در بردار

نشربه علمي مهندسي فناوري اطلاعات مكاني

سال یازدهم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۲ Vol.11, No.4, Winter 2024 ۱۰۳ – ۱۱۷ مقاله پژوهشی

یک رابطه فرکتالی جدید برای اندازهگیری زبری سطح به منظور استفاده در مدلهای فیزیکی بازپراکنش راداری

محمد ملکی*

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۱۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۴

چکیدہ

حساسیت امواج مایکروویو به پارامترهای فیزیکی و هندسی خاک سبب شده است تا سنجش از دور راداری کاربردهای وسیعی در حوزههای مختلف پیدا کند. در مسائل کشاورزی و زیست محیطی بررسی پارامترهای خاک از جمله رطوبت و زبری آن از مسائل مهم و مورد توجه متخصصان این حوزه بوده است که رطوبت مربوط به خصوصیت فیزیکی و زبری مربوط به خصوصیت هندسی خاک میباشد. پارامتر زبری نقش مهمی در تعیین چگونگی فرسایش خاک دارد. همچنین به منظور بررسی رطوبت خاک حتما میبایست زبری خاک نیز مورد مطالعه قرار گیرد. مدلهای مختلفی به منظور تخمین این دو پارامتر از تصاویر راداری وجود دارد که از مهمترین آنها به مدل معادله انتگرالی (*IEM*) و مدل آشفتگی کوچک (*SPM*) میتوان اشاره نمود. با توجه به اینکه ارزیابی دقت این مدلها در تخمین زبری سطح بر اساس دادهای واقعی زمینی مورت میگیرد، لذا محاسبه اندازه گیری زبری زمینی از اهمیت بالایی برخوردار است. به منظور اندازه گیری زبری زمینی دو روش استفاده از اندازه گیری به منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از وارونه سازی برخوردار است. به منظور اندازه گیری زبری زمینی دو روش استفاده از پیشنهاد شده که مبتنی بر طول پروفیل میباشند، در حالی که در این مطالعه رابطه جدیدی برای وندازه گیری زبری به روش فرکتالی پیشنهاد شده که مبتنی بر فواصل نمونه برداری و ضریب هرسازی زبری با استفاده از مدل های فیزیکی، روشها و فرمول های مختلف فرکتالی پیشنهاد شده که مبتنی بر طول پروفیل میباشند، در حالی که در این مطالعه رابطه جدیدی برای اندازه گیری زبری به روش فرکتالی پیشنهاد شده که مبتنی بر فواصل نمونه برداری و ضریب هورست است. این رابطه بر اساس شبیه سازی سطوح مختلف فرکتالی در ابعاد وسیعی به دست آمده است. دقت مدل بهدست آمده ۲۱۰ هر ۱۹۵۹ که در این مطالعه رابطه جدیدی برای اندازه گیری زبری به روش فرکتالی بیشنهاد

كليدواژهها : پارامتر زبرى سطح، هندسه فركتالى، هندسه اقليدسى، مدل فركتالى fbm

[.] آنویسنده مکاتبه کننده: گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. تلفن: ۰۹۱۸۳۳۶۷۶۵۰

سال یازدهم • شماره چهارم • زمستان ۱۴۰۲

۱– مقدمه

حساسیت امواج ماکرویو به پارامترهای فیزیکی و هندسی خاک سبب شده است تا سنجش از دور راداری کاربردهای وسیعیدرحوزههای مختلف پیدا کند. بخصوص قابلیت بازیابی رطوبت خاک از تصاویر با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا سبب شدہ است کے مشارکت این علم در پیشبینی مدلهای هیدرولوژی و هواشناسی و همچنین در بهینهسازی فعالیتهای اقتصادی در بخش کشاورزی بیشتر شده و قابلیتهای آن به اثبات رسیده است. در تخمین کمی پارامترهای خاک یعنی رطوبت و زبری، جداسازی نقش و مقدار هر کـدام آنهـا در بـاز پـراکنش تصـاویر راداری مسـئله مهمی میباشد، لذا به منظور تخمین مقدار رطوبت خاک، اندازه گیری کمی زبری خاک نیز مورد نیاز است. اندازه گیری مقدار زبری خاک با تصاویر چند پلاریزه بهتر انجام می گیرد. پارامتر زبری به عنوان یک عامل مزاحم در اندازه گیری رطوبت مطرح می باشد که مطالعات زیادی در خصوص به حداقل رساندن نقش ایـن کمیـت در تخمـین رطوبـت خـاک انجـام گرفتـه است [۱]. برای جداسازی نقش این دو پارامتر می بایست از تصاویر با پلاریزاسیون کامل آستفاده نمود[۲]. یکی از پارامترهای کلیدی در مورد سطح، ٔ رطوبت حجمی آب هوجود در خاک می باشد که مقدار باز پراکنش امواج راداری به شدت به دلیل تاثیر ثابت دی الکتریک به آن وابسته میباشد. ویژگی دیگر سطح، پارامتر هندسی خاک است که این پارامتر تحت عنوان زبری خاک توصيف می شود. زبری خاک بوسيله دو پارامتر تعريف مي گردد:

^NMoisture ^TRoughness ^TFull Polarized ^TSurface ^DVolumetric soil moisture

۱- K.S (K شـماره مـوج و S انحـراف معيـار ارتفاع مىباشد)
۲- طول همبستگى.
پارامتر K.S تغييرات زبرى را در جهت عمودى و پارامتر طول همبستگى، تغييرات زبرى را در جهت افقى نشان مىدهد.

الگوریتمهای مختلفی در رابطـه بـا ارتبـاط پارامترهـای سطح با بازپراکنش امواج با پلاریزاسیونهای مختلف به منظور تخمین آنها پیشـنهاد شـدهاسـت. در تمـام ایـن موارد پلاریمتری نقش مهم و تعیین کنندهای دارد.

مسئله پراکنش امواج الکترومغناطیس از سطوح با زبری نامنظم همواره یکی از موضوعات مورد توجه محققان بوده است و تاکنون هنوز روش دقیق و قابل اعتمادی برای آن بدست نیامده است. البت برای بسیاری از کاربردهای عملی،روشهای تقریبی مناسب میاشد. یکی از مشهورترین و متداولترین مدل های تقریبی در حوزه رادار مدل آشفتگی کوچک (SPM) میباشد. فرض اولیه در این مدل این است که تغییرات ارتفاعی در مقایسه با طول موج کوتاه است، در نتیجه این مدل برای طول موجهای بلند مانند S و L مناسب میباشد. اگر چه این مدل برای محدوده کوچکی از سطوح معتبر است، اما به هر حال یکی از روش های کلاسیک در حوزه رادار میباشد. این مدل در بسیاری از کارهای عملی استفاده شده است و در بسیاری از مطالعات روشهای عددی برای این مدل انجام گردیده است [۳و۴]. در نواحي مدل SPM، نسبت پـراکنش هـم پلاريـزه^۷ بـراي نواحی با زبری اندک (K.S<۰٫۳)، به ثابت دی الکتریک حساس می باشد. متعاقبا این نسبت برای نواحی زبرتر (K.S>./۳) غیر حساس می باشد. معمولا زبری سطوح $-\pi < K.S < 1$ داری L داری $-\pi < K.S < 1$ می باشد. برای این نواحی تاکنون مدل های تجربی و

Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2025-06-05

⁹Small Perturbation Model ⁹Copolarized

نیمه تجربی در بعضی از مطالعات توسعه داده شده است[۵۹]. بین پلاریزاسیونهای مختلف در ارتباط با تغییرات ارتفاعی و ثابت دی الکتریک سطح، همبستگی مشاهده می گردد[۷]. این مشاهدات نشان میدهد که استفاده از ضریب همبستگی میتواند برای جداسازی رطوبت و زبری خاک استفاده گردد، اما با این وجود باز هم روش عددی قوی برای این کار نمی باشد. ارتباط بین زبری سطح خاک با مقادیر ویژه ماتریس همدوسی پراکنش، که هر کدام از آنها داری تعبیر فیزیکی خودشان می باشند، با استفاده از دامنه تصاویر در آزمایشگاه اثبات شده است[۸].

این دستاورد، متخصصان را به استفاده از تصاویر با پلاریزاسیون کامل برای جداسازی پارامترهای سطح ترغیب نموده است. اولین مدل در این رابطه توسط هاجنسک^۱و همکاران تحت عنوان *Rragg که م*دل توسعه یافته *SPM یا م*دل *Bragg م*یباشد، ارائه شدهاست [۲]. در این مدل برخلاف مدل *SPM ک*ه از تصاویر دو پلاریزه (هم پلاریزه) استفاده می شود، این مدل از پلاریزاسیون کامل استفاده می کند.

یکی دیگر از مدلهای فیزیکی مشهور برای تخمین زبری سطح از تصاویر راداری، مدل معادله انتگرالی (IEM) آمیباشد.

در تخمین زبری سطح، روشی که برای اندازه گیری آن برای ورود به مدلهای فیزیکی استفاده می گردد، بسیار مهم میباشد. روشهای مورد استفاده شامل اندازه گیری زبری سطح به روش هندسه اقلیدسی و هندسه فرکتالی میباشند. مطالعات متعددی در جهت بهبود دقت میباشند. مطالعات متعددی در جهت بهبود دقت بازیابی زبری سطح با استفاده از مدلهای فیزیکی انجام شده است. در کار با مدل *IEM* مطالعات بیشتر در زمینه نحوه بیان هندسه سطح صورت گرفته است. به عبارت دیگر با انجام پیشپردازش بر روی پارامترهای

[\]Hajnesk [\]Integral Equation Model

یـک رابطـه فرکتـالی جدیـد بـرای انـدازهگیـری زبـری... محمد ملکی

ورودی مدل IEM سعی در بالا بردن دقت تخمین زبری سطح را داشتهاند [۹۹ ۲۰]. همچنین علاوه بر محاسبه پارامترهای زبری سطح با استفاده از روش فرکتالی برای ورود به مدل IEM یکی دیگر از روشهای بهبود دقت، استفاده از مدل فیزیکی فرکتالی SPM می باشد. مطالعات مختلفی به منظور محاسبه بعد فرکتالی تصویر SAR با این مدل و مدل هندسه فرکتالی صورت گرفته است [۱۱ و ۱۲].

اکثر تحقیقات اذعان دارند که مدل فرکتالی بهترین روش برای بیان هندسه سطح یا زبری میباشد/۱۴،۱۳و ۱۵]

۲ – اندازه گیری پارامتر زبری ورودی مـدلهای
فیزیکی بازپراکنش به روش هندسه اقلیدسی:
پارامترهای زبری مدلهای فیزیکی در هندسه کلاسیک
شامل مربع میانگین ریشه ارتفاع (rms_height) و طول
همبستگی میباشند. rms_height نشاندهنده تغییرات
ارتفاعی زبری سطح و طول همبستگی بیانگر تغییرات
زبری سطح در جهت افقی میباشد. مقدار
زرطه (۱) حاصل میگردد:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} [(\sum_{i=1}^{N} z_i^2) - N \overline{z}^2]} \qquad g \qquad \overline{z} = \frac{1}{N}$$

در رابطه (۱)، N تعداد نمونـهها، z ارتفاع نمونـههای اندازه گیری شـده و \overline{z} میانگین ارتفاع کـل نمونـهها می باشد. زبری نسبت به طول موج تعریف می گردد؛ بـه عنوان مثال برای طول موج D ممکن است یـک سـطح زبر باشد در حالی که برای طول موج L زبـری آن فـرق کنـد(کمتـر باشـد). لـذا تغییـرات عمـودی ارتفاع بـا پارامتر π . σ تعریف می گردد که k شماره موج می باشـد و مقدار آن برابر با $K\pi/\lambda$ بوده که k طول موج است. \mathbf{T} مدل هندسه فرکتالی: در میان مدلهای هندسی برای بیان پدیدههای طبیعی

[&]quot;Root Mean Square of height

نشریہ علمی – مہندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال یازدهم • شماره چهارم • زمستان ۱۴۰۲

و زبری سطح، مدل فرکتالی نسبت به مدلهای دیگر مانند نمایی و گوسی بهتر است[۱۵و۱۹]. در اکثر (*fBm*) مطالعات معمولا از مدل فرکتالی حرکت براونی (*fBm*) برای توصیف زبری سطح استفاده می گردد. یک روند تصادفی،^۲ (*x*, *y*) سطح استفاده می گردد. دیک روند توصیف کند که برای هر مقدار '*y*.*y*' *x* و *x* در دامنه اعداد حقیقی، رابطه(۲) برقرار باشد:

 $pr\{z(x, y) - z(x'.y') < \zeta = \frac{1}{\sqrt{2\pi s\tau^{H}}} \int_{-\infty}^{\zeta} \exp(-\frac{\zeta^{2}}{2s^{2}\tau^{2H}}) d\zeta$

 $\tau = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2}$ در رابطه(۲)، τ فاصله بین دو نقطه میباشد که از رابطه، مقدار بیان شده بدست میآید. همچنین در این رابطه، مقدار H ضریب هورست میباشد که معمولا دارای مقدار بین صفر و یک است. *s* انحراف معیار افزایشی^T میباشد و این مقدار نباید با *rms_height* اشتباه گرفته شود. پارامتر دیگر مهم در هندسه فرکتالی توپوتزی ^۲است *fBm* که تحت عنوان طول مشخصه سطح فرکتالی *s* تعریف می گردد. ارتباط این طول با ضریب هورست و از رابطه (۳) به دست میآید:

