آ در برآورد سری زمانی رطوبت سطحی خاک موفق‌تر عمل کرده است.

طبق جدول ۶، در هر دو ایستگاه زمینی Las-Tres-Rayas و Las-Arenas الگوریتم Ice با مقدار RMSE کمتر نسبت به دیگر بازتعقیب‌گرهای موجود در داده‌های GDR ماهواره جیسون-۳ در برآورد سری زمانی رطوبت سطحی خاک موفق‌تر عمل کرده است. البته در ایستگاه زمینی Las-Arenas الگوریتم بازتعقیب MLE3 نیز نتیجه‌ای تقریباً مشابه با الگوریتم بازتعقیب Ice حاصل کرده است. در بخش (۲-۴) نیز نشان داده شد، سری‌های زمانی ضرب پراکنش حاصل از الگوریتم بازتعقیب Ice ارتباط مستقیم بالایی با سری زمانی رطوبت سطحی خاک اندازه‌گیری شده در هر دو ایستگاه Las-Tres-Rayas و Las-Arenas دارند.

شکل‌های ۱۷ الی ۲۰ سری‌های زمانی رطوبت سطحی خاک به‌دست‌آمده از داده‌های سطح دو ماهواره سنتینل-۳ آ و داده‌های GDR ماهواره جیسون-۳ را نشان می‌دهند.

برخی از نمودارهای پراکنندگی نمایش داده‌شده در شکل‌های ۸، ۱۵ و ۱۶ مقادیر بالایی از ضرب پراکنش را نشان می‌دهند که با رطوبت سطحی خاک اندازه‌گیری شده مطابقت ندارد، این مقادیر می‌تواند مربوط به بارندگی‌های شدیدی باشد که چند ساعت قبل از برداشت ارتفاع‌سنج رخ داده‌اند و گودال‌های موقتی را ایجاد کرده‌اند که سبب تقویت بازگشت سیگنال راداری شده‌اند.

۳-۴. ارزیابی سری زمانی رطوبت سطحی خاک با

استفاده از ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای

نتایج ارزیابی سری‌های زمانی رطوبت سطحی خاک حاصل از ارتفاع‌سنج ماهواره‌های سنتینل-۳ آ (گذر ۶۴۴) و جیسون-۳ (گذر ۲۱۳) در منطقه مورد مطالعه این پژوهش نسبت به سری زمانی رطوبت سطحی خاک حاصل از داده‌های میدانی با پارامتر RMSE در جدول‌های (۵) و (۶) آورده شده است.

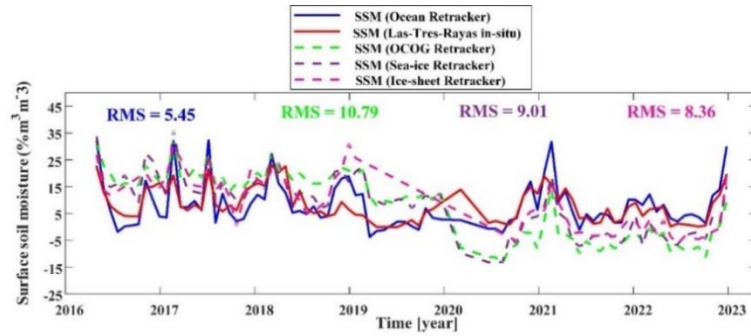
طبق جدول ۵، الگوریتم Ocean با مقدار RMSE کمتر نسبت به دیگر بازتعقیب‌گرهای موجود در

جدول ۵. ارزیابی سری زمانی رطوبت سطحی خاک حاصل از داده‌های سطح دو ماهواره سنتینل-۳ آ نسبت به سری زمانی رطوبت سطحی خاک حاصل از ایستگاه اندازه‌گیری زمینی.

