

Estimation of volumetric soil moisture from GNSS-IR and analysis of the resulting time series with LSTM artificial neural networks

Rastbood, A.¹  | Danghian, P.¹ 

1. Department of Surveying, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Corresponding Author E-mail: arastbood@tabrizu.ac.ir

(Received: 27 June 2023, Revised: 18 Aug 2023, Accepted: 9 Jan 2024, Published online: 6 July 2024)

Summary

One of the ways for measuring environmental parameters is using GNSS (Global Navigation Satellite System) reflected signals from the Earth surface that are received by GNSS antennas. Environmental parameters include soil moisture, seasonal snow accumulation, ice thickness, vegetation cover and water level changes in dams, lakes and seas (tide). The focus of this research is on soil moisture.

Reflection of GNSS signals from a surface is called multipath. When the goal is positioning, multipath is one of the most significant sources of error in GNSS observations. But, by analyzing those reflected signals, we will get useful information about the reflection surface. This technique is called GNSS interferometric reflectometry (GNSS-IR). By this definition, GNSS-IR can be considered as a remote sensing technique for continuous and local monitoring of environmental parameters which can be performed in various weather conditions such as rainy and cloudy conditions, as well as different lighting conditions such as day and night.

Signal-to-Noise Ratio (SNR) is a measure of the strength of a signal relative to the background noise level. In GNSS, SNR is used to evaluate the quality of the received signal. It is calculated as the ratio of the power of the received signal to the power of the noise in the receiver's bandwidth. Some of the receivers can also record SNR data which includes SNR component of reflected signals. In GNSS-IR, changes in soil moisture result in changes in the SNR component of the reflected signals. Specifically, as the soil moisture content increases, the dielectric constant of the soil increases, which causes the reflected signals to have higher amplitudes and higher SNR. Conversely, as the soil moisture content decreases, the reflected signals have lower amplitudes and lower SNR. Therefore, analyzing the SNR of the reflected signals can provide useful information about the soil moisture content. In addition to soil moisture, SNR can also be affected by other factors such as atmospheric conditions and receiver noise. Therefore, it is important to carefully analyze and process the SNR data to accurately estimate the soil moisture content.

The soil moisture algorithm to be used in this study, is currently implemented at stations in the EarthScope PBO H₂O network with the greatest variations in vegetation. Among the sites in the PBO H₂O network, data from P038 in the New Mexico region is used. This site is located at in a flat area in a ecosystem characterized as grass land.

SNR data from the new L2C signals are used by this site because the quality of the data are higher than those either the legacy L1 or L2P signals. The frequency of the L2C signal corresponds to a maximum penetration depth of 5 cm. The multipath signals are used to estimate soil moisture changes over a four-years period from 2017 to 2020.

The calculations were done in four main steps. In the first step, appropriate satellite tracks with elevation angle between 5 to 30 degrees were selected and SNR data were extracted from RINEX files. In the second step the initial reflector height is estimated for each track and then the phase is obtained for each satellite track on each day. In the third step, SNR metrics are calculated, and finally, vegetation cover effects are removed and the result is converted to volumetric water content. According to the estimations, the volumetric water content in 2017 was 8.88%, which increased to 11.74% in 2018, then slightly decreased to 10.88% in 2019 and finally increased to 12.49% in 2020. In the fourth step, the effectiveness of the LSTM neural network model in predicting the time series of volumetric soil moisture obtained from GNSS-IR signals is investigated. The LSTM neural network can maintain its content over a long period of time and essentially remember previous information. This prediction will help farmers to prepare their irrigation schedules more efficiently. For this purpose, it is suggested to use cheap GPS receivers in agricultural lands in rural areas. The model is trained using 80% of station observations. By updating the network status with observed values instead of predicted values, the root mean square error decreased from 0.09 to 0.04, and the predictions became more accurate.

Handling the location and type of receivers located in the Iranian Permanent GPS Network for Geodynamics (IPGN) and making the necessary settings in order to determine environmental parameters are suggested as by-products for IPGN. Investigations have shown that performing GNSS observations produces more homogeneous reflective effects. Therefore, in order to increase the accuracy and quality of the results, it is suggested to use GNSS-IR instead of just GPS-IR.

Keywords: volumetric soil moisture, SNR, GNSS-IR, time series, LSTM.

Cite this article: Rastbood, A., & Danghian, P. (2024). Estimation of volumetric soil moisture from GNSS-IR and analysis of the resulting time series with LSTM artificial neural networks. *Journal of the Earth and Space Physics*, 50(2), 283-304. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2024.361132.1007533>

E-mail: (1) p.danghian1400@ms.tabrizu.ac.ir



Publisher: University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2024.361132.1007533>

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

برآورد رطوبت حجمی خاک از تداخل سنجی سنجش بازتاب سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی و تحلیل سری زمانی حاصل با شبکه‌های عصبی مصنوعی حافظه طولانی کوتاه‌مدت

اصغر راست‌بود^۱ | پاتریشیا دانگیان^۱

۱. گروه نقشه برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: arastbood@tabrizu.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۲/۴/۶، بازنگری: ۱۴۰۲/۵/۲۷، پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۱۰/۱۹، انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۴/۱۶)

چکیده

تداخل سنجی سنجش بازتاب سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی (GNSS-IR) را می‌توان به‌عنوان یکی دیگر از روش‌های سنجش از دور برای پایش رطوبت خاک به‌صورت پیوسته و البته در مقیاس محلی در نظر گرفت که در وضعیت‌های مختلف جوی مانند شرایط بارانی و مه‌آلود و در شرایط متفاوت نور و روشنایی مانند روز و شب قابل اجرا است. سیگنال‌های بازتابی از سطح زمین توسط آنتن‌های GNSS قابل دریافت است. تغییرات در رطوبت خاک باعث تغییر در مقدار مؤلفه نسبت سیگنال به نویز SNR سیگنال‌های بازتابی می‌شود. با تجزیه و تحلیل سیگنال‌های بازتابی، می‌توان به اطلاعات مفیدی در مورد سطح بازتاب دست یافت. SNR به شدت به رطوبت خاک وابسته است. در این تحقیق داده‌های ایستگاه P038 در منطقه نیومکزیکو مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین‌صورت که از سیگنال‌های چندمسیری برای برآورد تغییرات رطوبت خاک در طول چهار سال، از ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ استفاده می‌شود. طبق برآورد انجام شده سطح محتوای حجمی آب در سال ۲۰۱۷، برابر ۸/۸۸ درصد می‌باشد، که در سال ۲۰۱۸ به ۱۱/۷۴ درصد افزایش می‌یابد. سپس اندکی کاهش یافته و در سال ۲۰۱۹ به ۱۰/۸۸ درصد رسیده و نهایتاً در سال ۲۰۲۰ به ۱۲/۴۹ درصد افزایش می‌یابد. در این مقاله کارایی شبکه‌های عصبی حافظه طولانی کوتاه‌مدت (LSTM) در پیش‌بینی سری زمانی رطوبت حجمی خاک به‌دست آمده از تداخل سیگنال‌های بازتابی GNSS مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. آموزش مدل با استفاده از ۸۰ درصد مشاهدات ایستگاه انجام می‌گیرد. با به‌روزرسانی وضعیت شبکه با مقادیر مشاهده شده به جای مقادیر پیش‌بینی‌شده، مقدار جذر خطای مربعی میانگین از ۰/۰۹ به ۰/۰۴ کاهش یافته و پیش‌بینی‌ها دقیق‌تر انجام می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: رطوبت حجمی خاک، GNSS-IR، SNR، سری زمانی، LSTM.

۱. مقدمه

موجود در خاک و همچنین وضعیت آبیاری، محتوای حجمی آب (Volumetric water content) VWC است. محتوای حجمی آب نسبت حجم آب به واحد حجم خاک است. محتوای حجمی آب را می‌توان به‌صورت نسبت، درصد یا عمق آب در هر عمق خاک (با فرض یک واحد سطح) بیان کرد. VWC نشان می‌دهد که چه مقدار از حجم خاک با آب پر شده است. در این تحقیق VWC به‌صورت درصد بیان می‌شود که مقادیر آن بین صفر تا صد درصد متغیر است. مقدار صفر زمانی است که خاک کاملاً خشک باشد و حجم آن فاقد آب باشد. مقدار صد درصد نیز نشان‌دهنده این است که تمام حفره‌ها

در عصر حاضر، سرانه اراضی قابل کشت به‌دلیل افزایش سریع جمعیت رو به کاهش بوده و به‌علاوه، کمبود و گرانی آب شیرین نیز به‌صورت چالشی جدی درآمده است. به همین دلیل، متخصصان کشاورزی باید از فناوری‌ها و راه‌حل‌های ابتکاری برای بهبود بهره‌وری، صرفه‌جویی در هزینه‌های اولیه و بهینه‌سازی مصرف منابع محیطی و به‌ویژه آب استفاده کنند. بنابراین اندازه‌گیری و پایش رطوبت خاک اهمیت زیادی دارد. رطوبت خاک یک عامل کلیدی است برای پی بردن به این‌که خاک یک منطقه برای کشت کدام نوع پوشش گیاهی مناسب است. یکی از پارامترهای اصلی برای بیان مقدار آب

استناد: راست‌بود، اصغر و دانگیان، پاتریشیا (۱۴۰۳). برآورد رطوبت حجمی خاک از تداخل سنجی سنجش بازتاب سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی و تحلیل سری زمانی حاصل با شبکه‌های عصبی مصنوعی حافظه طولانی کوتاه‌مدت. مجله فیزیک زمین و فضا، ۵۰(۲)، ۲۸۳-۳۰۴. DOI: <https://doi.org/10.22059/jesphys.2024.361132.1007533>

<http://doi.org/10.22059/jesphys.2024.361132.1007533>

رایانامه: (۱) p.danghian1400@ms.tabrizu.ac.ir



ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jesphys.2024.361132.1007533>

آنهایی که در هواپیما و ماهواره نصب می‌شوند، به‌طور متوالی مناطق سنجش بزرگ‌تری دارند. این اندازه‌گیری‌ها معمولاً در طی کمپین‌های میدانی انجام می‌شوند و رکوردهای طولانی‌مدت ایجاد نمی‌کنند.

پایش رطوبت خاک یکی از اهداف اصلی مأموریت‌های ماهواره‌های سنجش از دور مانند SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) و Sentinel-1 (Moisture Active Passive) است.

مأموریت SMOS در سال ۲۰۰۹، توسط آژانس فضایی اروپا (ESA) برای برآورد رطوبت خاک و شوری آب اقیانوس‌ها تعریف شده است. از سال ۲۰۱۵ نیز سازمان ملی هوانوردی و فضایی (ناسا) از مأموریت SMAP برای برآورد رطوبت خاک استفاده کرده است (الیاری و همکاران، ۲۰۱۷؛ توکل و همکاران، ۲۰۱۹). مأموریت‌های ماهواره‌ای یادشده به‌منظور تهیه نقشه‌های جهانی رطوبت خاک تعریف شده‌اند. ابزارهای موجود در مأموریت‌های ماهواره‌ای SMOS و SMAP تقریباً هر ۳ روز یک بار برآوردی از رطوبت خاک ارائه می‌دهند (انتخابی و همکاران، ۲۰۱۰). محدوده سنجش رادارها یا رادیومترهای فضا برد بین ۱۰ تا ۱۶۰۰ کیلومتر مربع است.

سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی (GNSS) علاوه بر کاربردهای اصلی مانند تعیین موقعیت، ناوبری و زمان‌سنجی، دارای کاربردهای دیگری مانند سنجش از دور اتمسفر، حل مسئله معکوس مربوط به زمین‌لرزه جهت تعیین میزان نابرجایی (dislocation) گسل و رفتار سنجی تغییر شکل پوسته است (لی و همکاران، ۲۰۱۵؛ چن و همکاران، ۲۰۱۸). کاربرد جدید GNSS تداخل سنجی سنجش بازتاب با سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی (GNSS-IR) است که رویکردی برای تقریب پارامترهای محیط‌زیستی و ژئوفیزیکی در اطراف یک ایستگاه GNSS با کیفیت سایر محصولات ژئودزی است. بدین‌منظور از سیگنال‌های بازتابی استفاده می‌شود. بازتاب سیگنال تحت‌عنوان چندمسیری (multipath) شناخته می‌شود. هنگامی که هدف تعیین موقعیت است، چندمسیری یکی از مهم‌ترین منابع خطا محسوب می‌شود، زیرا سیگنال‌های

و فضا‌های خالی خاک با آب پر شده است. برآورد محتوای حجمی آب خاک می‌تواند برای انتخاب نوع گیاهی که در آن منطقه کشت می‌شود، مفید باشد. رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در مناطق وسیع نشان می‌دهد که چه مقدار بارندگی به جو برگشته است. پس رطوبت خاک جزء اساسی از چرخه هیدرولوژیکی و یک کمیت مشاهداتی اصلی برای بهینه‌سازی مدیریت آبیاری در کشاورزی است.

رطوبت حجمی خاک در حال حاضر با استفاده از روش‌های سنجش از دور و اندازه‌گیری در محل تعیین می‌شود. پایش رطوبت خاک در محل یا با خشک‌کردن فیزیکی حجمی از خاک برای محاسبه مقدار آب یا از طریق استفاده از پوششگرهای الکترومغناطیسی انجام می‌شود (راجکای و رایدن، ۱۹۹۲؛ روبروک و همکاران، ۲۰۰۰). این روش‌ها اطلاعاتی در مورد میزان رطوبت خاک برای حجم کمتر از یک متر مکعب ارائه می‌دهند. رطوبت خاک معمولاً در مقیاس‌های مکانی نسبتاً کوچک، از چند متر تا صدها متر متغیر است (فامیگلیتی و همکاران، ۱۹۹۸؛ گومز-پلازا و همکاران، ۲۰۰۱؛ بروکا و همکاران، ۲۰۰۷؛ بارونی و همکاران، ۲۰۱۳)، بنابراین اغلب مطلوب است که یک برآورد بزرگ‌تر به‌صورت میانگین سطحی ارائه شود. این کار را می‌توان با استفاده از تعداد زیادی پوششگر در محل (in-situ) که برای تولید میانگین در مقیاس بزرگ‌تر ترکیب می‌شوند، یا از طریق روش‌های سنجش از دور با بردپای بزرگ‌تر انجام داد.