رابطه(۳) $s = T^{1-H}$ در رابطه(۳)، T مقدار توپوتزی میباشد. توپوتزی عبارت است از طولی که مقدار شیب⁶*RMS* نقاط بر روی آن، برابر یک باشد. ضریب هورست از طریق رابطه(۴) برای سطوح سه بعدی با بعد فرکتالی ارتباط پیدا میکند: D = 3 - H (۴) رابطه(۴)، D بعد فرکتالی میباشد. نکته مهم در خصوص بیان فرکتالی سطح این است که

[\]Fractal Brownian Motion [\]Stochastic process [\]Incremental Standard deviation [\]Topothesy [\]Root Mean Square Slope

زبری سطح در هندسه فرکتالی هم می تواند به صورت خود متشابه⁹و هم خود وابسته ^۷تعريف گردد [۱۶].در یک سطح خود متشابه اگر یک قسمت کوچک آن بزرگنمایی گردد، دقیقا مانند کل آن سطح میباشد. بر طبق این تعریف واژه فرکتـال را مـی تـوان متـرادف بـا مقیاس ثابت ^۸در نظر گرفت. بسیاری از خصوصیات زمین شناسی خاک در مقیاس های متفاوت ممکن است شبیه به هم به نظر برسند، اما در مورد توپوگرافی و زبـری سـطح ایـن خصوصـیت بـه نـدرت اتفـاق میافتد (۱۷]. در این حالت بخش کوچکی از سطح تابعی از سطح کل میباشد که تحت عنوان خود متشابه تعریف می گردد. بنابراین دو پارامتر برای توصیف زبـری توسط هندسه فركتالي مورد نياز است. اولين پارامتر نحوه تغییرات زبری سطح را در مقیاسهای متفاوت بیان می کند و پارامتر دیگر واریانس سطح را در مقیاس مرجع تعريف مي كند. اين دو پارامتر همان بعد فركتالي و توپوتزی میباشند. یک پارامتر به تنهایی نمای تواند زبری سطح را توسط هندسه فرکتالی بیان کند. ممکن است دو سطح با زبری مختلف دارای ابعاد فرکتالی یکسان باشند که در این صورت آنچه که می تواند این دو را از هم متمایز کند توپوتزی است. زبری سطح به دو مولفه بسیار مهم بهخصوص در هندسه فرکتالی وابسته است[۱۷]:

۱- اندازه واحد نمونهبرداری: یعنی اینکه با یک بار
اندازه گیری چه ناحیهای از سطح را پوشش میدهد. این
اندازه در واقع همان طول پروفیل میباشد. معمولا اکثر
دادههای زبری زمینی در مقیاس I×1 مترمربع اندازه گیری میشوند [۱۹۹].

۲- فاصله بین نمونه های اندازه گیری یا فاصله بین نقاطی که ارتفاع آنها اندازه گیری می شود.

^vSelf –affine

[^]Scale invariance

^{\$}Self similar

امروزه روشهای مختلفی برای اندازه گیری زمینی ارتفاع نقاط وجود دارد که عبارتند از روشهای تماسی و غیرتماسی. در روشهای تماسی مانند اندازه گیری با مقطع بردارهای سوزنی معمولا قدرت تفکیک مکانی در حد یک سانتیمتر میباشد / ۱۹]، اما در روشهای غیرتماسی مانند روشهای فتوگرامتری امکان اندازه-گیری با قدرت تفکیک مکانی بهتر از سانتیمتر و در حد میلیمتر وجود دارد.

تابع خود همبستگی (که طول همبستگی از آن به دست می آید)، درجه همبستگی بین ارتفاع (*x*) را در نقطه *x* و ارتفاع (*x*(*x*+*ρ*) به فاصله *q* از *x* اندازه گیری می کند. این تابع مطابق رابطه (۵) بیان می گردد:

$$\rho(r) = \frac{\sum_{i=1}^{N-r} z_i - z_{i+r} / \Delta x}{\sum_{i=1}^{N} z_i^2}$$
(۵)

در رابطه(۵)، r جابجایی مکانی^{$7} e x \Delta$ فواصل مقاطع نمونهبرداری میباشد. طول همبستگی l عبارت است از طول r به هنگامی که مقدار تابع خود همبستگی بزرگتر یا مساوی 2/l گردد. متداولترین توابع همبستگی، توابع نمایی و گوسی میباشد که از روابط(۶) و (Y) به دست میآیند:</sup>

$$\rho(r) = e^{\frac{|r|}{l}} \tag{(8)}$$

$$o(r) = e^{\overline{l^2}} \tag{Y}$$

محاسبه طول همبستگی به دلیل وابستگی به طول پروفیل و مقدار *rms_height* همواه کار سخت و پیچیده ای بوده است. بغدادی (۲۰۰۰) روابطی را برای محاسبه طول همبستگی به عنوان تابعی از پلاریزاسیون، طول موج ، زاویه برخورد و *rms_height* ارائه داد [۲۰]. در بعضی از

یـک رابطـه فرکتـالی جدیـد بـرای انـدازهگیـری زبـری... محمد ملکی

مطالعات از شکل تعمیم یافته تـابع خودهمبسـتگی بـه عنـوان هندسـه فرکتـالی مطـابق رابطـه (۸) اسـتفاده میگردد.

 $\rho(r) = e^{\frac{-r}{l^{\beta}}}$ رابطه(۸) زریبی آو همکاران (۲۰۰۰) از تابع رابطه(۷) برای محاسبه بعد فرکتالی در زمینهای کشاورزی استفاده نمودند. آنها نتیجه گرفتند که مقدار بعد فرکتالی برای زمینهای کشاورزی برای پروفیل طولی، حدود ۱٫۴ میباشد [۲۱].

در رابطه(۸) اگر مقدار ۲ = β باشد تـابع گوسـی و اگـر برابر یک باشد تـابع خودهمبسـتگی بـه نمـایی تبـدیل میشود.

۳–۱– محاسبه پارامتر زبری(rms_height) ورودی مدل های فیزیکی بازپراکنش با استفاده از هندسه فرکتالی:

همانطور که گفته شد دو پارامتر مهم هندسه فرکتالی عبارتند از بعد فرکتالی و توپوتزی. برای محاسبه -rms height می ایست ابتدا تابع طیف مقطع یا سطح را به دست آورد. بعد از محاسبه مربوط به تابع طیف سطح، ضریب هورست و بعد فرکتالی به دست می آیند. تابع چگالی طیف توان سطح[†](PSD) از رابطه (۹) حاصل می شود [۲۲]:

$$s(k) = s_0 k^{-\alpha}, k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$$
 (9)

در رابطه (۹)، k عدد موج و α شیب طیف میباشـد و مقدار s_0 از رابطه (۱۰) به دست میآید:

$$s_0 = 2^{H+1} \gamma^2 (1+h) \sin(\pi H) s^2$$
 (۱۰) ابطه(

مقدار α برابر با شیب مقدار S(k) بر حسب k در مقدار α مقیاس لگاریتمی میاشد. رابطه بین α و ضریب

^۳Zribi

^{\$}power spectral density

Autocorrelation Function

^{*}Lag Distance(increment distance)

سال یازدهم ● شماره چهارم ● زمستان ۱۴۰۲

$$rms-height = \sqrt{\frac{L^{\alpha}}{\alpha - 1}}$$
 (۱۳) رابطه

$$l = \frac{(\alpha - 1)^2 L}{2(2\alpha - 1)}$$
(۱۴) رابطه

در روابط(۱۳) و (۱۴)، L طول پروفیل، α شیب تابع طیف سطح و l طول همبستگی میباشد.

