بر آورد رطوبت حجمی خاک از تداخلسنجی سنجش بازتاب سیستمهای ماهوارهای ناوبری جهانی و تحلیل سری زمانی حاصل با شبکههای عصبی مصنوعی حافظه طولانی کوتاه مدت اصغر راست بود^{(*}، پاتریشیا دانغیان^۲

^{۱*}استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، 09143004878<u>arastbood@tabrizu.ac.ir</u>, ۲دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، <u>p.danghian1400@ms.tabrizu.ac.ir</u>,

چکیدہ

تداخل سنجی سنجش باز تاب سیستم های ماهواره ای ناوبری جهانی (GNSS-IR) را می توان به عنوان یکی دیگر از روش های سنجش از دور برای پایش رطوبت خاک به صورت پیومنه و البته در مقیاس محلی در نظر گرفت که در وضعیت های مختلف جوی مانند شرایط بارانی و مه آلود و در شرایط متفاوت نور و روشنایی مانند روز و شب قابل اجرا است. سیگنال های باز تابی از سطح زمین توسط آنتن های شود. با تجزیه و تحلیل سیگنال های بازتابی، می توان به اطلاعات مفیدی در مقدار مؤلفه نسبت سیگنال به نویز SNR سیگنال های بازتابی از شود. با تجزیه و تحلیل سیگنال های بازتابی، می توان به اطلاعات مفیدی در مورد سطح باز تاب دست یافت. های به شدت به رطوبت خاک وابسته است. در این تحقیق داده های ایستگاه BO38 در منطقه نیومکزیکو مورد استفاده قرار می گیرد. بدین صورت که از سیگنال های چندمسیری برای بر آورد تغییرات رطوبت خاک در طول چهار سال، از ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ استفاده می شود. طبق بر آورد انجام شده سطح محتوای حجمی آب در سال ۲۰۱۷، برابر ۸/۸۸ درصد می باشد، که در سال ۲۰۱۷ به ۲۰۱۷ درصد افزایش می یابد. سپس شده سطح محتوای حجمی آب در سال ۲۰۱۷، برابر ۱۸/۸ درصد می باشد، که در سال ۲۰۱۷ به توایش می می در این مقاله کارائی شده سطح محتوای حجمی آب در سال ۲۰۱۷، برابر ۱۸/۸ درصد می باشد، که در سال ۲۰۱۷ به ۲۰۱۴ درصد افزایش می یابد. سپس شده سطح محتوای حجمی آب در سال ۲۰۱۷، برابر ۱۸/۸ درصد می باشد، که در سال ۲۰۱۷ به ۱۲/۴ درصد افزایش می یابد. سپس شده سطح محتوای حجمی آب در سال ۲۰۱۷، درصد رسیده و نهایتاً در سال ۲۰۲۰ به ۱۲/۴ درصد افزایش می یابد. در این مقاله کارائی شرکه های عصبی حافظه طولانی کو تامیدت (LSTM) در پیش بینی سری زمانی وطوبت حجمی خاک بدست آمده از تداخل سیگنال-وضعیت شبکه با مقادیر مشاهده شده به جای مقادیر پیش بینی شده، مقدار جذر خطای مربعی میانگین از جاب کره و باره کاره یا یانه و وضعیت شبکه با مقادیر مشاهده شده به جای مقادیر پیش بینی شده، مقدار جذر خطای مربعی میانگین از ماره می شود. پیش بینی ها دقیق تر انجام می شوند.

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

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

Abstract

One of the ways for measuring environmental parameters is using GNSS 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 H_2O network with the greatest variations in vegetation. Among the sites in the PBO H_2O network, data from P038 in the New Mexico region is used. This site located 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 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.

۱. مقدمه

در عصر حاضر، سرانه اراضی قابل کشت بهدلیل افزایش سریع جمعیت رو به کاهش بوده و بهعلاوه، کمبود و گرانی آب شیرین نیز به صورت چالشی جدی درآمده است. به همین دلیل، متخصصان کشاورزی باید از فناوریها و راهحل های ابتکاری برای بهبود بهرهوری، صرفهجویی در هزینه های اولیه و بهینه سازی مصرف منابع محیطی و به ویژه آب استفاده نمایند. بنابراین اندازه گیری 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 موجود در خاک و همچنین وضعیت آبیاری، محتوای حجمی آب ((VWC) Volumetric water content) است. محتوای حجمی آب نسبت حجم آب به واحد حجم خاک است. محتوای حجمی آب را می توان به صورت نسبت، درصد یا عمق آب در هر عمق خاک (با فرض یک واحد سطح) بیان کرد. VWC نشان می دهد که چه مقدار از حجم خاک با آب پر شده است. در این تحقیق VWC به صورت درصد بیان می شود که مقادیر آن بین صفر تا صددرصد متغیر است. مقدار صفر زمانی است که خاک کاملاً خشک باشد و حجم آن فاقد آب باشد. مقدار صددرصد نیز نشان دهنده این است که تمام حفره ها و فضاهای خالی خاک با آب پر شده است. برآورد محتوای حجمی آب خاک می تواند برای مقدار بارندگی به جو برگشته است. پس رطوبت خاک با آب پر شده است. از چرخه هیدرولوژیکی و یک کمیت مشان می دهد که چه مقدار بارندگی به جو برگشته است. پس رطوبت خاک جزء اساسی از چرخه هیدرولوژیکی و یک کمیت مشاهداتی اصلی برای مقدار بارندگی به جو برگشته است. پس رطوبت خاک جزء اساسی از چرخه هیدرولوژیکی و یک کمیت مشاهداتی اصلی برای بهینه سازی مدیریت آبیاری در کشاورزی است.

رطوبت حجمی خاک در حال حاضر با استفاده از روش های سنجش از دور و اندازه گیری در محل تعیین می شود. پایش رطوبت خاک در محل یا با خشک کردن فیزیکی حجمی از خاک برای محاسبه مقدار آب یا از طریق استفاده از پویشگرهای الکترومغناطیسی انجام می شود (راجکای و رایدن، ۱۹۹۲؛ روبوک و همکاران، ۲۰۰۰). این روش ها اطلاعاتی در مورد میزان رطوبت خاک برای حجم کمتر از یک متر مکعب ارائه می دهند. رطوبت خاک معمولاً در مقیاس های 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 بر آورد بزرگتر به صورت میانگین سطحی ارائه شود. این کار را می توان با استفاده از تعداد زیادی پویشگر در محل (in-situ) که برای تولید میانگین در مقیاس بزرگتر ترکیب می شوند، یا از طریق روش های سنجش از دور با ردپای بزرگتر انجام داد.

