

## مقایسه مدل‌های باز پراکنش سطح خاک به منظور اعتبار سنجی و معکوس‌سازی برخی پارامترهای فیزیکی سطح خاک

سید محمد میرمظلومی<sup>۱</sup>، محمود رضا صاحبی<sup>۲\*</sup>

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد سنجش از دور دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده ژئودزی و ژئوماتیک

۲- استادیار پژوهشکده سنجش از دور، دانشکده ژئودزی و ژئوماتیک دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۲۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۹/۰۴

### چکیده

استفاده از داده‌های رادار با روزه مجازی بهترین و پرتعدادترین روش بازیابی پارامترهای سطح خاک است. در این تحقیق سعی بر انتخاب بهترین مدل برای تخمین پارامترهای سطح خاک با استفاده از داده‌های آزمایشات رطوبت خاک ۰۳ در منطقه اوکلاهومی جنوبی است. با استفاده از مدل‌های بازپراکنشی آه، دوبوآ و رابطه تجمعی در سه باند L، C و P ابتدا به مقایسه ضرایب بازپراکنشی حاصل از مدل و تصویر در پلاریزاسیون‌های افقی افقی و عمودی عمودی پرداخته شده است؛ سپس با استفاده از معکوس همان مدل‌ها و روش‌های ریاضی، پارامترهای زبری سطح، ضریب ثابت دی الکتریک و طول همبستگی محاسبه شده و نتایج با مقادیر اندازه‌گیری شده زمینی مقایسه شده است. در بخش مقایسه ضرایب بازپراکنش، مدل آه در باند C بهترین دقت را دارد. در این بخش مدل‌های دوبوآ و رابطه تجمعی در باند L دقت‌های مناسبی دارند، اما نسبت به بهترین حالت نتایج ضعیف‌تری ارائه داده‌اند. در بخش بازیابی پارامترهای سطح خاک به عنوان اصلی‌ترین هدف تحقیق، روش حل معادلات با استفاده از سرشکنی که روی مدل رابطه تجمعی صورت گرفت، در تخمین تمامی پارامترها نتایج با دقت بهتری به دست آمدند، هرچند که مدل آه در باند C برای تخمین زبری سطح و همین مدل در باند L برای تخمین ضریب ثابت دی الکتریک نتایج مناسبی ارائه داده است. از جمله نتایج این تحقیق می‌توان به نتایج نامناسب باند P اشاره کرد، که نتایج بسیار نامناسبی نسبت به سایر باندها دارد، هم چنین نتایج ضعیف‌تر مدل‌های تجربی در تخمین پارامترهای سطح خاک نسبت به مدل تئوری رابطه تجمعی اشاره کرد. هم چنین پیشنهاد می‌شود در صورت امکان از داده‌های زمینی با دقت مکانی بیشتر استفاده کرد.

کلید واژه‌ها: سنجش از دور، پارامترهای سطح خاک، مدل‌های بازپراکنش سطحی، رادار با روزه مجازی.

\*نویسنده مسئول: محمود رضا صاحبی: تهران-خیابان ولیعصر-تقاطع میرداماد- دانشکده نقشه‌برداری و ژئوماتیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تلفن: ۰۲۱۸۸۸۸۸۴۴۵

## ۱- مقدمه

پارامترهای خاک عنصر کلیدی در چرخه‌های جهانی آب و انرژی است. از این رو بررسی وضعیت پارامترهای خاک برای هیدرولوژی، هواشناسی، اقلیم‌شناسی، کشاورزی و بسیاری از علوم زمینی مناسب است [۱]. بررسی و پیاده کردن الگوریتمی برای بازیابی پارامترهای سطح خاک مانند رطوبت و زبری می‌تواند کمک شایانی به کاربردهای مختلف داشته باشد. پتانسیل رادار با روزه مجازی<sup>۱</sup> برای اندازه‌گیری پارامترهای خاک بیش از ۳۰ سال است که شناخته شده، ولی امروزه جستجو برای سنجنده‌های مناسب و الگوریتم‌های قابل اجرای بازیابی پارامترهای خاک به صورت ادامه دارد. بنابراین پیدا کردن مسیرهای جدید در تحقیقات پارامترهای خاک با استفاده از داده‌های رادار با روزه مجازی از اهمیت خاصی برخوردار است. با افزایش تعداد ماهواره‌های رادار با روزه مجازی و قدرت تفکیک مکانی بالا با فواصل زمانی کوتاه برای بازدید مجدد، پتانسیل مناسبی برای بهبود کیفیت بازیابی پارامترهای خاک از داده‌های رادار به وجود آمده است.

سنجش از دور مایکروویو تابش الکترومغناطیسی را در محدوده‌ی امواج الکترومغناطیسی در طول موج ۰/۵ تا ۱۰۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری می‌کند. برای ماهواره‌های سنجش از دور در محدوده مایکروویو فقط طول موج‌های بزرگ‌تر از ۵ سانتی‌متر موثر است، زیرا که این محدوده‌ی طول موجی کمتر تحت تاثیر پوشش گیاهی و اتمسفر قرار می‌گیرد، عمق بیشتری از خاک را تشخیص می‌دهند و به رطوبت خاک بیشتر حساس هستند [۲ و ۳]. پایه و اساس سنجش از دور مایکروویو برای رطوبت خاک، تقابل ثابت دی الکتریک خاک خشک و مرطوب و رابطه بین

ضریب بازتاب فرسnel<sup>۲</sup> و ثابت دی الکتریک است. سنجش از دور مایکروویو را می‌توان به دو بخش فعال و غیرفعال تقسیم کرد. در سنجش از دور غیرفعال منبع ایجاد انرژی خورشید است، و سنجنده موج بازتابی از سطح زمین را که توسط خورشید بازتاب شده است را دریافت می‌کند. اما در سنجش از دور فعال موج بازتابی توسط دستگاه فرستنده ارسال می‌شود. یک تفاوت عمده بین سنجش از دور مایکروویو فعال و غیرفعال، قدرت تفکیک مکانی تولیدشده توسط آن‌هاست. سنجنده‌های مایکروویو فعال با نام رادار شناخته می‌شوند. یک سنجنده راداری شامل فرستنده و گیرنده است. فرستنده یک موج الکترومغناطیسی در محدوده امواج مایکروویو تولید و ارسال می‌کند و گیرنده موج بازگشتی از سطح را دریافت می‌کند. اطلاعاتی که از این موج بازتابی قابل استخراج است، دو گونه است. اولین داده قابل استخراج، فاصله دستگاه راداری و هدف است که از اندازه‌گیری زمان رفت و برگشت موج و با توجه به ثابت بودن سرعت امواج الکترومغناطیس قابل محاسبه است (فاز). دومین داده از شدت موج بازگشتی نسبت به موج اولیه قابل استخراج است و بازتابندگی هدف را مشخص می‌کند (شدت). این پارامتر به صورت ضریب بازتابندگی قابل ارائه است، که با علامت اختصاری  $\sigma^0$  نشان داده می‌شود [۴]. ضریب بازتابندگی، معمولاً در واحد دسی بل بیان می‌شود.