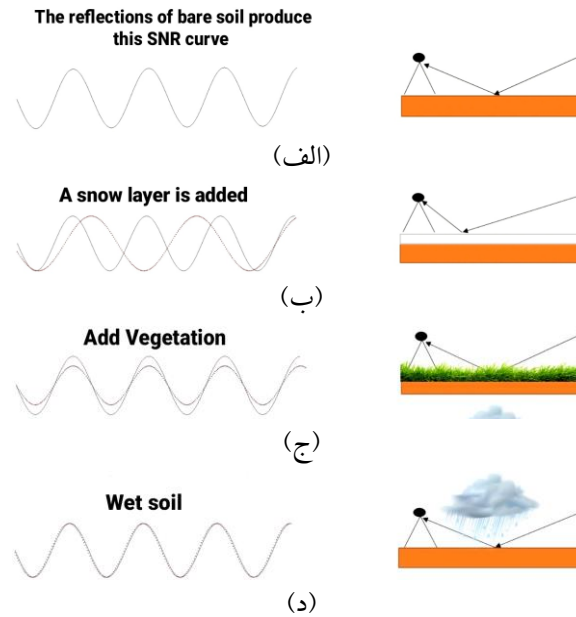
سنجش از دور رطوبت خاک معمولاً با استفاده از رادار مونواستاتیک یا رادیومتر انجام می‌شود. رادارهای مونواستاتیک و رادیومترها ممکن است بر روی برج‌ها یا جرثقیل (شوانک و همکاران، ۲۰۰۵)، در هواپیما (جکسون و همکاران، ۱۹۹۵؛ جکسون و لو واین، ۱۹۹۶؛ ملاندونا و همکاران، ۲۰۱۱) یا بر روی ماهواره یا فضاپیما (کر و همکاران، ۲۰۰۱؛ انتخابی و همکاران، ۲۰۱۰) نصب شوند. سنسورهایی که بر روی برج‌ها یا جرثقیل نصب می‌شوند، می‌توانند برآورد رطوبت خاک را در ابعاد یک مزرعه با ده تا صدها متر مربع ارائه دهند، درحالی‌که

بازتابی قبل از دریافت توسط آنتن از سطح زمین منعکس شده و در نهایت فاصله مابین ماهواره و آنتن درست بزرگ‌تر از مقدار واقعی ثبت می‌شود که یک خطای سیستماتیک در روابط ترفیع برای تعیین موقعیت محل استقرار گیرنده ایجاد کرده و باعث کاهش دقت تعیین موقعیت می‌شود.

در سال‌های اخیر، برای به‌دست آوردن اطلاعات مستمر و البته در مقیاس محلی در مورد رطوبت خاک، GNSS-IR به‌عنوان یک راه حل ممکن مطرح و به‌طور آزمایشی اجرا شده است. علت امکان‌پذیر بودن راه حل مطرح شده این است که ماهواره‌های GNSS سیگنال‌های باند L (فرکانس مایکروویو) را ارسال می‌کنند، که برای استفاده‌های نزدیک به سطح مناسب هستند. سیگنال‌هایی که توسط سطوح مجاور بازتاب و توسط آنتن ثبت می‌شوند، اطلاعاتی در مورد محیط اطراف آنتن را در مقیاس حدود ۱۰۰۰ متر مربع دربردارند. برای این فرکانس‌ها، ضریب بازتاب سیگنال و گذردهی خاک به رطوبت خاک وابسته است (لارسون و همکاران، ۲۰۰۸؛ لارسون و همکاران، ۲۰۰۹؛ چو و همکاران، ۲۰۱۳). بنابراین، از سیگنال بازتاب شده از سطح زمین که توسط یک گیرنده اندازه‌گیری می‌شود، می‌توان برای درک تغییرات زمانی رطوبت خاک نزدیک سطح زمین استفاده کرد. در این روش، تغییرات در الگوی تداخلی سیگنال‌های مستقیم و بازتابیده تجزیه و تحلیل می‌شود. داده‌های اصلی ثبت شده توسط گیرنده‌های GNSS مشاهدات کد و فاز حامل است. سومین مشاهده‌ای که توسط برخی گیرنده‌ها ثبت می‌شود، نسبت سیگنال به نویز SNR (Signal to Noise Ratio) است. SNR نسبت توان سیگنال به اندازه‌گیری نویز است که با استفاده از واحد دسی‌بل لگاریتمی (dB) یا دسی‌بل-هرتز (dB-Hz) بیان می‌شود. تغییرات در الگوی تداخلی سیگنال‌های مستقیم و

بازتابیده که در داده‌های SNR ثبت می‌شوند، به‌صورت نمودارهای تداخلی در می‌آیند. نوسانات زمانی نمودارهای تداخلی، مبین تغییرات میزان رطوبت حجمی خاک (Volumetric Soil Moisture) در نزدیکی سطح زمین در عمق حدود ۵ سانتی‌متری است.

در شکل ۱-الف منحنی SNR استخراج شده توسط بازتاب خاک بدون پوشش نمایش داده شده است. در شکل ۱-ب خاک پوشیده از برف است که باعث تغییرات قابل توجه منحنی SNR در مقایسه با خاک بدون پوشش می‌شود. در شکل ۱-ج لایه‌ای از پوشش گیاهی روی خاک وجود دارد که تغییرات آشکاری را در منحنی SNR ایجاد کرده است. شکل ۱-د منحنی SNR را نشان می‌دهد که توسط بازتاب خاک مرطوب ایجاد شده است. رطوبت خاک تغییرات جزئی در منحنی SNR ایجاد می‌کند و به‌همین دلیل است که به‌دست آوردن اطلاعات دقیق در مورد میزان رطوبت خاک از تجزیه و تحلیل داده‌های SNR چالش‌برانگیز است. اخیراً ثابت شده است که GNSS-IR قابلیت بسیار خوبی برای اندازه‌گیری محتوای رطوبت خاک (SMC) دارد. به‌عنوان مثال، SNR را می‌توان برای مشاهده تغییرات کوچک در بازتاب سطح و محتوای رطوبت خاک استفاده کرد (لارسون و همکاران، ۲۰۰۹؛ مائو و همکاران، ۲۰۰۹). هر دو سیگنال مستقیم و بازتابی توسط گیرنده‌های GNSS دریافت می‌شود. دلیل عملکرد GNSS-IR این است که مقادیر داده‌های SNR با تغییر رطوبت خاک تغییر می‌کند (دابسون و همکاران، ۱۹۸۵). با توجه به رابطه بین ضریب بازتاب خاک و رطوبت خاک لو و همکاران (۲۰۱۶) یک مدل تجربی ساختند. یک مدل برآوردی توسط چو و همکاران (۲۰۱۴) برای به‌دست آوردن رطوبت خاک برای عمق ۵ سانتی‌متر به بالای خاک بدون پوشش پیشنهاد شد.



شکل ۱. تغییرات در منحنی SNR در چهار وضعیت زمین (الف) بدون پوشش، (ب) با لایه برف، (ج) با پوشش گیاهی، (د) با خاک مرطوب.

چین با استفاده از داده‌های SNR سیستم ماهواره‌ای بیدو (BeiDou) و همچنین سیستم تعیین موقعیت جهانی GPS بازایی و از طریق مقایسه با مشاهدات میدانی ارزیابی شد. در این بررسی نیز معلوم شد که فناوری تداخل‌سنجی سنجش بازتاب سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی از توانایی و پتانسیل مطلوب برای پایش رطوبت حجمی خاک و نیز رشد گیاهان در زمین‌های کشاورزی برخوردار است (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۱).

سیگنال‌های بازتابی اطلاعاتی در مورد چرخه آب زمین مانند عمق برف (رودریگر-آلوارز و همکاران، ۲۰۱۱الف؛ کاردلاک و همکاران، ۲۰۱۲)، ارتفاع یخ، سطح آب دریا و ارتفاع امواج (شین و همکاران، ۲۰۰۸؛ آلونسو-آرویو و همکاران، ۲۰۱۴)، رشد و پوشش گیاهی (فرازولی و همکاران، ۲۰۱۱، رودریگر-آلورز و همکاران، ۲۰۱۱ب)، ارتفاع‌سنجی اقیانوس‌ها (مشبرن و همکاران، ۲۰۱۶؛ مشبرن و همکاران، ۲۰۱۸)، ارتفاع و طول موج سونامی (یو، ۲۰۱۴؛ ۲۰۱۶) و رطوبت خاک (مسترز، ۲۰۰۴) ارائه می‌دهند. GNSS-IR اندازه‌گیری عمق برف را از راه دور در مناطق صعب‌العبور فراهم می‌کند. با اندازه‌گیری تغییرات ارتفاع یخ می‌توان دریافت که چه مقدار آب شیرین در یخچال‌ها ذخیره شده یا از بین رفته است. همچنین از

تاکنون چندین مطالعه در زمینه برآورد رطوبت حجمی خاک با استفاده از تداخل‌سنجی سنجش بازتاب سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی انجام شده است. یک مطالعه موردی که توسط اتحادیه اروپایی علوم زمین منتشر شد، مربوط به بازتاب‌سنجی تداخلی GNSS در مرکز آزمایشات کاجمار در والنسیای اسپانیا است. این مطالعه، به‌منظور پایش رطوبت خاک طی مدت ۶۶ روز از ۳ دسامبر ۲۰۱۸ تا ۶ فوریه ۲۰۱۹ انجام شد. در این بررسی، مشاهدات GNSS با ادغام منظومه‌های ماهواره‌ای GPS، GLONASS و GALILEO انجام پذیرفت و همزمان با مشاهدات GNSS، نمونه‌برداری محلی از خاک در عمق ۵ سانتی‌متری به‌منظور تعیین رطوبت خاک و ایجاد مجموعه داده صحت‌سنجی نیز انجام شد. سرانجام، با مقایسه داده‌های تداخل‌سنجی سنجش بازتاب ماهواره‌ای با مجموعه داده‌های میدانی معلوم شد که روش تداخل‌سنجی سنجش بازتاب سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی در برآورد تغییرات رطوبت خاک و برآورد رشد گیاهان مجاور ایستگاه، از پتانسیل بالایی برخوردار است (مارتین و همکاران، ۲۰۲۰). طی مطالعه دیگری تغییرات رطوبت حجمی خاک و رشد و نمو گندم در مزرعه‌ای واقع در شهر پکن کشور

GNSS-IR به عنوان جزرومدسنج استفاده می شود و می تواند تغییرات محلی، منطقه ای و جهانی سطح آب دریا را اندازه گیری کند. GNSS-IR می تواند شروع رشد گیاه، سن گیاه، حداکثر رشد پوشش گیاهی و طول فصل رشد را اندازه گیری کند. پس با تجزیه و تحلیل سیگنال های بازتابی، می توان به اطلاعات مفیدی در مورد سطح بازتاب دست یافت.

الگوریتم مورد استفاده در این تحقیق برای برآورد رطوبت خاک در کل ایستگاه های شبکه EarthScope PBO H₂O که اکثراً در غرب ایالات متحده آمریکا واقع بوده و دارای بیشترین تغییرات در پوشش گیاهی هستند، اجرا می شود (لارسون و اسمال، ۲۰۱۳). پروژه PBO H₂O برای مطالعه چرخه آب تعریف شده و از داده های بازتابی GNSS مربوط به شبکه PBO (Plate Boundary Observation) استفاده می کند. تمام ایستگاه های شبکه PBO H₂O دارای آنتن های choke-ring بوده و تقریباً همگی از گیرنده های Trimble NetRS استفاده می کنند. ایستگاه ها در مناطقی با تغییرات توپوگرافی کم و در اکوسیستم هایی که به عنوان زمین های چمن یا درختچه شناخته می شوند، قرار دارند. برخی از ایستگاه ها داده ها را در بازه های زمانی یک ثانیه ثبت می کنند.

در این مقاله ایستگاه P038 از این شبکه برای انجام تحقیق انتخاب شد. دلیل انتخاب این ایستگاه وجود مشاهدات بازتابی بدون قطعی و بدون تغییر در مشخصات ایستگاه برای مدت ۴ سال طی سال های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ است. داده های SNR از فایل های RINEX استخراج شد و از الگوریتم ارائه شده توسط لارسون و همکاران (۲۰۰۹) برای برآورد تغییرات رطوبت خاک طی سال های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ استفاده شد. همچنین از شبکه های عصبی مصنوعی حافظه طولانی کوتاه مدت برای مدل سازی و پیش بینی سری زمانی رطوبت خاک استفاده شد و داده ها بر اساس نتایج آن ارزیابی شد. نتیجه برآوردها نشان می دهد که رطوبت خاک در این منطقه روندی صعودی دارد.

۲. الگوریتم برآورد رطوبت خاک با استفاده از GNSS الگوریتم مورد استفاده در این تحقیق برای برآورد رطوبت خاک در کل ایستگاه های شبکه EarthScope PBO H₂O واقع در ایالات متحده آمریکا که دارای بیشترین تغییرات در پوشش گیاهی هستند، اجرا می شود (لارسون و اسمال، ۲۰۱۳). تمام ایستگاه های شبکه PBO H₂O دارای آنتن های choke-ring بوده و تقریباً همگی از گیرنده های Trimble NetRS استفاده می کنند. ایستگاه ها در مناطقی با تغییرات توپوگرافی محدود و در اکوسیستم هایی که به عنوان زمین های چمن یا درختچه شناخته می شوند، قرار دارند. برخی از ایستگاه ها داده ها را در بازه های زمانی یک ثانیه و برخی در بازه های زمانی ۱۵ ثانیه ثبت می کنند. الگوریتم مورد استفاده دارای چهار مرحله اصلی است. در گام نخست مسیرهای ماهواره ای مناسب انتخاب می شوند. سپس ارتفاع اولیه بازتاب برای هر مسیر برآورد می شود. در ادامه متریک های SNR محاسبه می شوند و در نهایت اثرات پوشش گیاهی کمی سازی شده و حذف می شوند.