همانطور که در روابط بالا مشاهده می گردد، پارامترهای هندسه فرکتالی ارتباط مستقیمی با طول پروفیل دارند. محققین زیادی تاکید کردهاند که این روابط باید بر حسب طول پروفیل ایجاد گردد. اما نکته مهم دیگر این است که این پارامترها علاوه بر طول پروفیل تابعی از فاصله بین نمونههای اندازه گیری شده یا قدرت تفکیک نمونهبرداری میباشند. به همین جهت ارائه یک رابطه که وابستگی زبری سطح را به فواصل نمونهبرداری نشان دهد میتواند در بهبود دقت اندازه گیری این پارامتر مفید باشد. در واقع هدف اصلی در این مطالعه ارائه مید باشد.

۴-ارائه روش پیشنهادی این تحقیق برای محاسبه rms_height فرکتالی

برای ارائه روش پیشنهادی در این مطالعه ابتدا شبیه-سازی سطوح فرکتالی، در محدوده وسیعی از ابعاد فرکتالی و طولها و قدرت تفکیکهای مکانی مختلف انجام گرفت. محدوده این شبیهسازی در جدول(۱) آمده است.

پارامتر	محدوده					
ضریب هورست (H)	از ۱٫۱ تا ۹٫ به فواصل ۱٫					
rms_height	از ۲ میلیمتر تا ۴ سانتیمتر به فواصل ۲ میلیمتر					
قدرت تفکیک سطح (<i>R</i>)	از ۱ سانتیمتر تا ۱۱ سانتیمتر به فواصل ۲ سانتیمتر					
طول سطح (L)	از ۱ متر تا ۱۰ متر					

جدول۱: محدوده ابعاد فرکتالی، قدرت تفکیک مکانی و طول مربوط به سطوح شبیهسازی شده

به منظور اندازه گیری rms_height سطوح شبیهسازی شده، ابتدا تابع PSD مربوط به هر پروفیل تخمین زده می شود. سپس مقدار α از رگرسیون خطی تابع PSDدر مقیاس لگاریتمی محاسبه می گردد. تمامی مراحل شبیه سازی سطوح و تخمین تابع PSD و محاسبه α در

نرمافزار متلب انجام گرفته است.

بعد از محاسبه α مقدار ضریب هورست و بعد فرکتالی محاسبه می شوند. علاوه بر بعد فرکتالی یکی دیگر از پارامترهای مهم هندسه فرکتالی، s می باشد. s همان انحراف معیار افزایشی سطح است که با واحد m^{1-H}

اندازه گیری می شود. این پارامتر ms_height نیست و همانطور که قبلا گفته شد رابطه بین این دو پارامتر از طریق رابطه(۱۲) بیان می گردد.

در رابطه (۱۲)، $^{H-1}T = s$ میباشد. همانطور که از رابطه (۱۲) مشاهده میشود، ارتباط بین ms_height و rms_height یا طول پروفیل و ضریب هورست میباشد، درحالی که در این تحقیق نشان داده خواهد شد که این رابطه ارتباط شدیدی با قدرت تفکیک یا فاصله بین نمونهها داشته و ارتباط بسیار کمی با طول پروفیل دارد. بر این اساس، رابطه ای جدید برای ارتباط بین دارد. بر این اساس، رابطه ای جدید برای ارتباط بین رابطه (۱۲) که تابعی از طول پروفیل میباشد، این رابطه تابعی از قدرت تفکیک یا فاصله بین نقاط نمونه برداری است (رابطه (۱۵)).

رابطه(۱۵) rms_height = A×S در رابطه(۱۵)، A تابعی از قدرت تفکیک (فواصل نمونه-برداری) و ضریب هورست میباشد. بعـد از شـبیهسازی سـطوح در محـدوههـای مطـابق

بعد از سبیه ساری سعوی در معاومتای معاوم از جدول(۱)، با روش welch تابع PSD کلیه سطوح از رابطه(۹) محاسبه می گردد. در رابطه(۹)، (S(k) همان تابع PSD می باشد.

با معلوم بودن (S(k در رابطه (۹) و همچنین محاسبه مقدار α، میتوان مقدار s را از رابطه(۱۶) محاسبه نمود.

 $s = 10^{(\log S + \alpha \log k)} \tag{18}$

با محاسبه S و
$$\alpha$$
 می توان مقدار s را (مطابق
رابطه(۱۰)) از رابطه (۱۷) به دست آورد.
 $s = \sqrt{\frac{s}{2^{H+1}\gamma^2}(1+H)\sin(\pi H)}$

به این ترتیب مقدار s برای کلیه سطوح محاسبه می-گردد. با معلوم بودن rms_height مربوط به آنها می-توان ضریب A را به دست آورد. **۵- نتایج و پیشنهادها**

با بررسی نتایج، می توان نتیجه گرفت که رابطـه بـین

یـک ر ابطـه فرکتـالی جدیـد بـرای انـدازهگیـری زبـری... محمد ملکی

ضریب A و rms_height به شدت تابع بعد فرکتالی میباشد و تا حدود بسیار کمی که قابل چشمپوشی نیز هست، به تغییرات rms_height وابسته است. به عنوان A مثال جداول(۲) و (۳) به ترتیب نشان دهنده ضریب برای طول ۱ متر و قدرت تفکیک یک سانتیمتر و طول ۱۰ متر و قدرت تفکیک ۵ سانتیمتر میاشند. سطرهای جداول نشاندهنده ضرایب با توجه به تغییر rms_height و ستونهای آنها نشاندهنده ضرایب با توجه به تغییر ضریب هورست میباشند. تغییرات rms_height بین مقادیر ۲ میلیمتر تا ۴ سانتیمتر با پلههای ۲ میلیمتری و تغییرات ضریب هورست از ۰٫۱ تا ۰٫۹ میاشد. همانطور که از جداول مشاهده می گردد، تغییرات ضریب A نسبت به rms_height بسیار اندک بوده؛ طوری که قابل چشمپوشی میباشد. بنابراین میتوان برای تمام rms_height ، میانگین ضریب را محاسبه نمود. این ضریب با تغییر ضریب هورست به شدت تغییر می کند. لذا برای یک سطح با طول و قدرت تفکیک معلوم می توان نتیجه گرفت که این ضریب فقط تابعی از ضریب هورست میباشد.

