

بررسی تأثیر تغییرات رطوبت خاک بر فاز تداخل سنجی راداری

صادق رنجبر^۱، مهدی آخوندزاده هنزانی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
۲- استادیار دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۰۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۲۸

چکیده

تداخل سنجی راداری تفاضلی (*DInSAR*) به عنوان یک ابزار بالقوه سنجش از دور برای شناسایی جابجایی‌های سطح زمین با دقت زیر سانتی متر شناخته شده است. تغییرات رطوبت سطحی خاک (ΔM_v) در زمان میان دو تصویر به عنوان یک پارامتر تأثیرگذار بر فاز تداخل سنجی (ϕ)، باعث ایجاد خطا در برآورد جابجایی می‌شود. در این پژوهش، میزان و نحوه تأثیرگذاری ΔM_v بر ϕ در زمین‌هایی با پوشش گیاهی گندم، کلزا، علف هرز، نخود و زمین بایر با استفاده از یک مدل رگرسیونی بطور تجربی بررسی شده است. برای این بررسی از داده‌های هوایی سنجنده *UAVSAR* (باند *L*) همراه با داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی در کمپین زمینی کانادا برای رطوبت خاک در سال ۲۰۱۰ (*CanEx-SM10*) استفاده شده است. با توجه به نمودارهای پراگندگی بین ϕ و ΔM_v و مشاهده رابطه مستقیم و تقریباً خطی بین این دو پارامتر، تعدادی فرضیه برای استفاده از یک مدلسازی رگرسیونی در نظر گرفته شد. با مقایسه فاز تخمین زده شده با استفاده از مدل رگرسیونی کالیبره شده و فاز محاسبه شده از تکنیک تداخل سنجی، بهترین نتایج مدل در زمین بایر با خطای جذر میانگین مربعات (*RMSE*)، ۰/۳ رادیان تا ۰/۶ رادیان و ضریب تعیین (*R*²)، ۰/۶۹ تا ۰/۷۲ در قطبیدگی‌های *VV* و *HH* بدست آمده است. بطور کلی، نتایج مدل رگرسیونی نشان می‌دهد بدون تأثیر بقیه عوامل تأثیرگذار بر ϕ ، این پارامتر می‌تواند به عنوان تابعی رگرسیونی از تغییرات سطح رطوبت خاک در زمین‌های بایر باشد. همچنین، این مدلسازی نتایج قابل قبولی برای زمین‌های دارای پوشش گیاهی ارائه می‌دهد (*RMSE*)، ۰/۶ رادیان تا ۰/۹۹ رادیان و *R*²، ۰/۴۰ تا ۰/۵۵ با توجه به نوع پوشش گیاهی و قطبیدگی‌های مختلف. در مقایسه‌ی قطبیدگی‌ها، نوسانات ϕ در قطبیدگی‌های هم‌قطبش (*HH* و *VV*) همبستگی بیشتری با ΔM_v نشان می‌دهند. بطور کلی، ϕ تابعی مستقیم و تقریباً خطی از ΔM_v می‌باشد و تغییرات زیاد رطوبت سطحی خاک باعث ورود خطای قابل توجهی در برآورد جابجایی می‌شود.

کلید واژه‌ها: تداخل سنجی راداری، فاز، رطوبت سطحی خاک، تغییرات پوشش گیاهی.

* نویسنده مکاتبه کننده: تهران-خیابان کارگر شمالی-بالا تر از تقاطع جلال آل احمد-دانشکده فنی دانشگاه تهران-دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی.

تلفن: ۰۲۱۶۱۱۴۵۲۲

Email: makhonz@ut.ac.ir

۱- مقدمه

تداخل‌سنجی راداری تفاضلی^۱ (*DInSAR*) یک روش سنجش از دوری است که می‌تواند جابه‌جایی‌های سطح زمین را با دقت زیر سانتی‌متر برآورد کند. یک پارامتر قابل مشاهده کلیدی این روش، فاز تداخل‌سنجی راداری (ϕ) می‌باشد که از ترکیب دو تصویر با اختلاف زمانی یا مکانی مشخص بدست می‌آید. با استفاده از ϕ جابجایی‌های سطح زمین با دقت زیر سانتیمتر قابل برآورد می‌باشد. پارامترهای بسیاری در فاصله‌ی زمانی بین دو تصویر تغییر می‌کنند که می‌توانند بر سیگنال ϕ تأثیرگذار باشند و نهایتاً باعث خطا در برآورد جابجایی با استفاده از این روش گردند [۱]. تغییر رطوبت سطح خاک در زمان میان دو تصویر، بر فاز تداخل‌سنجی راداری تأثیر می‌گذارد که نتیجه آن ایجاد خطا در برآورد جابه‌جایی می‌شود که این خطا تا ده درصد طول موج رادار می‌تواند باشد [۲ و ۳]. با توجه به محدوده طیف الکترومغناطیس مورد استفاده در سنجنده‌های راداری که از طول موج ۳ تا ۳۰ سانتیمتر می‌باشد این خطا از ۳ میلیمتر تا ۳ سانتیمتر می‌تواند باشد که با توجه به این مقدار، بزرگی این خطا می‌تواند از دقت تخمین جابه‌جایی یا حتی خود جابه‌جایی بیشتر باشد [۴ و ۵].

محققان جابجایی برآورد شده توسط روش تداخل-سنجی که بدلیل آبیاری را هنگام کار با داده‌های *SEASAT* بوده است را در سال ۱۹۸۹ گزارش کردند، که نشان می‌دهد رابطه‌ای بین تغییرات رطوبت سطحی خاک (ΔM_v) و ϕ ، حداقل از سال ۱۹۸۹ شناسایی شده است [۶]. با این وجود، مطالعات کمی در مورد تأثیر تغییر رطوبت بر ϕ صورت گرفته است، درحالی که مطالعات گسترده‌ای بر خطاهای مداری و تأخیر تروپوسفری وجود دارد [۷ و ۸]. از انجایی که

رطوبت خاک می‌تواند در مقیاس مکانی-زمانی بسیار کوچک تغییر قابل توجه‌ای کند نمیتوان از روش‌های فیلترینگ مکانی برای کم کردن تأثیرات تغییرات رطوبت بر فاز تداخل‌سنجی استفاده کرد [۸، ۹ و ۱۰]. گابریل و همکاران (۱۹۸۹) در ابتدا فرض کردند که تغییرات رطوبت سطح خاک بر روی سیگنال تداخل-سنجی اثرگذار می‌باشد. سپس با توجه به تغییر شکل-های تخمین زده شده با استفاده از ϕ ، که در زمین‌های کشاورزی آبیاری شده و بدون هیچ جابجایی بوده اند، فرضیه خود را اثبات کردند [۶]. بطور کلی، محققان به دو دلیل علاقه‌مند به مطالعه تأثیر تغییر رطوبت سطح خاک بر ϕ هستند:

- ۱- تصحیح خطای مربوطه در فرآیند تخمین جابجایی
 - ۲- استفاده از پتانسیل روش تداخل‌سنجی برای نظارت بر ΔM_v
- سه قابلیت مشاهداتی در روش تداخل‌سنجی راداری ϕ ، همدوسی، و فاز سه‌گانه می‌باشد که برای بررسی رابطه بین ΔM_v و ϕ مورد استفاده قرار می‌گیرند [۷ و ۱۱]. همه مشاهدات روش تداخل‌سنجی راداری به ΔM_v حساس هستند، در حالی که تنها ϕ تحت تأثیر تغییر شکل‌ها (جابجایی‌های هندسی سطح) قرار می‌گیرد [۱۲، ۱۳ و ۱۴]. فاز سه‌گانه، به عنوان یکی از مشاهدات تداخل‌سنجی راداری، می‌تواند برای سه یا چند رادار بدست آید [۱۴ و ۱۵]. از مشاهدات تداخل-سنجی راداری که نسبت به جابجایی حساس نیستند، میتوان برای اصلاح ϕ و از این رو اصلاح تخمین جابجایی استفاده کرد [۱۱]. اسکات هنسلی و همکاران (۲۰۱۱) داده‌های تداخل‌سنجی قطبیده با عبور تکراری^۲ تولید شده از پروازهای *UAVSAR* را با اندازه‌گیری‌های ΔM_v زمینی، بمنظور بررسی ارتباط میان ΔM_v و ϕ مقایسه کردند. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده‌ی رابطه مستقیم بین ΔM_v و ϕ بوده است [۱۶]. بارت و

^۱ Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar

^۲ Repeat-pass polarimetric-interferometric

و همکاران (۲۰۱۸) برای اولین بار از فاز سه‌گانه با استفاده از مجموعه ای از تصاویر ALOS-2 / PALSAR-2 باند L برای بازیابی ΔM_v استفاده کرد. در این تحقیق، آنها نشان می‌دهند که ابهاماتی برای تخمین ΔM_v فقط با استفاده از فاز سه‌گانه وجود دارد. آنها از همدوسی برای حل اثر ابهامات استفاده کردند. نتایج با ΔM_v زمینی ارزیابی شد و نشان داد که درجه بالایی از همبستگی وجود دارد [۸]. مولان و همکاران (۲۰۲۰) تأثیر خواص آماری ΔM_v را بر همدوسی و فاز سه‌گانه مطالعه کردند تا بررسی کند آیا با استفاده از همدوسی و فاز سه‌گانه می‌توان ΔM_v را تخمین زد. نتایج نشان می‌دهد که کاهش همبستگی فاز سه‌گانه و با افزایش در ΔM_v رخ می‌دهد. علاوه بر این، نتایج نشان داد که نتایج متنوع برای φ ، همدوسی و فاز سه‌گانه^۱ با نوع پوشش زمین ارتباط دارد. به طور کلی، نتایج نشان دادند که همدوسی و فاز سه‌گانه ابزار نامناسبی برای تخمین ΔM_v هستند [۱۷].

با توجه به اینکه تأثیر ΔM_v بر φ را در زمین‌هایی با پوشش گیاهی مختلف در هیچ تحقیقی به صورت اختصاصی بررسی نشده است، در این تحقیق تأثیر ΔM_v بر φ در قطبیدگی‌های مختلف و در پوشش‌های گیاهی مختلف در باند L مورد بررسی و بحث قرار گرفته است. در این تحقیق پس از در نظر گرفتن فرضیاتی راجع به اجزای سیگنال فاز تداخل‌سنجی راداری، با استفاده از یک مدل رگرسیونی رابطه میان ΔM_v و φ در زمین‌های با پوشش‌های کلزا، نخود فرنگی، علف‌های هرز، گندم، و زمین بایر بررسی شده است. نتایج مدل رگرسیونی با استفاده از داده‌های هوایی سنجنده‌ی UAVSAR (باند L) همراه با داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی زمینی در کمپین زمینی کانادا برای رطوبت خاک در سال ۲۰۱۰ ($CanEx-SM10^2$) ارزیابی شده است.