رابطه بین پارامترهای سطح خاک و سیگنال‌های راداری با استفاده از فناوری رادار با روزه مجازی از طریق مدل‌های بازپراکنش بیان می‌گردد. این مدل‌ها عموماً به ۳ دسته

<sup>۲</sup> Fresnel

\* محمودرضا صاحبی: تهران-خیابان ولیعصر-تقاطع میرداماد- دانشکده

نقشه برداری و ژئوماتیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تلفن:

۰۲۱۸۸۸۸۸۴۴۵

<sup>۱</sup> Synthetic aperture radar

مدل آه<sup>۷</sup> نسبت های ضرایب بازپراکنش را در قطبش های متفاوت با رطوبت خاک و زبری سطح مرتبط می کند [۵]. آلوارز و همکاران [۹] نشان دادند که وقتی داده های چندگانه قطبش<sup>۸</sup> در دست باشد، ثابت دی الکتریک و زبری سطح می تواند بدون نیاز به اندازه گیری های زمینی به دست آید. دوبوا و همکاران، مدل نیمه تجربی دوبوا<sup>۹</sup> را تنها برای بازپراکنش هم قطبش پیشنهاد کردند و برای استفاده از داده های بازپراکنش سنج جمع آوری شده در ۶ فرکانس بین ۲.۵ تا ۱۱ گیگاهرتز طراحی شده است، با این حال در مقایسه با ضرایب بازپراکنش غیرهم قطبش نسبت به نویز کمتر حساس است و دقیق تر نیز است و هم چنین آسان تر کالیبره می شود [۱۶]. تحقیقاتی مانند سیکدار و همکاران [۱۰] و نئوش و همکاران [۱۱] بهترین نتایج را در مناطق خشک با پوشش گیاهی تنک بیان کرده اند. روش های بازیابی پارامترهای سطح خاک اکثراً به صورت استفاده همزمان از داده های چندگانه<sup>۱۰</sup> است، به طور مثال صاحبی و انجلس با استفاده از داده های چندگانه زاویه برخورد<sup>۱۱</sup> سنجنده رادارست-۱ با زاویه فرود ۳۵ و ۴۷ درجه و استفاده از معکوس مدل های مدل اختلال هندسی، مدل اختلال کوچک، آه و دوبوا اصلاح شده به این نتیجه دست یافتند که مدل دوبوا اصلاح شده بهترین مدل برای بازیابی پارامترهای سطح خاک در مناطق خشک است [۱۲]. هم چنین با مقایسه روش های چندگانه قطبش و چندگانه زاویه برخورد بر روی داده های رادارست، به کارآمدی بهتر روش چندگانه زاویه برخورد پی بردند [۱۳]. در مقایسه مدل ها با استفاده از روش های چندگانه قطبش و چندگانه زاویه برخورد سنجنده های انوی ست

تقسیم می شوند: مدل های تئوری، تجربی و نیمه تجربی. اصول کلی این مدل ها بدین شکل است که  $\sigma^0$  ضریب بازپراکنش<sup>۱</sup> تابعی از پارامترهای مربوط به سنسور شامل طول موج ( $\lambda$ )، زاویه برخورد<sup>۲</sup> ( $\theta$ ) و قطبش<sup>۳</sup> ( $p$ ) است و پارامترهای تارگت به خصوصیات سطح مانند زبری، ثابت دی الکتریک (رطوبت) مربوط است. با حل این شکل از معادله می توان پارامترهای سطح خاک مانند زبری و رطوبت را به دست آورد.

برای محاسبه اشکال مختلف سنجنده ها و پارامترهای سطح، مدل های بسیاری از بازپراکنش توسط اولابی و همکاران [۵]، آه و همکاران [۶]، فانگ و چن [۷]، شی و همکاران [۸]، صاحبی و همکاران [۱۲ و ۱۴] سایر دانشمندان در طی ۳۰ سال گذشته برای تعیین رابطه ی بین سیگنال رادار و پارامترهای اصلی بیوفیزیکی توسعه یافته است، که بیشتر مطالعات بر روی شناسایی اثر زبری سطح و پوشش گیاهی در تخمین رطوبت انجام شده است. این مدل ها همان طور که گفته شد: مدل های تئوری، تجربی و نیمه تجربی هستند.

یکی از مهم ترین مدل های تئوری، مدل رابطه تجمعی<sup>۴</sup> (IEM) است. مدل رابطه تجمعی یک مدل فیزیکی بر مبنای انتقال تابشی است که توسط فانگ و چن [۵] براساس ترکیب مدل های کیرشهف<sup>۵</sup> و مدل اختلال کوچک<sup>۶</sup> (SPM) توسعه داده شد، این کار باعث شد که این مدل در مناطق وسیع تر با شرایط زبری قابل اجرا شود و در تئوری به مکان وابسته نباشد. در سال ۱۹۹۲ آه و همکاران مدلی تجربی را بر مبنای نتایج آزمایشگاهی ارائه دادند.

<sup>1</sup> Backscatter coefficient

<sup>2</sup> Incidence angle

<sup>3</sup> Polarization

<sup>4</sup> Integration Equation Model

<sup>5</sup> Kirchhoff

<sup>6</sup> Small Perturbation Model

<sup>7</sup> Oh

<sup>8</sup> Multi-polarization

<sup>9</sup> Dubois

<sup>10</sup> Multi

<sup>11</sup> Multi-angular

و رادارست-۲، صاحبی و همکاران مدل رابطه تجمعی را بهترین مدل معرفی نمودند [۱۳].

بررسی همزمان روش‌های مستقیم شامل مدل‌های تئوری، تجربی و نیمه تجربی به طور همزمان با تمامی روش‌های معکوس می‌تواند دید کلی مطلوبی از رطوبت خاک در رادار با روزه مجازی ارائه دهد. در واقع روش‌های معکوس، همان بازیابی پارامترهای سطح خاک از معکوس مدل‌هاست. استفاده از روش‌های معکوس در واقع نوعی بهره‌وری بهینه از تمامی اطلاعات موجود سنجنده‌ها است. هم‌چنین با مقایسه‌ی این روش‌ها از لحاظ نتایج به دست آمده می‌توان روش مناسب را کشف کرد و حتی با بهبود آن کمک شایانی در شناسایی بهترین روش در منطقه مورد مطالعه کرد. در واقع، با در نظر گرفتن شرایط منطقه مورد مطالعه می‌توان از مدل بهینه در مناطق مشابه بهره برد و دیگر به دنبال مدل یا روش مناسب نبود.

مهم‌ترین هدف این تحقیق بازیابی پارامترهای سطح خاک با استفاده از داده‌های رادار با روزه مجازی است که بتواند با ارائه روش‌های مناسب هر یک از پارامترهای خاک را بدون در نظر گرفتن پارامترهای تأثیرگذار دیگر بازیابی کند. هم‌چنین یافتن بهترین مدل برای تخمین پارامترهای سطح خاک و حتی بهبود آن از دیگر اهداف است.