سنجش از دور رطوبت خاک معمولاً با استفاده از رادار مونواستاتیک یا رادیومتر انجام می شود. 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، ۱۹۹۴؛ ملادنوا 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 می شوند می توانند بر آورد رطوبت خاک را در ابعاد یک مزرعه با دهها تا صدها متر مربع ارائه دهند، درحالی که آنهایی که در هواپیما و ماهواره نصب می شوند به طورمتوالی مناطق سنجش بزرگتری دارند. این اندازه گیری ها معمولاً در طی کمپینهای میدانی انجام می شوند و رکوردهای طولانی مدت ایجاد نمی کنند.

پایش رطوبت خاک یکی از اهداف اصلی مأموریتهای ماهوارههای سنجش از دور مانند SMOS (Soil Moisture and Ocean و مانند SMOS در سال ۲۰۰۹، توسط آژانس (Salinity) (Salinity) و SMAP (Soil Moisture Active Passive) 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 به منظور تهیه نقشههای جهانی رطوبت خاک تعریف شده اند. ابزارهای موجود در مأموریت-های ماهوارهای SMOS و SMAP تقریباً هر ۳ روز یک بار برآوردی از رطوبت خاک ارائه میدهند (انتخابی و همکاران). سیستمهای ماهواره ای ناوبری جهانی (GNSS) علاوه بر کاربردهای اصلی مانند تعیین موقعیت، ناوبری و زمان سنجی، دارای کاربردهای دیگری مانند سنجش از دور اتمسفر، حل مسئله معکوس مربوط به زمین لرزه جهت تعیین میزان نابر جایی (dislocation) گسل و رفتار سنجی تغییر شکل پوسته است (لی و همکاران، ۲۰۱۵؛ چن و همکاران، ۲۰۱۸). کاربرد جدید GNSS تداخل سنجی سنجش باز تاب با سیستمهای ماهواره ای ناوبری جهانی (GNSS-IR) است که رویکردی برای تقریب پارامترهای محیط زیستی و ژئوفیزیکی در اطراف یک ایستگاه GNSS با کیفیت سایر محصولات ژئودزی است. بدین منظور از سیگنالهای باز تابی استفاده می-شود. باز تاب سیگنال تحت عنوان چندمسیری (multipath) شناخته می شود. هنگامی که هدف تعیین موقعیت است، چندمسیری یکی از مهم ترین منابع خطا محسوب می شود، زیرا سیگنالهای باز تابی قبل از دریافت توسط آنتن از سطح زمین منعکس شده و درنهایت فاصله مابین ماهواره و آنتن درست بزرگتر از مقدار واقعی ثبت می شود که یک خطای سیستماتیک در روابط ترفیع برای تعیین موقعیت محل استقرار گیرنده ایجاد کرده و باعث کاهش دقت تعیین موقعیت می شود.

در سالهای اخیر، برای به دست آوردن اطلاعات مستمر و البته در مقیاس محلی در مورد رطوبت خاک، GNSS-IR به عنوان یک راه حل ممکن مطرح و به طور آزمایشی اجرا گردیده است. علت امکان پذیر بودن راه حل مطرح شده این است که ماهواره های GNSS سیگنالهای باند *L* (فرکانس مایکروویو) را ارسال میکند، که برای استفاده های نزدیک به سطح مناسب هستند. سیگنالهایی که توسط سطوح مجاور بازتاب و توسط آنتن ثبت می شوند اطلاعاتی در مورد محیط اطراف آنتن را در مقیاس حدود ۱۰۰۰ متر مربع دربردارند. برای این فرکانس ها، ضریب بازتاب سیگنال و گذردهی خاک به رطوبت خاک وابسته است (لارسون و همکاران، ۲۰۰۹) لارسون و همکاران، ۲۰۰۹؛ چو و همکاران، ۲۰۱۳، بتابراین، از سیگنال بازتاب شده از سطح زمین که توسط یک گیرنده اندازه گیری می شود، می توان برای درک تغییرات زمانی رطوبت خاک نزدیک سطح زمین استفاده کرد. در این روش، تغییرات در الگوی تداخلی اسیگنالهای مستقیم و بازتایده تجزیه و تحلیل می گردد. داده های اصلی ثبت شده توسط گیرنده های GNSS مشاهدات کد و فاز حامل است. سومین مشاهدهای که توسط برخی گیرنده ها ثبت می شود، نسبت سیگنال به نویز ((GNS) مشاهدات کد و فاز حامل است. سومین مشاهدهای که توسط برخی گیرنده اثبت می شود، نسبت سیگنال به نویز ((GNS) مشاهدات کد و فاز حامل است. سومین مشاهدهای که توسط برخی گیرنده ها ثبت می شود، نسبت سیگنال به نویز ((GNS) مشاهدات کد و فاز حامل راست. می موند، می توان سیگنال به اندازه گیری نویز است که با استفاده از واحد دسی بل لگاریتمی (B) یا دسی بل حمرتز (JB-Hz) بیان می شود. تغییرات در الگوی تداخلی سیگنالهای مستقیم و باز تایده که در داده های RS ثبت می شوند، به صورت نمودارهای تداخلی در می آیند. نوسانات زمانی نمودارهای تداخل، مبین تغییرات میزان رطوبت حجمی خاک (volumetric Soil Moisture) در نزدیکی سطح زمین در عمق حدود ه سانتی متری 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 می شود. در شکل ۱-ج لایه ای از پوشش گیاهی روی خاک وجود دارد که تغییرات آشکاری را در منحنی SNR ایجاد کرده است. شکل ۱-د منحنی SNR را نشان می دهد که توسط بازتاب خاک مرطوب ایجاد شده است. رطوبت خاک تغییرات جزئی در منحنی SNR ایجاد می کند و به همین دلیل است که بدست آوردن اطلاعات دقیق در مورد میزان رطوبت خاک از تجزیه و تحلیل داده های SNR چالش برانگیز است. اخیراً ثابت شده است که SNR قابلیت بسیار خوبی برای اندازه گیری محتوای رطوبت خاک (SMC) دارد. به عنوان مثال، SNR را می توان برای مشاهده تغییرات کوچک در بازتاب سطح و محتوای رطوبت خاک استفاده کرد (لارسون و همکاران، ۲۰۰۹؛ مائو و همکاران، ۲۰۹۹). هر دو سیگنال مستقیم و بازتابی توسط گیرنده های GNSS در یافت می شود. دلیل عملکرد IR GNSS-IR این است که مقادیر داده های SNR با تغییر رطوبت خاک تغییر می کند (دابسون و همکاران، SNR). باتوجه به رابطه بین ضریب بازتاب خاک و رطوبت