همکاران (۲۰۱۳) از تداخل‌سنجی راداری برای تخمین ΔM_v در مناطق کشاورزی استفاده کرد. نتایج ضرایب همبستگی $R = 0.51$ و $R = 0.81$ با توجه به انواع محصولات را نشان داد که دلیل کم شدن دقت، فاصله زمانی-مکانی زیاد بین جفت تصویرها بوده است. در واقع، ورود اجزای مزاحم همچون تغییرات پوشش خاک و تأثیرات مدل رقومی زمین بر فاز تداخل‌سنجی باعث کاهش دقت شده است [۱۲]. در سالهای اخیر تحقیقات ارزشمندی در این زمینه انجام شده است. دی زن و همکاران (۲۰۱۴) مدلی را بر اساس امواج صفحه ارائه داد که عدد موج پیچیده عمودی موجود در خاک را به عنوان تابعی از ویژگی‌های هندسی و دی الکتریک و کوهرنس پیچیده تداخل مدلسازی می‌کند. در این مقاله نتایج با داده‌های هوایی SAR اخذ شده از باند L ارزیابی شده‌اند [۵]. سایمون زویبک و دیگران (۲۰۱۵) از دو مجموعه داده هوایی در باند L برای بررسی ارتباط بین ΔM_v و φ ، همدوسی و همچنین فاز سه‌گانه با استفاده از روش‌های رگرسیون استفاده کرد. نتایج نشان داد که وابستگی φ برای بیش از ۷۰ درصد از مزارع در قطبش HH ، ۵۳ درصد از مزارع در قطبش VH و بیش از ۶۴ درصد از مزارع در قطبش VV معنی دار بود [۷]. سیمون زویبک و همکاران (۲۰۱۷) تحلیل می‌کنند که آیا میتوان رطوبت خاک را از سه مشاهدات تداخل-سنجی راداری، با هدف جداسازی اثرات ΔM_v و جابجایی بر روی φ ، تخمین زد. آنها سعی کردند ΔM_v را از سه مشاهده تداخل‌سنجی راداری تخمین بزنند بدون اینکه هیچ فرضی در مورد پویایی زمانی - مکانی پیچیده آن داشته باشند. نتایج نشان می‌دهد که سری زمانی ΔM_v تا یک جبران کلی را میتوان توسط فاز مرجع تداخل‌سنجی راداری تخمین زد، همبستگی تقریبی $0.75 - 0.90$ با اندازه‌گیری‌های زمینی نتیجه داده شده است. از آنجا که تنها φ می‌تواند وسیله مناسبی برای ΔM_v باشد، آنها نتیجه گرفتند که تنها با استفاده از مشاهدات تداخل‌سنجی راداری، جدایی جابجایی‌ها و ΔM_v در عمل دشوار است [۱۱]. دی زن

^۱ Closure or triple phase

^۲ Canadian Experiment for Soil Moisture in 2010

در این مطالعه، در بخش اول مقدمه ارائه شده است. سپس در بخش دوم خلاصه ای از تئوری تکنیک تداخل سنجی ارائه شده است. در ادامه منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده ارائه شده است. بخش چهارم روش مورد استفاده در این پژوهش بیان شده است و سپس در بخش پنجم نتایج بدست آمده ارائه و بحث شده است. در نهایت در بخش ششم نتیجه‌گیری کلی پژوهش آورده شده است.

۲- تداخل سنجی راداری

φ با استفاده از ترکیب دو تصویر مختلط راداری (SLC) با اختلاف زمانی یا مکانی معین محاسبه می‌گردد. در یک سیستم راداری تمام پلاریزه، هر پیکسل مختلط SLC، یک ماتریس مختلط S می‌باشد که در رابطه (۱) تعریف می‌گردد [۱۸]:

$$S = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۱)}$$

همچنین هر پیکسل مختلط SLC می‌تواند به صورت یک بردار پراکنش $q = [S_{HH} \ S_{HV} \ S_{VV}]^T$ تعریف شود [۱۸]. در یک سیستم پلاریمتری، اگر q_n و q_m دو بردار پراکنش از دو تصویر مختلط SLC باشند، آنگاه سیگنال تداخل سنجی راداری را میتوان با استفاده از ماتریس کوریانس $C_{n,m} = \langle q_n q_m^\dagger \rangle$ (جاییکه $\dagger$ اپراتور مزدوج و ترانپوز و $\langle \cdot \rangle$ اپراتور میانگین می‌باشد) طبق رابطه (۲) بدست آورد [۱۹]:

رابطه (۲)

$$\gamma_{n,m}(\omega) = \frac{\omega^\dagger C_{n,m} \omega}{\sqrt{(\omega^\dagger C_{n,n} \omega)(\omega^\dagger C_{m,m} \omega)}} = |\gamma_{n,m}(\omega)| e^{j\varphi_{n,m}(\omega)}$$

جاییکه ω بردار مشخص کننده نوع پلاریمتری (برای مثال $\omega = [0 \ 0 \ 1]^T$ برای قطبیدگی VV) می‌باشد. همدوسی $|\gamma|$ و φ ، بترتیب اندازه و آرگومان عدد مختلط $\gamma_{n,m}$ برای یک قطبیدگی مشخص مرتبط با بردار قطبیدگی ω می‌باشند [۱۸].

همانطور که در بخش مقدمه بیان شد، φ تحت تأثیر عواملی همچون تغییرات در هندسه‌ی تصویربرداری، توپوگرافی، تغییرات سطح زمین (جابجایی یا مشخصات سطحی مانند رطوبت سطحی خاک، پوشش گیاهی و

غیره)، تغییرات اتمسفر و نویز و خطای مداری است [۱]، [۲۰، ۲۱ و ۲۲]. بنابراین در این تحقیق همانند تحقیقات قبلی سیگنالهای تشکیل دهنده‌ی φ را بدین گونه تعریف میکنیم [۷، ۸، ۲۳ و ۲۴]: ۱- اثرات تغییرات هندسی سطح زمین (که عمدتاً بدلیل جابجایی)، ۲- اثرات تغییرات الکتریکی سطح زمین که موجب تغییرات پراکنشی در سیگنال رادار می‌شود (عمدتاً بدلیل ΔM_v و تغییرات پوشش گیاهی)، ۳- وجود خطا در مدل ارتفاعی مورد استفاده در حذف اثر توپوگرافی از اینترفروگرام، ۴- اثرات اتمسفر، ۵- اثرات مدار، و اثرات نویز. رابطه (۳) اجزای φ را شرح داده‌است.

$$\varphi_{DInSAR} = \varphi_{def} + \varphi_{Diel_soil} + \varphi_{veg} + \varphi_{topo_res} + \varphi_{atm_d} + \varphi_{orb_d} + \varphi_{noise} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در رابطه (۳)، φ_{def} جمله فازی مرتبط با تغییر شکل هندسی سطح را مدل می‌کند [۲۵ و ۲۶]. φ_{Diel_soil} جمله فاز مربوط به تغییرات دی‌الکتریکی سطح خاک را برای φ مدل می‌کند، و φ_{veg} تغییرات فاز را به دلیل اثرات تغییرات پوشش گیاهی مدل می‌کند [۷ و ۲۴]. φ_{topo_res} مؤلفه باقیمانده در اثر خطای توپوگرافی (RTE) است [۲۰]. φ_{atm_d} و φ_{orb_d} به ترتیب جمله‌های فازی متأثر از تفاوت خطای مداری و فاز جوی در دو زمان را مدل میکنند [۲۰ و ۲۲]. φ_{noise} جمله فازی مرتبط با نویز را مدل می‌کند [۱].

۳- مواد

در این مطالعه، از داده‌های تمام قطبیدگی اخذ شده در باند L توسط سنجنده UAVSAR همراه با داده‌های زمینی اندازه‌گیری شده در کمپین CanEx-SM10 استفاده شده است [۲۷]. داده‌ها در کمپین CanEx-SM10 در منطقه کناستون^۱ در استان ساسکاچوان

^۱ Kenaston

کمپین کمتر از ۱۱ روز (در بیشترین حالت ۱۱ روز) است، تغییرات پوشش زمین قابل اغماض است. شرایط هواشناسی و دامنه ΔM_v در زمان اخذ تصویر در جدول (۱) ارائه شده است.

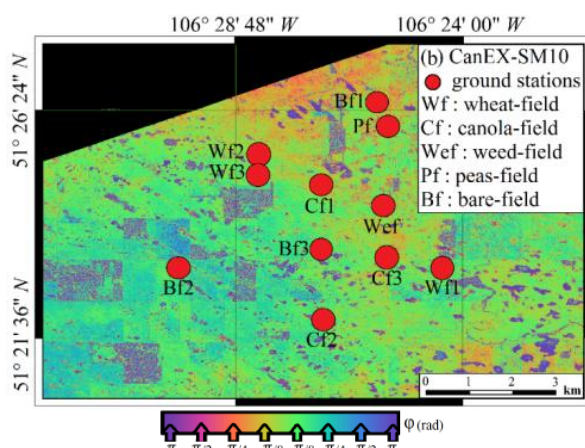
شش تصویر UAVSAR (باند L) اخذ شده با *baseline* مکانی فضایی تقریباً صفر از تاریخ ۲ ژوئن تا ۱۴ ژوئن ۲۰۱۰ برای این مطالعه موردی استفاده شده است. جدول (۱) خصوصیات بیشتری از تصاویر را ارائه می‌دهد. داده‌های UAVSAR استفاده شده در این کمپین دارای قطبیدگی کامل می‌باشند (HH, VH, VV و HV) و دارای توان تفکیک مکانی ۰/۸ متر در آریزیموت و ۱/۷ متر در دامنه هستند. اندازه‌گیری‌های زمینی ویژگی‌های سطح خاک (به عنوان مثال رطوبت سطح خاک در ارتفاع‌های مختلف و زبری) و خصوصیات پوشش گیاهی (به عنوان مثال ارتفاع پوشش گیاهی، شاخص سطح برگ (LAI) و زیست توده (b)) و نوع محصول برای بیشتر مزارع در حین اخذ داده‌ها در دسترس است [۲۷].

با توجه به هدف مقاله، الگوی زمانی ΔM_v و الگوی زمانی φ_{DInSAR} در شکل (۲) به منظور بررسی نحوه تغییرات دو این پارامتر در زمان نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود الگوی زمانی ΔM_v با تنوع φ_{DInSAR} سازگار است. در این شکل پیشرفت زمانی رطوبت سطحی خاک و φ_{DInSAR} را در سه نمونه نشان داده شده است. در این شکل، همه اختلاف‌ها با توجه به تصویر و داده‌های روز ۱۵ ژوئن ۲۰۱۰ محاسبه شده اند. در این مطالعه از اندازه‌گیری‌های رطوبت سطحی خاک در ۰ تا ۵ سانتی متر خاک استفاده شده است که روش تحلیل‌ها در بخش روش توضیح داده شده است.

(SK^۱) در کشور کانادا اخذ شده است. شکل (۱) منطقه مورد مطالعه در این کمپین را نمایش می‌دهد. در این کمپین اندازه‌گیری زمینی مشخصات پوشش گیاهی و سطح خاک از تاریخ ۲ ژوئن تا ۱۴ ژوئن ۲۰۱۰ برای پشتیبانی از فرایندهای توسعه الگوریتم، اعتبار سنجی و کالیبراسیون برای ماموریت‌های ماهواره ای SMOS و SMAP جمع آوری شد [۲۷]. این منطقه توسط چمنزارها، مراتع و مزارع کشاورزی دیم پوشانده شده است. در منطقه به دلیل اینکه عمدتاً جنس خاک لومی می‌باشد تورم و جمع شدن گسترده‌ای در رفتار خاک در رطوبت‌های مختلف انتظار نمی‌رود [۱۱ و ۲۷]. محیط زیست کانادا با استفاده از از حسگر استیون پروب ۲ در اعماق ۵، ۲۵ و ۵۰ سانتی‌متر برای اندازه‌گیری داده‌های زمینی رطوبت سطحی خاک در ایستگاه‌های مختلف استفاده شده است. دقت اخذ داده این حسگرها ۰/۰۱ در واحد حجم (m^3/m^3) می‌باشد [۲۷]. اندازه‌گیری‌های زمینی از ویژگی‌های پوشش گیاهی و خاک از جمله ارتفاع پوشش گیاهی، شاخص سطح برگ (LAI)، زیست توده (b) و دمای خاک (T)، و رطوبت سطح خاک در ارتفاع‌های مختلف، تراکم خاک، زبری سطح خاک (S) اندازه‌گیری شده اند. زمان اندازه‌گیری داده‌های زمینی بسیار به زمان اخذ داده‌های هوایی نزدیک می‌باشد (اختلاف زمانی اخذ داده زمینی و هوایی برای تمامی نمونه‌ها کمتر از ۱۵ دقیقه می‌باشد) [۲۷]. در این مطالعه از اندازه‌گیری‌های حسگر عمودی ۰ تا ۵ سانتی متری استفاده شده است. در این کمپین از سه مزرعه گندم، سه مزرعه کلزا، یک مزرعه علف‌های هرز، یک مزرعه نخود و سه مزرعه بایر استفاده شده است که تمامی این مزارع یا بدون پوشش بودند یا تا حدی با مواد باقی مانده محصول پوشیده شده بودند [۲۷]. از آنجا که اختلاف زمانی در این