## ۲- مواد و روش

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی این تحقیق در جنوب شرقی ایالت اکلاهما<sup>۱</sup> در منطقه دشت بزرگ جنوبی آمریکا است. این منطقه مساحتی در حدود ۶۱۱ کیلومتر مربع را شامل می‌شود. داده‌های این منطقه توسط مرکز ملی داده‌های برف و یخ آمریکا<sup>۲</sup>

جمع‌آوری شده است. علت اصلی انتخاب این منطقه جهت انجام نمونه‌برداری‌های میدانی، وجود ایستگاه‌های مختلف هواشناسی و هیدرولوژی است. در این تحقیق، از داده‌های این منطقه به منظور مدل سازی و ارزیابی مدل‌های محاسبه پارامترهای سطح خاک استفاده شده است. منطقه تحقیقاتی آبخیز واشیتا کوچک<sup>۳</sup> در مرکز بخش اکلاهما جنوبی است که پوشش اصلی این ناحیه زمین‌های مرتع<sup>۴</sup> است. در این ناحیه تابستان‌ها معمولاً طولانی، گرم و خشک است. به طور کلی، بخش‌های غربی و شرقی این ناحیه دارای بافت خاکی رسی شنی است و در حدود ۳۰٪ مرکز این ناحیه دارای بافت خاک ماسه‌ای است. از سال ۱۹۹۲ تحقیقات زیادی در این ناحیه به منظور جمع‌آوری داده زمینی صورت گرفته که شامل پروژه‌های واشیتا<sup>۵</sup> ۹۲، واشیتا<sup>۴</sup> ۹۴، آزمایشات رطوبت خاک<sup>۵</sup> ۰۲، ۰۳، ۰۴ و ۰۵ هستند. این منطقه در شکل (۱) که از تصاویر سنجنده تی ام ماهواره لندست ۵ که در تاریخ ۱۰ جولای سال ۲۰۰۳ میلادی تهیه شده است، نمایش داده شده است.

### ۲-۲- داده‌های مورد استفاده

داده‌های میدانی این تحقیق داده‌های آزمایشات رطوبت خاک<sup>۳</sup> ۰۳ اندازه‌گیری شده در تاریخ ۱۲ جولای ۲۰۰۳ میلادی است. نمونه‌برداری این داده‌ها به صورت سایت‌هایی با ابعاد ۸۰۰ در ۸۰۰ متر است. در هر سایت نمونه‌های خاک، دمای خاک، دمای محیط، میزان ثابت دی‌الکتریک (در عمق ۰-۶ سانتی‌متر) خاک اندازه‌گیری شده است. داده‌های استفاده شده از منطقه آبخیز واشیتا کوچک در این تحقیق شامل ۱۳ سایت و ۵۴ نقطه نمونه برداری در کل این سایت‌ها است. پراکندگی نقاط زمینی در شکل (۲) که

<sup>۳</sup> Little Washita Experimental Watershed

<sup>۴</sup> Grass Land

<sup>۵</sup> SMEX (Soil Moisture EXperiments)

<sup>۱</sup> Oklahoma

<sup>۲</sup> National Snow and Ice Data Center (NSIDC)

تصاویر سنجنده ایرسار در فرمت ماتریس استوکس ذخیره شده‌اند. پس مرحله اول برای خواندن تصاویر مرحله ترکیب کردن<sup>۹</sup> و باز کردن<sup>۱۰</sup> آنها برای استخراج ضرایب پس‌پراکنش برای هر تصویر است. پس از این مرحله هر تصویر شامل ۳ باند طیفی (P، L و C) و ۴ پلاریزاسیون (HH، VV، HV و TP) برای هر باند است. این پردازش توسط نرم افزار Envi نسخه ۵ انجام گرفته است. مشخصات این تصاویر در جدول (۱) بیان شده است.

## ۲-۳- روش تحقیق

در این تحقیق کار به دو بخش اصلی تقسیم شده است، بدین صورت که ابتدا با استفاده از داده‌های زمینی و جایگذاری آنها در مدل‌های دوبوآ، آه و رابطه تجمعی بازپراکنش به‌دست آمده از این مدل‌ها را با مقادیر متناظر با آن نقطه در تصویر برای سه باند C، L و P مقایسه شده است و نتایج به صورت نمودارهایی که در راستای افقی داده‌های تصویر و در راستای عمودی نتایج مدل، نشان داده شده است. هدف از این کار مقایسه بین این سه مدل است و انتخاب بهترین آنها، با توجه به این که صحت داده‌های به کار گرفته شده و همچنین شرایط منطقه تاثیر بسزایی در نتایج خواهند داشت و بنابراین نتایج این تحقیق در بخش اول صرفاً برای مقایسه است.

در بخش دوم که هدف اصلی نیز است، پارامترهای سطح خاک که شامل زبری، رطوبت و طول همبستگی (تغییرات افقی زبری سطح) است را با استفاده از معکوس مدل‌های دوبوآ، آه و رابطه تجمعی به دست آوردیم و سپس به مقایسه آنها با نتایج زمینی پرداختیم که این مقایسه با استفاده از ریشه میانگین مربع انحراف<sup>۱۱</sup> (RMSE) و

نقشه منطقه واشیتای کوچک است، نمایش داده شده است. برای هر سایت نمونه برداری، ثابت دی‌الکتریک خاک در عمق ۰-۶ سانتی‌متر با استفاده از تتا پروب<sup>۱</sup> اندازه‌گیری شده است، پروب‌های استفاده شده در این تحقیق دارای ۴ تیغه استیل جداگانه به ۸ طول ۶ سانتی‌متر بوده که به‌طور قائم در خاک فرو داده شده‌اند. در هر سایت، دو منطقه جداگانه برای محاسبه زبری سطح انتخاب شده است. در زمین‌هایی که دارای رج‌های ردیفی مشخص هستند مانند زمین‌های شخم زده و یا زمین‌های ذرت تنها یک عکس زبری در راستای ردیف رج‌ها و یک عکس دیگر در راستای عمود بر آن کافی است. اما در زمین‌هایی که در حین پروژه شخم زده شده‌اند بعد از شخم زدن نیز دوباره نیاز به عکسبرداری زبری است. در این پروژه زبری توسط عکسبرداری از یک صفحه زبری سنج<sup>۲</sup> به طول یک متر که در سطح خاک قرار داده شده است محاسبه می‌شود.

سنجنده هوا برد ایرسار<sup>۳</sup> سازمان فضایی آمریکا<sup>۴</sup> متداول‌ترین سیستم تصویربرداری راداری هوایی است. این سنجنده ضریب بازپراکنش را در ۴ پلاریزاسیون (HH<sup>۵</sup>، VV<sup>۶</sup>، HV<sup>۷</sup> و TP<sup>۸</sup>) و سه باند فرکانسی P (۰/۴۵ GHz)، L (۱/۲۶ GHz) و C (۵/۳۱ GHz) را به طور هم‌زمان داراست. همان‌طور که در جدول (۱) مشخص است، توان تفکیک مکانی تصاویر سنجنده ایرسار حدود ۶/۶ متر در راستای برد مایل و ۹/۲۶ متر در راستای آزیموت است.