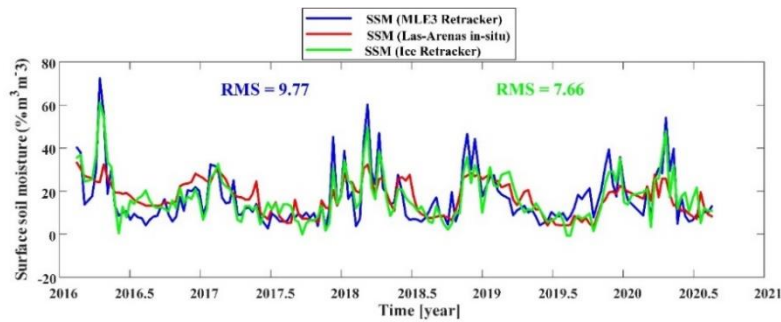
Ice-sheet	Sea-ice	OCO2	Ocean	بازتعقیب‌گر	ایستگاه زمینی
۸,۳۶	۹,۰۱	۱۰,۷۹	۵,۴۵	RMSE (درصد)	Las-Tres-Rayas
۵۹	۸۴	۸۴	۸۴	تعداد داده	

جدول ۶. ارزیابی سری زمانی رطوبت سطحی خاک حاصل از داده‌های GDR ماهواره جیسون-۳ نسبت به سری زمانی رطوبت سطحی خاک حاصل از ایستگاه اندازه‌گیری زمینی.

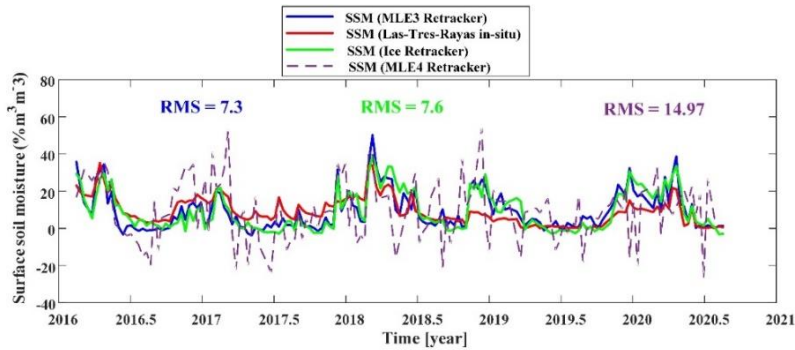
MLE4	Ice	MLE3	بازتعقیب‌گر	ایستگاه زمینی
۱۴,۹۷	۷,۶	۷,۳	RMSE (درصد)	Las-Tres-Rayas
۱۳۱	۱۶۱	۱۶۱	تعداد داده	
۱۴۱,۶۲	۷,۶۶	۹,۷۷	RMSE (درصد)	Las-Arenas
۱۴۱	۱۵۸	۱۵۸	تعداد داده	



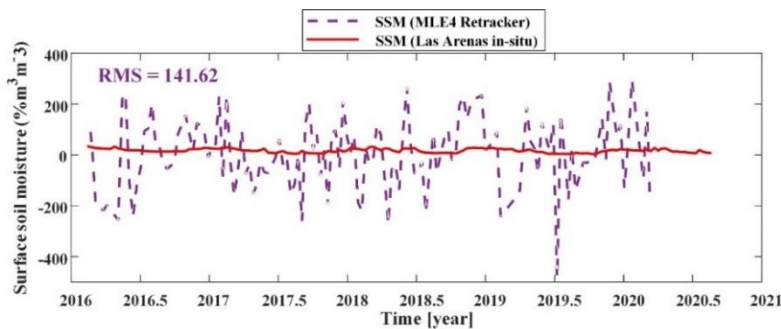
شکل ۱۷. سری‌های زمانی رطوبت سطحی خاک به‌دست‌آمده از بازتعقیب‌گرهای موجود در داده‌های سطح دو ماهواره سنتینل-۳ آ به همراه سری زمانی رطوبت سطحی خاک اندازه‌گیری شده در ایستگاه زمینی Las-Tres-Rayas



شکل ۱۸. سری‌های زمانی رطوبت سطحی خاک به‌دست‌آمده از بازتعقیب‌گرهای موجود در داده‌های GDR ماهواره جیسون-۳ به همراه سری زمانی رطوبت سطحی خاک اندازه‌گیری شده در ایستگاه زمینی Las-Tres-Rayas



شکل ۱۹. سری‌های زمانی رطوبت سطحی خاک به‌دست‌آمده از بازتعقیب‌گرهای موجود در داده‌های GDR ماهواره جیسون-۳ به همراه سری زمانی رطوبت سطحی خاک اندازه‌گیری شده در ایستگاه زمینی Las-Arenas