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.

تاکنون چندین مطالعه در زمینهٔ بر آورد رطوبت حجمی خاک با استفاده از تداخل سنجی سنجش باز تاب سیستمهای ماهواره ای ناوبری جهانی انجام شده است. یک مطالعه موردی که توسط اتحادیه اروپائی علوم زمین منتشر شد، مربوط به باز تاب سنجی تداخلی GNSS در مرکز آزمایشات کاجمار در والنسیای اسپانیا است. این مطالعه، به منظور پایش رطوبت خاک طی مدت ۶۶ روز از ۳ دسامبر ۲۰۱۸ تا ۶ فوریه ۲۰۱۹ انجام شد. در این بررسی، مشاهدات GNSS با ادغام منظومهای ماهواره ای GDNASS مدت ۶۶ روز از ۳ دسامبر ۲۰۱۸ تا انجام پذیرفت و همزمان با مشاهدات GNSS، نمونهبرداری محلی از خاک در عمق ۵ سانتی متری به منظور تعیین رطوبت خاک و ایجاد مجموعه داده صحتسنجی نیز انجام گردید. سرانجام، با مقایسه داده های تداخل سنجی سنجش بازتاب ماهواره ای با مجموعه ایجاد مجموعه داده صحتسنجی نیز انجام گردید. سرانجام، با مقایسه داده های تداخل سنجی سنجش بازتاب ماهواره ای با مجموعه حاک و بر آورد رشد گیاهان مجاور ایستگاه، از پتانسیل بالائی برخوردار است (مارتین و همکاران، ۲۰۱۰). طی مطالعه دیگری تغییرات رطوبت حجمی خاک و رشد و نمو گندم در مزرعه ای واقع در شهر یکن کشور چین با استفاده از داده های تارواره و پتانسیل مطواره ای با میاره ای برطوبت حجمی خاک و رشد و نمو گندم در مزرعه ای واقع در شهر یکن کشور چین با استفاده از داده های SNR سیستم ماهواره ای بررسی نیز معلوم گردید که فناوری تداخل سنجی سنجش باز تاب سیستمهای ماهواره ای ناوبری جهانی در برآورد تغییرات رطوبت بررسی نیز معلوم گردید که فناوری تداخل سنجی منجش باز تاب سیستمهای ماهواره ای ناوبری جهانی از روایی هراز می بر بر بررسی زیز معلوم گردید که فناوری تداخل سنجی سنجش باز تاب سیستمهای ماهواره می ناوبری جهانی از توانایی و پتانسیل مطلوب

سیگنالهای بازتابی اطلاعاتی در مورد چرخه آب زمین مانند عمق برف (رودریگز-آلوارز و همکاران، ۲۰۱۱؛ کاردلاک و همکاران، ۲۰۱۲)، ارتفاع یخ، سطح آب دریا و ارتفاع امواج (کیانگ و همکاران، ۲۰۰۸؛ آلونسو-آرویو و همکاران، ۲۰۱۴)، رشد و پوشش گیاهی (فرازولی، گوریرو و همکاران، ۲۰۱۱، رودریگز-آلورز، بوش-لوئیس و همکاران، ۲۰۱۱)، ارتفاعسنجی اقیانوسها (مشبرن و همکاران، ۲۰۱۶؛ مشبرن و همکاران، ۲۰۱۸)، ارتفاع و طول موج سونامی (یو، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۴)، و رطوبت خاک (مسترز، ۲۰۰۴) ارائه

خاک لو و همکاران (۲۰۱۶) یک مدل تجربی ساختند. یک مدل برآوردی توسط چو و همکاران (۲۰۱۴) برای بدست آوردن رطوبت خاک برای عمق ۵ سانتیمتر به بالای خاک بدون پوشش پیشنهاد شد. The reflections of bare soil produce میدهند. GNSS-IR اندازه گیری عمق برف را از راه دور در مناطق صعبالعبور فراهم میکند. با اندازه گیری تغییرات ارتفاع یخ می توان دریافت که چه مقدار آب شیرین در یخچال ها ذخیره شده یا از بین رفته است. همچنین از 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 بر آورد رطوبت خاک در کل ایستگاههای 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 دادههای بازتابی GNSS مربوط به شبکه Plate Boundary (Plate Boundary رای مطالعه چرخه آب تعریف شده و از دادههای بازتابی GNSS مربوط به شبکه PBO (Plate Boundary رای مطالعه چرخه آب تعریف شده و از دادههای بازتابی GNSS مربوط به شبکه PBO (Plate Boundary) observation) (Dbservation) استفاده می کند. تمام ایستگاههای شبکه PBO H₂O دارای آنتزهای choke-ring بوده و تقریباً همگی از گیرنده-های Trimble NetRS استفاده می کند. ایستگاهها در مناطقی با تغییرات توپوگرافی کم و در اکوسیستمهایی که به عنوان زمینهای چمن یا درختچه شناخته می شوند، قرار دارند. برخی از ایستگاهها دادهها را در بازههای زمانی یک ثانیه و برخی در بازههای زمانی ۵۱

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 سالهای ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ است. دادههای SNR از فایل های RINEX استخراج گردید و از الگوریتم ارائه شده توسط لارسون و همکاران (۲۰۰۹) برای برآورد تغییرات رطوبت خاک طی سالهای ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۰ استفاده شد. همچنین از شبکههای عصبی مصنوعی حافظه طولانی کوتاه مدت برای مدلسازی و پیش بینی سری زمانی رطوبت خاک داستفاده شد و دادهها بر اساس نتایج آن ارزیابی گردید. نتیجه برآوردها نشان می دهد که رطوبت خاک در این منطقه روندی صعودی دارد.