^۱ Saskatchewan

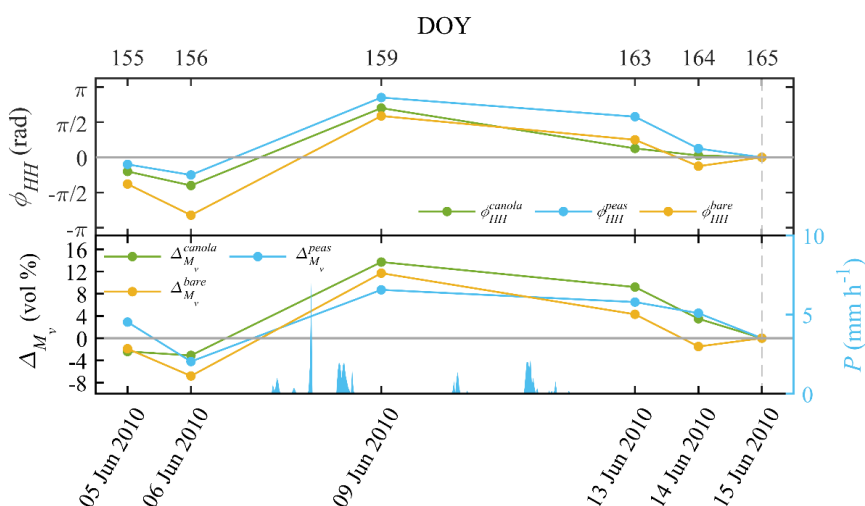
^۲ Steven's Water Hydra Probe 2



شکل ۱: اینترفروگرام بین روزهای ۱۵۶ و ۱۵۹ سال در منطقه‌ی مورد مطالعه در سایت CanEX-SM10 و موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری داده‌های زمینی در این منطقه

جدول ۱: مشخصات تصاویر هوایی و شرایط هواشناسی در زمان اخذ داده‌ها (IA_{CS} : زاویه برخورد در منطقه مورد مطالعه، M_v : میانگین رطوبت حجمی سطح خاک، 3-days P : میانگین بارش در سه روز).

تاریخ	IA_{CS} (degree)	3-days P (mm)	M_v (vol. %)	دما ($^{\circ}C$)
۲۰۱۰ ژوئن ۰۵	[۳۶٫۴۳ - ۴۷٫۸۶]	۰	۲۸٫۰	۱۳٫۷
۲۰۱۰ ژوئن ۰۶	[۳۶٫۴۳ - ۴۷٫۸۶]	۰	۲۷٫۲۵	۱۴٫۲
۲۰۱۰ ژوئن ۰۹	[۳۶٫۴۳ - ۴۷٫۸۶]	۱۹٫۴	۳۳٫۵	۱۲٫۸
۲۰۱۰ ژوئن ۱۳	[۳۶٫۴۳ - ۴۷٫۸۶]	۱۷٫۶	۴۱٫۹	۱۱٫۹
۲۰۱۰ ژوئن ۱۴	[۳۶٫۴۳ - ۴۷٫۸۶]	۶٫۳	۳۹٫۲۷	۱۱٫۲
۲۰۱۰ ژوئن ۱۵	[۳۶٫۴۳ - ۴۷٫۸۶]	۰	۳۰٫۸	۱۱٫۳



شکل ۲: تغییرات زمانی ϕ در قطبیدگی HH و رطوبت سطحی خاک را برای سه نمونه در کمپین CanEX-SM ۱۰ نمایش می‌دهد. تمامی محاسبات با توجه به تصویر پایه در ۱۶۵ امین روز سال انجام شده است. میله‌های آبی میزان بارندگی اندازه‌گیری شده در زمین بایر شماره یک در این منطقه را نشان می‌دهند.

۴- روش

برای دستیابی به هدف اصلی مقاله در این تحقیق داده‌های زمینی رطوبت سطح خاک و φ محاسبه شده با یکدیگر مقایسه شده و به صورت اماری بررسی میشوند. در تحلیل اماری داده‌ها پس از محاسبه‌ی اینترفروگرام-ها ابتدا φ و رطوبت زمینی اندازه‌گیری شده به صورت متقابل استخراج میشوند. سپس در نمودارهای نقطه‌ای آنها نمایش داده و بررسی خواهد شد. پس از آن با در نظر گرفتن فرضیاتی، که در بخش بعد توضیح داده شده اند، رابطه بین رطوبت سطحی خاک و φ راداری با مدلی رگرسیونی بررسی شده است.

۴-۱- فرضیات در نظر گرفته شده

به منظور کاهش پیچیدگی رابطه (۳)، و برای سهولت و امکان اجرای محاسبات در این مطالعه، برخی مفروضات مربوط به اجزای فاز در رابطه (۳) در نظر گرفته شده است. چنین فرضیاتی در مطالعات قبلی مربوط به این مبحث در نظر گرفته شده است [۵، ۷، ۸، ۱۱ و ۱۳]. خطای حذف این مؤلفه‌ها با روش‌های موجود، که به دلیل بازهای کوچک مکانی-زمانی بسیار ناچیز و قابل اغماض هستند، باعث کاهش ارتباط بین رطوبت سطح خاک و φ و زیاد شدن سهم اجزای مزاحم میشود. بنابراین، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است تا مقدار این اجزای مزاحم را به حداقل برساند و از کاهش ارتباط بین رطوبت سطح خاک و φ جلوگیری کند [۷ و ۱۱].

۴-۲- اجزای مزاحم

با توجه به خطوط بازهای مکانی-زمانی بسیار کوتاه، اجزای فاز φ_{def} ، φ_{topo_res} ، φ_{atm_d} ، φ_{orb_d} و φ_{noise} در رابطه (۳) در محاسبه در نظر گرفته نشده اند. اندازه این اجزا در مقایسه با سهم ΔM_v و تغییرات پوشش گیاهی در باز کوتاه مکانی-زمانی برای تشکیل φ بسیار ناچیز می‌باشد [۱۱ و ۲۴]. پس از استفاده از برخی روش‌های موجود برای حذف φ_{atm_d} و φ_{orb_d} یا کاهش φ_{noise} (به عنوان مثال، فیلترهای مکانی)،

ارتباط بین رطوبت سطح خاک و φ به شدت کاهش یافت. بنابراین، به دلیل وارد کردن خطاهای اضافی که ارتباط بین ΔM_v و φ را بشدت تحت تأثیر قرار می‌دهند، بمنظور وارد نشدن اجزا مزاحم، حذف این اجزا در این تحقیق در نظر گرفته نشده است. به هر حال، روشی مبتنی بر توزیع نرمال دو متغیره بر اساس توزیع نرمال ΔM_v و φ در نظر گرفته شده است تا با حذف داده‌های غیرعادی مانند نویز، سهم اجزای مزاحم به حداقل رسانده شوند. این روش در یک بخش جداگانه در ادامه توضیح داده شده است. از آنجا که فاصله زمانی برای همه جفتهای کمپین CanEx-SM10 کمتر از ۱۱ روز می‌باشد، φ_{def} قابل اغماض تلقی شده است. همچنین جمله‌های φ_{topo} و φ_{topo_res} نیز بدلیل پایه مکانی صفر بین جفت تصاویر تداخلسنجی راداری ناچیز در نظر گرفته شده است، بطور کلی مقدار این مؤلفه‌ها در مقایسه با سهم ΔM_v بسیار ناچیز است [۲۷].

۴-۳- جزء مربوط به تغییرات رطوبت سطح خاک

با توجه به تأثیرات قابل توجه مؤلفه تغییرات رطوبت سطح بر φ ، به خصوص با پایه زمانی بسیار کوتاه و پایه مکانی صفر، فقط این مؤلفه در مدل رگرسیونی در این مطالعه در نظر گرفته شده است. نفوذ بالای باند L در پوشش گیاهی باعث می‌شود که تغییرات جزئی این مؤلفه برای رادار با این طول موج، نامرئی به نظر برسد که باعث می‌شود ΔM_v در این باند تأثیرات بیشتری بر تغییرات سیگنال رادار در زمین‌های پوشش گیاهی بسیار کم داشته باشد [۱۱، ۲۸ و ۲۹].

چهار فرضیه در مورد روند فیزیکی اساسی سیگنال رطوبت خاک وجود دارد. این فرایندها بر اساس اثرات تغییرات رطوبت خاک بر موج ارسالی رادار گرفته شده است. این فرایندهای فیزیکی لزوماً از یکدیگر جدا نیستند. تمرکزی بر پیاده سازی این فرایندها و مدل-سازی آنها نخواهد بود و برای واضح تر شدن تأثیرات این فرایندها نشان داده شده اند. در این مطالعه

مدلسازی بین ΔM_v و ϕ با یک مدل رگرسیونی انجام شده است. زیرا، مدل رگرسیون خطی نتایج مناسبی را در ارائه داده است [۷، ۱۱ و ۲۴].

۴-۳-۱- فرضیه صفر (Null)

فرضیه صفر (به صورت شماتیک در شکل (۳-الف) نشان داده شده است) بیان می‌کند که هیچ رابطه‌ای بین ΔM_v و ϕ وجود ندارد. بیشتر مطالعات تداخل-سنجی با هدف برآورد جابجایی این فرضیه را فرض کرده اند، جایی که تاثیرات ΔM_v ناچیز فرض می‌شود [۱۵].

۴-۳-۲- تأثیر چرخه خیس شدن / خشک شدن

بر رفتار تورم

تأثیر ΔM_v بر فاز تداخی که الگوهای آن با واحدهای هیدرولوژیکی مطابقت دارد به عنوان جابجایی شناخته شده است [۶ و ۳۰]. انواع مختلف خاک پس از خیس شدن بیشتر (به عنوان مثال رس مونتموریلونیت) متورم می‌شوند [۳۱، ۳۲ و ۳۳]. چنین تغییر شکل‌هایی، با استفاده از داده‌های زمینی و با استفاده از $DInSAR$ مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته اند [۳۴]. شکل (۳-ب) افزایش حجم خاک را به دلیل رطوبت نشان می‌دهد. اثرات ΔM_v بر روی کوهرنس، به مکانیزم دقیق بستگی دارد: جابجایی یکنواخت منجر به کم شدن همبستگی در کوهرنس نمی‌شود، در حالی که تغییر غیر یکنواخت به راحتی می‌تواند کم شدن همبستگی را نشان دهد. بر این اساس، این تغییر شکل‌ها به انواع مختلف خاک بستگی دارد [۳۳]. علاوه بر این، حساسیت ϕ به این اثرات به شدت به طول موج رادار بستگی دارد [۱۶].

۴-۳-۳- عمق نفوذ ($Pene^1$)

عمق نفوذ سیگنال به نوع خاک و شرایط آن بستگی دارد و نفوذ سیگنال به خاک جذب کننده کم می‌شود [۳۰]. هنگامی که خاک یکنواخت است، می‌توان نفوذ

سیگنال را به عنوان تابعی از طول موج و ثابت دی الکتریک مدل کرد. وابستگی نفوذ سیگنال به رطوبت سطح خاک توسط بسیاری از محققان مدل سازی شده است [۳۵]. فرضیه عمق نفوذ اظهار دارد که با تغییرات رطوبت سطح خاک، عمق نفوذ موج تغییر می‌کند که باعث تغییر در پراکنش موج و در نتیجه‌ی آن تغییر در فاز موج می‌گردد (شکل (۳-ج) را ببینید). ابهام نحوه ارتباط عمق نفوذ با ϕ قابل مشاهده است و غیرقابل پیش بینی بودن کوهرنس مشکل ذاتی در این روش است. به عنوان مثال در شرایط خاک $M_v = 0.4 m^{+3} m^{-3}$ و $0.1 m^{+3} m^{-3}$ مدل هالیکاین^۲ عمق نفوذ ۴ سانتی متر و ۲ سانتی متر در L باند، به ترتیب پیش بینی می‌کند، و مدل پپلینسکی پیش بینی می‌کند که برای دو شرایط به ترتیب ۱۳ سانتی متر و ۵ سانتی متر باشد [۲۸ و ۲۹]. البته تمام مطالعات انجام شده تاکید میکنند که طول موج راداری رفتار متفاوتی در نفوذ در خاک‌های مختلف نشان میدهند [۲۸ و ۳۶].