<sup>۱</sup> Theta Probe

<sup>۲</sup> Roughness board

<sup>۳</sup> AIRSAR

<sup>۴</sup> National Aeronautics and Space Administration

<sup>۵</sup> Horizontal-Horizontal

<sup>۶</sup> Vertical-Vertical

<sup>۷</sup> Horizontal-Vertical

<sup>۸</sup> Total power

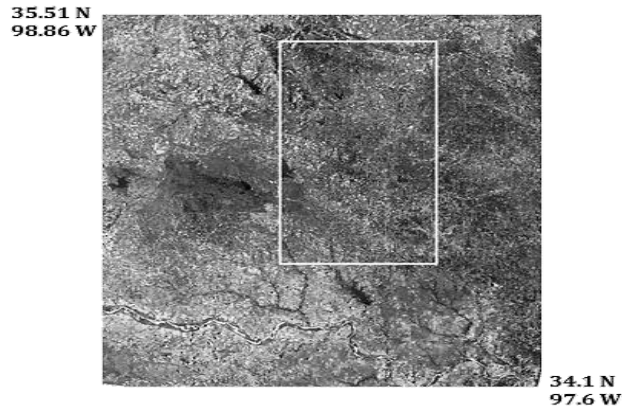
<sup>۹</sup> Synthesized

<sup>۱۰</sup> Decompressed

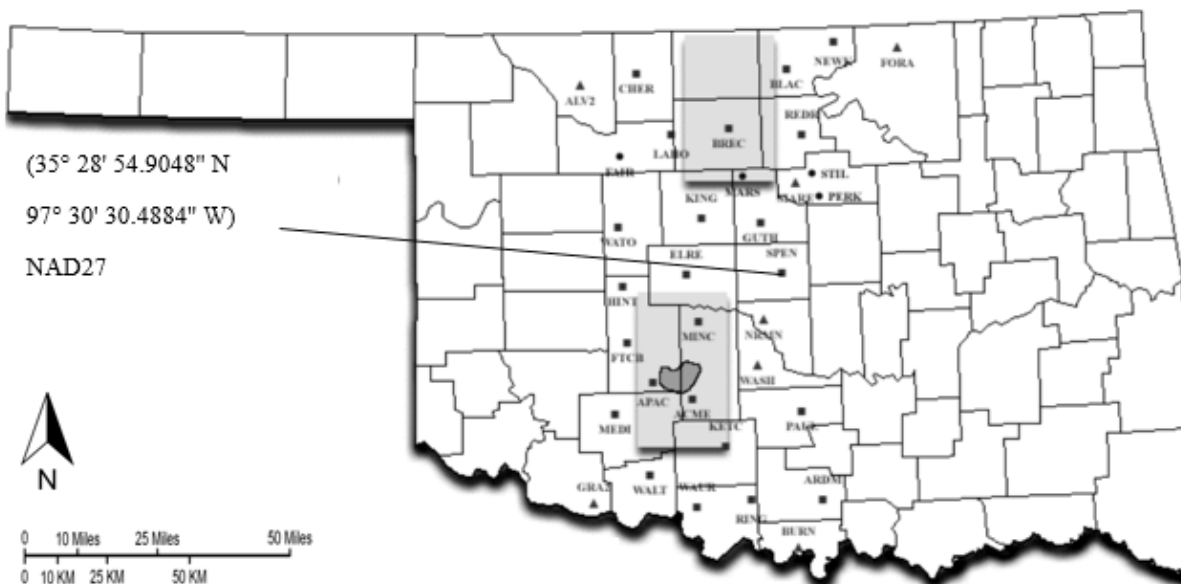
<sup>۱۱</sup> Root Mean Square Error

و در راستای عمودی نتایج حاصل از معکوس مدل‌ها هستند.

نیمساز بین دو محور صورت گرفته است. نمایش نتایج بدین صورت است که در راستای افقی داده‌های زمینی

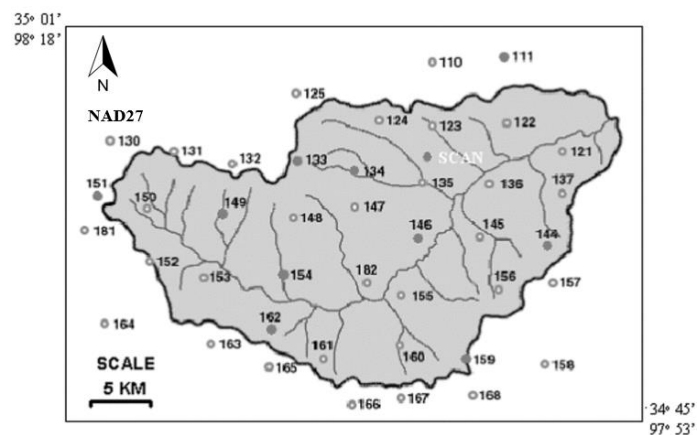


(الف)



(ب)

شکل ۱: (الف): تصویر تی ام سنجنده لندست ۵ که ناحیه منطقه مطالعاتی را نشان می‌دهد. (ب): نقشه محدوده عملیات واشیتای کوچک (محدوده مورد مطالعه در ایالت اکلاهای آمریکا)



شکل ۲: نحوه توزیع نقاط زمینی اندازه‌گیری شده در نقشه منطقه واشیتای کوچک

جدول ۱: پارامترهای سنجنده هوابرد ایرسار

باند	P	L	C
فرکانس باند (GHz)	۰/۴۵	۱/۲۶	۵/۳۱
زاویه فرود	$0^{\circ}$ - $70^{\circ}$ (این میزان تئوری است و در عمل این زاویه بین $20^{\circ}$ و $70^{\circ}$ است)		
ارتفاع سنجنده (Km)	$\approx 8$		
پهنای باند (Mhz)	۲۰		
قدرت تفکیک مکانی در راستای رنج (m)	۶/۷		
قدرت تفکیک مکانی در راستای آزمون (m)	۹/۲۶		

## ۲-۳-۱- مقایسه ضرایب بازپراکنش سطح

برای مقایسه ابتدا مقادیر پارامترهای خاک در مدل‌ها جایگذاری می‌شوند و سپس با مقادیر متناظر آن‌ها در مدل مقایسه می‌شوند. جایگذاری پارامترهای ضریب ثابت دی‌الکتریک، زبری سطح و طول همبستگی با استفاده از نرم‌افزار متلب ۲۰۱۳ انجام شده است. این کار برای هر سه باند C, L و P و پلاریزاسیون‌های افقی افقی<sup>۱</sup> و عمودی عمودی<sup>۲</sup> صورت گرفت. بدین شکل که برای دو مدل دوبوآ و آه دو پارامتر زبری سطح و ضریب ثابت دی‌الکتریک مربوط به منطقه مورد نظر که همان ایستگاه‌های واشیتا کوچک است و برای مدل رابطه تجمعی علاوه بر دو پارامتر قبلی از طول همبستگی نیز استفاده می‌شود که این پارامتر دقیقاً متناظر با زبری است. همچنین پارامتر ثابت دی‌الکتریک با توجه به فرکانس باند مورد نظر انتخاب شد و چون این پارامتر از رطوبت خاک به دست آمده در واقع در ۲ عمق ۰-۳ سانتی‌متر و ۳-۶ سانتی‌متر است. سپس ضرایب متناظر با هر نقطه با دقت زیر پیکسل از روی تصاویر مربوط به همان روز اخذ شد. در نهایت نتایج به صورت نمودار نمایش داده خواهد شد.

## ۲-۳-۲- پارامترهای سطح خاک

پارامترهای سطح خاک به صورت کلی از معکوس مدل‌های بازپراکنش به دست می‌آیند، اما آن‌چه که اهمیت دارد این است که آیا خود مدل قابلیت معکوس پذیری دارد یا خیر. در این تحقیق با توجه به ملاحظات ریاضی و فیزیکی از سه مدل دوبوآ، آه و رابطه تجمعی استفاده شده است. نتایج مدل رابطه تجمعی با استفاده از روش بندلش صورت گرفته [۱۵]، در واقع این روش به نوعی حل مجهولات معادله با استفاده از روش سرشکنی است.

برای به دست آوردن پارامتر ضریب دی‌الکتریک و زبری سطح با استفاده از مدل دوبوآ، از معکوس خود مدل استفاده می‌شود، که با جایگذاری پارامترهای تصویری، زبری سطح و ضریب دی‌الکتریک از دو معادله متفاوت به دست می‌آیند. همین دو پارامتر با استفاده از مدل آه به روش تکرار ریاضی محاسبه می‌شوند، بدین شکل که ابتدا مقادیر اولیه فرضی در نظر گرفته می‌شود و با ۳۰ بار تکرار پارامترها محاسبه می‌شوند.