۱-۲. انتخاب مدارهای ماهواره ای مناسب

همه مدارهای ماهواره ای را نمی توان برای برآورد رطوبت خاک استفاده کرد. با در نظر گرفتن شرایط زیر می توان مناسب ترین مدارها را انتخاب کرد. مدارهای ماهواره ای بایستی بازتاب های یکنواخت مابین زوایای ارتفاعی ۵ الی ۲۵ درجه یا ۵ الی ۳۰ درجه داشته باشند. نوسانات تداخل نما برای زوایای ارتفاعی بالاتر توسط الگوی بهره آنتن پنهان می شوند. در انتخاب منطقه مطالعاتی بایستی به وجود درختان و ساختمان ها توجه کرد که مدارهای ماهواره ای را مسدود نکنند. همچنین بایستی دقت کرد که امواج از سطوح ساخت انسانی مانند جاده ها بازتاب نشوند. یک مدار باید برای دوره هایی از سال که محتوای آب گیاهی یا ارتفاع آن تقریباً ثابت است، فرکانس غالب نسبتاً پایدار داشته باشد. از مدارهای ماهواره ای که مناطقی با تغییرات توپوگرافی زیاد در فاصله حدود ۵۰ متری آنتن را دربرمی گیرند، باید اجتناب شود. هیچ قانون ساده ای برای

$$A = \beta V \quad (۳)$$

شیفت فاز که تفاضل فاز مابین دو سیگنال مستقیم و بازتابی است را می‌توان براساس اختلاف طول طی شده توسط دو سیگنال و طول موج سیگنال بیان کرد.

$$\Delta\phi = 2\pi/\lambda \times L \quad (۴)$$

که در آن λ طول موج GNSS است. در مثلث قائم‌الزاویه سمت چپ شکل ۲ می‌توان اختلاف طول را به صورت تابعی از زاویه ارتفاعی ماهواره (e) و طول D نوشت:

$$L = D \sin(e) \quad (۵)$$

در مثلث متساوی‌الساقین سمت چپ شکل ۲ قاعده مثلث (D) دو برابر ارتفاع آنتن (H) است. بنابراین با ترکیب روابط (۴) و (۵) می‌توان نوشت:

$$\Delta\phi = 4\pi H/\lambda \times \sin(e) \quad (۶)$$

با جای‌گذاری روابط (۴) و (۵) در رابطه (۲) خواهیم داشت:

$$SNR_{ref} = A \cos(4\pi H/\lambda \times \sin(e) + \phi) \quad (۷)$$

در رابطه فوق فرض می‌شود که داده‌های SNR دارای فرکانس و دامنه ثابت به‌عنوان تابعی از سینوس زاویه ارتفاعی ماهواره هستند که یک ساده‌سازی است. شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط لارسون و همکاران (۲۰۰۸) نشان می‌دهد که ϕ مستقیماً با عمق بازتاب ظاهری سیگنال GPS ارتباط دارد. هنگامی که خاک مرطوب است، بازتابنده ظاهری نزدیک به سطح است؛ همان‌طور که خاک خشک می‌شود، عمق بازتاب چندین سانتی‌متر عمیق‌تر می‌شود. ارتفاع اولیه بازتابنده تقریباً با H برابر است و از داده‌های SNR سیگنال‌های بازتابی با استفاده از رابطه (۷) برآورد می‌شود. داده‌های هر مدار ماهواره‌ای می‌تواند برای برآورد ارتفاع اولیه بازتابنده برای ایستگاه استفاده شود. فاز و دامنه نیز با استفاده از روش کمترین مربعات برآورد می‌شوند.

۲-۳. برآورد سنج‌های SNR

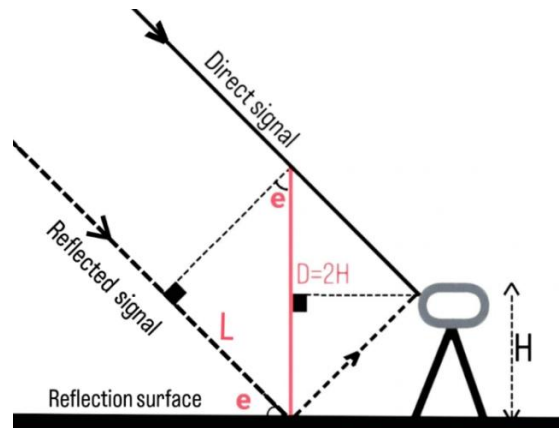
پرودوگرام LSP (Lomb-Scargle) را می‌توان برای برآورد تغییرات زمانی در فرکانس غالب تداخل‌نمای SNR استفاده کرد. این روش در برآورد عمق برف از

تعیین این که چه زمانی تغییرات توپوگرافی بیش از حد شدید است وجود ندارد، ولی در حالتی که تغییرات توپوگرافی از ۴ درصد تجاوز نکند، برای بازیابی بهترین گزینه است (لارسون و نیوینسکی، ۲۰۱۳).

در حالت کلی هرچقدر تعداد مدارهای ماهواره‌ای مورد استفاده در یک ایستگاه بیشتر باشد، برآورد نهایی سری زمانی رطوبت خاک قابل اعتمادتر خواهد بود.

۲-۲. برآورد ارتفاع اولیه بازتابنده برای هر مدار

شکل ۲ یک نمای ساده از یک سیگنال بازتابی را نمایش می‌دهد. این شکل اطلاعاتی در مورد فاصله بین سطح بازتابنده و گیرنده ارائه می‌دهد که به آن ارتفاع بازتابنده (Reflector Height) RH می‌گویند. ارتفاع اولیه بازتابنده (H_0) کاملاً مشخص نیست و باید از داده‌های SNR برآورد شود.



شکل ۲. سیگنال‌های بازتابی سیستم ماهواره‌ای ناوبری جهانی GNSS مورد استفاده برای تداخل‌سنجی سنجش بازتاب، سیگنال‌های دریافتی ترکیبی از سیگنال‌های مستقیم و سیگنال‌های بازتابی هستند. ارتفاع آنتن، e زاویه ارتفاعی ماهواره و L اختلاف طول پیموده شده توسط دو سیگنال مستقیم و بازتابی است.

SNR سیگنال مستقیم تابعی از ولتاژ و کسینوس فاز سیگنال است:

$$SNR_{dir} = V \cos(\phi) \quad (۱)$$

در مقایسه با سیگنال مستقیم، سیگنال بازتابی، دارای دامنه ولتاژ ضعیف شده و شیفت فاز است:

$$SNR_{ref} = \beta V \cos(\phi + \Delta\phi); \quad 0 < \beta < 1 \quad (۲)$$

$$A_{norm(t)} = A(t)/A_{20\%} \quad (11)$$

که در آن اندیس پایین ۲۰ درصد نشان دهنده میانگین ۲۰ درصد بالای مقادیر A یا A_{LSP} در سری زمانی برای یک مدار ماهواره‌ای منفرد است. ۲۰ درصد پارامتری است که بسته به میزان نویز موجود در سری‌های زمانی یا طول کل سری‌های زمانی ممکن است تغییر کند. هر مقدار نرمال شده که بزرگ‌تر از یک باشد برابر یک قرار داده می‌شود.

تغییرات در سری زمانی H_{eff} با استفاده از رابطه (۹) محاسبه می‌شود. در حالت کلی، ΔH_{eff} بیش از ۵ سانتی‌متر در طول سال تغییر نمی‌کند، اگرچه میزان قابل توجه برف یا آب گیاهی در ایستگاه می‌تواند تغییرات بزرگ‌تری ایجاد کند. در گام بعدی اثرات پوشش گیاهی با استفاده از این معیارها کمی می‌شوند.

۲-۴. کمی‌سازی اثر پوشش گیاهی

در غیاب اندازه‌گیری‌های میدانی تغییرات فصلی محتوای آب پوشش گیاهی، می‌توان از سری زمانی A_{norm} برای برآورد این که آیا اثرات پوشش گیاهی قابل توجه سری‌های زمانی $\Delta\phi$ را تحت تأثیر قرار می‌دهد یا خیر، استفاده کرد. چو و همکاران (۲۰۱۴) با یک مدل الکتروپدینامیکی نشان دادند که افزایش رطوبت خاک باعث کاهش دامنه SNR می‌شود. این مدل نشان می‌دهد که افزایش رطوبت به میزان $(cm)^{-3}(cm)^3 \cdot 0.4$ ، منجر به کاهش A_{norm} از یک به 0.78 می‌شود. از آنجایی که تفاوت بین رطوبت باقی‌مانده و اشباع برای یک خاک معمولی حدود $(cm)^{-3}(cm)^3 \cdot 0.4$ است، در غیاب رشد پوشش گیاهی نباید شاهد کاهش A_{norm} به کمتر از 0.78 بود. این بدان معناست که یک مدار ماهواره‌ای که سری زمانی A_{norm} آن برای مدت‌زمان طولانی زیر 0.78 باقی می‌ماند، احتمالاً تحت تأثیر چیزی غیر از تغییرات رطوبت خاک، مانند تغییرات محتوای آب پوشش گیاهی قرار می‌گیرد. مداری که A_{norm} سری زمانی آن بیشتر از 0.78 باقی می‌ماند ممکن است اثرات پوشش گیاهی کوچکی داشته باشد، اگرچه برای این موارد تعیین این که آیا

GPS-IR استفاده شده است (لارسون و نیوینسکی، ۲۰۱۳). LSP مانند تبدیل فوریه سریع است، با این تفاوت که می‌توان از آن برای داده‌های نمونه‌برداری نامنظم استفاده کرد. فرکانس غالب را می‌توان با استفاده از رابطه زیر به ارتفاع مؤثر بازتابنده (H_{eff}) تبدیل کرد:

$$H_{eff(t)} = \frac{1}{2} f_{m,t} \lambda \quad (8)$$

که در آن f_m فرکانس اوج LSP و t شمارنده روز است. تغییر در ارتفاع مؤثر بازتابنده (ΔH_{eff}) در طول سال به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Delta H_{eff(t)} = H_0 - H_{eff(t)} \quad (9)$$

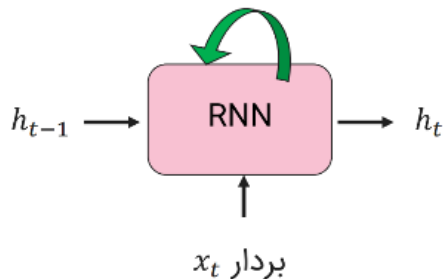
توان اوج فرکانس LSP یا دامنه LSP (A_{LSP}) نیز تحت تأثیر رطوبت خاک، پوشش گیاهی و سایر شرایط ایستگاه مانند توپوگرافی است. معیارهای به دست آمده از داده‌های SNR ($\Delta H_{eff}, A, A_{LSP}, \phi$) به میزان‌های مختلفی تحت تأثیر تغییرات رطوبت خاک (لارسون و همکاران، ۲۰۰۸؛ زاوروتنی و همکاران، ۲۰۱۰؛ چو و همکاران، ۲۰۱۴)، پوشش گیاهی (وان و همکاران، ۲۰۱۴) و عمق برف (لارسون و نیوینسکی، ۲۰۱۳) قرار می‌گیرند. دو مطالعه مدل‌سازی نشان دادند که فاز بهترین شاخص تغییرات رطوبت خاک است (چو و همکاران، ۲۰۱۴) و A متریکی است که بیشترین ارتباط را با تغییرات در گذردهی پوشش گیاهی و ارتفاع تاج پوشش دارد (چو و همکاران ۲۰۱۵). با این حال، مشخص شد که فاز نیز به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر تغییرات پوشش گیاهی قرار می‌گیرد (چو و همکاران، ۲۰۱۵). بنابراین، بسته به وسعت پوشش گیاهی در یک ایستگاه، قبل از برآورد رطوبت خاک از داده‌های SNR، ابتدا باید اثر پوشش گیاهی کمی‌سازی و حذف شود.

سنجه‌های SNR برای هر روز و هر مدار ماهواره‌ای محاسبه می‌شود. بزرگی مطلق A ، A_{LSP} به رطوبت خاک یا تغییرات پوشش گیاهی ارتباطی ندارد و در عوض عمدتاً به قدرت ارسال ماهواره، بهره آنتن و دمای گیرنده وابسته هستند. A ، A_{LSP} در هر روز به صورت زیر نرمال‌سازی می‌شوند:

$$A_{LSPnorm(t)} = A_{LSP(t)}/A_{LSP20\%} \quad (10)$$

برای مدل‌سازی و پیش‌بینی سری زمانی رطوبت خاک استفاده می‌شود. LSTM یک معماری بازگشتی از شبکه‌های عصبی است که در سال ۱۹۹۷ میلادی توسط هوخرایتر و اشمیدهوربر ارائه شد و بعداً توسط جرس و همکاران (۲۰۰۰) و گرف و همکاران (۲۰۱۷) بهبود داده شد.

ساختار شبکه بازگشتی (Recurrent Neural Network) RNN (Network) خیلی شبیه به شبکه LSTM است. بدین صورت که LSTM تقریباً نسخه بروز شده RNN است. مطابق شکل ۴ بلوک RNN به عقب نگاه می‌کند و به عبارت دیگر دارای حافظه کوتاه‌مدت است. این شبکه خروجی بلوک قبل (h_{t-1}) و بردار ورودی (x_t) را گرفته و خروجی بلوک جاری (h_t) را استخراج می‌کند. ترتیب داده‌های ورودی x_t برای این شبکه مهم است.