۲. الگوریتم بر آورد رطوبت خاک با استفاده از GNSS

الگوریتم مورد استفاده در این تحقیق برای بر آورد رطوبت خاک در کل ایستگاههای 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 ایستگاههای شبکه PBO H₂O دارای آنتن های choke-ring بوده و تقریباً همگی از گیرنده های Trimble NetRS استفاده می کنند. ایستگاهها در مناطقی با تغییرات توپو گرافی محدود و در اکوسیستم هایی که به عنوان زمین های چمن یا در ختچه شناخته می شوند، قرار دارند. برخی از ایستگاهها 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 ماهوارهای مناسب انتخاب میشوند. سپس ارتفاع اولیه بازتاب برای هر مسیر بر آورد میشود. در ادامه متریکهای SNR محاسبه میشوند و در نهایت اثرات پوشش گیاهی کمیسازی شده و حذف میشوند.

1-1. انتخاب مدارهای ماهواردای مناسب

همه مدارهای ماهوارهای را نمی توان برای بر آورد رطوبت خاک استفاده کرد. با در نظر گرفتن شرایط زیر می توان مناسب ترین مدارها را انتخاب کرد. مدارهای ماهوارهای بایستی بازتابهای یکنواخت مابین زوایای ارتفاعی ۵ الی ۲۵ درجه یا ۵ الی ۳۰ درجه داشته باشند. نوسانات تداخلنما برای زوایای ارتفاعی بالاتر توسط الگوی بهره آنتن پنهان می شوند. در انتخاب منطقه مطالعاتی بایستی به وجود درختان و ساختمانها توجه کرد که مدارهای ماهوارهای را مسدود نکنند. همچنین بایستی دقت کرد که امواج از سطوح ساخت انسانی مانند جادهها بازتاب نشوند. یک مدار باید برای دورههایی از سال که محتوای آب گیاهی یا ارتفاع آن تقریباً ثابت است، فرکانس غالب نسبتاً پایدار داشته باشد. از مدارهای ماهوارهای که مناطقی با تغییرات توپوگرافی زیاد در فاصله حدود ۵۰ متری آنتن را دربرمی گیرند، باید اجتناب شود. هیچ قانون سادهای برای تعیین اینکه چه زمانی تغییرات توپوگرافی زیاد در فاصله حدود ۵۰ متری آنتن را 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، بر آورد نهایی سری زمانی رطوبت خاک قابل اعتمادتر خواهد بود.

۲-۲. بر آورد ارتفاع اولیه باز تابنده 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) می گویند. ارتفاع اولیه بازتابنده (H₀) کاملاً مشخص نیست و باید از دادههای SNR بر آورد شود.



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

SNR سیکنال مستقیم تابعی از ولتاژ و کسینوس فاز سیگنال است:
(۱)
در مقایسه با سیگنال مستقیم، سیگنال بازتابی، دارای دامنه ولتاژ ضعیف شده و شیفت فاز است:
SNR_{ref} =
$$\beta Vcos(\phi + \Delta \phi); \ 0 < \beta < 1$$

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

$$\Delta \phi = 2\pi / \lambda \times L$$

 $A = \beta V$

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

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

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

با جایگذاری روابط (۴) و (۳) در رابطه (۲) خواهیم داشت:

 $SNR_{ref} = Acos(4\pi H/\lambda \times sin(e) + \phi)$

در رابطه فوق فرض میشود که دادههای SNR دارای فرکانس و دامنه ثابت به عنوان تابعی از سینوس زاویه ارتفاعی ماهواره هستند که یک سادهسازی است. شبیهسازی های انجام شده توسط لارسون و همکاران (۲۰۰۸) نشان می دهد 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 می-شود، عمق بازتاب چندین سانتی متر عمیق تر می شود. ارتفاع اولیه بازتابنده تقریباً با H برابر است و از دادههای SNR سیگنال های بازتابی با استفاده از رابطه (۷) بر آورد می شود. دادههای هر مدار ماهوارهای می تواند برای بر آورد ارتفاع اولیه بازتابنده برای ایستگاه استفاده شود. فاز و دامنه نیز با استفاده از روش کمترین مربعات بر آورد می شوند.

۲-۳. بر آورد سنجههای SNR

پریودو گرام Lomb-Scargle (LSP) را می توان برای بر آورد تغییرات زمانی در فرکانس غالب تداخل نمای SNR استفاده کرد. این روش در بر آورد عمق برف از GPS-IR استفاده شده است (لارسون و نیوینسکی، ۲۰۱۳). LSP مانند تبدیل فوریه سریع است، با این تفاوت که می توان از آن برای داده های نمونه برداری نامنظم استفاده کرد. فرکانس غالب را می توان با استفاده از رابطه زیر به ارتفاع موثر باز تابنده (H_{eff}) تبدیل کرد:

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

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

توان اوج فرکانس LSP یا دامنه LSP (A_{LSP}) نیز تحت تأثیر رطوبت خاک، پوشش گیاهی و سایر شرایط ایستگاه مانند توپو گرافی است. معیارهای به دست آمده از دادههای SNR (ΔH_{eff}, A, A_{LSP}) 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 می گیرند. دو مطالعه مدلسازی نشان دادند که فاز بهترین شاخص تغییرات رطوبت خاک است

(۴)

(9)

(V)

(٩)

(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 به طور قابل توجهی تحت تأثیر تغییرات پوشش گیاهی قرار می گیرد (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 *ALSP A ب*ه رطوبت خاک یا تغییرات پوشش گیاهی ارتباطی ندارد و در عوض عمدتاً به قدرت ارسال ماهواره، بهره آنتن و دمای گیرنده وابسته هستند. *ALSP ALSP د*ر هر روز به صورت زیر نرمال<u>سازی می</u>شوند:

$A_{LSPnorm(t)} = A_{LSP(t)} / A_{LSP_{20\%}}$

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

که در آن اندیس پایین ۲۰٪ نشاندهنده میانگین ۲۰٪ 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 می شود.