با توجه به روش‌های مذکور، زبری سطح خاک، ضریب ثابت دی‌الکتریک و طول همبستگی را با استفاده از این سه مدل برای هر سه باند به دست آوردیم که نتایج به صورت نمودارهایی که در جهت افقی داده‌های زمینی و در جهت عمودی نتایج مدل، نمایش داده شده است. برای مقایسه بهتر

<sup>۱</sup> HH : Horizontal- Horizontal<sup>۲</sup> VV : Vertical-Vertical

بر روی هر نمودار نیمساز دو محور و هم‌چنین ریشه میانگین مربع انحراف درج شده است.

### ۳- نتایج و بحث

در این بخش به طور مجزا ابتدا به مقایسه ضرایب بازپراکنش‌های سطح بین مدل‌ها و تصویر می‌پردازیم و در پایان به تحلیل و بررسی نتایج هر مدل پرداخته می‌شود. پس از این، در مرحله دوم پارامترهای سطح خاک را به تفکیک نمایش داده می‌شود و در انتهای هر پارامتر آنالیز آن بیان شده است.

در بخش اول نتایج را به تفکیک مدل به صورت جدول (۲) بدین صورت که ریشه میانگین مربع انحراف مدل‌ها برای سه باند و در دو پلاریزاسیون نمایش داده می‌شود.

جدول ۲: نتایج مدل‌ها برای پلاریزاسیون‌های افقی و عمودی عمودی در سه باند L، C و P

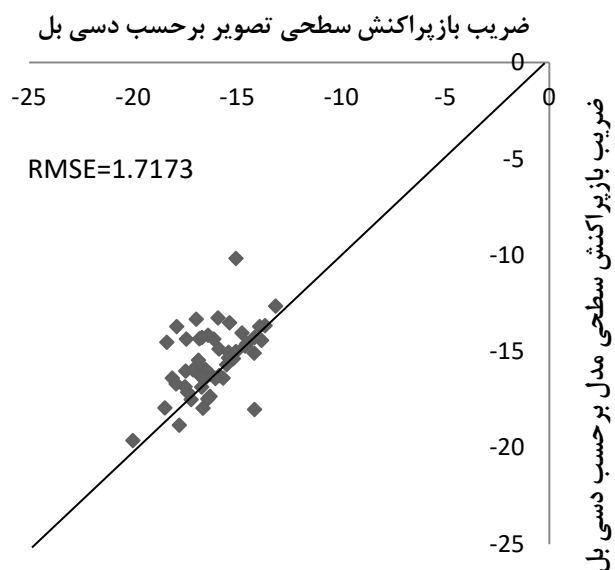
عمودی عمودی	افقی افقی	اُه
1.7173	3.1222	C
5.0368	6.2949	L
14.0883	13.0214	P

با بررسی نتایج پیاده سازی برای پلاریزاسیون افقی می‌توان دید که مدل‌ها در باند C دارای دقت بیشتری برای محاسبه این ضریب است (شکل ۳). ریشه میانگین مربع انحراف برای  $\sigma_{HH}^0$  در باند C برابر با ۳/۱۲۲۲، در باند L برابر با ۶/۲۹۴۹ بوده و در باند P برابر با ۱۳/۰۲۱۴ است. ریشه میانگین مربع انحراف برای  $\sigma_{VV}^0$  در باند C برابر با ۱/۷۱۷۳، در باند L برابر با ۵/۰۳۶۸ بوده و در باند P برابر با ۱۴/۰۸۸۳ است. در نتیجه مدل‌ها در باند C برای هر دو پلاریزاسیون نتایج بهتری نسبت به دو باند دیگر دارد. با توجه به این که مدل‌ها براساس باند C به دست آمده است، نتایج بهتر این مدل قابل پیش‌بینی بود، هم‌چنین به دلیل تعداد کمتر داده نسبت به تحقیق‌ها و همکاران [۶] و نیز عدم تطابق

مناسب مدل با منطقه، نتایج این تحقیق با دقت کمتری به دست آمده است.

پارامترهای استفاده شده برای محاسبه ضریب بازپراکنش شامل: فرکانس رادار، زاویه فرود، ثابت دی‌الکتریک خاک، مجذور میانگین مربع ارتفاع، طول همبستگی و تابع همبستگی است. با بررسی نتایج پیاده سازی برای پلاریزاسیون افقی می‌توان دید که مدل رابطه تجمعی در باند L دارای دقت بیشتری برای محاسبه این ضریب است. ریشه میانگین مربع انحراف برای ضریب بازپراکنش در قطبش افقی<sup>۱</sup> در باند C برابر با ۸/۲۵۸۰، در باند L برابر با ۴/۰۴۲۹ بوده و در باند P برابر با ۱۰/۷۵۵ است. ریشه میانگین مربع انحراف برای  $\sigma_{VV}^0$  در باند C برابر با ۶/۴۸۹۳، در باند L برابر با ۴/۶۳۳۱ بوده و در باند P برابر با ۸/۰۵۳ است. همانگونه که در جدول (۳) نشان داده شده، مدل رابطه تجمعی در باند L نتایج بهتری نسبت به دو باند دیگر دارد. در مورد نتایج بهتر باند L آن چه که اهمیت دارد رابطه طول موج این باند و مدل IEM است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، مدل IEM یک مدل تئوری است و براساس داده‌های بسیار زیادی به دست آمده است و نمی‌توان به‌طور قاطع در مورد نتایج آن پیش‌بینی کرد. شکل (۴) نوع پراکندگی نتایج به دست آمده از مدل رابطه تجمعی مربوط به باند L در پلاریزاسیون افقی را نشان می‌دهد. به جز چند مورد، سایر نتایج به‌دست آمده از مدل به مقادیر ضریب بازپراکنش تصویر نزدیک است.

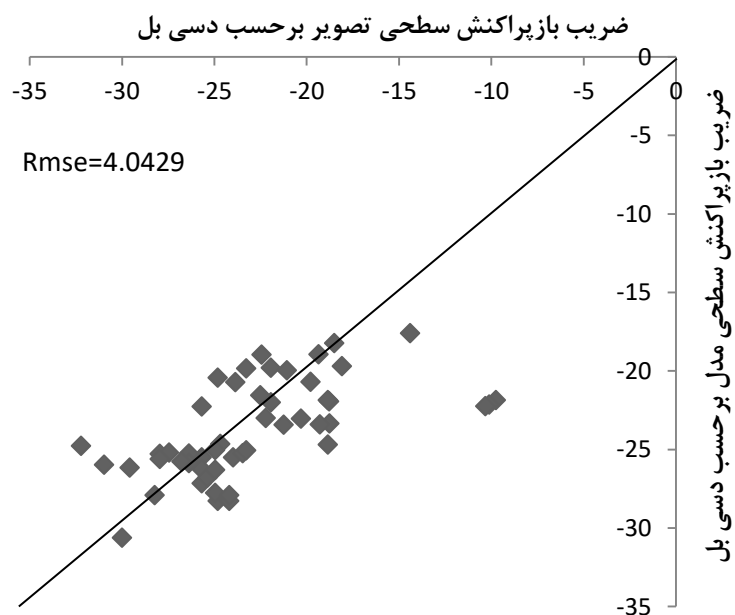
<sup>۱</sup>  $\sigma_{HH}^0$



شکل ۳: ضریب بازپراکنش سطحی مدل آه در پلاریزاسیون عمودی عمودی و باند C

جدول ۳: نتایج مدل رابطه تجمعی برای پلاریزاسیون های افقی افقی و عمودی عمودی در سه باند C, L و P