شکل ۴. بلوک شبکه RNN، نگاه به عقب این شبکه نشانگر حافظه کوتاه‌مدت است.

روابط شبکه RNN به صورت زیر است:

$$h_t = f_w(h_{t-1}, x_t) \quad (6)$$

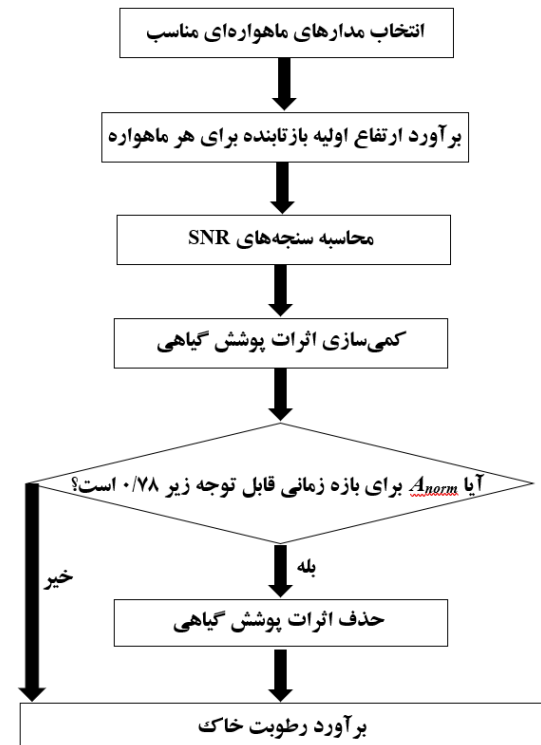
$$h_t = \tanh(w_{hh}h_{t-1}, w_{xh}x_t) \quad (7)$$

$$y_t = w_{hy}h_{t-1} \quad (8)$$

که در آن w وزن‌ها و y_t خروجی شبکه است. شکل ۵ بلوک دیاگرام شبکه بازگشتی RNN را نشان می‌دهد که در آن w وزن‌ها و L حافظه‌ها هستند. تابع تانژانت هیپربولیک (\tanh) قسمت اصلی بلوک‌هاست. بخشی از خروجی‌ها (y_i) به حافظه‌ها (L_i) فرستاده می‌شود.

کاهش در A_{norm} ناشی از پوشش گیاهی است یا از تغییرات رطوبت خاک دشوار است.

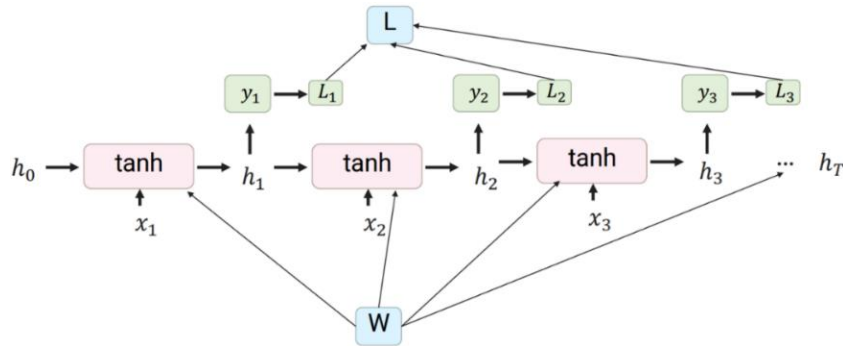
اگر اطراف ایستگاه دارای اثر پوشش گیاهی قابل توجهی باشد که توسط سری زمانی A_{norm} تعیین شده است، باید قبل از برآورد رطوبت خاک اثرات پوشش گیاهی حذف شود. اگر اثر پوشش گیاهی قابل توجهی وجود داشته باشد ولی دارای دوره زمانی کوتاه باشد، داده‌های فاز زمانی که A_{norm} کمتر از ۰/۷۸ است را می‌توان بدون استفاده از فیلتر پوشش گیاهی حذف کرد. با این حال، صرفاً حذف داده‌های فاز بدون اجرای اصلاح پوشش گیاهی منجر به خطا در دوره‌های اطراف بازه تحت تأثیر می‌شود که هنوز تحت تأثیر رشد پوشش گیاهی هستند. شکل ۳ خلاصه‌ای از الگوریتم برآورد رطوبت خاک را برای یک ایستگاه نشان می‌دهد.



شکل ۳. الگوریتم برآورد رطوبت خاک برای یک ایستگاه GNSS.

۳. شبکه‌های عصبی حافظه طولانی کوتاه‌مدت

در این مقاله از شبکه‌های عصبی حافظه طولانی کوتاه‌مدت (Long Short-Term Memory) LSTM

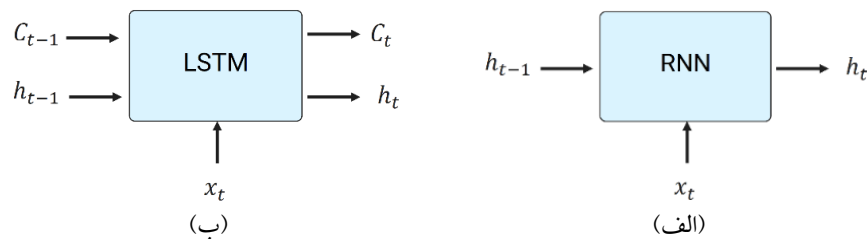


شکل ۵. بلوک دیاگرام شبکه بازگشتی RNN، وزن W هم روی بردارهای x و هم روی h ها تأثیرگذار است.

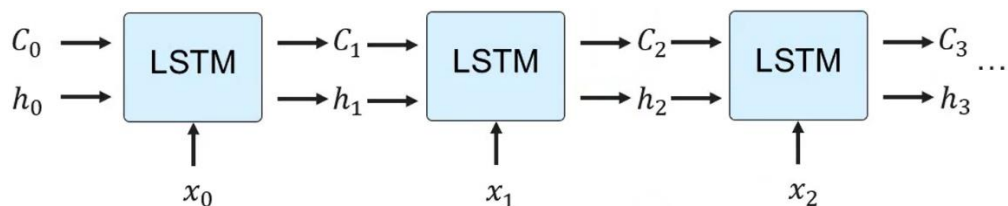
۳-۱. دلایل نیاز به شبکه LSTM

یکی از مشکلات اصلی شبکه‌های عصبی بازگشتی، گرادیان صفرشونده (vanishing gradient) است. افزایش تعداد داده‌ها باعث نزدیک شدن گرادیان به صفر می‌شود که نتیجه آن عدم توانایی استفاده از اطلاعات قدیمی‌تر است. مشکل دوم این است که در صورت افزایش بیش از حد وزن‌ها (exploding gradient) گرادیان به سمت بی‌نهایت میل کرده و نتیجه آن باز عدم توانایی استفاده از اطلاعات قبلی است. در بلوک LSTM به‌منظور حل این دو مشکل، راه‌هایی برای انتقال اطلاعات مهم پیشین در هنگام پیشروی ایجاد شده‌است. این مهم به‌طور کلی از طریق ضرب بردارهایی تحت‌عنوان درگاه، در ورودی‌های بلوک صورت می‌پذیرد. (هوکرایتر و اشمیدوبر، ۱۹۹۶). پس شبکه LSTM شامل شبکه RNN هم می‌شود و

دربرگیرنده روابط بیشتری بوده و در حالت کلی پیچیده‌تر از آن است و جهت اجرا نیاز به سخت‌افزار قوی‌تری دارد. پس شبکه LSTM توسعه یافته شبکه RNN بوده و دارای حافظه بسیار طولانی‌تری نسبت به آن است ولی هر دو شبکه ساختار زنجیره‌ای یا دنباله هم دارند. شبکه RNN یک ورودی و یک خروجی دارد (شکل ۶-الف) و دارای حافظه کوتاه‌مدت است. شبکه LSTM دو ورودی و دو خروجی داشته (شکل ۶-ب) و هم حافظه کوتاه‌مدت و هم بلندمدت دارد و دارای قدرت حافظه بسیار بالایی است که تابع شرایط آموزش و شرایط لایه‌هاست. کار حافظه بلندمدت در شبکه LSTM یا حذف اطلاعات (فراموشی) یا افزودن اطلاعات در حافظه (به‌خاطر سپردن) است. ساختار لایه‌ای شبکه LSTM در شکل ۷ نشان داده شده‌است.



شکل ۶. شبکه (الف) RNN و (ب) LSTM، h_{t-1} خروجی از بلوک قبل، x_t بردار یا دنباله ورودی، C_{t-1} حافظه بلوک قبلی، h_t خروجی از بلوک جاری، C_t حافظه بلوک جاری.



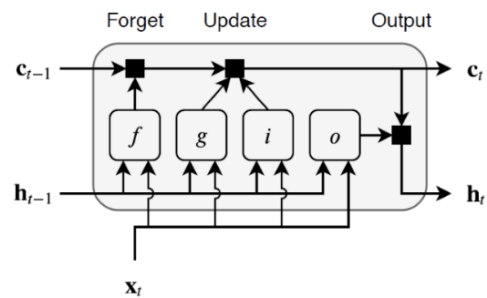
شکل ۷. ساختار لایه‌ای شبکه LSTM، جفت‌های ورودی و خروجی مابین بلوک‌ها مشخص است.

۳-۲. انواع درگاه در شبکه LSTM

شبکه LSTM دارای سه درگاه است. درگاه فراموشی که اطلاعات را حذف کرده و فراموش می‌کند. درگاه ورودی که دریافت‌کننده اطلاعات است و درگاه خروجی. حافظه در LSTM به کمک این سه درگاه مدیریت می‌شود (جرس و همکاران، ۲۰۰۰). بلوک دیاگرام مبتنی بر درگاه شبکه LSTM در شکل ۸ نمایش داده شده است. شکل ۹ ساختار کامل شبکه LSTM را نشان می‌دهد. دو سری وزن w_h و w_i در این شکل دیده می‌شود که هرکدام شامل چهار ضریب وزنی است. اندیس اول نوع وزن و اندیس دوم نوع درگاه را مشخص می‌کند.

$$w_i = \{w_{if}, w_{ii}, w_{ig}, w_{io}\} \quad (9)$$

$$w_h = \{w_{hf}, w_{hi}, w_{hg}, w_{ho}\} \quad (10)$$

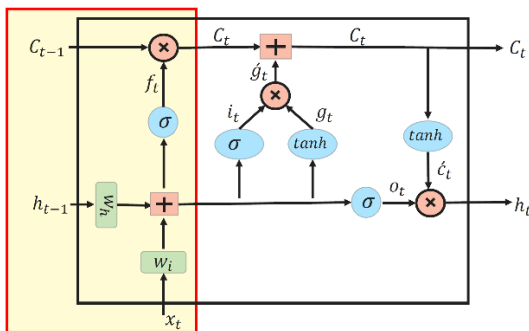


شکل ۸. بلوک دیاگرام مبتنی بر درگاه شبکه LSTM که شامل سه درگاه فراموشی (f)، ورودی (i) و خروجی (o) است.

f_t با c_{t-1} به صورت درایه‌به‌درایه ضرب می‌شود. ترم‌های b بایاس یا اریب هستند که در فرایند یادگیری بهینه می‌شوند.

$$c_t = c_{t-1} \odot f_t \quad (12)$$

در صورت حذف اطلاعات مقدار لایه فراموشی برابر صفر و در صورت نگهداری و حفظ اطلاعات در حافظه مقدار لایه برابر یک است. اگر مقدار اطلاعات توسط لایه تغییر کند مقدار σ بین صفر و یک است. پس وظیفه درگاه فراموشی حذف، نگهداری یا تغییر اطلاعات است.



شکل ۱۰. جایگاه درگاه فراموشی در ساختار کلی شبکه LSTM با رنگ زرد مشخص شده است.

۳-۲-۲. درگاه ورودی

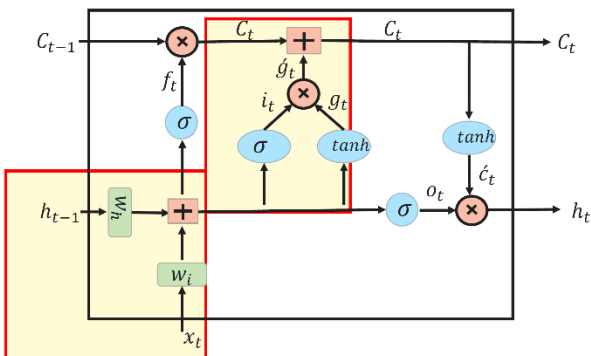
کار درگاه ورودی بررسی ورود اطلاعات جدید به حافظه بلندمدت است. روابط درگاه ورودی به صورت زیر است:

$$i_t = \sigma(w_{hi}h_{t-1} + w_{ii}x_t + b_{hi} + b_{ii}) \quad (13)$$

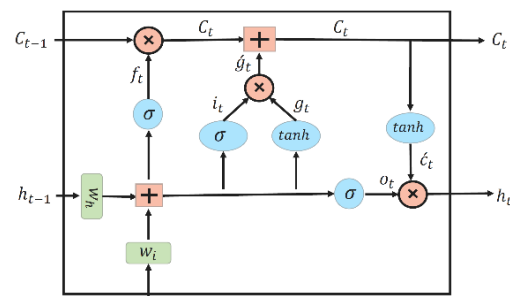
$$g'_t = g_t \odot i_t \quad (14)$$

$$c_t = c_t + g'_t \quad (15)$$

شکل ۱۱ جایگاه درگاه ورودی در ساختار کلی شبکه LSTM را با رنگ زرد نشان می‌دهد.



شکل ۱۱. جایگاه درگاه ورودی در ساختار کلی شبکه LSTM با رنگ زرد مشخص شده است.