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 نمی کند، 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.

٤-٢. کمیسازی اثر پوشش گیاهی

در غیاب اندازه گیریهای میدانی تغییرات فصلی محتوای آب پوشش گیاهی، میتوان از سری زمانی Anorm برای بر آورد اینکه آیا اثرات پوشش گیاهی قابل توجه سریهای زمانی ΦΔ را تحت تأثیر قرار می دهد یا خیر، استفاده کرد. چو و همکاران (۲۰۱۴) با یک مدل الکترودینامیکی نشان دادند که افزایش رطوبت خاک باعث کاهش دامنه SNR می شود. این مدل نشان می دهد که افزایش رطوبت به میزان ³³ (cm)³ (cm) ۲۰ ، منجر به کاهش morm از یک به ۲۸/۰ می شود. از آنجایی که تفاوت بین رطوبت باقیمانده و اشباع برای یک خاک معمولی حدود ³³ (cm) ۲۰ ، منجر به کاهش معری است، در غیاب رشد پوشش گیاهی نباید شاهد کاهش Anorm به کمتر از ۱۰ مرابع برای یک خاک معمولی حدود ³³ (cm) ۲۰ ، منجر به کاهش می مری زمانی ۲۰۰۳ می شود. از آنجایی که تفاوت بین رطوبت باقیمانده و ۱۰ مرابع برای یک خاک معمولی حدود ³³ منجر به کاهش Anorm از یک به ۲۰/۰ می شود. از آنجایی که تفاوت بین رطوبت باقیمانده و ۱۰ مربع برای یک خاک معمولی حدود ³³ منجر به کاهش Anorm از یک به ۲۰/۰ می شود. از آنجایی که تفاوت بین رطوبت باقیمانده و ۱۰ مربع برای یک خاک معمولی حدود ³³ منجر به کاهش Anorm از یک به ۲۰/۰ می شود. از آنجایی که تفاوت بین محمد که افزایش ۱۰ مربع برای یک معمولی حدود ³⁴ مینکه مارک است، در غیاب رشد پوشش گیاهی نباید شاهد کاهش Anorm به کمتر از مربع برای یک معمولی زمانی و مراده ماهواره ای که سری زمانی Anorm آن برای مدت زمان طولانی زیر ۲۰/۰ باقی می ماند، احتمالاً تحت تأثیر چیزی غیر از تغییرات رطوبت خاک، مانند تغییرات محتوای آب پوشش گیاهی قرار می گیرد. مداری که Anor مری زمانی آن بیشتر از ۲/۰ باقی می ماند ممکن است اثرات پوشش گیاهی کوچکی داشته باشد، اگرچه برای این موارد تعیین اینکه آیا کاهش در Anorm 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 Anorm تعیین شده است، باید قبل از بر آورد 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 Anorm کمتر از ۱۰/۷۸ است را می توان بدون استفاده از فیلتر پوشش گیاهی حذف کرد. بااین حال، صرفاً حذف دادههای فاز بدون اجرای اصلاح پوشش گیاهی منجر به خطا در دورههای اطراف بازه تحت تأثیر می شود که هنوز تحت تأثیر رشد پوشش گیاهی هستند. شکل ۳ خلاصهای از الگوریتم بر آورد رطوبت خاک را برای یک ایستگاه نشان می دهد.

(1·) (11)



.. سبع مای کسبی عصبی حافظه طولانی کوتاهمدت (Long Short-Term Memory (LSTM) برای مدلسازی و پیش بینی در این مقاله از شبکههای عصبی حافظه طولانی کوتاهمدت (LSTM یک معماری بازگشتی از شبکههای عصبی است که در سال ۱۹۹۷ میلادی توسط هوخرایتر و اشمیدهوبر ارائه شد، و بعداً توسط ژرس و همکاران (۲۰۰۰) و گرف و همکاران (۲۰۱۷) بهبود داده شد. ساختار شبکه بازگشتی RECURTEN Neural Network (RNN) و گرف و همکاران (۲۰۱۷) بهبود داده شد. نسخه بروز شده RNN است. مطابق شکل ۴ بلوک RNN به عقب نگاه می کند و به عبارت دیگر دارای حافظه کوتاهمدت است. این شبکه خروجی بلوک قبل (h_t) و بردار ورودی (x_t) را گرفته و خروجی بلوک جاری (h_t) را استخراج می کند. ترتیب دادههای ورودی x_t برای این شبکه مهم است.





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 قبل، h_t ، خروجی از بلوک جاری، h_t ، حافظه بلوک جاری.

پس شبکه LSTM شامل شبکه RNN هم می شود و دربر گیرنده روابط بیشتری بوده و در حالت کلی پیچیده تر از آن است و جهت اجرا نیاز به سخت افزار قوی تری دارد. پس شبکه LSTM توسعه یافته شبکه RNN بوده و دارای حافظه بسیار طولانی تری نسبت به آن است ولی هر دو شبکه ساختار زنجیرهای یا دنبال هم دارند. شبکه RNN یک ورودی و یک خروجی دارد (شکل ۶–الف)، و دارای حافظه کو تاه مدت است. شبکه LSTM دو ورودی و دو خروجی داشته (شکل ۶–ب) و هم حافظه کو تاه مدت و هم بلندمدت دارد و دارای قدرت حافظه بسیار بالایی است که تابع شرایط آموزش و شرایط لایه هاست. کار حافظه بلندمدت در شبکه LSTM یا حذف اطلاعات (فراموشی) یا افزودن اطلاعات در حافظه (به خاطر سپردن) است. ساختار لایه ای شبکه LSTM در شکل ۷ نشان داده شده است.



۲-۳. انواع درگاه در شبکه LSTM

شبکه LSTM دارای سه درگاه است. درگاه فراموشی که اطلاعات را حذف کرده و فراموش می کند. درگاه ورودی که دریافت-کننده اطلاعات است و درگاه خروجی. حافظه در LSTM به کمک این سه درگاه مدیریت می شود (گرس 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 می دهد. دو سری وزن W_i و W_h در این شکل دیده می شود که هر کدام شامل چهار ضریب وزنی است. اندیس اول نوع وزن و اندیس دوم نوع درگاه را مشخص می کند.