شکل ۲۰. سری‌های زمانی رطوبت سطحی خاک به‌دست‌آمده از بازتعقیب‌گر MLE4 موجود در داده‌های GDR ماهواره جیسون-۳ به همراه سری زمانی رطوبت سطحی خاک اندازه‌گیری شده در ایستگاه زمینی Las-Arenas

۵. نتیجه گیری

ارتفاعسنجی ماهواره‌ای در ابتدا برای اندازه‌گیری ارتفاع سطح اقیانوس طراحی شده بود. امروزه نیز به‌طور معمول از آن برای پایش آب‌های کره‌زمین و همچنین صفحات یخی استفاده می‌شود. تغییرات مکانی و زمانی ضریب پراکنش ماهواره‌های ارتفاعسنجی به ویژگی‌های خاک و همچنین رطوبت سطحی خاک مرتبط است. با این وجود با توجه به این ارتباط، تا به حال به‌طور گسترده از ماهواره‌های ارتفاعسنجی در برآورد رطوبت سطحی خاک استفاده نشده است. لذا هدف اصلی این پژوهش بررسی پتانسیل ماهواره‌های ارتفاعسنجی در برآورد رطوبت سطحی خاک در مناطق نیمه‌خشک کشور اسپانیا در بازه زمانی ۲۰۱۶ الی ۲۰۲۳ بود.

جهت نیل به این هدف از داده‌های سطح دو ماهواره سنتینل-۳ (گذر ۶۴۴) و داده‌های GDR ماهواره جیسون-۳ (گذر ۲۱۳) استفاده شد. ارتفاعسنجی SRAL ماهواره سنتینل-۳ آ کل کره‌زمین را با حالت رادار دهانه ترکیبی با مزیت اندازه پایین ردپا (۳۰۰ متر) در امتداد برداشت پوشش می‌دهد در حالی که ارتفاعسنجی پوزیدون-۳ ماهواره جیسون-۳ از ارتفاعسنجی‌های نسل قدیم (با اندازه ردپا بزرگ‌تر از ۲ کیلومتر) است. در این پژوهش علاوه بر دو هندسه برداشت متفاوت در این دو مأموریت ارتفاعسنجی، کارایی بازتعقیب‌گرهای مورد استفاده در آنها در برآورد رطوبت سطحی خاک نیز به چالش کشیده شدند. در ابتدا همبستگی بین سری‌های زمانی ضریب پراکنش حاصل از بازتعقیب‌گرهای موجود در داده‌های ماهواره‌های سنتینل-۳ آ و جیسون-۳ و سری زمانی رطوبت سطحی خاک اندازه‌گیری شده در نزدیک‌ترین ایستگاه‌های زمینی به گذرهای ماهواره‌ای، مورد بررسی قرار گرفت. سری‌های زمانی رطوبت سطحی خاک، با محاسبه ضرایب رگرسیون خطی و معکوس کردن رابطه خطی بین ضریب پراکنش و رطوبت سطحی خاک، برآورد شدند. در نهایت نیز سری‌های زمانی برآورد شده با پارامتر RMSE نسبت به سری زمانی رطوبت سطحی خاک حاصل از داده‌های میدانی

مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج این پژوهش را می‌توان به‌صورت خلاصه به شرح زیر بیان کرد.
- این مطالعه نشان داد که ضریب پراکنش موجود در داده‌های ارتفاعسنجی ماهواره‌ای می‌تواند با تغییرات زمانی رطوبت سطحی خاک اندازه‌گیری شده در منطقه مورد پژوهش مرتبط باشد.

- با آنالیز همبستگی بین سری زمانی ضریب پراکنش حاصل از ماهواره‌های سنتینل-۳ آ و جیسون-۳ و سری زمانی رطوبت سطحی خاک اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های زمینی موجود در منطقه مورد مطالعه، یک رابطه خطی نسبتاً قوی بین دو سری زمانی برای هر دو ماهواره حاصل شد. البته نشان داده شد که کیفیت روابط در هر سری زمانی، به شدت به الگوریتم‌های بازتعقیبی که برای برآورد ضریب پراکنش استفاده شده است، وابسته است.

- مقدار همبستگی بالای میان سری زمانی تغییرات ضریب پراکنش و سری زمانی تغییرات رطوبت سطحی خاک مشاهده شده، حاکی از توانایی بالای مأموریت‌های ارتفاعسنجی مورد استفاده در برآورد رطوبت سطحی خاک در منطقه مورد پژوهش است.