۴-۳-۴- مکانیسم دی الکتریک (Diet)

بردار موج پیچیده تحت تأثیر ویژگی دی الکتریک یک محیط قرار می‌گیرد: تأثیرات جو اتمسفر بر روی ϕ اندازه‌گیری شده از طریق $DInSAR$ یک مثال می‌باشد. رودانت و همکاران این ایده را که خواص دی الکتریک به طور قابل توجهی به رطوبت سطح خاک بستگی دارد، گسترش داد [۳۷]. دی زن و همکاران (۲۰۱۴) در مدلسازی پراکندگی مرتبه اول کوهرنس را در خاک ناهمگن انجام داد: این مدلسازی با استفاده از تعداد زیادی پراکندگی در خاک انجام شد [۵]. فرضیه مکانیسم دی الکتریک (به صورت شماتیک در شکل (۳-د) نشان داده شده است) بیان می‌کند که تغییرات ثابت دی الکتریک بر موج ارسالی توسط رادار به شدت تاثیر می‌گذارد. پیش بینی شده است که تغییر در خصوصیات

^۲ Hallikainen

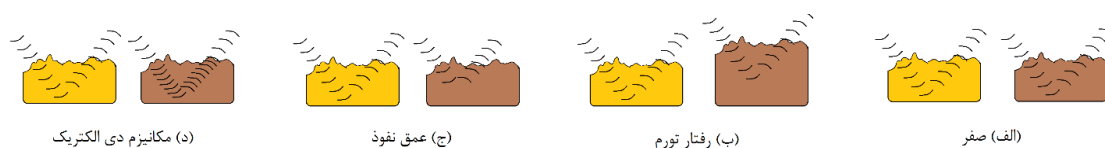
^۱ Penetration

جدول (۲) اطلاعات بیشتر را از خصوصیات اینترفروگرام‌ها شرح می‌دهد. طبق جدول، باز مکانی جفتهای کمپین CanEx-SM10 تقریباً صفر هستند و باز فاصله‌ی زمانی بین جفتهای اینترفروگرام از ۱ تا ۱۰ روز می‌باشد.

دی الکتریک منجر به تغییرات φ می‌شود، حتی اگر هیچ ناهمگنی در خاک وجود نداشته باشد [۵].

۴-۴- پردازش‌های SAR

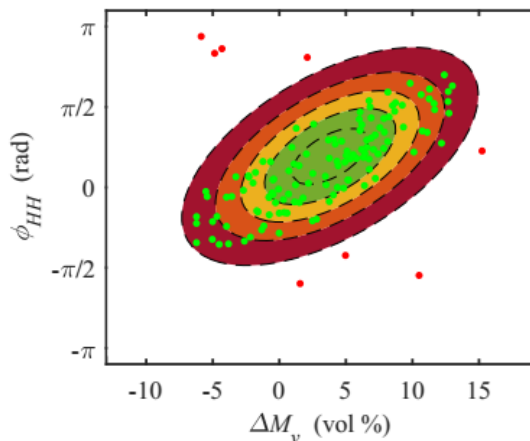
اینترفروگرام‌های کامل برای همه جفتهای احتمالی در کمپین CanEx-SM10 تشکیل شده است که در مجموع ۱۵ مورد اینترفروگرام محاسبه شد.



شکل ۳: نمایش تأثیرات چهار فرضیه بر φ ، قهوه ای روشن: خاک خشک، قهوه ای تیره: خاک مرطوب.

جدول ۲: مشخصات جفتهای تشکیل دهنده تداخل‌نماها (MID: تاریخ تصویر پایه، SID: تاریخ تصویر پیرو، ΔT : فاصله زمانی، PBD: تفاوت پایه مکانی عمودی).

شماره	MID	SID	ΔT (day)	PBD
۱	۲۰۱۰ ژوئن ۰۵	۲۰۱۰ ژوئن ۰۶	۱	.
۲	۲۰۱۰ ژوئن ۰۵	۲۰۱۰ ژوئن ۰۹	۴	.
۳	۲۰۱۰ ژوئن ۰۵	۲۰۱۰ ژوئن ۱۳	۸	.
۴	۲۰۱۰ ژوئن ۰۵	۲۰۱۰ ژوئن ۱۴	۹	.
۵	۲۰۱۰ ژوئن ۰۵	۲۰۱۰ ژوئن ۱۵	۱۰	.
۶	۲۰۱۰ ژوئن ۰۶	۲۰۱۰ ژوئن ۰۹	۳	.
۷	۲۰۱۰ ژوئن ۰۶	۲۰۱۰ ژوئن ۱۳	۷	.
۸	۲۰۱۰ ژوئن ۰۶	۲۰۱۰ ژوئن ۱۴	۸	.
۹	۲۰۱۰ ژوئن ۰۶	۲۰۱۰ ژوئن ۱۵	۹	.
۱۰	۲۰۱۰ ژوئن ۰۹	۲۰۱۰ ژوئن ۱۳	۴	.
۱۱	۲۰۱۰ ژوئن ۰۹	۲۰۱۰ ژوئن ۱۴	۵	.
۱۲	۲۰۱۰ ژوئن ۰۹	۲۰۱۰ ژوئن ۱۵	۶	.
۱۳	۲۰۱۰ ژوئن ۱۳	۲۰۱۰ ژوئن ۱۴	۱	.
۱۴	۲۰۱۰ ژوئن ۱۳	۲۰۱۰ ژوئن ۱۵	۲	.
۱۵	۲۰۱۰ ژوئن ۱۴	۲۰۱۰ ژوئن ۱۵	۱	.



شکل ۴: توزیع داده‌های ΔM_v و ϕ بر توزیع نرمال دومتغیره آنها، در تجزیه و تحلیل‌ها از پراکنده‌های سبز استفاده می‌شود و موارد قرمز به عنوان اجزای مزاحم شناخته می‌شوند و آنها از تجزیه و تحلیل‌ها حذف می‌شوند.

۴-۶- تحلیل بصری رابطه میان ΔM_v و ϕ

نمودارهای نمودار پراکندگی برای پارامترهای ΔM_v و ϕ در پلاریزه‌های مختلف و در انواع مختلف پوشش گیاهی برای تحلیل تجسمی رابطه احتمالی نمایش داده می‌شوند. نمودارهای پراکندگی در بخش نتایج ارائه شده و مورد بحث قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، یک تجزیه و تحلیل کمی از کوهرنس بمنظور تعیین تأثیرات انواع محصولات، ΔM_v و فاصله زمانی بر روی کوهرنس انجام شد که نمودارهای پراکندگی در بخش نتایج ارائه شده و مورد بحث قرار گرفته‌اند. تجزیه و تحلیل کمی کوهرنس برای بررسی منبع خطاها با جزئیات بیشتر انجام شده است که میتوان عوامل تاثیرگذار بر رابطه بین ΔM_v و ϕ را با جزئیات بیشتری بررسی و ارزیابی نمود. در این ارزیابی، با مقایسه بین تغییرات ϕ و کوهرنس مرتبط با نوسانات ΔM_v ، منبع خطاها را می‌توان تخمین زد.

به عنوان مثال، عدم ارتباط بین ΔM_v با هر دو پارامتر ϕ و کوهرنس نشان دهنده‌ی آن است که خطای وارد شده بر اساس تغییر شکل نیست زیرا کوهرنس تحت تأثیر تغییر شکل قرار نمی‌گیرد [۵ و ۱۱]. اما، اگر همبستگی بین کوهرنس و ΔM_v زیاد و بین ΔM_v و ϕ

۴-۵- فیلتر آماری جهت حذف سهم اجزای مزاحم

در این تحقیق یک فیلتر آماری مبتنی بر توزیع نرمال دو متغیره در نظر گرفته شده است تا با حذف داده‌های نویزی، سهم اجزای مزاحم را حذف کند. در تئوری و آمار احتمال، بعد بالاتر از توزیع‌های نرمال یک بعدی، توزیع نرمال چند متغیره است. از توزیع نرمال چند متغیره می‌توان برای توصیف مجموعه‌ای از متغیرهای مقدار واقعی استفاده کرد که احتمالاً می‌توانند با هم همبستگی داشته باشند [۳۸ و ۳۹]. توزیع نرمال دو متغیره نوعی توزیع طبیعی دو متغیره است که در این مطالعه برای شناسایی داده‌های نویزی استفاده شده است [۳۹]. شکل (۴) چگالی دو متغیره رسم شده بین ΔM_v و ϕ بیضی را نشان می‌دهد. هرچند این نمودار مربوط به توزیع دو متغیره‌ی ϕ و تغییرات رطوبت در یک زمین بدون پوشش گیاهی با فاصله زمانی بسیار کوتاه می‌باشد (بهترین حالت ممکن می‌باشد). از این فیلتر تنها در جهت حذف سهم اجزای مزاحم استفاده شده است و مدلسازی به استفاده از یک تابع رگرسیونی که در ادامه توضیح داده خواهد شد استفاده شده است. توزیع نرمال دو متغیره بین ΔM_v و ϕ ، تابع چگالی احتمال این پارامترها را نشان می‌دهد که داده‌های نویزی را می‌توان با در نظر گرفتن مقدار درست برای پارامتر تصمیم‌گیری α ، به راحتی حذف کرد. شکل (۴) توزیع رطوبت سطح خاک و ϕ و توزیع نرمال دو متغیره این داده‌ها را نشان می‌دهد، که نشان می‌دهد نقاط پراکنده سبز در منطقه توزیع نرمال دو متغیره می‌باشند و به عنوان داده‌های نرمال در تجزیه و تحلیل استفاده شده‌اند و نقاط پراکنده قرمز به عنوان داده‌های نویزی شناخته شده و برای تجزیه و تحلیل در نظر گرفته نشده است. پارامتر تصمیم‌گیری α مربوط به نرمال بودن در $\alpha = 0.05$ و فاصله اطمینان ۹۵٪ برای حذف سهم اجزای مزاحم در همه تحلیل‌ها از جمله تحلیل‌های پراکندگی، برآورد مدل و روند ارزیابی در نظر گرفته شده است.

گیاهی از مدل رگرسیونی حذف گردیده است. برای برآورد پارامترهای مدل، از روش حداقل مربعات تعمیم یافته (GLS^1) در مدل رگرسیون خطی استفاده شده است [۴۱]. در این فرایند، بمنظور مدلسازی خطاهای رگرسیون سازی به یک ماتریس کوواریانس نیاز است [۷]، که همانند مطالعات قبلی مدلسازی شده است [۲۶]. در فرآیند کالیبراسیون، از فیلتر اماری معرفی شده در این تحقیق، جهت حذف سهم اجزای مزاحم استفاده شده است.

۴-۷-۳- ارزیابی مدل رگرسیونی

بمنظور ارزیابی مدل رگرسیونی همانند مطالعات قبلی، شاخص‌های آماری ضریب تعیین^۲ (R^2)، ریشه مربع میانگین خطا^۳ ($RMSE$)، خطای انحراف ($bias$) و انحراف معیار استاندارد^۴ ($StdV$) با مقایسه φ مشاهده شده و φ برآورد شده از طریق مدل رگرسیون تنظیم شده محاسبه شده است [۹]. در فرایند محاسبه‌ی شاخص‌های آماری، فاز اندازه‌گیری زمینی با فاز تخمین زده شده با استفاده از مدل رگرسیونی مقایسه شده است.

۵- نتایج و بحث

در این بخش ابتدا نتایج به همراه تحلیل آنها آورده شده است، سپس عوامل مزاحم در بررسی رابطه بین ΔM_v و φ بحث شده است.