- (٩)
- $(\mathbf{1},\mathbf{1})$

 $w_{i} = \{w_{if}, w_{ii}, w_{ig}, w_{io}\}$ $w_{h} = \{w_{hf}, w_{hi}, w_{hg}, w_{ho}\}$



شکل ۸ بلوک دیاگرام مبتنی بر درگاه شبکه LSTM که شامل سه درگاه فراموشی (f)، ورودی (i) و خروجی (0) است.





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

۳**-۲-۳. درگاه خروجی** بایستی درگاهی باشد که تعیین کند کدام اطلاعات ارزشمند هستند و آنها را حفظ کند و اینکه کدام اطلاعات مورد نیاز نیستند و آنها را حذف کند. این فرایند تحت عنوان فرآیند بهخاطر سپردن شناخته میشود که توسط درگاه خروجی انجام میشود. رابطه بهخاطر سپردن در شبکه LSTM بهصورت زیر است:

 $g_t = tanh(w_{hg}h_{t-1} + w_{ig}x_t + b_{hg} + b_{ig})$ (۱۶) باارزش بودن g_t باعث می شود. که اطلاعات آن به حافظه سپرده شود و بی ارزش بودن g_t باعث فراموشی آن می شود. بررسی باارزش

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 باارزش 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.



پس درگاه خروجی تعیین می کند 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 می دهد. $o_t = \sigma(w_{ho}h_{t-1} + w_{io}x_t + b_{ho} + b_{io})$ $h_t = o_t \odot tanh(c_t)$ (۱۸)

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



شبکه عصبی LSTM می تواند در بازه زمانی طولانی محتوای خود راه 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 اضافه شدن اطلاعات جدید را مشخص می کنند. بهطورکلی یک به معنای عبور و صفر به معنای حذف اطلاعات است. درگاه ورودی مشخص می کند چه بخشهایی از داده ورودی و به چه مقدار به محتوای حافظه اضافه شوند. درگاه فراموشی مشخص می کند که چه بخشهایی از محتوای حافظه از آن حذف شوند. درگاه خروجی نیز مشخص می کند محتوای وضعیت مخفی (h_t) حاوی چه بخشی از محتوای حافظه باشد.

٤. مطالعه موردي

بهعنوان مطالعه موردی یکی از ایستگاههای PBO به نام P038 انتخاب گردید. محل ایستگاه در پورتالز، نیومکزیکو در عرض جغرافیایی

"۵۰ " ۵۰ " و طول جغرافیایی "۲۴ ۲۶" ۵۰ ^۵ و ارتفاع ۱۲۱۲/۹۸۲ 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 اینکه در دوسال اول تأسیس ایستگاه یعنی سالهای ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ ثبت داده به صورت 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 به صورت دائمی و بدون تغییر در مشخصات ایستگاه انجام شده است، لذا از داده های این بازه زمانی برای تجزیه و تحلیل رطوبت خاک استفاده شد. داده های مورد نیاز در بخش آرشیو ویژه UNAVCO ارائه شده است.



(ب)

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 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.

(الف)

مرحله نخست، محاسبه مناطق بازتابی GNSS است تا این اطمینان حاصل شود که سطحی که هدف سنجش آن است، در دسترس ماهواره است. بدینمنظور بایستی موقعیت ایستگاه بررسی شود و محل های عدم پوشش و موقعیت صحیح موانع در منطقه تحت بررسی که ممکن است باعث ایجاد اعوجاج در آنالیز شود، معلوم گردد، درصورت 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 نمی کند 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 می شود. 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 سیگنال.های دریافتی در آنها ضعیف بوده و یا در دسترس نیستند که می تواند به دلایل مختلفی مانند موانع، شرایط جوی یا محدودیتهای گیرنده رخ دهد. گیرندهها از نظر حساسیت و دقت محدودیتهایی دارند که می تواند 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 آزیموت های انتخابی مناسب هستند. پس از تجزیه و تحلیل مناطق بازتابی اطراف ایستگاه و انتخاب بهترین زوایای ارتفاعی و آزیموت، داده های SNR از فایل های RINEX استخراج می شوند. داده های SNR از واحد dB-Hz به واحد خطی (ولت/ولت) برای هر مسیر ماهوارهای در حال طلوع و غروب تبدیل میشوند. باتوجه به اینکه در این مرحله هدف استخراج دادههای SNR از سیگنالهای چند مسیری است، می توان یک نگاه گذرا به دادهها داشت تا گزینههای مختلف (زوایای ارتفاع، فرکانس ها، آزیموت ها و پارامترهای کنترل کیفیت) ایستگاه را بررسی کرده و مناسب ترین آنها را انتخاب کرد.

بررسی پریودوگرامهای LSP به عنوان معیار کنترل کیفیت نشان میدهد که دادههای L2C برای برآورد رطوبت خاک مناسب تر از سایر دادهها مانند L1 و L2P هستند. شکل ۱۵ پریودوگرام LSP دادههای SNR مستخرج از مشاهدات L2C دریافت شده توسط ایستگاه PO38 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 Vollt/Volt را نشان میدهد. بیشینه دامنه LSP، ارتفاع رفلکتور را روی محور افقی ارتفاع رفلکتور را برحسب متر و محور قائم دامنه برحسب Vollt/Volt را نشان میدهد. بیشینه دامنه SNR، ارتفاع رفلکتور را روی محور افقی از تفاع رفلکتور را برحسب متر و محور آه متر است. مقدار کمینه محور افقی از ۵/۰ متر شروع می شود. کمتر از ۵/۰ متر محدوده مجاز نیست و ارتفاع باز تابنده کمتر از آن عملاً توسط GNSS-IR قابل تعیین نیست. با استفاده از این پریودوگرامها می توان متوجه شد که آیا یک باز تابنده مسطح زیر آنتن وجود دارد یا خیر. در صورت وجود باز تابنده مسطح نمودار SNR فقط دارای یک قله خواهد بود که نشاندهنده ارتفاع بازتابنده و تغییرات زمانی آن نشاندهنده تغییرات زمانی ارتفاع بازتابنده است. ولی اگر منطقه تحت پایش دارای توپوگرافی باشد قلل متعدد در نمودار LSP ظاهر خواهد شد. پس برای رسیدن به نتایج بهتر در بر آورد 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 آنتن درحدود 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.