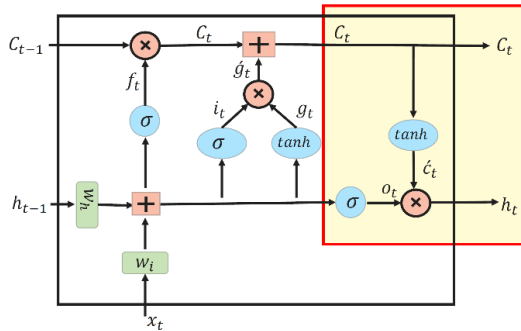


شکل ۹. ساختار کامل شبکه LSTM.

۳-۲-۱. درگاه فراموشی

درگاه فراموشی خود شبیه یک شبکه عصبی است (شکل ۱۰). مطابق رابطه زیر خروجی این درگاه (f_t) یک بردار است. مقدار مجاز σ بین صفر و یک است.

$$f_t = \sigma(w_{hf}h_{t-1} + w_{if}x_t + b_{hf} + b_{if}) \quad (11)$$



شکل ۱۳. جایگاه درگاه خروجی در ساختار کلی شبکه LSTM با رنگ زرد مشخص شده است.

شبکه عصبی LSTM می‌تواند در بازه زمانی طولانی محتوای خود را حفظ کند و در واقع اطلاعات پیشین را به‌خاطر بسپارد. درگاه‌ها نیز بردارهایی با مقادیر بین صفر و یک هستند که چگونگی پیشروی اطلاعات قدیمی و اضافه‌شدن اطلاعات جدید را مشخص می‌کنند. به‌طورکلی یک به معنای عبور و صفر به معنای حذف اطلاعات است. درگاه ورودی مشخص می‌کند چه بخش‌هایی از داده ورودی و به چه مقدار به محتوای حافظه اضافه شوند. درگاه فراموشی مشخص می‌کند که چه بخش‌هایی از محتوای حافظه از آن حذف شوند. درگاه خروجی نیز مشخص می‌کند محتوای وضعیت مخفی (h_t) حاوی چه بخشی از محتوای حافظه باشد.

۴. نتایج مطالعه موردی

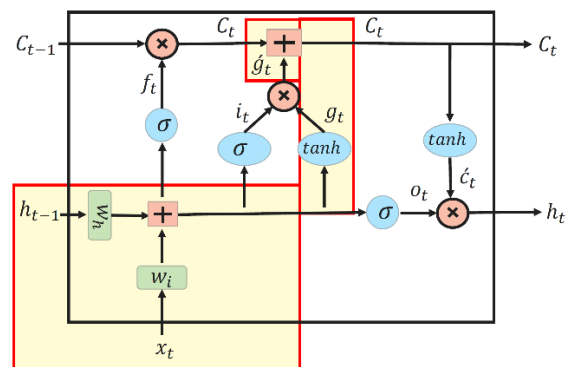
به‌عنوان مطالعه موردی یکی از ایستگاه‌های PBO به نام P038 انتخاب شد. محل ایستگاه در پورتالز، نیومکزیکو در عرض جغرافیایی $34^{\circ} 08' 50''$ و طول جغرافیایی $103^{\circ} 24' 26''$ و ارتفاع $1212/982$ متر از سطح دریا واقع شده است. نوع بنای ایستگاه مهاربندی شده عمیق (deep drilled braced) است. ایستگاه در سال ۲۰۱۵ تأسیس شده و تا به امروز در حال ثبت مشاهده است. با توجه به این که در دو سال اول تأسیس ایستگاه یعنی سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ ثبت داده به‌صورت دائمی نبوده است و از طرفی تجهیزات این ایستگاه در ماه مارس سال ۲۰۲۱ ارتقاء یافته است و فقط در فاصله زمانی سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ ثبت داده توسط ایستگاه به‌صورت دائمی و بدون تغییر در مشخصات ایستگاه انجام شده است، لذا از داده-

۳-۲-۳. درگاه خروجی

بایستی درگاهی باشد که تعیین کند کدام اطلاعات ارزشمند هستند و آنها را حفظ کند و این که کدام اطلاعات مورد نیاز نیستند و آنها را حذف کند. این فرایند تحت عنوان فرایند به‌خاطر سپردن شناخته می‌شود که توسط درگاه خروجی انجام می‌شود. رابطه به‌خاطر سپردن در شبکه LSTM به‌صورت زیر است:

$$g_t = \tanh(w_{hg}h_{t-1} + w_{ig}x_t + b_{hg} + b_{ig}) \quad (16)$$

با ارزش بودن g_t باعث می‌شود که اطلاعات آن به حافظه سپرده شود و بی‌ارزش بودن g_t باعث فراموشی آن می‌شود. بررسی با ارزش بودن یا بی‌ارزش بودن برعهده درگاه خروجی است. درگاه خروجی مشابه درگاه فراموشی است که در سرراه g_t یا به‌خاطر سپردن قرار می‌گیرد تا با ارزش بودن یا بی‌ارزش بودن آن را مشخص کند. در شکل ۱۲ جایگاه به‌خاطر سپردن در ساختار کلی شبکه LSTM با رنگ زرد مشخص شده است.



شکل ۱۲. جایگاه به‌خاطر سپردن در ساختار کلی شبکه LSTM با رنگ زرد مشخص شده است.

پس درگاه خروجی تعیین می‌کند که چقدر از اطلاعات حافظه بلندمدت باید به خروجی منتقل شود. ساختار درگاه خروجی مشابه سایر درگاه‌های LSTM است. شکل ۱۳ جایگاه درگاه خروجی در ساختار کلی شبکه LSTM را با رنگ زرد نشان می‌دهد.

$$o_t = \sigma(w_{ho}h_{t-1} + w_{io}x_t + b_{ho} + b_{io}) \quad (17)$$

$$h_t = o_t \odot \tanh(c_t) \quad (18)$$

h_t و c_t خروجی درگاه خروجی و کل ساختار LSTM هستند.

گیرنده رخ دهد. گیرنده‌ها از نظر حساسیت و دقت محدودیت‌هایی دارند که می‌تواند منجر به سیگنال‌های ضعیف یا نادرست در مناطق خاص شود. با توجه به عدم وجود مانع خاص در این ایستگاه، نیازی به استفاده از ماسک آزیموت نیست. مطابق شکل ۱۴-ب، تمام زوایای ارتفاعی و آزیموت‌های انتخابی مناسب هستند. پس از تجزیه و تحلیل مناطق بازتابی اطراف ایستگاه و انتخاب بهترین زوایای ارتفاعی و آزیموت، داده‌های SNR از فایل‌های RINEX استخراج می‌شوند. داده‌های SNR از واحد dB-Hz به واحد خطی (ولت/ولت) برای هر مسیر ماهواره‌ای در حال طلوع و غروب تبدیل می‌شوند. با توجه به این که در این مرحله هدف استخراج داده‌های SNR از سیگنال‌های چند مسیری است، می‌توان یک نگاه گذرا به داده‌ها داشت تا گزینه‌های مختلف (زوایای ارتفاع، فرکانس‌ها، آزیموت‌ها و پارامترهای کنترل کیفیت) ایستگاه را بررسی کرده و مناسب‌ترین آنها را انتخاب کرد.

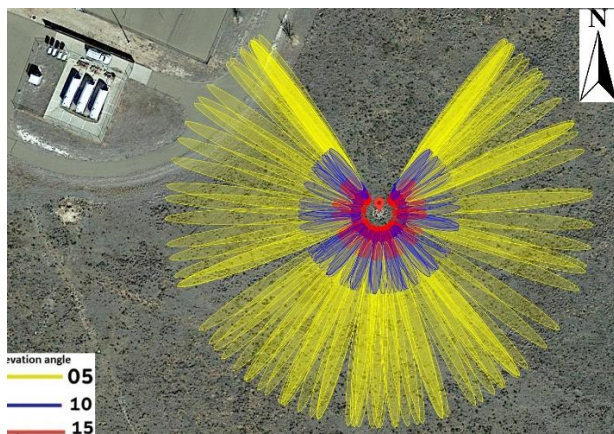
بررسی پریودوگرام‌های LSP به‌عنوان معیار کنترل کیفیت نشان می‌دهد که داده‌های L2C برای برآورد رطوبت خاک مناسب‌تر از سایر داده‌ها مانند L1 و L2P هستند. شکل ۱۵ پریودوگرام LSP داده‌های SNR مستخرج از مشاهدات L2C دریافت شده توسط ایستگاه P038 را برای روز صدم سال ۲۰۱۹ در چهار ربع شمال شرقی، شمال غربی، جنوب شرقی و جنوب غربی نشان می‌دهد. محور افقی ارتفاع رفلکتور را برحسب متر و محور قائم دامنه برحسب Volt/Volt را نشان می‌دهد. بیشینه دامنه LSP، ارتفاع رفلکتور را روی محور افقی نشان می‌دهد. بیشینه محور افقی ۶ متر است. مقدار کمینه محور افقی از ۰/۵ متر شروع می‌شود. کمتر از ۰/۵ متر محدوده مجاز نیست و ارتفاع بازتابنده کمتر از آن عملاً توسط GNSS-IR قابل تعیین نیست. با استفاده از این پریودوگرام‌ها می‌توان متوجه شد که آیا یک بازتابنده مسطح زیر آنتن وجود دارد یا خیر. در صورت وجود بازتابنده مسطح نمودار LSP فقط دارای یک قله خواهد بود که نشان‌دهنده ارتفاع بازتابنده و تغییرات زمانی آن نشان‌دهنده تغییرات زمانی

های این بازه زمانی برای تجزیه و تحلیل رطوبت خاک استفاده شد. داده‌های مورد نیاز در بخش آرشو ویژه UNAVCO ارائه شده است.

مرحله نخست، محاسبه مناطق بازتابی GNSS است تا این اطمینان حاصل شود که سطحی که هدف سنجش آن است، در دسترس ماهواره است. بدین منظور بایستی موقعیت ایستگاه بررسی شود و محل‌های عدم پوشش و موقعیت صحیح موانع در منطقه تحت بررسی که ممکن است باعث ایجاد اعوجاج در آنالیز شود، معلوم شود، در صورت نیاز می‌توان از ماسک زاویه ارتفاعی یا آزیموت استفاده کرد. شکل ۱۴-ب تصویر مناطق بازتابی در اطراف ایستگاه P038 را نشان می‌دهد. شکل کلی مناطق بازتابی در طول زمان ثابت و در واقع تابع زمان نیست ولی تابع موقعیت گیرنده است. زاویه شیب (inclination) مدار ماهواره‌های سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GNSS) نسبت به استوا بسته به نوع ماهواره متفاوت است. زاویه شیب مدار برای ماهواره‌های GPS ایالات متحده آمریکا حدود ۵۵ درجه، ماهواره‌های GLONASS روسیه حدود ۶۵ درجه، ماهواره‌های Galileo اتحادیه اروپا حدود ۵۶ درجه، ماهواره‌های BeiDou چین حدود ۵۵ درجه است. بنابراین زاویه شیب معمول مدار ماهواره‌های GNSS بین ۵۵ تا ۶۵ درجه متغیر است و از این زاویه شیب تا قطب شمال عملاً ماهواره‌ای طلوع یا غروب نمی‌کند و ماهواره‌ها قادر به پوشش آن نیستند. به همین دلیل در یک محدوده‌ای حول شمال سیگنال بازتابی برای دریافت توسط گیرنده عملاً وجود ندارد. ابعاد این منطقه با نزدیک شدن محل ایستگاه به سمت قطب شمال بزرگ‌تر و با نزدیک شدن به سمت استوا کوچک‌تر می‌شود. عین این وضعیت در نیمکره جنوبی نیز وجود دارد با این تفاوت که منطقه عدم دریافت سیگنال بازتابی در قسمت جنوبی ایستگاه ظاهر خواهد شد. بقیه نواحی عدم پوشش که در ناحیه بازتاب دیده می‌شود مناطقی هستند که سیگنال‌های دریافتی در آنها ضعیف بوده و یا در دسترس نیستند که می‌تواند به دلایل مختلفی مانند موانع، شرایط جوی یا محدودیت‌های

آنتن در حدود ۲ متر بالاتر از سطح بازتابنده زمینی است. هر رنگ برای یک ماهواره متفاوت است. داده‌هایی که به رنگ خاکستری ترسیم شده‌اند نشان‌دهنده بازتاب از سطوحی غیر از سطح هدف یعنی خاک اطراف گیرنده هستند.

ارتفاع بازتابنده است. ولی اگر منطقه تحت پایش دارای توپوگرافی باشد قتل متعدد در نمودار LSP ظاهر خواهد شد. پس برای رسیدن به نتایج بهتر در برآورد رطوبت خاک بهتر است از یک منطقه مسطح استفاده شود. جمع شدن قله‌ها در پریودوگرام‌ها در حدود ۲ متر به صورت گروهی، به این معنی است که در این ایستگاه مرکز فاز

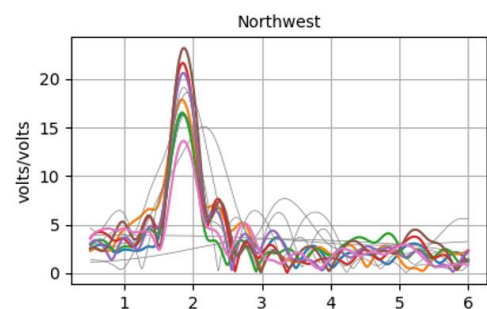


(ب)

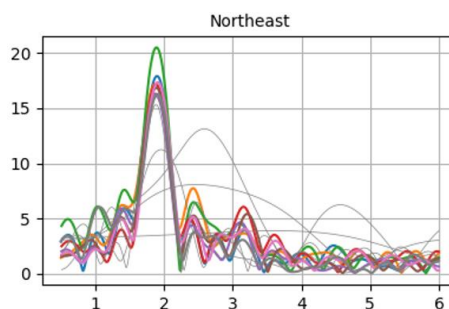


(الف)

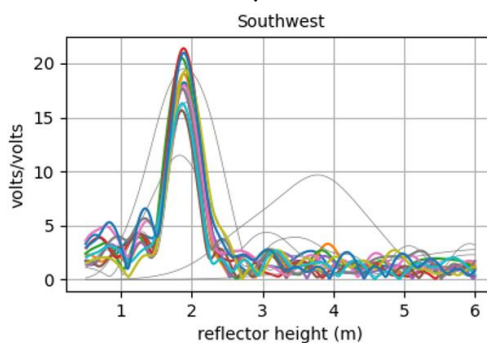
شکل ۱۴. (الف) تصویر ایستگاه GPS به نام P038. مرکز فاز آنتن در این ایستگاه تقریباً ۲ متر بالاتر از سطح خاک است. این ایستگاه در سال ۲۰۱۵ نصب شده است. (ب) تصویر از Google Earth از ایستگاه P038 و مناطق بازتابی برای ارتفاع بازتابنده ۲ متری و ماهواره‌های با زوایای ارتفاعی بین ۵ تا ۱۵ درجه. مناطق بازتابی برای زاویه ارتفاعی ۵ درجه با رنگ زرد، ۱۰ درجه با رنگ آبی و ۱۵ درجه با رنگ قرمز نشان داده شده است.