۵-۱- تجزیه و تحلیل رابطه میان ΔM_v و φ

بصورت بصری

شکل (۵) نمودارهای پراکندگی بین پارامترهای ΔM_v و φ را برای قطبیدگی‌های مختلف بر زمین‌هایی با پوشش‌های گیاهی مختلف نمایش می‌دهند. این نمودارهای پراکندگی بمنظور تحلیل بصری رابطه بین

کم باشد، میتوان منبع کاهش ارتباط بین ΔM_v و φ ناشی از تغییر شکل دانست [۵ و ۷].

۴-۷-۲- مدل رگرسیونی ارائه شده در این تحقیق و کالیبراسیون آن

رابطه بین ΔM_v و φ با یک مدل رگرسیون خطی ایجاد می‌شود. بنابراین فرض می‌شود که φ را می‌توان با یک مدل رگرسیون ساده به عنوان تابعی از ΔM_v و یک توصیف کننده پوشش گیاهی در فاصله زمانی کوتاه مدل نمود [۷]. این رابطه سطح معناداری بالاتری برای برای تغییرات قابل توجه رطوبت سطح خاک را از خود نشان می‌دهد. هرچند در این تحقیق، بیشتر مزارع یا کاملاً بدون پوشش بوده اند یا تا حد بسیار کمی با بقایای پوشش گیاهی پوشیده شده‌اند [۲۷]. در نتیجه همانند تحقیق در کمپین $CanExSM10$ پارامتر تغییرات پوشش گیاهی از مدل حذف شده است [۷ و ۱۱]. علاوه بر پوشش ناچیز زمین، همچنین فاصله زمانی بسیار کوتاه که باعث میشوند تغییرات پوشش گیاهی بسیار ناچیز باشد، و در نتیجه این تغییرات اصطلاحاً برای باند L نامرئی باشند [۲۴ و ۴۰].

۴-۷-۱- مدل رگرسیونی

رابطه ارائه شده در تحقیق به منظور مدلسازی خطی رابطه ΔM_v و φ در این تحقیق در نظر گرفته شده است [۷] (رابطه (۴)):

$$\varphi_{ij} = \beta_{\Delta M_v} \Delta M_v + \beta_{\Delta V} \Delta V + \epsilon_{ij} \quad \text{رابطه (۴)}$$

جاییکه ضریب $\beta_{\Delta M_v}$ نشان‌دهنده تأثیرات ΔM_v بر φ ، و ضریب $\beta_{\Delta V}$ نشان‌دهنده تأثیرات ΔM_v بر φ می‌باشد. ϵ_{ij} پارامتر خطای اینترفروگرام تشکیل شده بین تصاویر i و j را مدل می‌کند.

۴-۷-۲- برآورد پارامترهای مدل رگرسیونی

برای کالیبره نمودن مدل ۳-۳، شیب‌های $\beta_{\Delta M_v}$ و $\beta_{\Delta V}$ باید تخمین زده شوند تا مدل رگرسیون تنظیم شود. فرایند برآورد، نیاز به داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی ΔM_v و تغییرات پوشش گیاهی به همراه داده محاسبه شده φ دارد [۷ و ۱۳]. هرچند در این مطالعه همانطور که در بخش‌های قبل توضیح داده شد جمله پوشش

^۱ Generalized least square

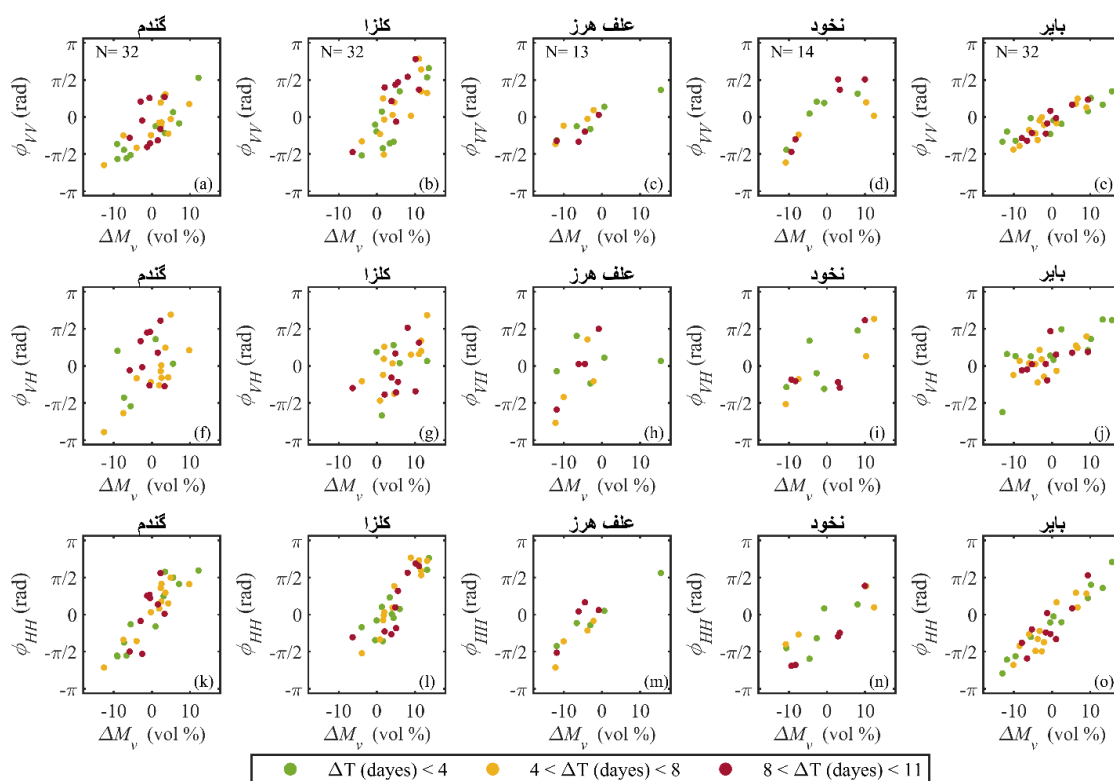
^۲ Coefficient of determination

^۳ Root mean square error

^۴ Standard deviation

متفاوت جدا رسم شده اند. فیلتر توضیح داده شده در بخش روش بمنظور شناسایی و حذف اثرات اجزای مزاحم اعمال شده است. با توجه به شکل (۵)، یک رابطه مثبت و تقریباً خطی را می‌توان بین ΔM_v و ϕ به مشاهده کرد. محققان در مطالعات قبلی نتایج مشابهی را نشان داده اند [۷، ۱۱ و ۱۲].

ΔM_v و ϕ رسم شده اند که بخوبی این رابطه را نشان می‌دهند. بمنظور بررسی جزئی‌تر، پلات‌ها برای قطبیدگی‌های مختلف نشان داده شده‌اند که رفتارهای متفاوتی را در قطبیدگی‌های مختلف نشان می‌دهند. همچنین بمنظور بررسی تاثیر پوشش‌های گیاهی مختلف بر رابطه، نمودارها برای پوشش‌های گیاهی



شکل ۵: توزیع داده‌های ΔM_v و ϕ را در کمپین CanEx-SM10 نشان می‌دهد، پایه‌های زمانی مختلف (ΔT) با رنگ‌های متفاوت به تصویر کشیده شده اند.

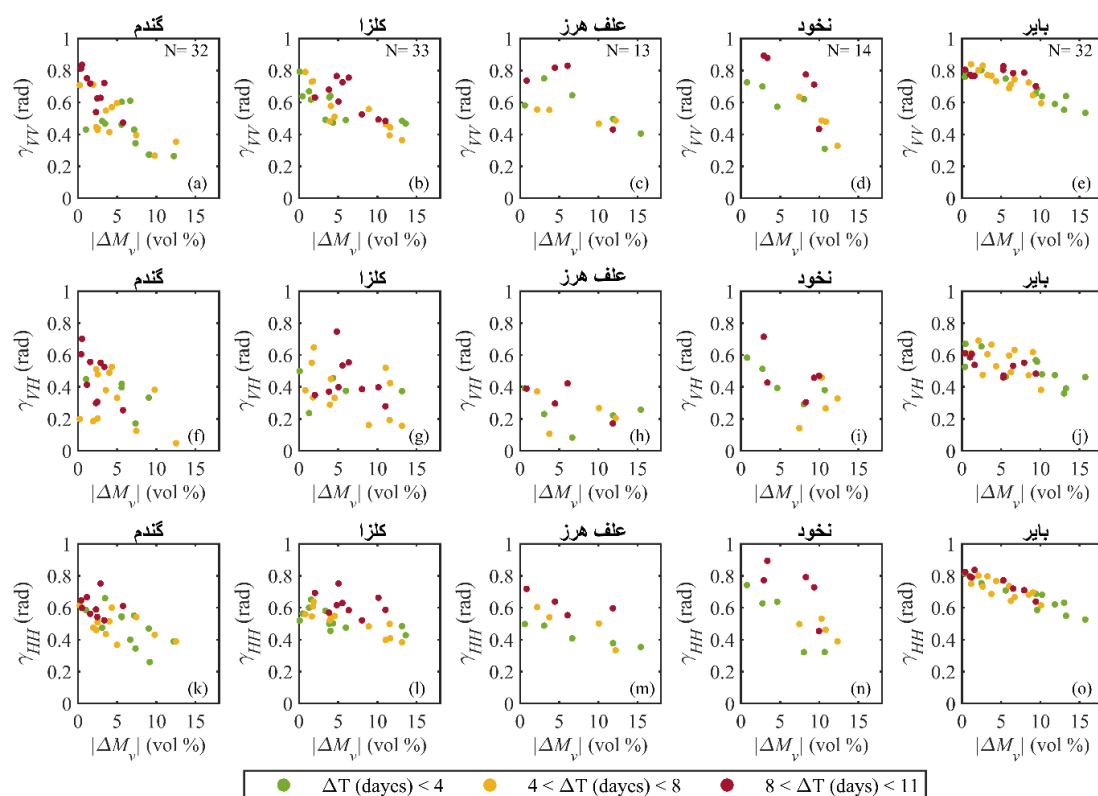
در شکل (۵) نیز تأثیر پوشش‌های گیاهی مختلف بر رابطه بین ΔM_v و ϕ نشان داده شده است. میتوان مشاهده کرد که پراکندگی داده‌ها برای محصولات بترتیب کلزا < نخود < فرنگی < علف‌های هرز < گندم می‌باشد. نتایج نشان میدهند که رابطه بین ΔM_v و ϕ برای پراکندگی‌های مرتبط با زمین‌های کشاورزی بدون پوشش در یک رابطه الگوی خطی با همبستگی زیاد است. در مقایسه بین پلاریزاسیون‌های مختلف در

با مقایسه فاصله زمانی مختلف بر رابطه بین ΔM_v و ϕ ، میتوان مشاهده کرد که افزایش فاصله زمانی باعث پراکندگی بیشتر نقاط نمودارهای پراکندگی می‌شود. هرچند، به دلیل فاصله زمانی بسیار کوتاه در کمپین CanEx-SM10 (فاصله‌های زمانی کمتر از ۱۱ روز است)، تأثیرات این پارامتر در برخی نمودارهای پراکندگی مشخص است و در برخی دیگر روند خاصی را نشان نمی‌دهد.

مختلف نمایش داده شده است. در این نمودارها، فاصله-های زمانی مختلف با رنگ‌های مختلف مشخص شده است. محققان در مطالعات قبلی نشان داده اند که کوهرنس با ΔM_v رابطه معکوس و تقریباً خطی دارد، همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود [۷، ۴۲ و ۴۳]. در این تجزیه و تحلیل همچنین، همانند شیوه تجزیه و تحلیل پراکندگی‌های ΔM_v و فازتداخلی، سهم اجزای مزاحم با استفاده از فیلتر معرفی شده در بخش-های قبلی شناسایی و حذف می‌شوند.