با کاهش قدرت تفکیک، ضریب A کم می شود اما با تغییر طول پروفیل، تغییر محسوسی در این ضریب رخ نمی دهد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که برای یک قدرت تفکیک معلوم، با تغییر طول پروفیل تغییری قابل توجه در ضریب A اتفاق نمی افتد، به طوری که می توان متوسط این ضریب در طول های پروفیل می توان متوسط این ضریب در طول های پروفیل منتلف را برای یک قدرت تفکیک معلوم در نظر گرفت. می باشد. بنابراین ضریب مستقل از طول پروفیل هم می باشد. بنابراین ضریب A تابعی از قدرت تفکیک (*R*) و ضریب هورست (*H*) می باشد، به طوری که با افزایش ضریب هورست این ضریب اضافه می شود و با کاهش قدرت تفکیک این مقدار کاهش پیدا می کند. با در نظر گرفتن تمامی مقادیر و برازش منحنی بین آنها در این پژوهش، رابطه (۱۸) حاصل می شود.

 $A = 0.5078 \times (\frac{1}{R})^{H} + 0.09585$ (۱۸) (۱۸) (۱۸)

نشریه علمی – مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال یازدهم ● شماره چهارم ● زمستان ۱۴۰۲

در برازش دادهها برای به دست آوردن رابطه(۱۸)، مقدار ۲۰.۲ = RMSE و ۸۹۹۸۸ = ۳۶ میباشد. در رابطه(۱۸)، *R* مقدار قدرت تفکیک بر حسب متر و *H* ضریب هورست میباشد. مطابق روابط(۱۵) و (۱۸)، مقددار rms_height از رابطه(۱۹) بدست میآید. در واقع رابطه(۱۹) رابطه

جدیـدی اسـت کـه در ایـن پـژوهش بـرای محاسـبه rms_height فرکتالی ارائه شده است.
رابطه(۱۹)
$$rms_height = [0.5078 \times (\frac{1}{R})^H + 0.09858] \times s$$

جدول۲: مقدار ضریب A بر حسب ضریب هورست(H) و rms_height)های مختلف برحسب سانتیمتر (این مقادیر با توجه به
طول پروفیل یک متر و قدرت تفکیک یک سانتیمتر به دست آمدهاند.)

H rms	./1	۰,۲	.,٣	./ ۴	., Δ	. _/ %	./ V	., ٨	. _/ 4
۰,۲	١/•٧	1/44	۲۸۲۳	٣/۴٩	0/41	٨/۴٩	17/21	T• <i>/</i> 97	۳۰/۴۶
./ ۴	١/•٧	1/49	٢/٢٢	۳/۴۸	۵٬۳۸	٨/۴۶	17/97	۲۰/۰۶	۳۲/۹۵
. ₁ 8	١/•٧	١/۴٧	۲۸۳	٣/۴٩	۵/۴۳	٨/٢٨	۱۳/۳	۲۰/۴۳	86/69
./ ٨	۱/۰۶	١/۵	7/74	٣/٤٧	۵/۳۶	٨/٣۵	18/08	۲۰/۱۲	29/88
١	۲/۰۳	1/01	7/74	٣/۴۴	0/47	٨/٣۵	17/77	19,88	۳۳/۰۶
١,٢	۱/۰۵	١/۴٧	٢/٢١	٣/٤٧	۵/۴۴	۸٫۳۸	١٣/٢	۲۰ <i>۶</i>	877/7F
۱/۴	۱/۰۲	1/47	۲٦/۲٢	۳/۴۵	۵/۴۲	٨/۴١	17/90	19/08	۳۰/۸۴
۱/۶	١/٠٩	١/۵	۲/۲۴	۳٬۵۱	۵٫۳۹	٨/٤۵	17/29	۲۰/۰۱	84/07
۱,۸	1/• 4	١,/٤٨	۲۸۳	٣/۴۵	۵/۴۲	۲۹/۸	١٣/٢	19,89	٣٢
٢	۱/۰۶	١/۴٨	۲۸۳	٣/٤٧	۵/۴	٨/٣۶	۱۳/۰ ۱	۲۰/۱	٣۴
۲,۲	۱/۰۲	١,/٤٨	۲۸۳	٣/۴۶	۵٫۳۹	٨/٣۵	18/18	19/14	۲۸٬۲۷
۲,۴	٠/٩٩	1/49	۲/۲۶	٣/۴۶	۵/۴۲	٨/۴	17/99	70/18	27/07
۲,۶	۱/۰۶	1/40	۲۸۳	٣/۴٩	0/44	٨/۴	17/9	51/08	۳١٫٣١
۲/۸	1/•4	۱,۵	7/74	8/48	0/47	٨٨٦	17/99	19/48	۳۰/۴
٣	۱/۰۵	١/۴٧	۲/۲۶	٣/49	۵٬۳۹	۸٬۳۷	18/20	19/41	۳۱/۷۲
٣,٢	١/•٧	1,189	۲/۲۴	8/48	۵/۴۶	٨/۴۶	١٣/٣٩	19/18	۳۰/۲۵
۳,۴	1/•4	1/47	۲/۲۵	8/48	۵٫۳۵	٨/۵۶	17/98	۱٩/٩	87/66
۳,۶	١/•٧	1/48	۲/۲۴	٣/۴٨	۵٬۳۸	٨./۵٨	18/21	۱۹۸۱	٣٣٦٨٧
٣٫٨	۱/۰۵	٩/١	۲/۲۶	٣/٤٧	۵٫۳۶	٨/۴٧	۱۳/۰۵	7./44	۳١/١۵
۴	۱/۰۵	1/48	٢/٢١	٣/٤۵	۵/۴	٨/٤۵	17/98	19/18	۳۲/۱۸

یـک رابطـه فرکتـالی جدیـد بـرای انـدازهگیـری زبـری...