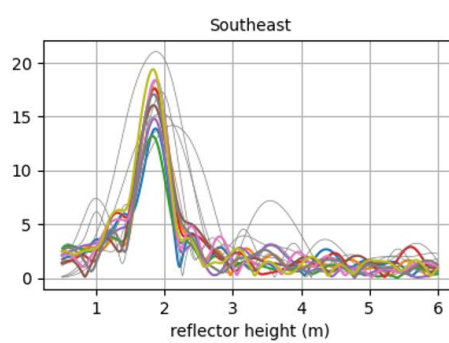
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

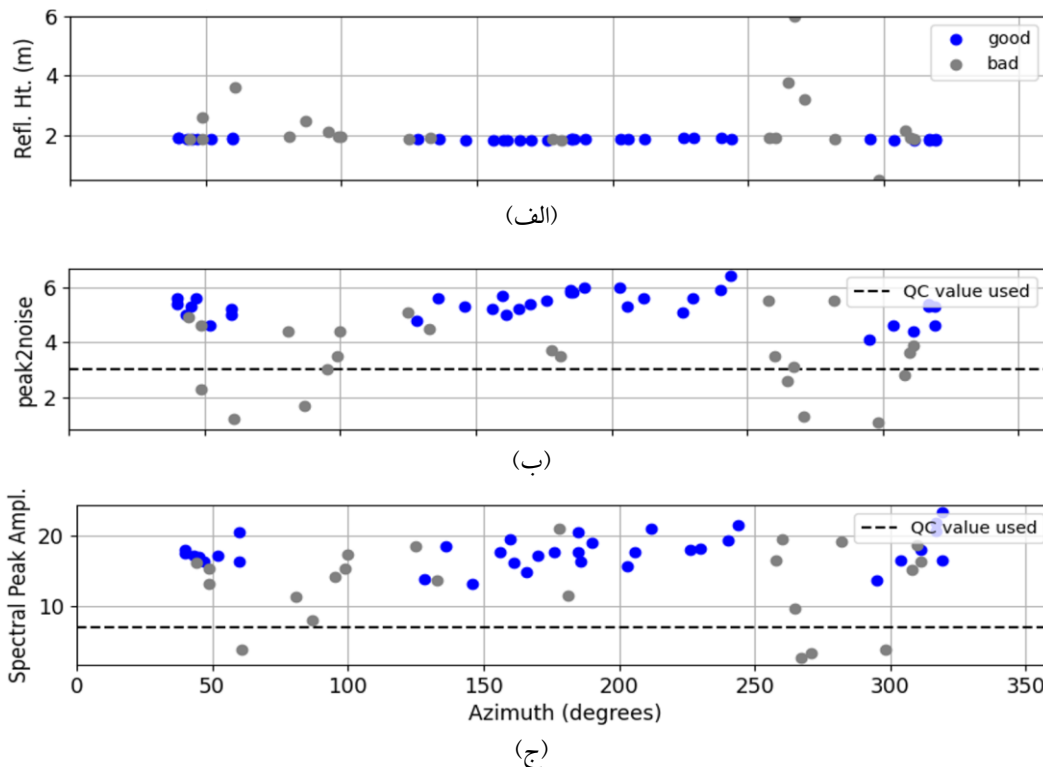
شکل ۱۵. پریودوگرام LSP برای داده‌های SNR مستخرج از مشاهدات L2C در چهار ربع (الف) شمال شرقی، (ب) شمال غربی، (ج) جنوب شرقی و (د) جنوب غربی، برای ایستگاه P038 در روز صدم از سال ۲۰۱۹.

متر بالاتر از سطح زمین هستند. در ایستگاه P038 آنتن ۲ متر بالاتر از سطح زمین است. داشتن داده با نرخ بالا ضروری نیست، بنابراین زمانی که فایل RINEX در حال تبدیل به فرمت فایل SNR است، می‌توان آن را به ۱۵ ثانیه کاهش داد. زاویه ارتفاع بین ۵ تا ۳۰ درجه محدود می‌شود زیرا داده‌های زیر زاویه ارتفاعی ۵ درجه ممکن است توسط درختان یا ساختمان‌های مرتفع مسدود شود، اما زاویه ارتفاعی بین ۵ تا ۳۰ درجه بیشتر تحت تأثیر چندمسیری است.

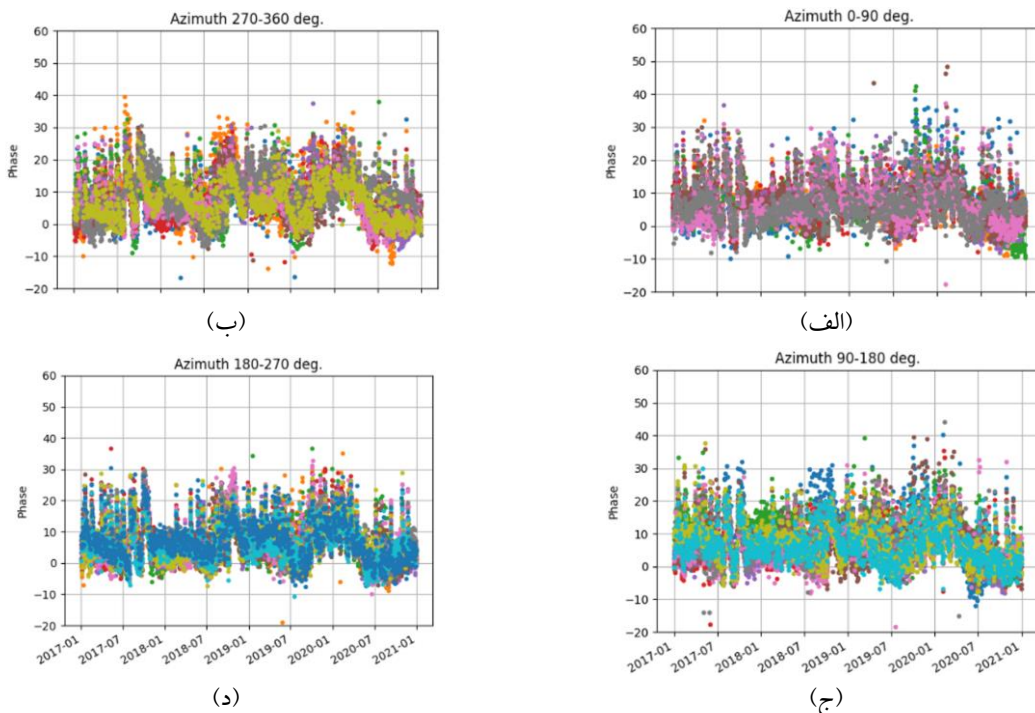
در مرحله دوم، نخست بهترین مدارهای ماهواره‌ای شناسایی می‌شوند، پیش‌فرض انتخاب تمام مدارهای طلوع و غروب ماهواره‌ای با مشاهدات L2C است. سپس فاز هر مدار ماهواره‌ای برای هر روز برآورد می‌شود. شکل ۱۷ نتایج فاز را برای چهار ربع جغرافیایی نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۱۶-الف، نقاط با رنگ آبی بازتابی موفق ارتفاع بازتابنده و نقاط با رنگ خاکستری نشان‌دهنده بازتابی ناموفق هستند. شکل ۱۶-ب نشان‌دهنده نسبت اوج به نویز و شکل ۱۶-ج نشان‌دهنده دامنه اوج طیفی است. خط چین‌ها نشان‌دهنده معیارهای کنترل کیفیت مورد استفاده است. مطابق شکل ۱۶-الف برای ایستگاه P038 ارتفاع بازتابی شده بازتابنده تقریباً در آزیموت‌های بین ۱۳۰ تا ۲۵۰ درجه ثابت است. از شکل ۱۶-ب می‌توان دریافت که سنجی کنترل کیفیت نسبت اوج به نویز ۳ قابل قبول است. در شکل ۱۶-ج، دامنه‌ها معمولاً بزرگ‌تر از ۱۱ هستند، بنابراین می‌توان ۸ را به‌عنوان کمینه مقدار دامنه اوج طیفی پذیرفت.

در ادامه بایستی ارتفاع اولیه بازتابنده را برای ایستگاه برآورد کرد. ایستگاه‌های شبکه PBO H₂O مابین ۱ الی ۳



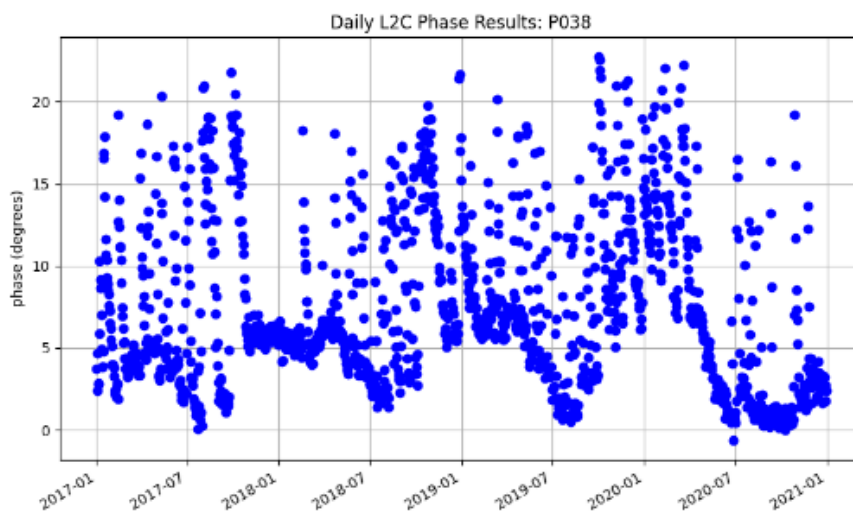
شکل ۱۶. خلاصه‌ای از معیارهای مختلف کنترل کیفیت (الف) ارتفاع بازتابنده برحسب متر، (ب) نسبت اوج به نویز، (ج) دامنه اوج طیفی برحسب .volts/volts.



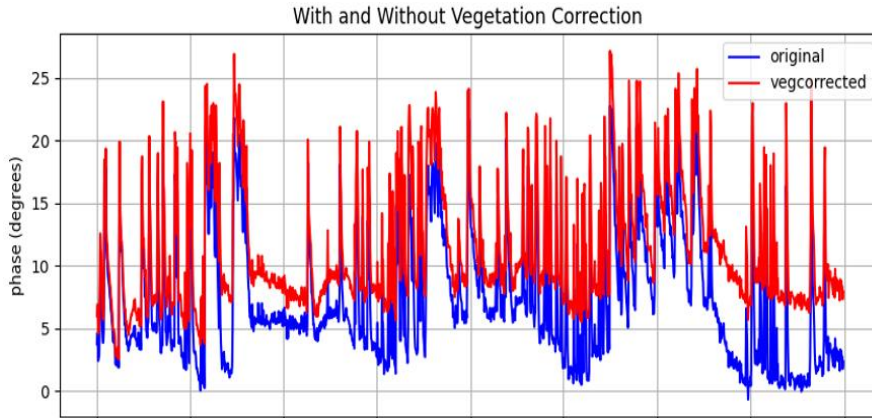
شکل ۱۷. نتایج فاز تمام ماهواره‌ها برای هر روز برحسب درجه در چهار ربع جغرافیایی (الف) شمال شرقی، (ب) شمال غربی، (ج) جنوب شرقی و (د) جنوب غربی، که برای ایستگاه P038 برآورد شده است.

(با رنگ آبی) و با اصلاح پوشش گیاهی (با رنگ قرمز) قابل مشاهده است. در نهایت، ۵ درصد محتوای حجمی آب به‌عنوان تراز آب در نظر گرفته شده است (شکل ۱۹-ب). لازم به توضیح است که با توجه به پروفیل‌های بافت خاک اطراف ایستگاه می‌توان درصد متفاوتی از محتوای حجمی آب را برای تراز آن در نظر گرفت. همچنین توجه به این نکته مهم است که مقادیر منفی رطوبت خاک مقادیر مجازی نیستند.