رابطه تجمعی	افقی افقی	عمودی عمودی
C	8.2580	6.4893
L	4.0429	4.6331
P	10.755	8.0534



شکل ۴: ضریب بازپراکنش سطحی مدل رابطه تجمعی در پلاریزاسیون افقی افقی و باند L

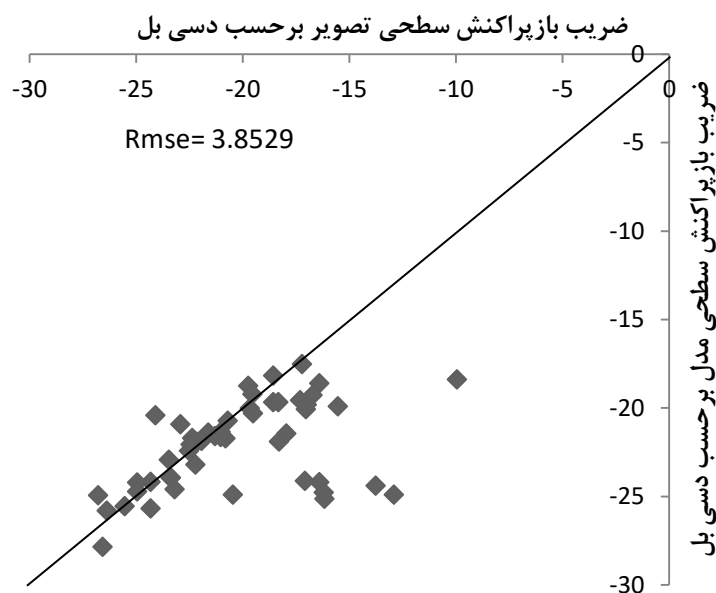
در نتیجه مدل دوبوآ در باند L نتایج بهتری نسبت به دو باند دیگر دارد.

تمامی نتایج به دست آمده از مدل دوبوآ در جدول (۴) آمده است اما به دلیل محدودیت، فقط نمودار این مدل در باند L برای پلاریزاسیون عمودی عمودی به عنوان مثال نشان داده شده است. شکل (۵) دقت مناسب این مدل در تخمین ضریب بازپراکنش را در باند L نشان می‌دهد.

با بررسی نتایج پیاده‌سازی برای پلاریزاسیون افقی افقی مربوط به مدل دوبوآ، می‌توان دید که مدل دوبوآ در باند L دارای دقت بیشتری برای محاسبه این ضریب است. ریشه میانگین مربع انحراف برای  $\sigma_{HH}^0$  در باند C برابر با ۵.۱۲۸۳، در باند L برابر با ۴.۷۶۳۷ بوده و در باند P برابر با ۸.۱۶۱۰ است. ریشه میانگین مربع انحراف برای  $\sigma_{VV}^0$  در باند C برابر با ۴.۲۷۹۷، در باند L برابر با ۳.۸۵۲۹ بوده و در باند P برابر با ۸.۳۱۳۰ است.

جدول ۴: نتایج مدل دوبوآ برای پلاریزاسیون‌های افقی افقی و عمودی عمودی در سه باند L، C و P

دوبوآ	افقی افقی	عمودی عمودی
C	5.1283	4.2797
L	4.7637	3.8529
P	8.1610	8.3130



شکل ۵: ضریب بازپراکنش سطحی مدل دوبوآ در پلاریزاسیون عمودی عمودی و باند L

در باند C بهترین دقت را داشتند. نتایج باند P با توجه به طول موج و عدم استفاده از آن در طراحی مدل‌ها نتایج قابل پیش‌بینی بود و این تحقیق برای مقایسه نتایج اولین بار از این باند استفاده کرده است. دقت بهتر مدل رابطه تجمعی در باند L به دلیل نوع رفتار این مدل

جدول (۵) بیان می‌کند که کدام مدل برای کدام باند و کدام پلاریزاسیون مناسب‌تر است. در واقع این جدول خلاصه‌ای از بخش اول این تحقیق است. شایان ذکر است که در تمامی نتایج به دست آمده برای ضریب بازپراکنش افقی افقی، مدل A در باند C و برای ضریب بازپراکنش عمودی عمودی نیز مدل A

در تخمین زبری استفاده شده است، درجه آزادی ۴ در حصول نتایج دقیق تاثیرگذار بود. نتایج مذکور از دقت بهتری نسبت به آلوارز و همکاران [۹]، نشوش و همکاران [۱۵] و سیکدار و همکاران [۱۰] نتایج برخوردار است.

جدول ۶: نتایج زبری سطح خاک برای مدل های آه، دوبوآ و رابطه تجمعی در سه باند L، C و P

دوبوآ	آه	رابطه تجمعی	زبری سطح
1.754	0.8895		C
0.3314	1.3196	0.1801	L
1.7682	3.3574		P

با توجه به نتایج بهتر مدل رابطه تجمعی فقط نمودار مربوط به این مدل برای تخمین زبری سطح خاک آمده است (شکل ۶) و از نمایش سایر مدل ها خودداری شده است.

نتایج ضریب ثابت دی الکتریک ابتدا برای دو مدل آه و دوبوآ به دست آمد و سپس از روش بندلش برای مدل رابطه تجمعی محاسبه شد. ضریب ثابت دی الکتریک با استفاده از دو مدل آه و رابطه تجمعی و در سه باند P، L و C محاسبه شد که با مقایسه ۶ ریشه میانگین مربع انحراف به دست آمده (شکل ۷) مدل آه با ریشه میانگین مربع انحراف ۲.۴۶۳۶ در باند L دقت خوبی دارد، هرچند که طبق پیشبینی مدل رابطه تجمعی در روش بندلش با ریشه میانگین مربع انحراف ۲.۴۳۳۰ نتیجه بهتری داده است (جدول ۷). در تخمین ضریب ثابت دی الکتریک به صورت قاطع نمی توان گفت کدام مدل بهتر است، چون علاوه بر عمق نفوذ، شرایط مختلفی مانند منطقه مورد مطالعه دخیل هستند. هرچند که نتایج این تحقیق در مقایسه دو مدل دوبوآ و آه مانند صاحبی و همکاران [۱۴]، ششی و همکاران [۸]،

با پارامتر زبری سطح است، همان طور که در مقدمه بیان شد، زبری در این مدل آنچنان تاثیری ندارد و با ذکر این نکته که طول موج باند L نسبت به باند C بلندتر است، تاثیر داده زبری در نتایج کمتر دیده می شود. نتایج مدل دوبوآ در مقایسه با تحقیقات دیگر آه و همکاران [۶] و دوبوآ و همکاران [۱۶] از دقت کمتری برخوردار است هرچند که در مقایسه نتایج مدل ها فاکتور مهم منطقه با شرایط یکسان بسیار تاثیرگذار است.