محمد ملكى

N		, .		·. · -		J ** 0. 2			
H rms	٠/١	۰/۲	۰/۳	•/۴	۰/۵	•18	•/¥	•/٨	٠/٩
٠ ,۲	٠٫٩٢	١,١	1,41	۱٬۸۵	7 ,44	٣,٢۴	11,4	۴٫۵	۴٣,٧
•, 	•,9۴	١,١	1,41	۱٬۸۵	۲,۴۳	٣,٢١	۴٫۱۵	۵,۴۲	۷,۱۶
+ /۶	•,9۴	١,١١	1,41	۱٫۸۵	۲,۴۳	٣,٢٢	4,11	$\Delta_{/}\Delta A$	۲٫۵۱
•, \	•,9۴	۱٬۰۹	1/41	۱٬۸۵	۲,۴۳	٣,٢١	۴٫۱۵	۵٫۵۳	۷٫۶۸
١	۰٫۹۵	١,١	1,41	۱٬۸۵	r,44	٣,٢١	۴٫۱۳	۵, ۲۹	۲,۱۹
١,٢	۰٫۹۳	١,• ٩	1,41	۱٬۸۵	۲,۴۲	٣,٢	۴,۱۷	۵/۵۲	۷,۴۵
۱,۴	۰٫۹۵	۱,۰۹	1,47	۱٬۸۵	۲,۴۴	٣,٢٣	۴,۲۳	۵٫۳۴	۷٫۷۲
۱,۶	٠٫٩٢	١,١	1,41	۱٬۸۵	۲,۴۵	٣,٢٢	۴٫۱۱	۵٫۵۴	۷٫۸۵
١,٨	•,9۴	١,١١	١,۴	۱٬۸۵	۲,۴۴	۳٫۱۹	۴٫۱۸	۵,۴۸	٧
۲	۰٫۹۳	١,١	1,41	۱٬۸۵	7,48	٣,٢٢	4,74	$\Delta_{i}\Delta$	Y /• Y
۲,۲	۰٫۹۱	١,١	1,41	۱,۸۴	۲,۴۴	٣٫١٧	۴,۲۲	۵,۴۲	۲/۳۱
۲٫۴	٠,٩۴	١,١	1,41	۱٬۸۵	۲,۴۴	٣,٢١	۴٫۱۷	۵,۴۶	۶,۹۸
۲,۶	۰٫۹۵	١,١	1,41	۱٬۸۵	۲,۴۴	٣,٢۴	۴٫۱۸	$\Delta_{/}\Delta Y$	۲,۱۴
۲٫۸	•,9۴	١,١١	1,47	۱٬۸۵	۲,۴۴	٣,٢	۴,۱۷	۵,۴	۲/۴۸
٣	٠٫٩۴	١,١	1,41	۱٬۸۵	۲,۴۴	٣,٢١	4,18	۵,۴۱	٧,4٢
٣,٢	۰٫۹۳	١,١	1,41	۱٫۸۶	۲,۴۵	٣,٢۶	۴,۱۴	۵٫۳۳	٧٫۴
٣/۴	۰٫۹۳	١,١	1/41	۱٬۸۵	۲,۴۲	٣,٢١	4,14	۵,۴۴	٧,٢۴
۳,۶	۰٫۹۵	١٬٠٨	1/41	۱٬۸۵	۲,۴۳	٣,٢۴	۴٫۱۱	۵,۴۱	$\mathbf{A}_{i} \cdot \mathbf{A}$
٣/٨	۰٫۹۳	١,١	١٫۴	۲,۸۴	۲,۴۴	٣,٢٢	۴٫۱۵	۵,۲۹	۷٫۲۳
۴	۰٫۹۳	١,١	1,41	۱٬۸۵	۲,۴۴	٣,٢٢	۴,۲۷	۵,۴۱	۷٫۷۲

جدول۳: مقدار ضریب A بر حسب ضریب هورست(H) و rms_height) های مختلف برحسب سانتیمتر (این مقادیر با توجه به طول یروفیل ۱۰ متر و قدرت تفکیک ۵ سانتیمتر به دست آمدهاند.)

میباشد. بنابراین میانگین ضرایب برای rms-heigh در نظر گرفته شده است. اما برای طولها و قدرت تفکیک-های مختلف، آنالیز نتایج نشان دادند که مقدار A وابستگی شدیدی به ضریب هورست و قدرت تفکیک دارد و نسبت به تغییرات طول پروفیل تغییرات محسوسی ندارد. دو نمونه از این ضرایب در جداول(۴) و (۵) نمایش داده شدهاند. جـداول(۲) و (۳) نشـاندهنـده تغییـرات ضـریب A برحسب rms_height و H میباشند. این جداول دو نمونه از ضرایبی هستند که بر اساس سطوح شبیهسازی شده، ارائه شدهاند. به طور کلی میتوان نتیجه گرفت کـه بـرای یک طول و قدرت تفکیـک مشخص، تغییـرات A ارتبـاط بسیار کمی با rms_height دارد و به شدت وابسته بـه H

سال یازدهم • شماره چهارم • زمستان ۱۴۰۲

H L	•,1	•,۲	•/٣	٠ /۴	۰,۵	≁ / ۶	. , ∀	• / A	+, q
١	۱٬۰۵	1,48	۲,۲۴	٣,۴٧	۵,۴۲	۸٬۴۳	15/•6	۱۹٬۹۰	۳۱,۶۵
۲	۱,۱۰	۱,۵۲	۲,۲۸	۳,۵۳	۵,۴۶	٨,۴٣	۱۲,٩٠	۱٩٫۵۴	۳۱٬۲۴
٣	١,١١	۱,۵۳	۲٫۳۰	٣٫۵۴	۵٬۴۷	٨,۴۵	١٢٫٨٧	۱۹,۶۷	۳۲,۶۷
۴	۱,۱۱	۱,۵۳	۲٫۳۰	٣٫۵۴	۵,۴۸	٨,۴۵	17,98	۱۹ _/ ۷۹	TT/84
۵	١,١١	۱,۵۳	۲٫۳۰	٣٫۵۴	۵,۴۹	٨,۴٧	۱۳,۰۰	۲۰٬۰۶	۳۴,۵۷
۶	۱٬۰۹	۱,۵۱	۲,۲٩	٣٫۵۴	۵,۵۰	٨,۵٢	15/15	۳۴, ۲۰	۳۵,۴۷
۷	۱٬۰۹	١,۵٢	۲,۲٩	٣٫۵۴	۵٬۵۰	٨,۵٣	١٣,١٣	۲۰,۴۱	۳۵٫۷۲
٨	۱٬۰۹	۱,۵۱	۲ /۲۹	٣٫۵۴	۵,۵۰	٨,۵٣	١٣،١٣	۲۰,۴۴	۳۵٫۸۱
٩	۱٬۰۹	۱,۵۲	۲,۲۹	٣٫۵۴	۵,۵۱	٨,۵٣	١٣،١٣	7. ,44	۳۵٫۷۰
۱٠	۱,•۹	۱,۵۲	۲,۲۹	٣٫۵۴	۵,۵۱	٨,۵۴	15/15	۲۰,۴۹	۳۵,۶۹

جدول۴: مقدار ضریب A بر حسب ضریب هورست(H) و طول پروفیلهای مختلف. طول پروفیل بر حسب متر میباشد. (این ضرایب بر اساس قدرت تفکیک یک سانتیمتر به دست آمدهاند.)

جدول۵: مقدار ضریب A برحسب ضریب هورست(H) و قدرت تفکیکهای مختلف. قدرت تفکیک بر حسب سانتیمتر میباشد. (این ضرایب بر اساس طول پروفیل ۵ متر دست آمدهاند.)