شکل (۵)، مشاهده شده است که پراکندگی‌ها در قطبیدگی VH ارتباط کمتری بین ΔM_v و φ نشان می‌دهد اما، این ارتباط در قطبیدگی VV و HH منسجم‌تر و همبستگی بسیار بالاتری دارد. این نشان می‌دهد که قطبیدگی‌های هم قطبش اطلاعات و تأثیرپذیری بیشتری از ΔM_v دارند.

۵-۲- تجزیه و تحلیل رابطه میان تغییرات رطوبت سطح خاک همدوسی بصورت بصری
شکل (۶) تأثیر ΔM_v بر همدوسی به صورت بصری در انواع پوشش‌های گیاهی مختلف و در قطبیدگی‌های



شکل ۶: توزیع داده‌های ΔM_v و همدوسی را در کمپین *CanEx-SM10* نشان می‌دهد، پایه‌های زمانی مختلف (ΔT) با رنگ‌های متفاوت به تصویر کشیده شده اند.

های گیاهی مختلف مشاهده می‌شود که مقادیر همدوسی گندم > علف هرز > کلزا > نخود > زمین بایر می‌باشد. مطابق شکل (۶)، این می‌تواند مشاهده شود که مزارع نخود فرنگی، علف‌های هرز و گندم در کمپین *CanEx-SM10*، به ترتیب همبستگی کمتری در رابطه

با توجه به این نمودارها، با افزایش فاصله زمانی، شاهد کاهش همبستگی بین روابط ΔM_v و همدوسی نیز می‌باشیم. عوامل مرتبط با کاهش همبستگی و خطاها را در ادامه بطور مفصل بحث شده است. با توجه به جدول (۳) و شکل (۶) و با مقایسه همدوسی در پوشش-

همدوسی در زمین‌های کشاورزی با پوشش گیاهی بسیار زیاد است که این نشان می‌دهد که اثرات مختلف پوشش گیاهی در زمان تصویربرداری بر روی همدوسی قابل توجه است. بنابراین، توزیع پراکنده‌ها برای همدوسی در مزارع زراعی بسیار بیشتر از مزارع بایر است. ϕ و همدوسی در قطبیدگی‌های مختلف رفتار یکسانی دارند، به عنوان مثال، نمودارهای نمودار پراکندگی مرتبط با VH پراکندگی بیشتری نشان می‌دهند. محققان در مطالعات قبلی نشان داده اند که طول موج‌های بلندتر (یا فرکانس‌های پایین‌تر) کمتر تحت تأثیر تغییرات بسیار کم رشد گیاه قرار می‌گیرند [۲۸، ۳۲ و ۴۴]. نتایج این مطالعه کاملاً مطابق با مطالعات قبلی است.

بین ΔM_v و همدوسی را نشان داده‌اند که بدلیل وجود پوشش ناچیز زمین‌ها می‌باشد که باعث می‌شود همدوسی کاهش پیدا کند. در این تحلیل می‌توان نشان داد که پراکندگی‌های مرتبط با زمین بایر دارای همدوسی بالاتر و همچنین همبستگی بیشتری هستند که بدلیل تغییرات بسیار کم پوشش سطح می‌باشد. همدوسی و ϕ در قطبیدگی‌های مختلف به طور مشابه رفتار میکنند و این مشاهده می‌شود که همدوسی مربوط به قطبیدگی‌های VV و HH همبستگی بیشتری را نسبت به قطبیدگی VH نشان می‌دهد. بنابراین، با توجه به نتایج پراکندگی ϕ و همدوسی، می‌توان نتیجه گرفت که مشاهدات در قطبیدگی‌های هم‌قطبش شامل اطلاعات بیشتری برای ΔM_v می‌باشند. طبق جدول (۳)، تفاوت بین کمترین و بالاترین مقادیر

جدول (۳): بیشترین و کمترین مقادیر همدوسی در زمین‌های مختلف و با پایه‌های زمانی مختلف (ΔT)

	پایه‌های زمانی	گندم		کلزا		علف هرز		نخود		بایر	
		بیشتر	کمتر	بیشتر	کمتر	بیشتر	کمتر	بیشتر	کمتر	بیشتر	کمتر
	(روز)										
CanEx-SM10	$\Delta T < 4$	۰.۶۱	۰.۲۶	۰.۷۹	۰.۴۷	۰.۷۵	۰.۴۱	۰.۷۳	۰.۳۱	۰.۸۰	۰.۶۱
	$4 < \Delta T < 8$	۰.۷۱	۰.۲۷	۰.۷۹	۰.۳۶	۰.۵۶	۰.۴۷	۰.۶۴	۰.۳۳	۰.۸۴	۰.۵۹
	$8 < \Delta T < 11$	۰.۸۴	۰.۴۷	۰.۷۶	۰.۴۸	۰.۸۳	۰.۴۳	۰.۸۹	۰.۴۳	۰.۸۳	۰.۷۰
	$\Delta T < 4$	۰.۶۰	۰.۲۰	۰.۶۵	۰.۲۳	۰.۵۵	۰.۲۶	۰.۷۴	۰.۴۵	۰.۶۷	۰.۳۶
	$4 < \Delta T < 8$	۰.۶۳	۰.۱۵	۰.۷۵	۰.۲۶	۰.۴۷	۰.۲۱	۰.۵۶	۰.۲۴	۰.۶۹	۰.۳۸
	$8 < \Delta T < 11$	۰.۴۳	۰.۱۸	۰.۴۳	۰.۳۷	۰.۴۲	۰.۱۷	۰.۷۱	۰.۳۰	۰.۶۱	۰.۴۶
	$\Delta T < 4$	۰.۶۶	۰.۲۶	۰.۶۵	۰.۴۳	۰.۵۰	۰.۳۵	۰.۷۴	۰.۳۲	۰.۸۲	۰.۵۳
	$4 < \Delta T < 8$	۰.۶۱	۰.۳۷	۰.۶۴	۰.۳۸	۰.۶۰	۰.۳۳	۰.۵۳	۰.۳۹	۰.۸۰	۰.۶۱
	$8 < \Delta T < 11$	۰.۷۵	۰.۵۲	۰.۷۵	۰.۵۲	۰.۷۲	۰.۵۵	۰.۸۹	۰.۴۵	۰.۸۴	۰.۶۴

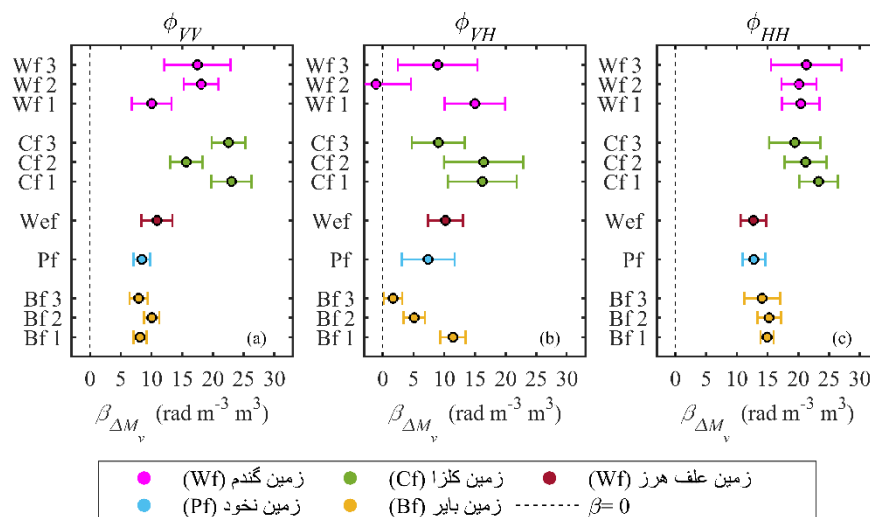
۵-۳-۱- کالیبراسیون مدل رگرسیونی

همانطور که بحث شد تنها ضرایب رگرسیون رطوبت خاک $\beta_{\Delta M_v}$ تخمین زده شده است زیرا جمله پوشش گیاهی را در رابطه (۴) را ناچیز در نظر گرفتیم. ضرایب برآورد شده $\beta_{\Delta M_v}$ برای انواع مختلف پوشش‌های گیاهی برای قطبیدگی‌های مختلف در کمپین CanEx-SM10 در شکل (۷) نمایش داده شده است. همانطور که

۵-۳-۲- مدل رگرسیونی

در این بخش ابتدا نتایج کالیبراسیون مدل رگرسیونی آورده شده و راجع به نتایج بحث شده است. سپس در بخش بعدی این مدل را با استفاده از پارامترهای آماری ارزیابی کرده‌ایم.

مشاهده می‌شود تمام ضرایب مثبت هستند، بجز یکی از آنها که در قطبیدگی VH می‌باشد، که در حالت کلی نشان دهنده‌ی یک رابطه مثبت بین ΔM_v اندازه‌گیری شده‌ی زمینی و ϕ است. برای مثال با ضریب $\beta_{\Delta M_v}$



شکل ۷: ضرایب کالیبراسیون مربوط به جمله رطوبت خاک در کمپین CanEx-SM10

از باند L در کمپین CanEx-SM10 استفاده شد است، نتایج دقت مناسبی را برای زمین‌های پوشش گیاهی نشان می‌دهد، که به دلیل نفوذ پذیری بالای باند L همچنین فاصله‌های زمانی بسیار کوتاه می‌باشد.

۴-۵- تفاوت‌های میان قطبیدگی‌های مختلف

اثر ΔM_v و ΔV بر روی همه قطبیدگی‌ها یکسان است، اما رفتار موج در قطبیدگی‌های مختلف در این تغییرات متفاوت می‌باشد، که به دلیل فیزیک پراکنش موج در قطبیدگی‌های مختلف است. به عنوان مثال، در بخش-های تحلیل بصری پراکندگی‌های ϕ و همدوسی مشاهده شد که در قطبیدگی VH ، نوسانات ϕ ارتباط کمتری با ΔM_v نسبت به ϕ در قطبیدگی‌های VV و VH نشان می‌دهد. این نتایج با نتایج مطالعات قبلی مطابقت دارد [۷ و ۱۱]. مشاهده می‌گردد که قطبیدگی‌های مختلف از انواع مختلف محصولات تأثیرپذیر می‌باشد، برای مثال، قطبیدگی HH در زمین بایر با $RMSE$ ۰/۶۱ رادیان، ضریب تعیین ۰/۷۲/۹، خطای ۰/۰۲- رادیان، و انحراف معیار ۰/۶۲ رادیان