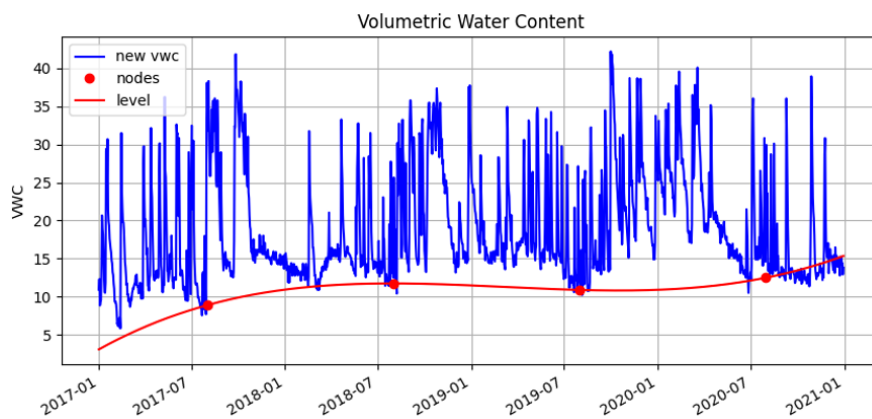
سپس فاز منتج از مرحله قبل که در شکل ۱۸ نمایش داده شده است به محتوای آب حجمی تبدیل می‌شود. پوشش گیاهی تأثیر بسزایی در فاز حاصل دارد و برای دستیابی به برآورد دقیق رطوبت خاک باید این اثر حذف شود، بنابراین قبل از تغییر واحدها از فاز (درجه) به VWC، با استفاده از دامنه طیفی، اثرات پوشش گیاهی مدل‌سازی و حذف می‌شوند. در شکل ۱۹-الف، نتایج فاز بدون اصلاح پوشش گیاهی



شکل ۱۸. نتایج روزانه فاز L2C.



(الف)

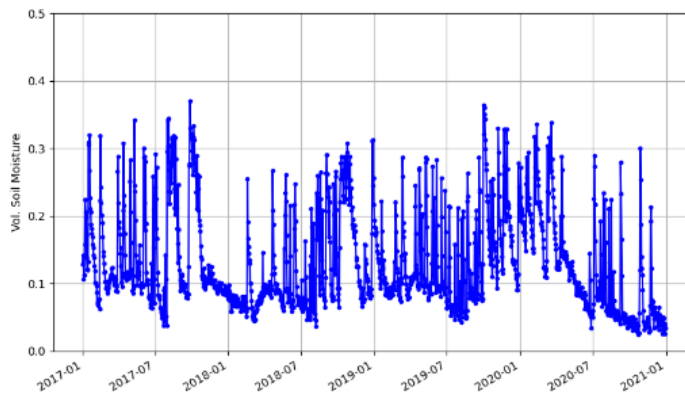


(ب)

شکل ۱۹. (الف) نتایج فاز بدون اصلاح پوشش گیاهی (رنگ آبی) و با اصلاح پوشش گیاهی (رنگ قرمز)، (ب) محتوای حجمی آب (رنگ آبی) و تراز آن (رنگ قرمز)، برحسب درصد.

همان‌طور که در شکل ۱۹-ب نشان داده شده است، سطح محتوای حجمی آب در سال ۲۰۱۷، برابر ۸/۸۸ درصد می‌باشد، این میزان در سال ۲۰۱۸ به ۱۱/۷۴ درصد افزایش می‌یابد. سپس تا سال آینده اندکی کاهش یافته و در سال ۲۰۱۹ به ۱۰/۸۸ درصد می‌رسد و نهایتاً در سال ۲۰۲۰ به ۱۲/۴۹ درصد افزایش می‌یابد. در شکل ۲۰ نتیجه نهایی نمایش داده شده است. محور افقی تاریخ و مدت‌زمان داده‌ها را نشان می‌دهد که مربوط به سال‌های ۲۰۱۷ تا پایان ۲۰۲۰ است و محور قائم نیز نشان‌دهنده رطوبت حجمی خاک، در هر روز از این بازه زمانی است.

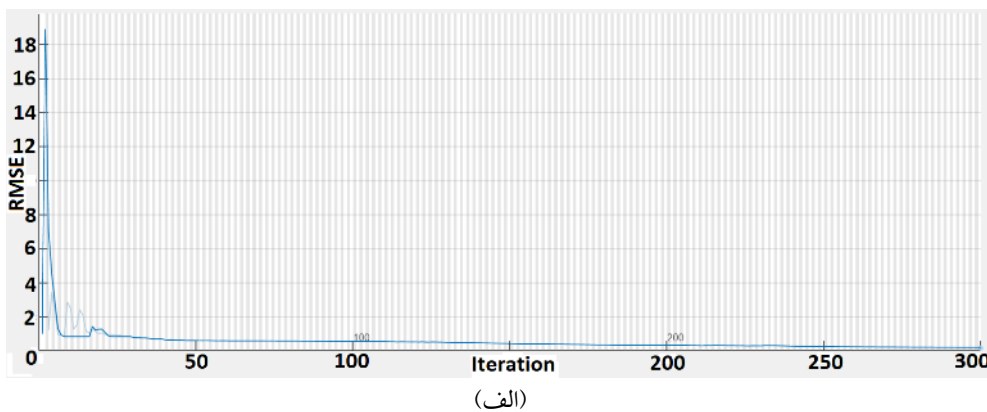
همان‌طور که در شکل ۱۹-ب نشان داده شده است، سطح محتوای حجمی آب در سال ۲۰۱۷، برابر ۸/۸۸ درصد می‌باشد، این میزان در سال ۲۰۱۸ به ۱۱/۷۴ درصد افزایش می‌یابد. سپس تا سال آینده اندکی کاهش یافته و در سال ۲۰۱۹ به ۱۰/۸۸ درصد می‌رسد و نهایتاً در سال ۲۰۲۰ به ۱۲/۴۹ درصد افزایش می‌یابد. در شکل ۲۰ نتیجه نهایی نمایش داده شده است. محور افقی تاریخ و مدت‌زمان داده‌ها را نشان می‌دهد که مربوط به سال‌های ۲۰۱۷ تا پایان ۲۰۲۰ است و محور قائم نیز نشان‌دهنده رطوبت حجمی خاک، در هر روز از این بازه زمانی است.



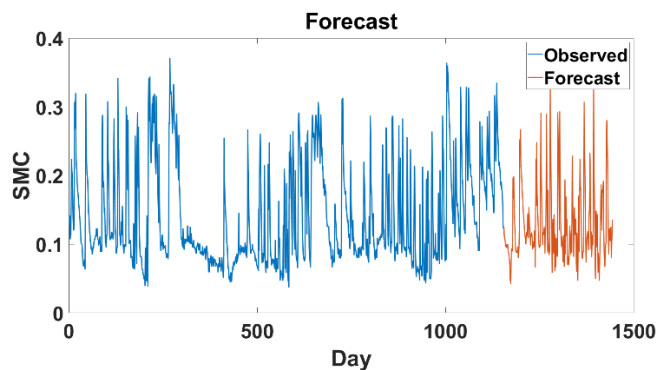
شکل ۲۰. رطوبت حجمی خاک (VSM) نهایی به صورت نسبت حجم آب به حجم کل برای ایستگاه P038 در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰.

میانگین و تابع هزینه برحسب تعداد تکرار نشان می‌دهد. سری زمانی آموزشی با مقادیر پیش‌بینی شده سری زمانی در شکل ۲۲ نشان داده شده است. مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده با داده‌های آزمون در اشکال ۲۳ و ۲۴ نشان داده شده است. مقایسه دو شکل ۲۳ و ۲۴ نشان می‌دهد که با به روزرسانی وضعیت شبکه با مقادیر مشاهده شده به جای مقادیر پیش‌بینی شده، مقدار جذر خطای مربعی میانگین از ۰/۰۹ به ۰/۰۴ و میانگین باقی‌مانده‌ها از ۰/۰۲۹۹ به ۰/۰۰۰۷- کاهش یافته و پیش‌بینی‌ها دقیق‌تر انجام می‌شود.

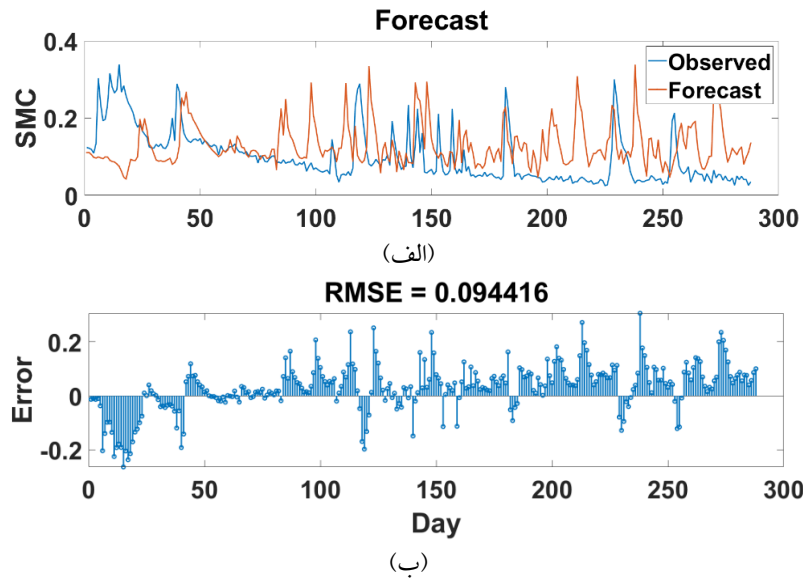
مرحله نهایی تحقیق پیش‌بینی رطوبت خاک از چند روز قبل است. این پیش‌بینی به کشاورزان کمک می‌کند تا برنامه‌ریزی آبیاری خود را به‌طور مؤثرتری انجام دهند. بدین‌منظور کارایی مدل شبکه عصبی مصنوعی LSTM در پیش‌بینی سری زمانی رطوبت حجمی خاک به‌دست آمده از GNSS-IR مورد ارزیابی قرار گرفت. ۸۰ درصد نتایج حاصل برای رطوبت حجمی خاک برای آموزش مدل و ۲۰ درصد باقی‌مانده برای آزمون مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۲۱ فرایند آموزش را با نمایش تغییرات جذر خطای مربعی



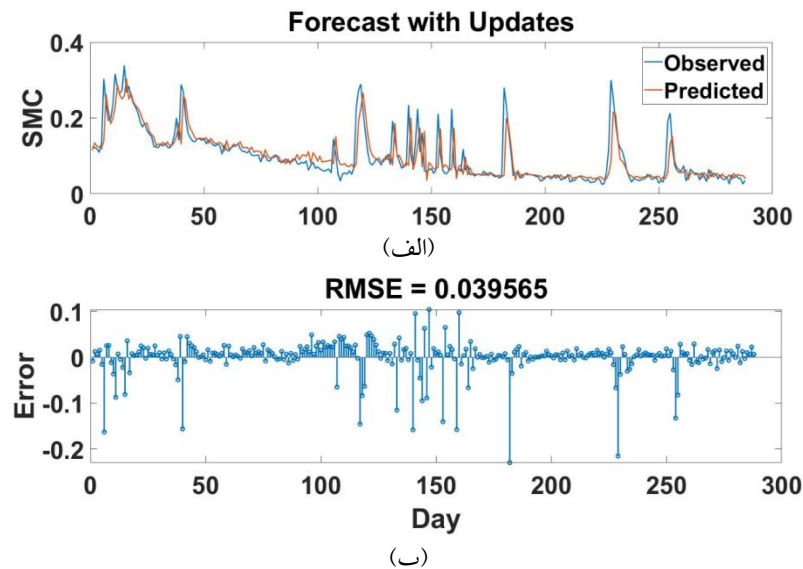
شکل ۲۱. فرایند آموزش شبکه LSTM، محور افقی نشان‌دهنده تعداد تکرارها تا ۳۰۰ و محور قائم نشان‌دهنده تغییرات (الف) جذر خطای مربعی میانگین و (ب) تابع هزینه، می‌باشد.



شکل ۲۲. سری زمانی آموزشی (رنگ آبی) با مقادیر پیش‌بینی شده (رنگ قهوه‌ای).



شکل ۲۳. مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده رطوبت خاک با داده‌های آزمون.



شکل ۲۴. مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده رطوبت خاک با داده‌های آزمون، با به‌روزرسانی وضعیت شبکه با مقادیر مشاهده شده به‌جای مقادیر پیش‌بینی شده، پیش‌بینی‌ها دقیق‌تر انجام می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

این سیگنال‌ها در بردارنده اطلاعاتی درباره سطوح بازتابنده پیرامون خود هستند. براساس نوع سطح بازتابنده می‌توان از این روش برای اندازه‌گیری رطوبت خاک، عمق برف، ضخامت یخ و تغییر سطح آب استفاده کرد. با توجه به نتایج تحقیقات، GNSS-IR را می‌توان به‌عنوان یکی از روش‌های سنجش از دور برای پایش رطوبت خاک به‌صورت پیوسته و البته در مقیاس محلی در نظر گرفت که در وضعیت‌های مختلف جوی مانند شرایط بارانی و مه‌آلود و در شرایط متفاوت نور و روشنایی مانند

تداخل‌سنجی سنجش بازتاب سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی یک فرایند سنجش از دوری با استفاده از یک گیرنده GNSS است. گیرنده GNSS سیگنال‌ها را از ماهواره‌های GNSS دریافت کرده و موقعیت خود را برآورد می‌کند. ولی گیرنده علاوه بر سیگنال‌های مستقیم قادر به دریافت سیگنال‌های بازتابی از مناطق پیرامون خود نیز هست. گیرنده نقش ابزار و سیگنال‌های بازتابی دریافت شده نقش داده سنجش از دوری رایگان را بازی می‌کنند.

روز و شب قابل اجرا است.

در این مقاله یک فرایند چهار مرحله‌ای برای برآورد رطوبت نزدیک به سطح خاک در اطراف یکی از ایستگاه‌های شبکه PBO H₂O به نام P038 برای داده‌های چهار سال از سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ اجرا شده است. در مرحله اول مدارهای ماهواره‌ای با زاویه ارتفاعی مابین ۵ تا ۳۰ درجه انتخاب شده و داده‌های SNR از فایل‌های RINEX استخراج می‌شوند. از آنجایی که این تحقیق در ارتباط با رطوبت خاک است، فقط از داده‌های L2C که برای این مورد بهترین انتخاب است، استفاده شد. در مرحله دوم ارتفاع اولیه بازتاب برای هر مدار ماهواره‌ای برآورد شده و فاز برای هر ماهواره در هر روز به دست می‌آید. در مرحله سوم سنجه‌های SNR محاسبه می‌شوند و در نهایت اثرات پوشش گیاهی در سری زمانی مدل‌سازی و حذف شده و نتیجه به محتوای حجمی آب و در نهایت رطوبت حجمی خاک تبدیل می‌شود.