H R	۰,۱	٠ /٢	٠,٣	•/ F	•،۵	۶ /۲	•,¥	•, \	٠ /٩
١	۱,۱۱	۱,۵۳	۲,۳۰	٣٫۵۴	۵,۴۹	٨٫۴٧	۱۳,۰۰	۲۰,۰۶	٣۴٬۵۷
٣	۰٫۹۸	١,٢١	۱/۶۳	۲,۲۶	٣,١۴	۴,۳۴	۵,۹۶	۸, • ۷	۱۱٬۵۱
۵	۰ _/ ۸۹	۱,• ۲	١,٣٨	۱٬۸۲	۲٫۴۲	٣,٢٠	۴,۲۵	۵٫۵۶	٧٫۴۵
۷	۰٫۸۱	۰,۹۶	١,٢٠	۱,۵۵	۲,۰۰	۲,۵۸	٣,٣٢	۴,۳۸	۵٬۸۷
٩	۰٫۷۵	۰,۸۸	۱٬۰۹	١,٣٧	١,٧٣	۲٫۱۸	۲٫۸۱	۳,۵۸	۵٬۰۷
11	۰٫۶⋏	۰٫۸۱	۱,•••	١،٢٣	۱,۵۳	۱,۹۱	۲٫۴۲	۳٫۱۱	۴,۳۴

همانطور که در جداول(۴) و (۵) و (۶) نشان داده شـده است، تغییـرات A بـه تغییـرات قـدرت تفکیـک کـاملا حساس است امـا نسـبت بـه تغییـرات طـول، تغییـرات

بسیار کمتری پیدا میکند؛ بنـابراین در ایـن مـورد هـم می توان متوسط این ضریب را برای طولهـای مختلـف در نظرگرفت. محمد ملكى

H R	•,1	٠ /٢	٠ ،٣	•/ F	•,۵	۰ /۶	≁ / ∀	•, \	+ _/ ۹
١	١,• ٩	۱,۵۲	۲ /۲۹	۳,۵۴	$\Delta_{I}\Delta$)	٨,۵۴	١٣,١٣	۲۰ <i>,</i> ۴۹	۳۵,۶۹
٣	٠ _/ ٩٩	۲,۲۳	۱,۶۵	۲٬۲۸	٣,١۵	۴,۳۵	۵٫۹۶	٨,١۵	15,10
۵	۰٫۹۳	۱,۱۰	1,41	۱٬۸۵	۲,۴۴	٣,٢٢	۴٫۱۷	۵,۳۹	۷٫۲۵
۷	۰ _/ ۸۹	١,٠٢	1,78	۱ <i>٬</i> ۶۰	۲٬۰۵	T /87	٣ /٢٩	4,18	۵,۲۴
٩	۰٫۸۵	۰٫۹۵	۱,۱۶	1,44	۱٫۸۰	۲,۲۵	۲,۷۷	٣,٣٧	۴,۳۰
11	٠٫٨٢	۰,۹۰	١,•٨	١,٣٢	1,87	١,٩٩	۲٫۴۲	۲٫۹۳	٣,٧٢

جدول۶: مقدار ضریب A بر حسب ضریب هورست(H) و قدرت تفکیکهای مختلف. قدرت تفکیک بر حسب سانتیمتر میباشد. (این ضرایب بر اساس طول پروفیل ۱۰ متر بدست آمدهاند.)

همانطور که در جداول(۳) و (۵) مشاهده می گردد، محدوده ms_height از ۲ میلیمتر تا ۴ سانتیمتر و قدرت تفکیک از ۱ سانتیمتر تا ۱۱ سانتیمتر در نظر گرفته شدهاست و سطوح بر اساس این محدودهها شبیهسازی شدهاند؛ درنتیجه رابطه(۱۹) براساس این محدودهها به دست آمده است. اما در ادامه ثابت خواهیم کرد که این رابطه قابل تعمیم برای مقادیر به مراتب بزرگتر از این محدودهها میباشد. با توجه به

رابطه (۱۹)، مقدار ضریب A برای طول پروفیل ۱۵ متر و ۲۲/۵ متر و ۱۳ متر با قدرت تفکیک ۱۵ سانتیمتر و ۶۵ سانتیمتر و ۱۰ سانتیمتر به دست آمده است و نتیجه با ضرایب واقعی آنها مقایسه گردید. شکلهای(۱)، (۲) و (۳)، رابطه بین این ضرایب را نشان میدهند. همچنین ضریب همبستگی و مقدار RMSE بین مقادیر واقعی و تخمین زده شده در این شکلها آورده شده است.



شکل۱: رابطه بین ضریب A تخمین زده شده از رابطه(۱۹) و مقدار واقعی آن برای طول L=۱۵ m و قدرت تفکیک مکانی R=۱۵ cm

سال یازدهم • شماره چهارم • زمستان ۲ ۱۴۰



شکل۲: رابطه بین ضریب A تخمین زده شده با رابطه(۱۹) و مقدار واقعی آن برای طول L=۳۲٬۵ m و قدرت تفکیک مکانی R=۶۵ cm



شکل ۳: رابطه بین ضریب A تخمین زده شده با رابطه(۱۹) و مقدار واقعی آن برای طول L=۱۳ m و قدرت تفکیک مکانی R=۱۰ cm

در ادامه به ارزیابی این روش برای rms_heightهای بزرگتر از ۴ سانتیمتر نیز خواهیم پرداخت. به همین منظور مقدار rms_height از ۴ سانتیمتر تا ۸ سانتیمتر برای طول پروفیل ۱متر و قدرت تفکیک ۱ سانتیمتر در

نظر گرفته شده است. جدول(۲) مقادیر ضریب A را برای این سطوح نشان میدهد. شکل(۴) نمودار مقایسه مقادیر واقعی(جدول(۲)) و تخمین زده شده (توسط رابطه(۱۹)) را برای این سطوح نشان میدهد. محمد ملكى