۵-۳-۲- ارزیابی مدل رگرسیونی با پارامترهای آماری

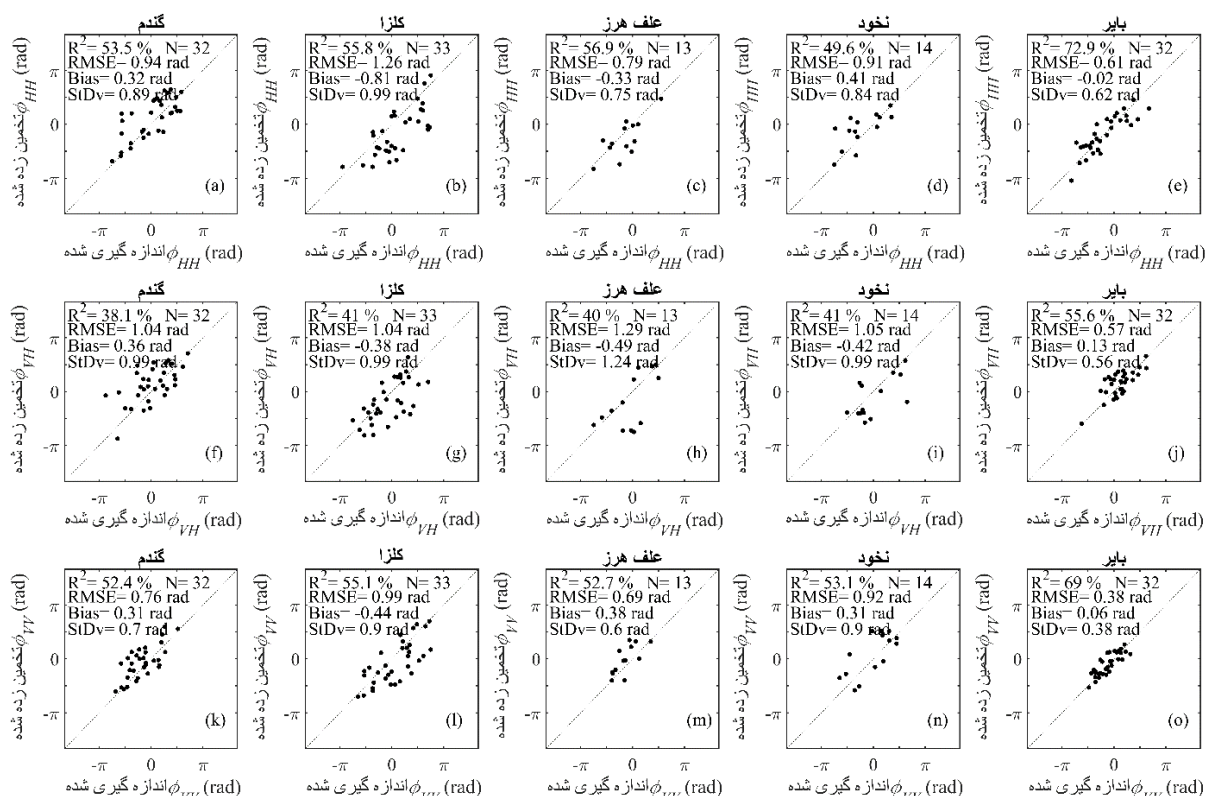
شکل (۸) مقایسه بین ϕ برآورد شده با ϕ حاصل از تداخل‌ها را برای کمپین CanEx-SM10 با استفاده از رگرسیون خطی نشان می‌دهد. جدول (۴) دقت رگرسیون مدل را در کمپین CanEx-SM10 برای انواع پوشش‌های گیاهی مختلف به طور جداگانه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مدل رگرسیون نتایج بهتری را برای زمین‌های بایر ارائه داده است ($RMSE$ از ۰/۳۸ رادیان تا ۰/۶۱ رادیان، R^2 از ۵۵٪ تا ۷۲٪ با توجه به قطبیدگی‌های مختلف، $bias$ از ۰/۰۲ رادیان تا ۰/۰۶ رادیان و $StDv$ از ۰/۳۸ رادیان تا ۰/۶۲ رادیان). در مقایسه قطبیدگی‌های مختلف، نتایج مرتبط با قطبیدگی‌های VV و HH نیز دقت بهتری را نشان داده اند ($RMSE$ از ۰/۳۸ رادیان تا ۰/۹۹ رادیان، R^2 از ۴۹٪ تا ۷۲٪ با توجه به قطبیدگی‌های مختلف، $bias$ از ۰/۰۲ رادیان تا ۰/۴۴ رادیان و $StDv$ از ۰/۳۸ رادیان تا ۰/۹ رادیان). دقت پایین تر در قطبش VH نتیجه همبستگی کمتر در نتایج بررسی‌های قبلی می‌باشد. از انجایی که

کمپین، ضرایب مرتبط با قطبش VH تغییرات بیشتری دارند، که بی ثباتی را در رابطه بین ϕ در قطبیدگی VH و نشان می‌دهد. در بخش ارزیابی ضرایب کالیبراسیون تخمین زده شده، نتایج و دقت‌های قابل اطمینان‌تر در قطبیدگی‌های هم‌قطبش VV و HH مرتبط هستند. قطبش VH نتایج ناپایداری را ارائه می‌دهد، که نتیجه‌ی پراکندگی بیشتر در بررسی بصری در نمودارهای پراکندگی همدوسی و ϕ می‌باشد.

بهترین عمل کرد را داشته است در حالی که بدتری عملکرد مربوط به قطبیدگی VH در زمین با پوشش ناچیز گندم با $RMSE$ ۱٫۰۴ رادیان، ضریب تعیین ۰٫۳۸۱٪، خطای ۰٫۳۶ رادیان، و انحراف معیار ۰٫۹۹ رادیان می‌باشد. در فرآیند کالیبراسیون در کمپین $CanEx-SM10$ باند L ، ضرایب تخمینی مدل رگرسیونی در قطبیدگی‌های VV و HH به طور مشابه رفتار کرده‌اند، اما مقادیر ضرایب در HH بیشتر از VV است. در این

جدول ۴: دقت برآورد ضرایب کالیبراسیون در کمپین $CanEx-SM10$

	#N	HH				VH				VV			
		R2 (%)	RMSE (rad)	bias (rad)	StDv (rad)	R2 (%)	RMSE (rad)	Bias (rad)	StDv (rad)	R2 (%)	RMSE (rad)	Bias (rad)	StDv (rad)
گندم	۳۲	۵۳٫۵	۰٫۹۴	۰٫۳۲	۰٫۸۹	۳۸٫۱	۱٫۰۴	۰٫۳۶	۰٫۹۹	۵۲٫۴	۰٫۷۶	۰٫۳۱	۰٫۷۰
کلزا	۳۳	۵۵٫۸	۱٫۲۶	-۰٫۸۱	۰٫۹۹	۴۱٫۰	۱٫۰۴	-۰٫۳۸	۰٫۹۹	۵۵٫۱	۰٫۹۹	-۰٫۴۴	۰٫۹۰
علف هرز	۱۳	۵۶٫۹	۰٫۷۹	-۰٫۳۳	۰٫۷۵	۴۰٫۰	۱٫۲۹	-۰٫۴۹	۰٫۲۴	۵۲٫۷	۰٫۶۹	۰٫۳۸	۰٫۶۰
نخود	۱۴	۴۹٫۶	۰٫۹۱	۰٫۴۱	۰٫۸۴	۴۱٫۰	۱٫۰۵	-۰٫۴۲	۰٫۹۹	۵۳٫۱	۰٫۹۲	۰٫۳۱	۰٫۹۰
بایر	۳۲	۷۲٫۹	۰٫۶۱	-۰٫۰۲	۰٫۶۲	۵۵٫۶	۰٫۵۷	۰٫۱۳	۰٫۵۶	۶۹٫۰	۰٫۳۸	۰٫۰۶	۰٫۳۸



شکل ۸: نمودار رگرسیون میان فاز محاسبه شده توسط تصاویر رادار و فاز تخمین زده شده توسط مدل کالیبره شده رگرسیونی

در کمپین CanEx-SM10

۵-۵- منابع خطا در مدلسازی

ϕ نه تنها تحت تأثیر ΔM_v است بلکه تحت تأثیر تمام تغییراتی است که در طول فاصله زمانی بر سطح زمین رخ داده نیز می‌باشد، که می‌تواند ارتباط بین ϕ و ΔM_v را کاهش دهد، و در نتیجه، خطاهای بیشتری در تخمین ϕ با استفاده از مدل رگرسیون نتیجه دهد. در این بخش، ابتدا خطاهایی که مربوط به اجزای مؤلفه فازی، مورد بحث قرار می‌گیرند. سپس، خطاهای مرتبط با نحوه مدلسازی انجام گرفته در این تحقیق (مدلسازی ϕ به عنوان یک تابع رگرسیون ساده از ΔM_v و پوشش گیاهی) بحث شده است.

در این مطالعه، اجزای ϕ_{atm_d} ، ϕ_{topo_res} ، ϕ_{def} ، ϕ_{noise} و ϕ_{orb_d} در رابطه تجزیه ϕ (رابطه (۳)) ناچیز در نظر گرفته شدند، و آنها برای کاهش پیچیدگی از رابطه ϕ $DInSAR$ حذف شده و مدل رگرسیون (رابطه (۴)) در این تحقیق معرفی شده است. اگرچه

سهم اجزای مزاحم با استفاده از فیلتر اماری معرفی شده شناسایی و حذف شده‌اند، و بدین ترتیب تأثیر نمونه‌های نویزی در محاسبات و تحقیق کاهش یافته است. خطای ϕ_{topo_res} به دقت DEM و وضوح DEM بستگی دارد و این خطا می‌تواند بصورت قابل توجهی ϕ تغییر دهد [۲۰]. خطای ناشی از تأخیر اتمسفر (ϕ_{atm_d}) به شرایط و بخار آب موجود در جو بستگی دارد، که این خطا می‌تواند بر روی سیگنال ϕ تأثیر بگذارد [۲۲ و ۴۵]. این خطا همچنین به فرکانس حسگر بستگی دارد، چنانکه برای فرکانس‌های پایین‌تر، بسیار شدیدتر است [۱ و ۲۲]. با توجه به هدف این مطالعه، در طی فاصله زمانی دوره‌هایی از بارش وجود داشته است، که باعث تغییر در شرایط جوی می‌شود و منجر به کاهش ارتباط بین ΔM_v و ϕ می‌شود. عدم مدلسازی پارامترهایی همچون تغییر در سرعت و جهت باد، به ویژه در مناطقی که پوشش گیاهی دارند،

میتوانند یک عامل کاهش دهنده‌ی دقت باشد. در نتیجه، اگرچه این مدل نتایج مطلوبی را برای زمین‌های با پوشش گیاهی اندک فراهم می‌کند، مدل رگرسیون خطی قادر به تخمین دقیق φ در زمین‌های با پوشش گیاهی مخصوصاً با فاصله زمانی طولانی نبوده است. این نتایج کاملاً با مطالعات قبلی سازگار است [۸ و ۴۴].

۶- نتیجه‌گیری

نقشه‌های جابه‌جایی و نرخ جابه‌جایی به منظور ارزیابی میزان خطرات و کمک به تصمیم‌گیری در مدیریت بحران استفاده می‌شود. در نتیجه بررسی و تحقیق راجع به استفاده از تداخل‌سنجی راداری به منظور تهیه نقشه جابجایی بسیار امری حیاتی می‌باشد. در این میان بسیاری از پژوهشگران به بررسی عوامل تأثیر گذار بر دقت استفاده از روش تداخل‌سنجی راداری (به منظور برآورد جابجایی) پرداخته‌اند. تداخل‌سنجی راداری یک روش سنجش از دوری است که می‌تواند تغییرات و جابه‌جایی‌های سطح زمین را با دقت زیر سانتی‌متر با استفاده از ترکیب دو تصویر با اختلاف زمانی یا مکانی مشخص برآورد کند. عوامل بسیاری از جمله توپوگرافی منطقه، اتمسفر، نویز، تغییر پارامترهای پویای سطح زمین (رشد پوشش گیاهی، ΔM_v) و غیره بر دقت برآورد جابجایی تأثیرگذار هستند.

در این تحقیق تأثیر تغییرات رطوبت بر φ در باند L در قطبیدگی‌های مختلف مورد بررسی و بحث قرار گرفته است. در این راستا یک مدلسازی رگرسیونی بین φ و ΔM_v با در نظر گرفتن چندین فرضیه انجام شده است. φ از طریق ΔM_v در باند L با استفاده از مدل رگرسیونی تخمین زده شده است. داده‌های منتسب به سنجنده‌ی UAVSAR در باند L اخذ شده بر روی سایت تحقیقاتی کمپین CanEx-SM10 برای مقایسه نتایج استفاده شد. نتایج نشان داد که این مدل توانایی برآورد قابل اعتماد

مراجع

φ در زمین‌های بایر مخصوصاً برای فاصله زمانی کوتاه‌تر (که تغییر شکل و سایر تغییرات وابسته به فاصله زمانی ناچیز است) را داراست. همچنین کمپین CanEx-SM10 دارای باند L می‌باشد که به دلیل طول موج بلند و فاصله زمانی کوتاه نتایج مناسبی را در تخمین φ در مزارع با پوشش گیاهی بسیار ناچیز ارائه داده است. بهترین نتیجه مدل رگرسیونی در قطبیدگی‌های VV و HH در زمین بایر با $RMSE$ ۰/۳۸ و ۰/۶۱ رادیان و با ضریب همبستگی ۰/۶۹ و ۰/۷۲۹ می‌باشند، و بدترین نتایج مربوط به قطبیدگی VH و در زمین با پوشش ناچیز گندم با $RMSE$ ۱/۰۴ رادیان و ضریب همبستگی ۰/۳۸ بدست آمد. که این نتایج می‌تواند به دلیل عدم تأثیرگذاری تغییرات بسیار کم پوشش گیاهی بر طول موج‌های طولانی‌تر مانند باند L برای فاصله‌های زمانی کوتاه باشد. عوامل خطا در این تحقیق، که باعث کاهش دقت تخمین فاز و مدل رگرسیونی شده است، در دو گروه فهرست شده اند، (۱) فرضیات اولیه، (۲) عدم مدلسازی بسیاری از پارامترهای موثر مانند زبری، رفتار تورم و تغییر در شرایط باد.