- آنالیز میانه و میانگین در نمایندگی سری زمانی لحظه‌ای ضریب پراکنش انجام شده در این پژوهش در هر دو گذر ماهواره سنتینل-۳ آ و جیسون-۳، برتری میانه نسبت به میانگین را نشان داد. دلیل این برتری را می‌توان این دانست که پارامتر میانه متأثر از مقادیر بسیار بزرگ یا بسیار کوچک در یک مجموعه داده مورد بررسی نمی‌باشد.

- بهترین نتیجه (بالاترین ضریب همبستگی) در بین ضرایب پراکنش حاصل از بازتعقیب‌گرهای موجود در داده‌های ماهواره‌های سنتینل-۳ آ و جیسون-۳ (در هر دو ایستگاه زمینی) در این پژوهش، به ترتیب با مقادیر ضریب همبستگی ۰/۷۵ و ۰/۷ با الگوریتم‌های بازتعقیب Ocean و Ice حاصل شد که یک رابطه خطی نسبتاً قوی را بین سری‌های زمانی ضریب پراکنش حاصل از این الگوریتم‌ها و سری زمانی رطوبت سطحی خاک اندازه‌گیری شده در ایستگاه زمینی نشان می‌دهد. بالطبع سری زمانی رطوبت سطحی خاک

پژوهش‌های بیشتری انجام شود.

- آنالیز کلی نتایج این پژوهش نشان‌دهنده توانایی بالاتر ارتفاع‌سنج رادار با دهانه ترکیبی ماهواره سنتینل-۳ آ در هر دو هندسه برداشت و بازتعقیب‌گر سطح دوی کارا تر نسبت به ارتفاع‌سنج ماهواره جیسون-۳ (ارتفاع‌سنج نسل قدیم) است. دلیل این برتری را می‌توان پایین بودن اندازه ردپا ارتفاع‌سنج‌های رادار دهانه ترکیبی نسبت به ارتفاع‌سنج‌های نسل قدیم دانست. با توجه به کوچک‌تر بودن اندازه ردپا، لذا سطحی که در ردپا ارتفاع‌سنج قرار می‌گیرد از نظر ویژگی سطح (توپوگرافی، جنس خاک، پوشش گیاهی و...) همگن‌تر است. در این صورت سبب می‌شود خطا در بازپراکنش رادار از سطح کمتر شود. فرکانس تکرار پالس بالاتر و برداشت چندمنظری آن نیز افزایش تعداد مشاهدات و به تبع آن دقت را به همراه دارد.

مراجع

آگار، پ.؛ وثوقی، ب.؛ روحی، ش. و امینی، آ. (۱۴۰۱). ارزیابی روش بازتعقیب اولین موجک شکل موج به منظور بهبود صحت مشاهدات ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای در مناطق ساحلی (مطالعه موردی: منطقه ساحلی خلیج فارس)، م. نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، ۱۰(۴)، ۱۷-۳۷.

Agar, P., Roohi, S., Voosoghi, B., Amini, A. & Poreh, D. (2023). Sea Surface Height Estimation from Improved Modified, and Decontaminated Sub-Waveform Retracking Methods over Coastal Areas. *Remote Sensing*, 15, 804.

Fatras, C., Frappart, F., Mougin, É., Grippa, M., & Hiernaux, P. (2012). Estimating surface soil moisture over Sahel using ENVISAT radar altimetry. *Remote sensing of environment*, 123, 496-507.

Fatras, C., Frappart, F., E. Mougin, E., P.-L. Frison, P.-L., Faye, G., Borderies, P., Jarlan, L. (2015). Spaceborne altimetry and scatterometry backscattering signatures at C- and Ku-bands over West Africa. *Remote Sensing of Environment*, 159, 117-133.

Gommenginger, C., Thibaut, P., Fenoglio-Marc, L., Quartly, G., Deng, X., Gómez-Enri, J., Challenor, P., & Gao, Y. (2011). Retracking altimeter waveforms near the coasts: A review of retracking methods and some applications to

صحیح‌تری (ارزیابی با داده‌های زمینی) نیز با این الگوریتم‌ها نسبت به بازتعقیب‌گرهای دیگر با مقادیر RMSE به ترتیب، ۵/۴۵ و ۷/۶ درصد حاصل شد.