جدول ۵: بهترین مدل در هر پلاریزاسیون و باند در تخمین ضریب بازپراکنش سطح

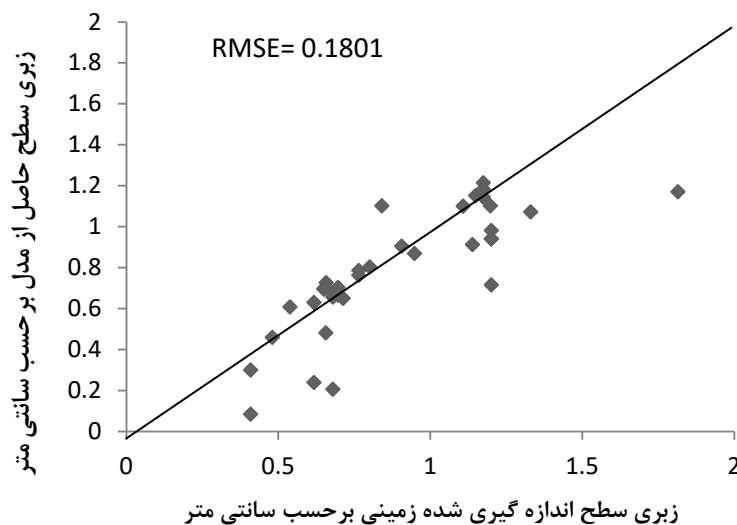
	عمودی عمودی	افقی افقی
C	آه	آه
L	دوبوآ	رابطه تجمعی
P	رابطه تجمعی	دوبوآ

در ادامه به بررسی نتایج به دست آمده پارامترهای سطح خاک می پردازیم. پارامتر زبری همان طور که بیان شد، با استفاده از معکوس مدل آه در ۳ پلاریزاسیون افقی افقی، عمودی عمودی و افقی عمودی و هم چنین در مدل دوبوآ در ۲ پلاریزاسیون افقی افقی و عمودی عمودی محاسبه گردید. در جدول (۶) مشخص است که این پارامتر با استفاده از مدل رابطه تجمعی بهترین نتیجه را با ریشه میانگین مربع انحراف، ۰.۱۸۰۱ حاصل شده است. هم چنین در مقایسه دو مدل دیگر در باندهای سه گانه مدل دوبوآ در باند L دقت بهتری دارد، با توجه به این که دقت مدل آه در باند C با ریشه میانگین مربع انحراف ۰.۸۸۹۵ نیز قابل توجه است. با تمامی تفاسیر، مدل رابطه تجمعی با روش بندلش، بهترین دقت را داراست. نتایج مدل رابطه تجمعی با استفاده از روش ریاضی مناسبتری از سایر مدل ها به دست آمده است؛ علاوه بر اینکه از هر سه باند

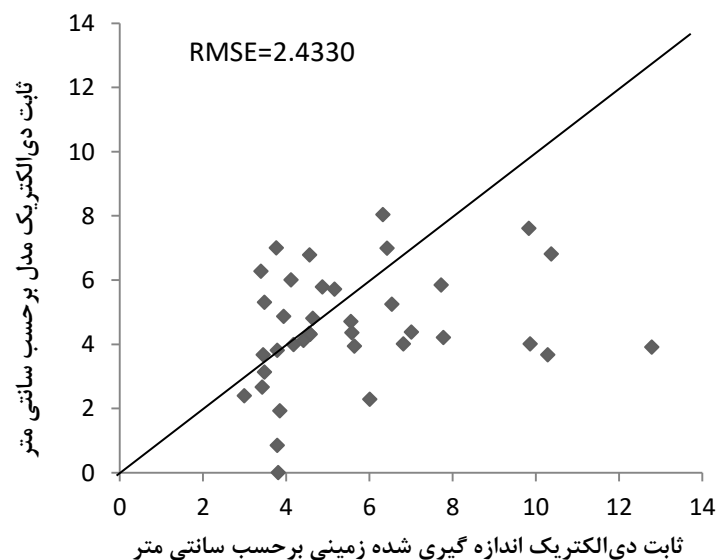
جدول ۷: نتایج ضریب ثابت دی الکتریک برای مدل های آه،  
دوبوآ و رابطه تجمعی در سه باند C، L و P

ثابت دی الکتریک	رابطه تجمعی	آه	دوبوآ
C		3.1783	1.754
L	2.4330	2.4636	6.9417
P		3.0626	13.6962

بندلیش و همکاران [۱۵] و از روند یکسانی برخوردار نیست ولی نتایج دوبوآ را می توان در تطبیق پذیری بهتر با سایر پارامترها درفرآیند به دست آوردن ثابت دی الکتریک جستجو کرد.



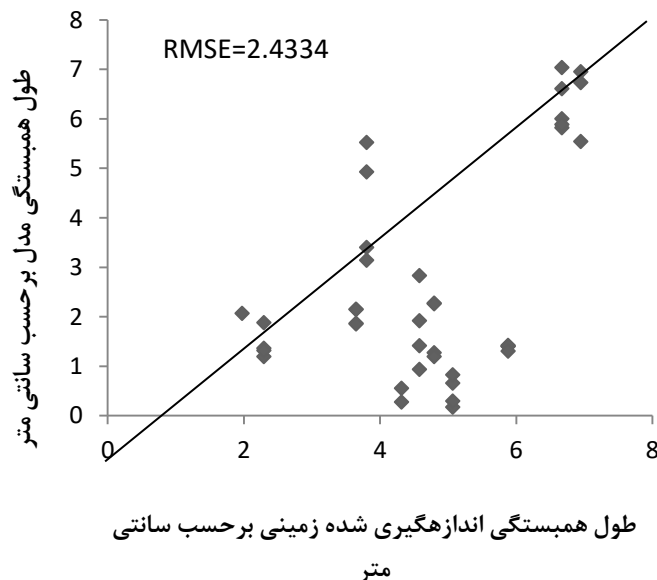
شکل ۶: زبری سطح خاک مدل رابطه تجمعی در سه باند C، L و P



شکل ۷: ضریب ثابت دی الکتریک سطح خاک مدل رابطه تجمعی در سه باند C، L و P

به دست آمده است. شکل (۸) نمایانگر نحوه عملکرد این مدل در تخمین طول همبستگی است.

همچنین طول همبستگی نیز با استفاده از مدل رابطه تجمعی در سه باند و در دو پلاریزاسیون



شکل ۸: طول همبستگی سطح خاک مدل رابطه تجمعی در سه باند C، L و P

بخش اول به مقایسه ضریب بازپراکنش افقی و عمودی عمودی منتهی از مدل و مقدار متناظر تصویری آن پرداختیم که در نهایت برای مدل رابطه تجمعی برای ضریب بازپراکنش افقی افقی، باند L و برای ضریب بازپراکنش عمودی عمودی نیز باند L بهترین دقت را داشتند. در مدل A، باند C برای هر دو ضریب بالاترین دقت و برای مدل دوبوآ، باند L بیشترین دقت را داشت.

در نهایت می توان نتایج تحقیق را به دو بخش تقسیم کرد، در بخش مقایسه ضرایب بازپراکنش، مدل A در باند C با ریشه میانگین مربع انحراف ۳.۱۲۲۲ بهترین دقت را دارد. در این بخش مدل های دوبوآ و رابطه تجمعی در باند L دقت های مناسبی دارند، اما نسبت به بهترین حالت نتایج ضعیف تری داشتند.