مطابق شکل ۱۶-الف، نقاط با رنگ آبی بازیابی موفق ارتفاع بازتابنده و نقاط با رنگ خاکستری نشاندهنده بازیابی ناموفق هستند. شکل ۱۹-ب نشان دهنده نسبت اوج به نویز و شکل ۱۶-ج نشان دهنده دامنه اوج طیفی است. خط چین ها نشان دهنده معیارهای کنترل کیفیت مورد استفاده است. مطابق شکل ۱۶-الف برای ایستگاه PO38 ارتفاع بازیابی شده بازتابنده تقریباً در آزیموتهای بین ۱۳۰ تا ۲۵۰ درجه ثابت است. از شکل ۱۶-ب می توان دریافت که سنجه کنترل کیفیت نسبت اوج به نویز ۳ قابل قبول است. در شکل ۱۶-ج، دامنه ها معمولاً بزرگتر از ۱۱ هستند، بنابراین می توان ۸ را به عنوان کمینه مقدار دامنه اوج طیفی پذیرفت.

در ادامه بایستی ارتفاع اولیه بازتابنده را برای ایستگاه بر آورد کرد. ایستگاههای شبکه PBO H₂O مابین ۱ الی ۳ متر بالاتر از سطح زمین هستند. در ایستگاه PO38 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، می توان آن را به ۱۵ ثانیه کاهش داد. زاویه ارتفاع بین ۵ تا ۳۰ درجه محدود می شود زیرا دادههای زیر زاویه ارتفاعی ۵ درجه ممکن است توسط درختان یا ساختمانهای مرتفع مسدود شود، اما زاویه ارتفاعی بین ۵ تا



شکل ۱۵. پریودو گرام 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.



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.

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.



(ج) 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 بر آورد شده است.

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.



شكل ۱۸. نتايج روزانه فازL2C

در شکل ۱۹-الف، نتایج فاز بدون اصلاح پوشش گیاهی (با رنگ آبی) و با اصلاح پوشش گیاهی (با رنگ قرمز) قابل مشاهده است. در نهایت، ۵ درصد محتوای حجمی آب بهعنوان تراز آب درنظر گرفته شده است (شکل ۱۹–ب). لازم به توضیح است که با توجه به پروفیل های بافت خاک اطرف ایستگاه می توان درصد متفاوتی از محتوای حجمی آب را برای تراز آن در نظر گرفت. همچنین توجه به این نکته مهم است که که مقادیر منفی رطوبت خاک مقادیر مجازی نیستند.



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).

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 مدت زمان 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 ۲۰۱۷.

مرحله نهایی تحقیق پیش بینی رطوبت خاک از چند روز قبل است. این پیش بینی به کشاورزان کمک می کند تا برنامه ریزی آبیاری خود را به طور موثر تری انجام دهند. بدین منظور کارائی مدل شبکه عصبی مصنوعی LSTM در پیش بینی سری زمانی رطوبت حجمی خاک بدست 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 فرآیند آموزش را با نمایش تغییرات جذر خطای مربعی میانگین و تابع هزینه بر حسب تعداد تکرار نشان می دهد. سری زمانی آموزشی با مقادیر پیش بینی شده سری زمانی در شکل ۲۲ نشان داده شده است. مقایسه مقادیر پیش بینی شده با داده های آزمون در اشکال ۳۲ و ۲۴ نشان داده شده است. مقایسه دو شکل ۳۲ و ۴۰ نشان می دهد که با به روزرسانی وضعیت شبکه با مقادیر مشاهده شده به جای مقادیر پیش بینی شده، مقدار جذر خطای مربعی میانگین از ۹۰/۰ به میانگین باقیمانده ها از ۹۲۹/۰ به ۲۰۰/۰۰ کاهش یافته و پیش بینی هده، مقدار جذر خطای مربعی میانگین از ۹۰/۰ به ۱۰/۰





شکل ۲۱. فر آیند آموزش شبکه LSTM، محور افقی نشاندهنده تعداد تکرارها تا ۳۰۰ و محور قائم نشاندهنده تغییرات (الف) جذر



شکل ۲۴. مقایسه مقادیر پیشبینی شده با دادههای آزمون، با به روزرسانی وضعیت شبکه با مقادیر مشاهده شده به جای مقادیر پیشبینی شده، پیشبینیها دقیق تر انجام می شود.

٥. نتيجه گيري

تداخلسنجی سنجش بازتاب سیستمهای ماهوارهای ناوبری جهانی یک فرآیند سنجش از دوری با استفاده از یک گیرنده GNSS است. گیرنده GNSS سیگنالها را از ماهوارههای GNSS دریافت کرده و موقعیت خود را برآورد می کند. 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 می کنند. این سیگنالها دربردارنده اطلاعاتی درباره سطوح بازتابنده پیرامون خود هستند. براساس نوع سطح بازتابنده می توان از این روش برای اندازه گیری رطوبت خاک، عمق برف، ضخامت یخ و تغییر سطح آب استفاده کرد.

با توجه به نتایج تحقیقات، GNSS-IR را میتوان بهعنوان یکی از روش های 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.

در این مقاله یک فرآیند 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 می شوند. 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 بدست 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 درصد 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 پیش بینی سری زمانی رطوبت خاک برای چند روز آینده با استفاده از شبکههای عصبی مصنوعی از نوع LSTM انجام می شود. با به روزرسانی وضعیت شبکه با مقادیر مشاهده شده به جای مقادیر پیش بینی شده، مقدار جذر خطای مربعی میانگین از ۲۰/۹ به ۲۰۱۴ کاهش یافته و پیش بینی ها دقیق تر انجام می شوند. انجام پیش بینی جهت برنامه ریزی مؤثر آبیاری برای کشاورزی مفید خواهد بود. بدین منظور استفاده از گیرنده های ارزان قیمت GPS در زمین های کشاورزی مناطق روستایی پیشنهاد می شود.