- برتری الگوریتم بازتعقیب Ice در بین بازتعقیب‌گرهای موجود در داده‌های GDR ماهواره جیسون-۳ در این پژوهش در توافق با مطالعات پیشین مبنی بر برتری الگوریتم‌های بازتعقیب تجربی نسبت به فیزیکی فترس و همکاران (۱۳۹۰) در برآورد رطوبت سطحی خاک است. با این وجود الگوریتم بازتعقیب Ocean که یک الگوریتم بازتعقیب فیزیکی است، نسبت به بازتعقیب‌گرهای موجود در داده‌های سطح دو ماهواره سنتینل-۳ آ در برآورد رطوبت سطحی خاک در این پژوهش موفق‌تر عمل کرد. نمی‌توان انتظار داشت که به‌طور حتم، نتایج این پژوهش در تست مناطق مطالعاتی دیگر تکرار شود. زیرا کارایی الگوریتم‌های بازتعقیب مختلف تابعی از وضعیت شکل موج‌ها و آن نیز تابعی از منطقه مطالعاتی و شرایط ژئوفیزیکی حاکم بر آن است. هر کدام از الگوریتم‌های بازتعقیب با توجه به شکل موج انعکاسی از سطح خاصی طراحی شده‌اند. البته ذکر این نکته نیز خالی از لطف نیست که تا به حال هیچ الگوریتم بازتعقیبی برای خشکی توسعه پیدا نکرده است. از این رو برای یافتن الگوریتم بازتعقیب بهینه برای محاسبه رطوبت سطحی خاک، لازم است

coastal waveforms. *Coastal altimetry*. 61-101.

Idris, N. H., Vignudelli, S. & Deng, X. (2021). Assessment of retracked sea levels from Sentinel-3A Synthetic Aperture Radar (SAR) mode altimetry over the marginal seas at Southeast Asia. *International Journal of Remote Sensing*, 42, 1535-1555.

Kim, H. Y., & Chappell, A. (2010). Soil water balance in soil physics with HYDRUS (pp. 3-31). Springer, Dordrecht.

Mostafavi, M., Delpeche-Ellmann, N., Ellmann, A. (2021). Accurate sea surface heights from Sentinel-3A and Jason-3 retracers by incorporating high-resolution marine geoid and hydrodynamic models. *Journal of Geodetic Science*. 1, 11(1), 58-74.

Nababan, B., Hakim, M. R., Panjaitan, J. P. (2018). Waveform identification and retracking analyses of Jason-2 altimeter satellite data for improving sea surface height estimation in Southern Java Island Waters and Java Sea,

- Indonesia. *InIOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 149(1), 012057). IOP Publishing.
- Peng, J., Niesel, J. & Loew, A. (2015). Evaluation of soil moisture downscaling using a simple thermal-based proxy—the REMEDHUS network (Spain) example. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 4765-4782.
- Roohi, S. (2015). Capability of Pulse-Limited Satellite Radar Altimetry to Monitor Inland Water Bodies. Master Thesis, University of Stuttgart, Stuttgart, Germany.
- Roohi, S., Sneeuw, N., Benveniste, J., Dinardo, S., Issawy, E. A. & Zhang, G. (2019). Evaluation of CryoSat-2 water level derived from different retracking scenarios over selected inland water bodies. *Advances in Space Research*.
- Sanchez, N., Martinez-Fernandez, J., Scaini, A. & Perez-Gutierrez, C. (2012). Validation of the SMOS L2 Soil Moisture Data in the REMEDHUS Network (Spain). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50, 1602-1611.
- Smith, J., & Johnson, A. (2020). Impact of Surface Soil Moisture Variations on Radar Altimetry Echoes at Ku and Ka Bands in Semi-Arid Areas. *Remote Sensing*, 15(3), 112-125. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.123456
- Tourian, M. J. (2012). Controls on satellite altimetry over inland water surfaces for hydrological purposes.
- Uebbing, B., Forootan, E., Braakmann-Folgmann, A., Kusche, J. (2017). Inverting surface soil moisture information from satellite altimetry over arid and semi-arid regions. *Remote sensing of environment*. 196, 205-23.
- Wang, J., Xu, H., Yang, L., Song, Q., & Ma, C. (2021). Cross-Calibrations of the HY-2B Altimeter Using Jason-3 Satellite During the Period of April 2019–September 2020. *Frontiers in Earth Science*, 9.