در بخش بازتابی پارامترهای سطح خاک به عنوان اصلی ترین هدف تحقیق، روش حل معادلات با استفاده از سرشکنی که روی مدل رابطه تجمعی

از آنجایی که طول همبستگی فقط در مدل رابطه تجمعی هست، پس تنها می توان از این مدل این پارامتر را به دست آورد که با استفاده از روش بندلش، به دقت مناسبی با ریشه میانگین مربع انحراف ۲.۴۳۳۴ برای این پارامتر رسیده ایم. تحقیقات مستندی زیادی راجع به این پارامتر به صورت جداگانه وجود ندارد و اکثر تحقیقات به صورت کلی در قالب زبری بیان شده است.

#### ۴- نتیجه گیری

شاید بتوان ادعا کرد که با توجه به تعدد مدل های بازپراکنش سطح و روش های مختلف معکوس ریاضی و فیزیکی، ده ها روش برای بازتابی پارامترهای سطح خاک وجود دارد؛ در این تحقیق سعی شد با توجه به داده های موجود و پیشینه مدل های بازپراکنش سطح، از سه مدل A، دوبوآ و رابطه تجمعی در سه باند L، C و P که مربوط به پروژه آزمایشات رطوبت خاک ۰۳ در منطقه اوکلاهوما جنوبی استفاده شود. در

سایر مدل‌ها دارد. هم چنین نتایج ضعیف‌تر مدل‌های نیمه تجربی در تخمین پارامترهای سطح خاک نسبت به مدل تئوری رابطه تجمعی اشاره کرد.

### سپاسگزاری

تقدیر و تشکر به عمل می‌آوریم از مسئولین پروژه آزمایشات رطوبت خاک ۰۳ (SMEX) که داده‌های موردنیاز این تحقیق را در وبگاه خود برای تحقیقات در زمینه‌های مختلف قرار داده اند.

صورت گرفت، در تخمین تمامی پارامترها نتایج با دقت بهتری به دست آمدند، در تخمین زبری سطح ریشه میانگین مربع انحراف ۰.۱۸۰۱ و برای ضریب ثابت دی‌الکتریک ریشه میانگین مربع انحراف ۲.۴۳۳۰ به دست آمد، هرچند که مدل آه در باند C برای تخمین زبری سطح و همین مدل در باند L برای تخمین ضریب ثابت دی‌الکتریک نتایج مناسبی به دست آمد.

از جمله نتایج این تحقیق می‌توان به نتایج نامناسب باند P اشاره کرد، که نتایج بسیار نامناسبی نسبت به

### مراجع

- [1] Pathe, C., Wagner, W., Sabel, D., Doubkova, M., & Basara, J. B.. "Using ENVISAT ASAR global mode data for surface soil moisture retrieval over Oklahoma, USA". *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 47(2), 468-480, (2009).
- [2] Topp, G. C., Davis, J. L., and Annan, A. P.. "Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines". *Water Resources Research*, 16(3), 574-582, (1980).
- [3] Walker, J. P.. "Estimating soil moisture profile dynamics from near-surface soil moisture measurements and standard meteorological data". (Doctoral dissertation, The University of Newcastle), (1999).
- [4] Baronti, S., Carla, R., Sigismondi, S., & Alparone, L. "Principal component analysis for change detection on polarimetric multitemporal SAR data". In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1994. IGARSS'94. Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis and Interpretation.*, International IEEE, 4, (1994, August).
- [5] Ulaby, F.T.; Moore, R.K.; Fung, A.K.. "Microwave Remote Sensing: Active and Passive. Volume Scattering and Emission Theory, Advanced Systems and Applications". Dedham, MA, USA, 14, (1986).
- [6] Oh, Y., Sarabandi, K., & Ulaby, F. T. "An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces". *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 30(2), 370-381, (1992)..
- [7] Fung, A.K.; Li, Z.; Chen, K.S. "Backscattering from a randomly rough dielectric surface". *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 30, 356-369. (1992).
- [8] Shi, J.; Wang, J.; Hsu, A.Y.; O'Neill, P.E.; Engman, E.T. "Estimation of bare surface soil moisture and surface roughness parameter using L-band SAR image data". *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 35, 1254-1266. (1997).
- [9] Álvarez-Mozos, J., Gonzalez-Audicana, M., & Casali, J. "Evaluation of empirical and semi-empirical backscattering models for surface soil moisture estimation". *Canadian Journal of Remote Sensing*, 33(3), 176-188. (2007).
- [10] Sikdar, M.; Cumming, I. "A modified empirical model for soil moisture estimation in vegetated areas using SAR data". In *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS '04)*, Anchorage, AK, USA,; pp. 803-806, (2004).
- [11] Neusch, T.; Sties, M. "Application of the

- Dubois-model using experimental synthetic aperture radar data for the determination of soil moisture and surface roughness". ISPRS J. Photogramm. Remote Sens., 54, 273-278, (1999).
- [12] Sahebi M. R. and J. Angles. "An inversion method based on multi-angular approaches for estimating bare soil surface parameters from RADARSAT-1". Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 6, 207-241, (2009).
- [13] Sahebi, M.R.; Bonn, F.; Béné, G.B. "Neural networks for the inversion of soil surface parameters from synthetic aperture radar satellite data". Can. J. Civil Eng., 31, 95-108, (2004).
- [14] Sahebi, M. R. ; Bonn, F. ; Gwyn, Q. H. J. "Estimation of bare soil surface moisture from RADARSAT using simple empirical models". International Journal of Remote Sensing, 24, 2575-2582, (2003).
- [15] Bindlish, R. and A. P. Barros. "Multifrequency Soil Moisture Inversion from SAR Measurements with the Use of IEM. REMOTE SENS". ENVIRON. 71:67-88, (2000).
- [16] Dubois, P. C., & Van Zyl, J. "An empirical soil moisture estimation algorithm using imaging radar". In Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'94 (Vol. 3, pp. 1573-1575). IEEE, (1994, August).



## **Comparison of backscattering soil surface models to validate and inversion physical parameters**

Seyed Mohammad MirMazloumi. <sup>\*1</sup>, Mahmood Reza Sahebi. <sup>2</sup>

1- MSc graduated, Remote Sensing Eng. Dept., KN Toosi University of Technology

2- Assistant Professor, Remote Sensing Eng. Dept., KN Toosi University of Technology

### **Abstract**

Using SAR data is the best and the most popular method for retrieving soil surface parameters. This research is trying to choose the best model to estimate soil surface parameters from SMEX03 data over southern Oklahoma. First, backscattering coefficients obtained from the Oh, Dubois, and IEM backscattering models in L, C, and P bands were compared with backscattering coefficients of the images in HH and VV polarization and the best model was chosen. Then soil roughness, dielectric constant and correlation length estimated from inversion backscattering models based on the mathematical algorithms and compared with corresponding result measured by ground truth.

In backscatter coefficients comparison section, the Oh model in band C presented the most accurate results. In this section, Dubois and IEM models in band L had appropriate accuracies. However, their results were weaker than the best result. In retrieving soil surface parameters section, the main purpose of the research, variables solution with adjustment on IEM provided better accuracy for estimating all parameters; however, the Oh model in band C for estimating surface roughness and in band L for estimation of dielectric constant presented the appropriate results. Inaccurate results of band P was another result calculated in this research. The results of band P presented the least satisfactory results in this work. In conclusion, the results of empirical models are weaker than of the results obtained from the theoretical model (IEM). In addition, using more accurate ground truth data might result in obtaining more accurate validation part.

**Key words:** Backscattering models, Remote Sensing, SAR, Soil surface parameters.