سی سود. گسترش الگوریتم رطوبت خاک مورد استفاده در این تحقیق برای ایستگاههای واقع در مناطق با توپو گرافی بیشتر یا برای ایستگاههایی با انواع آنتن ها برای تحقیقات بعدی پیشنهاد می شود. به منظور استفاده از انواع مختلف آنتن، الگوهای بهره و فاز آنها باید برای شبیه-سازی روابط خاص مابین رطوبت خاک و دادههای SNR معلوم باشد.

انجام مشاهدات چندمنظومهای GNSS، آثار بازتابشی 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 می شود.

خطاهای ناشی از فرضیات در الگوریتم فیلترینگ پوشش گیاهی نیز باید در بر آورد نهایی رطوبت خاک گنجانده شود. بررسی محل و نوع گیرنده های مستقر در ایستگاه های شبکه دائمی GPS ایران برای ژئودینامیک (Iranian Permanent GPS) Network for Geodynamics: IPGN و انجام تنظیمات لازم برای انجام مشاهدات در این ایستگاه ها به منظور تعیین پارامترهای محیط زیستی مانند عمق بارش برف، ضخامت یخ، پوشش گیاهی، تغییرات سطح آب در سدها، دریاچه ها و دریاها (جزر و مد) و میزان رطوبت خاک به عنوان محصولات فرعی برای این شبکه ها پیشنهاد می شود.

٦. مراجع

- Alonso-Arroyo, A., Camps, A., Park, H., Pascual, D., Onrubia, R., and Martín, F., (2014). Retrieval of significant wave height and mean sea surface level using the GNSS-R interference pattern technique: Results from a threemonth field campaign. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 53(6), 3198-3209.
- Al-Yaari, A., Wigneron, 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 spatiotemporal 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., and 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., and Ye, J., (2018). Vertical deformation monitoring of the suspension bridge tower using GNSS: A case study of the forth road bridge in the UK. Remote Sensing **10**(3): 364.
- Chew, C. C., Small, E. E., Larson, K. M., and 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. and Zavorotny, V. U. (2014). Vegetation sensing using GPSinterferometric 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
- Collobert, R. and Bengio, S., (2004). Links between perceptrons, MLPs and SVMs. Proceedings of the twenty-first international conference on Machine learning, July 2004, https://doi.org/10.1145/1015330.1015415.
- Ding, X., Xia, C., Zhang, X., Chu, X., Han, J., and Ding, G., (2021). Repmlp: Re-parameterizing convolutions into fully-connected layers for image recognition. arXiv preprint arXiv:2105.01883.
- Dobson, M. C., Ulaby, F. T., Hallikainen, M. T., and 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., and Swamy, M. N., (2006). Neural networks in a softcomputing framework, Springer.
- Engelbrecht, A. P., (2007). Computational intelligence: an introduction, John Wiley & Sons.
- 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., and 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., and 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.
- Haykin, S., (1998). Neural networks: a comprehensive foundation, Prentice Hall PTR.
- Hochreiter, S., Schmidhuber, J., (1996). LSTM can solve hard long time lag problems. Advances in Neural Information Processing Systems.
- Hochreiter, S., Schmidhuber, J., (1997). Long short-term memory. Neural Computation. 9 (8), 1735–1780. doi:10.1162/neco.1997.9.8.1735. PMID 9377276. S2CID 1915014.
- 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.
- Kay, J. W., Titterington, D. M., and Titterington, S. D., (1999). Statistics and neural networks: advances at the interface, Oxford University Press.
- 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., and 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., and Braun, J., (2008). Using GPS multipath to measure soil moisture fluctuations: initial results. GPS solutions, 12(3), 173-177.
- Larson, K. M., and 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.

- Levenberg, K., (1944). A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. Quarterly of applied mathematics 2(2), 164-168.
- Li, X., Dick, G., Lu, C., Ge, M., Nilsson, T., Ning, T., Wickert, J., and 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.
- Lian, D., Yu, Z., Sun, X., and Gao, S., (2021). As-mlp: An axial shifted mlp architecture for vision. arXiv preprint arXiv:2107.08391.
- Luo, X., Yan, S., Shan, J., Yan, H., and 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., and 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.
- Marquardt, D. W., (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics, 11(2), 431-441.
- Martín, A., Ibáñez, S., Baixauli, C., Blanc, S., and 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 and 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., P. Axelrad, S. T. Lowe and K. M. Larson (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.
- Meng, Z., Zhao, F., and Liang, M., (2021). SS-MLP: A novel spectral-spatial MLP architecture for hyperspectral image classification. Remote Sensing, 13(20): 4060.
- 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.
- Potghan, S., Rajamenakshi, R., and Bhise, A., (2018). Multi-layer perceptron based lung tumor classification. 2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), IEEE.
- 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., and 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., and Vall-Llossera, M., (2011). 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., and Vall-Llossera, M., (2011). Vegetation water content estimation using GNSS measurements. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 9(2), 282-286.
- Schwank, M., Matzler, C., Guglielmetti, M., and 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.
- Tolstikhin, I. O., Houlsby, N., Kolesnikov, A., Beyer, L., Zhai, X., Unterthiner, T., Yung, J., Steiner, A., Keysers, D., and Uszkoreit, J., (2021). Mlp-mixer: An all-mlp architecture for vision. Advances in neural information processing systems, 34, 24261-24272.
- 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.
- Wu, H., Zhou, H., Wang, A., and Iwahori, Y., (2022). Precise Crop Classification of Hyperspectral Images Using Multi-Branch Feature Fusion and Dilation-Based MLP. Remote Sensing, 14(11), 2713.
- Xin, W., Qiang, S., XunXie, Z., DaRen, L., LianJun, S., Xiong, H., Giulio, R., Stephen, D., and 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., and, 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.
- Zavorotny, V. U., Masters, D., Gasiewski, A., Bartram, B., Katzberg, S., Axelrad P., and Zamora, R., (2003). Seasonal polarimetric measurements of soil moisture using tower-based GPS bistatic radar. in Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp., 2003, 781–783.
- 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.