ΔM_v دارای تأثیرات غیر قابل انکار بر φ است که می‌تواند بشدت تخمین جابجایی را تحت تأثیر قرار دهد، چراکه این خطا می‌تواند از خطاهای اتمسفر، باقیمانده-ی توپوگرافی، و همچنین نویز بیشتر باشد و یا می‌تواند در برخی موارد از اندازه‌ی جابجایی یا نرخ آن نیز بزرگتر باشد. بطور کلی، در این تحقیق نشان داده شد که φ تابعی مستقیم و رگرسیونی از ΔM_v می‌باشد، در نتیجه، در مواردی که بررسی جابجایی و نرخ جابجایی مقادیر کوچکی می‌باشند، تغییرات شدید رطوبت سطحی خاک می‌تواند خطای قابل توجهی حتی به بزرگی جابجایی یا نرخ آن به محاسبات وارد نماید.

- [2] D. Massonnet et al., "The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry," *Nature*, vol. 364, no. 6433, pp. 138–142, 1993.

- [1] R. F. Hanssen, *Radar interferometry: data interpretation and error analysis*, vol. 2. Springer Science & Business Media, 2001.

- [3] R. F. Hanssen, T. M. Weckwerth, H. A. Zebker, and R. Klees, "High-resolution water vapor mapping from interferometric radar measurements," *Science* (80-.), vol. 283, no. 5406, pp. 1297–1299, 1999.
- [4] R. Bürgmann, P. A. Rosen, and E. J. Fielding, "Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation," *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, vol. 28, no. 1, pp. 169–209, 2000.
- [5] F. De Zan, A. Parizzi, P. Prats-Iraola, and P. López-Dekker, "A SAR interferometric model for soil moisture," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 52, no. 1, pp. 418–425, 2013.
- [6] A. K. Gabriel, R. M. Goldstein, and H. A. Zebker, "Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry," *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 94, no. B7, pp. 9183–9191, 1989.
- [7] S. Zwieback, S. Hensley, and I. Hajnsek, "Assessment of soil moisture effects on L-band radar interferometry," *Remote Sens. Environ.*, vol. 164, pp. 77–89, 2015.
- [8] F. De Zan and G. Gomba, "Vegetation and soil moisture inversion from SAR closure phases: First experiments and results," *Remote Sens. Environ.*, vol. 217, pp. 562–572, 2018.
- [9] S. Ranjbar, A. Zarei, M. Hasanlou, M. Akhoondzadeh, J. Amini, and M. Amani, "Machine learning inversion approach for soil parameters estimation over vegetated agricultural areas using a combination of water cloud model and calibrated integral equation model," *J. Appl. Remote Sens.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–17, 2021, doi: 10.1117/1.JRS.15.018503.
- [10] S. Ranjbar and M. Akhoondzadeh, "Volumetric soil moisture estimation using Sentinel 1 and 2 satellite images," *kntu-jgit*, vol. 7, no. 4, pp. 215–232, Mar. 2020, doi: 10.29252/jgit.7.4.215.
- [11] S. Zwieback, S. Hensley, and I. Hajnsek, "Soil moisture estimation using differential radar interferometry: Toward separating soil moisture and displacements," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 55, no. 9, pp. 5069–5083, 2017.
- [12] B. Barrett, P. Whelan, and E. Dwyer, "Detecting changes in surface soil moisture content using differential SAR interferometry," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 34, no. 20, pp. 7091–7112, 2013.
- [13] S. Zwieback, S. Hensley, and I. Hajnsek, "A polarimetric first-order model of soil moisture effects on the DInSAR coherence," *Remote Sens.*, vol. 7, no. 6, pp. 7571–7596, 2015.
- [14] F. De Zan, M. Zonno, and P. Lopez-Dekker, "Phase inconsistencies and multiple scattering in SAR interferometry," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 53, no. 12, pp. 6608–6616, 2015.
- [15] A. Ferretti, A. Fumagalli, F. Novali, C. Prati, F. Rocca, and A. Rucci, "A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 49, no. 9, pp. 3460–3470, 2011.
- [16] S. Hensley et al., "Effect of soil moisture on polarimetric-interferometric repeat pass observations by UAVSAR during 2010 Canadian soil moisture campaign," in *2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2011, pp. 1063–1066.
- [17] Y. Eshqi Molan and Z. Lu, "Can InSAR Coherence and Closure Phase Be Used to Estimate Soil Moisture Changes?," *Remote Sens.*, vol. 12, no. 9, p. 1511, 2020.
- [18] S. Cloude, *Polarisation: applications in remote sensing*. OUP Oxford, 2009.
- [19] S. R. Cloude and K. P. Papathanassiou, "Polarimetric SAR interferometry," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 36, no. 5, pp. 1551–1565, 1998.
- [20] H. A. Zebker and J. Villasenor, "Decorrelation in interferometric radar echoes," *IEEE Trans. Geosci. Remote*

- Sens., vol. 30, no. 5, pp. 950–959, 1992.
- [21] H. A. Zebker, C. L. Werner, P. A. Rosen, and S. Hensley, "Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 32, no. 4, pp. 823–836, 1994.
- [22] H. A. Zebker, P. A. Rosen, and S. Hensley, "Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps," *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 102, no. B4, pp. 7547–7563, 1997.
- [23] V. Brancato and I. Hajnsek, "Separating the Influence of Vegetation Changes in Polarimetric Differential SAR Interferometry," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 56, no. 12, pp. 6871–6883, 2018.
- [24] S. Zwieback and I. Hajnsek, "Influence of vegetation growth on the polarimetric zero-baseline DInSAR phase diversity—Implications for deformation studies," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 54, no. 5, pp. 3070–3082, 2016.
- [25] D. Massonnet and K. L. Feigl, "Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface," *Rev. Geophys.*, vol. 36, no. 4, pp. 441–500, 1998.
- [26] P. S. Agram and M. Simons, "A noise model for InSAR time series," *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 120, no. 4, pp. 2752–2771, 2015.
- [27] R. Magagi et al., "Canadian Experiment for Soil Moisture in 2010 (CanEx-SM10): Overview and Preliminary Results," vol. 51, no. 1, pp. 347–363, 2013.
- [28] M. T. Hallikainen, F. T. Ulaby, M. C. Dobson, M. A. El-Rayes, and L.-K. Wu, "Microwave dielectric behavior of wet soil-part 1: Empirical models and experimental observations," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, no. 1, pp. 25–34, 1985.
- [29] N. R. Peplinski, F. T. Ulaby, and M. C. Dobson, "Dielectric properties of soils in the 0.3-1.3-GHz range," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 33, no. 3, pp. 803–807, 1995.
- [30] M. Nolan, D. R. Fatland, and L. Hinzman, "DInSAR measurement of soil moisture," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 41, no. 12, pp. 2802–2813, 2003.
- [31] K. Norrish, "The swelling of montmorillonite," *Discuss. Faraday Soc.*, vol. 18, pp. 120–134, 1954.
- [32] F. T. Ulaby, K. Sarabandi, K. McDonald, M. Whitt, and M. C. Dobson, "Michigan microwave canopy scattering model," *Int. J. Remote Sens.*, vol. 11, no. 7, pp. 1223–1253, 1990.
- [33] A. R. Mitchell, "Soil surface shrinkage to estimate profile soil water," *Irrig. Sci.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–6, 1991.
- [34] B. te Brake, R. F. Hanssen, M. J. van der Ploeg, and G. H. de Rooij, "Satellite - based radar interferometry to estimate large - scale soil water depletion from clay shrinkage: Possibilities and limitations," *Vadose Zo. J.*, vol. 12, no. 3, pp. 1 - 13, 2013.
- [35] V. Mironov, Y. Kerr, J.-P. Wigneron, L. Kosolapova, and F. Demontoux, "Temperature-and texture-dependent dielectric model for moist soils at 1.4 GHz," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 10, no. 3, pp. 419–423, 2012.
- [36] F. Ulaby and D. Long, *Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing*. 2014.
- [37] J.-P. Rudant, A. Bedidi, R. Calonne, D. Massonnet, and G. Nesti, "Laboratory experiments for the interpretation of phase shift in SAR interferograms," *ESA SP*, 1997.
- [38] G. G. Hamedani and M. N. Tata, "On the determination of the bivariate normal distribution from distributions of linear combinations of the variables," *Am. Math. Mon.*, vol. 82, no. 9, pp. 913–915, 1975.
- [39] A. Genz and F. Bretz, *Computation of multivariate normal and t probabilities*, vol. 195. Springer Science & Business Media,

2009.

- [40] L. Tsang and J. A. Kong, *Scattering of electromagnetic waves: advanced topics*, vol. 26. John Wiley & Sons, 2004.
- [41] J. Pinheiro, D. Bates, S. DebRoy, D. Sarkar, and R. C. Team, "Linear and nonlinear mixed effects models," *R Packag. version*, vol. 3, no. 57, pp. 1–89, 2007.
- [42] Q. Yin, W. Hong, Y. Li, and Y. Lin, "Analysis on soil moisture estimation of SAR data based on coherent scattering model," in *EUSAR 2014; 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, 2014, pp. 1–4.
- [43] Y. Eshqi Molan, "Soil Moisture Contributions to InSAR Phase and Decorrelation," 2020.
- [44] F. T. Ulaby and M. A. El-Rayes, "Microwave dielectric spectrum of vegetation-Part II: Dual-dispersion model," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, no. 5, pp. 550–557, 1987.
- [45] R. Goldstein, "Atmospheric limitations to repeat - track radar interferometry, " *Geophys. Res. Lett.*, vol. 22, no. 18, pp. 2517 – 2520, 1995.



Study of soil moisture change effects on L-band DInSAR phase

Sadegh Ranjbar¹, Mehdi Akhoondzadeh^{2*}

1- M. Sc. in Remote Sensing, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran.

2- Assistant Professor, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran.

Abstract

The Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry (DInSAR) technique is recognized as a potential remote sensing tool for detecting ground surface displacements with less than a centimetre accuracy. The surface soil moisture changes (ΔM_v) during the time between the two images as an effective parameter on interferometry phase (φ), leads to incorrect calculation of ground movement. In this research, the amount and the way that ΔM_v affects φ on wheat, rapeseed, weed, pea and idle land fields have been investigated empirically using a regression model. To do this investigation, airborne data UAVSAR (L-band) along with ground-based data in the CanEx-SM10 campaign in 2010 were used. According to the scattergraphs between φ and ΔM_v , and observing a direct and approximately linear relationship between them, some hypotheses were taken into consideration in order to use a regression modeling. Comparing the estimated φ using the calibrated regression model and calculated φ from the interferometry technique shows that the model provided the best results for the bare field in VV and HH polarizations (RMSE) of 0.3 to 0.6 rad and R2 of 69% to 72%. In general, the results of the regression model showed that without other factors' effects on φ , this parameter can be modelled ΔM_v based on a regression function in bare fields. The model also provided acceptable results in vegetated fields (RMS of 0.6 to 0.99 rad and R2 of 40% to 55% depending on the different vegetation types and different polarizations). Comparing polarizations, φ fluctuations in co-polarizations (HH and VV) showed a higher correlation with ΔM_v . Consequently, φ is directly affected by ΔM_v , and significant changes in ΔM_v brings about a considerable error in displacement estimation.

Key words: DInSAR, phase, temporal decorrelation, surface soil moisture change.