براساس نتایج، در محدوده ایستگاه P038 سطح محتوای حجمی آب در سال ۲۰۱۷، برابر ۸/۸۸ درصد می‌باشد، که در سال ۲۰۱۸ به ۱۱/۷۴ درصد افزایش می‌یابد. سپس اندکی کاهش یافته و در سال ۲۰۱۹ به ۱۰/۸۸ درصد رسیده و نهایتاً در سال ۲۰۲۰ به ۱۲/۴۹ درصد افزایش یافته است. در نهایت مدل‌سازی و پیش‌بینی سری زمانی رطوبت خاک برای چند روز آینده با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی از نوع LSTM انجام می‌شود. با به روزرسانی وضعیت شبکه با مقادیر مشاهده شده به جای مقادیر پیش‌بینی شده، مقدار جذر خطای مربعی میانگین از ۰/۰۹ به ۰/۰۴ کاهش یافته و پیش‌بینی‌ها دقیق‌تر انجام

می‌شوند. انجام پیش‌بینی جهت برنامه‌ریزی مؤثر آبیاری برای کشاورزی مفید خواهد بود. بدین منظور استفاده از گیرنده‌های ارزان‌قیمت GPS در زمین‌های کشاورزی مناطق روستایی پیشنهاد می‌شود.

گسترش الگوریتم رطوبت خاک مورد استفاده در این تحقیق برای ایستگاه‌های واقع در مناطق با توپوگرافی بیشتر یا برای ایستگاه‌هایی با انواع آنتن‌ها برای تحقیقات بعدی پیشنهاد می‌شود. به منظور استفاده از انواع مختلف آنتن، الگوهای بهره و فاز آنها باید برای شبیه‌سازی روابط خاص مابین رطوبت خاک و داده‌های SNR معلوم باشد.

انجام مشاهدات چندمنظومه‌ای GNSS، آثار بازتابی همگن‌تری را در اطراف آنتن به وجود می‌آورد. لذا جهت افزایش دقت و کیفیت نتایج استفاده از تداخل‌سنجی سنجش بازتاب با GNSS به جای GPS پیشنهاد می‌شود. خطاهای ناشی از فرضیات در الگوریتم فیلترینگ پوشش گیاهی نیز باید در برآورد نهایی رطوبت خاک گنجانده شود.

بررسی محل و نوع گیرنده‌های مستقر در ایستگاه‌های شبکه دائمی ایران برای ژئودینامیک (IPGN Iranian Permanent GPS Network for Geodynamics) و انجام تنظیمات لازم برای انجام مشاهدات در این ایستگاه‌ها به منظور تعیین پارامترهای محیط‌زیستی مانند عمق بارش برف، ضخامت یخ، پوشش گیاهی، تغییرات سطح آب در سدها، دریاچه‌ها و دریاها (جزر و مد) و میزان رطوبت خاک به عنوان محصولات فرعی برای این شبکه‌ها پیشنهاد می‌شود.

مراجع

- Alonso-Arroyo, A., Camps, A., Park, H., Pascual, D., Onrubia, R., & Martín, F. (2014). Retrieval of significant wave height and mean sea surface level using the GNSS-R interference pattern technique: Results from a three-month field campaign. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(6), 3198-3209.
- Al-Yaari, A., Wigner, J.-P., Kerr, Y., Rodriguez-Fernandez, N., O'Neill, P.E., Jackson, T. J., De Lannoy, G. J. M., Al Bitar, A., Mialon, A.,

- Richaume, P., Walker, J. P., Mahmoodi, A., & Yueh, S. (2017). Evaluating soil moisture retrievals from ESA's SMOS and NASA's SMAP brightness temperature datasets. *Remote Sensing of Environment*, 193, 257-273.
- Baroni, G., Ortuani, B., Facchi, A., & Gandolfi, C. (2013). The role of vegetation and soil properties on the spatio-temporal variability of the surface soil moisture in a maize-cropped field. *J. Hydrol*, 489, 148-159. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.03.007.

- Brocca, L., Morbidelli, R., Melone, F., & Moramarco, T. (2007) Soil moisture spatial variability in experimental areas of central Italy. *J. Hydrol*, 333, 356–373. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.09.004.
- Cardellach, E., Fabra, F., Rius, A., Pettinato, S., & D'Addio, S. (2012). Characterization of dry-snow sub-structure using GNSS reflected signals. *Remote Sensing of Environment*, 124, 122-134.
- Chen, Q., Jiang, W., Meng, X., Jiang, P., Wang, K., Xie, Y., & Ye, J. (2018). Vertical deformation monitoring of the suspension bridge tower using GNSS: A case study of the fourth road bridge in the UK. *Remote Sensing*, 10(3), 364.
- Chew, C. C., Small, E. E., Larson, K. M., & Zavorotny, V. U. (2013). Effects of near-surface soil moisture on GPS SNR data: Development of a retrieval algorithm for soil moisture. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(1), 537-543.
- Chew, C. C., Small, E. E., Larson, K. M. & Zavorotny, V. U. (2014). Vegetation sensing using GPS-interferometric reflectometry: Theoretical effects of canopy parameters on signal-to-noise ratio data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(5), 2755-2764.
- Chew, C. C., Small, E. E., Larson, K. M., & Zavorotny, V. U. (2015). Vegetation sensing using GPS-interferometric reflectometry: theoretical effects of canopy parameters on signal-to-noise ratio data. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 53, 2755–2764
- Dobson, M. C., Ulaby, F. T., Hallikainen, M. T., & El-Rayes, M. A. (1985). Microwave dielectric behavior of wet soil-Part II: Dielectric mixing models. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 1, 35-46.
- Du, K. L., & Swamy, M. N., (2006). Neural networks in a softcomputing framework, Springer.
- Entekhabi, B. D., Njoku, E. G., Neill, P. E. O., Kellogg, K. H., Crow, W. T., Edelstein, W. N., Entin, J. K., Goodman, S. D., Jackson, T. J., Johnson, J., Kimball, J., Piepmeier, J. R., Koster, R. D., Martin, N., McDonald, K. C., Moghaddam, M., Moran, S., Reichle, R., & Shi, J. C. (2010). The soil moisture active passive (SMAP) mission. *Proc IEEE*, 98,704–716.
- Famiglietti, J. S., Rudnicki, J. W., & Rodell, M. (1998). Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas. *J. Hydrol.*, 210, 259–281. doi:10.1016/S0022-1694(98)00187-5.
- Ferrazzoli, P., Guerriero, L., Pierdicca, N., & Rahmoune, R. (2011). Forest biomass monitoring with GNSS-R: Theoretical simulations. *Advances in Space Research*, 47(10), 1823-1832.
- Gers, F. A., Schmidhuber, J., & Cummins, F. (2000). Learning to Forget: Continual Prediction with LSTM. *Neural Computation*. 12 (10), 2451–2471. doi:10.1162/089976600300015015.
- Gomez-Plaza, A., Martinez-Mena, M., Albaladejo, J., & Castillo, V. M. (2001). Factors regulating spatial distribution of soil water content in small semiarid catchments. *J. Hydrol.*, 253, 211–226.
- Greff, K., Srivastava, R. K., Koutník, J., Steunebrink, B. R., & Schmidhuber, J. (2017). LSTM: A Search Space Odyssey, in IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 28 (10), 2222-2232, doi: 10.1109/TNNLS.2016.2582924.
- Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1996). LSTM can solve hard long time lag problems. *Advances in Neural Information Processing Systems*.
- Jackson, T. J., Le-Vine, D. M., Swifi, C. T., & Schmugge, T. J. (1995). Large area mapping of soil moisture using the ESTAR passive microwave radiometer in washita'92. *Remote Sens Environ*, 53,27–37.
- Jackson, T. J., & Le-Vine, D. E. (1996). Mapping surface soil moisture using an aircraft-based passive microwave instrument: algorithm and example. *J. Hydrol*, 184, 85–99.
- Kerr, Y. H., Waldteufel, P., Wigneron, J., Martinuzzi, J., Font, J., & Berger, M. (2001). Soil moisture retrieval from space: the soil moisture and ocean salinity (SMOS) mission. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 39,1729–1735.
- Larson, K. M., Braun, J. J., Small, E. E., Zavorotny, V. U., Gutmann, E. D., & Bilich, A. L. (2009). GPS multipath and its relation to near-surface soil moisture content. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 3(1), 91-99.
- Larson, K. M., Small, E. E., Gutmann, E., Bilich, A., Axelrad, P., & Braun, J. (2008). Using GPS multipath to measure soil moisture fluctuations: initial results. *GPS solutions*, 12(3), 173-177.
- Larson, K. M., & Small, K .M. (2013). Estimation of Snow Depth Using L1 GPS Signal-to-Noise Ratio Data. in *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(10), 4802-4808 .doi: 10.1109/JSTARS.2015.2508673.
- Larson, K. M., & Nievinski, F. G. (2013). GPS snow sensing: results from the Earthscope Plate Boundary Observatory. *GPS Solutions*, 17, 41–52. doi:10.1007/s10291-012-0259-7.
- Li, X., Dick, G., Lu, C., Ge, M., Nilsson, T.,

- Ning, T., Wickert, J., & Schuh, H. (2015). Multi-GNSS meteorology: real-time retrieving of atmospheric water vapor from BeiDou, Galileo, GLONASS, and GPS observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(12), 6385-6393.
- Luo, X., Yan, S., Shan, J., Yan, H., & Wang, H. (2016). Using the BDS-R signal for soil moisture estimation. China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2016 Proceedings: Volume I, Springer.
- Mao, K., Wang, J., & Zhang, M. (2009). The study of soil moisture retrieval from GNSS_R signals based on AIEM model and experiment data. *High Tech Lett*, 3, 295-301.
- Martín, A., Ibáñez, S., Baixauli, C., Blanc, S., & Anquela, A. B. (2020). Multi-constellation GNSS interferometric reflectometry with mass-market sensors as a solution for soil moisture monitoring. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24, 3573-3582.
- Mashburn, J., P. Axelrad, S. T. Lowe & K. M. Larson (2016). An assessment of the precision and accuracy of altimetry retrievals for a monterey bay GNSS-R experiment. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(10), 4660-4668.
- Mashburn, J., Axelrad, P., Lowe, S. T. & Larson, K. M., (2018). Global ocean altimetry with GNSS reflections from TechDemoSat-1. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(7), 4088-4097.
- Masters, D. (2004). Surface remote sensing applications of GNSS bistatic radar: Soil moisture and aircraft altimetry, University of Colorado at Boulder.
- Mladenova, I., Lakshmi, V., Jackson, T. J., Walker, J. P., Merlin, O., & De-Jeu, R. A., (2011). Validation of AMSR-E soil moisture using L-band airborne radiometer data from National Airborne Field Experiment 2006. *Remote Sens Environ*, 115, 2096-2103. doi:10.1016/j.rse.2011.04.011.
- Rajkai, K., & Ryden, B. E. (1992). Measuring areal soil moisture distribution with the TDR method. *Geoderma*, 52, 73-85.
- Robock, A., Vinnikov, K. Y., Srinivasan, G., Entin, J. K., Hollinger, S. E., Speranskaya, N. A., Liu, S., & Namkhai, A. (2000). The global soil moisture data bank. *Bull Am Meteorol Soc*, 81, 1281-1299.
- Rodriguez-Alvarez, N., Aguasca, A., Valencia, E., Bosch-Lluis, X., Ramos-Pérez, I., Park, H., Camps, A., & Vall-Llossera, M. (2011a). Snow monitoring using GNSS-R techniques. 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE.
- Rodriguez-Alvarez, N., Bosch-Lluis, X., Camps, A., Ramos-Perez, I., Valencia, E., Park, H., & Vall-Llossera, M. (2011b). Vegetation water content estimation using GNSS measurements. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(2), 282-286.
- Schwank, M., Matzler, C., Guglielmetti, M., & Fluhler, H. (2005). L-Band radiometer measurements of soil water under growing clover grass. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 43, 2225-2237.
- Tavakol, A., Rahmani, V., Quiring, S. M., Kumar, S. V. (2019). Evaluation analysis of NASA SMAP L3 and L4 and SPoRT-LIS soil moisture data in the United States. *Remote Sensing of Environment*, 229, 234-246.
- Wan, W., Larson, K. M., Small, E. E., Chew, C. C., & Braun, J. J. (2014). Using geodetic GPS receivers to measure vegetation water content. *GPS Solut*. doi:10.1007/s10291-014-0383-7.
- Xin, W., Qiang, S., XunXie, Z., DaRen, L., LianJun, S., Xiong, H., Giulio, R., Stephen, D., & Soulat, F. (2008). First China ocean reflection experiment using coastal GNSS-R. *Chinese Science Bulletin*, 53(7), 1117-1120.
- Yu, K. (2014). Tsunami-wave parameter estimation using GNSS-based sea surface height measurement. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(5), 2603-2611.
- Yu, K. (2016). Tsunami lead wave reconstruction based on noisy sea surface height measurements. Proc. Int. Archives Photogrammetry, Remote Sens. Spatial Inf. Sci.
- Zhang, S., Wang, T., Wang, L., Zhang, J., Peng, J., & Liu, Q. (2021). Evaluation of GNSS-IR for Retrieving Soil Moisture and Vegetation Growth Characteristics in Wheat Farmland. *Journal of Surveying Engineering*, 147(3), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000355](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000355).
- Zavorotny, V. U., Larson, K. M., Braun, J. J., Small, E. E., Gutmann, E. D., Bilich, A. L. (2010). A physical model for GPS multipath caused by land reflections: toward bare soil moisture retrievals. *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens*, 3, 1-11.