است.)										
H rms	•/1	•/ T	٠,٣	•/۴	•, ۵	۶ /۲	•,¥	•, A	•,¶	
۴,۲	٥.	١,۴٧	5,54	۳,۴۸	۵٫۳۶	۸٫۳۹	١٢٫٧٨	۲۰,۰۰	۳۴,۲۲	
۴,۴	۱٬۰۸	١,۴٩	5,54	٣,44	۵٫۳۵	٨,۵٢	۱۳٬۱۱	۲۰,۲۵	۳۰,۰۶	
۴,۶	۶.	۱,۴۶	۲,۲۱	٣٫٤٧	۵,۴۲	٨,۴۵	۱۳٬۰۱	۱۹ _/ ۱۶	۳۳٬۰۴	
۴,۸	۱,	١,۴٨	۲٫۲۳	٣,۴۵	۵٫۳۵	۸٬۴۹	١٢/٩١	۱۹ _/ ۷۶	۳۰,۰۶	
۵	١,•٧	١,۴٧	۲٫۲۳	٣,46	۵,۴۴	٨,۵٢	١٣/٠٧	۱٩,۶۰	۳۲/۴۸	
۵,۲	١,•٧	١,۴٧	۲٫۲۳	٣٫٤۵	۵٫۳۹	۸٫۳۹	١٢/٩٠	۱ ٩ _/ ٩٣	۳۱/۱۵	
۵,۴	١,•٧	1,187	۲,۲۱	٣,46	۵٫۳۶	٨,۴١	17,87	۲۱,۰۱	۳۳٫۳۴	
۵,۶	۱٬۰۸	1,188	۲,۲۲	٣٫٤٧	۵,۴۰	۸٫۳۴	١٢٫٧١	۱٩٫٠٣	۲۸٬۷۲	
۵٫۸	۱٬۰۳	١,۴٧	۲,۲۴	٣٫Δ٠	۵٫۳۹	٨,4.	۱۳٬۰۸	۲۰٫۳۵	۳۲/۰۴	
۶	۴/۱	١,۴٧	۲,۲۴	٣,46	۵,۴۲	٨,46	١٣٫٠٣	۱۹٫۰۸	۲۹ _/ ۹۳	
۶,۲	۱٬۰۸	1,169	۲,۲۴	٣٫٤٧	۵,۴۲	٨,۶١	۱۲/۷۶	۱۹ _/ ۷۹	۳۱,۰۱	
۶,۴	١,•٧	١,۴٧	۲٫۲۳	٣٫٤٧	۵٫۳۹	٨,٣٧	١٣/١٧	۲۰,۰۴	۳۱,۳۱	
818	۱٬۰۸	۱٬۴۸	۲,۲۴	٣٫۴٨	۵,۴۳	۸٫۳۸	۱۳٬۸۰	۱۹٫۲۵	rf,87	
۶,۸	۴.	٢,۴٧	۲,۲۲	٣,۴۴	۵,۴۱	٨,۴۵	١٢٫٨٧	۱٩,۶۵	٣۴,٢٧	
۷	۱٬۰۵	١,۴٩	۲٫۲۳	٣,۴٩	۵٫٣٩	٨,٢١	١٢/٩٩	۲۰٬۵۰	۲۹ _/ ۸۱	
۷٫۲	۱٬۰۸	۱,۴۸	۲٫۲۳	٣,46	۵,۳۹	٨,۴٧	۲۲/۶۷	۲۰,۰۱	۳۰,۵۹	
۷٫۴	۴/۱	1,48	۲,۲۲	٣٫٤٧	۵,۴۱	۸٬۴۳	۱ ۲/۹۹	۲۰٫۳۵	٣۴,•۴	
۲ /۶	۱٬۰۵	١,۴٧	۲٫۲۳	٣٫۴۵	۵,۴۰	٨,۴٢	۱۲/۹۵	۲۰,۴۰	۳۰,۹۲	
۷٫۸	١,•٧	١,۴٧	۲,۲۲	٣٫٤٧	۵,۴۴	٨,۶۴	۱۲/۷۶	۲۰٬۰۳	۳۱٫۳۰	
٨	۶.	١,۴٧	۲,۲۵	٣,۴۴	۵٫٣٩	٨٫٢٩	۱۳٬۳۲	۲۰٫۳۸	۳۳,۶۵	

جدول۷: مقدار ضریب A بر حسب ضریب هورست(H) و rms_height)های مختلف. (این مقادیر با توجه به طول پروفیل یک متر و قدرت تفکیک یک سانتیمتر برای rms_height های بزرگتر از ۴ سانتیمتر بدست آمدهاند. مقدار rms بر حسب سانتیمتر

سال یازدهم • شماره چهارم • زمستان ۲ ۱۴۰



شکل۴: رابطه بین ضریب A تخمین زده شده با رابطه(۱۹) و مقدار واقعی آن برای طول L=۱m و قدرت تفکیک مکانی R=۱cm برای مقادیر rms-height از گ سانتیمتر

دقت تخمین رطوبت سطح هم افزایش پیدا میکند. همچنین پیشنهاد میشود در تخمین زبری سطح با استفاده از وارونهسازی مدلهای فیزیکی مانند SPM و IEM برای ارزیابی دقت تخمین و مقایسه آن با اندازه-گیری زمینی از این روش برای محاسبه زبری سطح استفاده گردد.

- [1] M.W. J. Davidson, T. Le Toan, F. Mattia, G. Satalino, T. Manniner, and M. Borgeaud, "On the characterization of agricultural soil roughness for radar remote sensing studies," IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 38, pp. 630– 640, Mar. 2000.
- [2] Irena Hajnsek, Member, IEEE, Eric Pottier, Member, IEEE, and Shane R. Cloude, Fellow, IEEE," Inversion of Surface Parameters from Polarimetric SAR" IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, VOL. 41, NO. 4, APRIL 2003.
- [3] P. Beckmann and A. Spizzichino, the Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces. New York: Pergamon, 1963, p. 503.
- [4] A. K. Fung, Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications.

با توجه به موارد فوق می توان نتیجه گرفت که رابطه(۱۹) دارای دقت بسیار بالایی در تخمین *rms_height* به روش فرکتالی می باشد. به همین دلیل پیشنهاد می گردد به منظور تخمین رطوبت سطح از تصاویر راداری با استفاده از مدل های فیزیکی از این رابطه برای محاسبه زبری سطح استفاده گردد که قطعا

مراجع

Norwood, MA: Artech House, 1994, p. 573.

- [5] P. C. Dubois, J. J. van Zyl, and T. Engman, "Measuring soil moisture with imaging radars," IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 33, pp. 916–926, July 1995.
- [6] J. Shi, J. Wang, A. Y. Hsu, P. E. O'Neill, and E. Engman, "Estimation of bare surface soil moisture and surface roughness parameters using L-band SAR image data," IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 35, pp. 1254–1264, Sept. 1997.
- [7] M. Borgeaud and J. Noll, "Analysis of theoretical surface scattering models for polarimetric microwave remote sensing of bare soils," Int. J. Remote Sens., vol. 15, no. 14, pp. 2931–2942, 1994.
- [8] S. R. Cloude and K. P. Papathanassiou, "Surface roughness and polarimetric

محمد ملكر

entropy," in Proc. IGARSS, Hamburg, Germany, 1999, pp. 2443–2445.

- [9] A. Ghafouri, J. Amini, M. Dehmollaian and M. A. Kavoosi, "Better Estimated IEM Input Parameters Using Random Fractal Geometry Applied on Multi-Frequency SAR Data," Remote Sens, vol. 9, no. 445, 2017.
- [10] A. Ghafouri, Top-Geological Formations surface roughness modeling in SAR image.PhD thesis, Tehran: University of Tehran, 2017.
- [11] G. Di Martino, D. Riccio and I. Zinno, "SAR Imaging of Fractal Surfaces," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vols. Vol. 50, No. 2,, pp. 630-644, 2012.
- [12] G. Di Martino, A. Iodice, D. Ricc and G. Ruello, "Imaging of Fractal Profiles," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 48, no. 8, pp. 3280-3289, 2010.
- [13] B. Mandelbrot, The Fractal Geometry of Nature, New York: Freeman, 1983.
- [14] K. Falconer, Fractal Geometry, Chichester, U.K: Wiley, 1990
- [15] G. Franceschetti and D. Riccio, Scattering, Natural Surfaces and Fractals, Burlington, MA: Academic, 2007.
- [16] P. Baveye, J. Parlange and B. Stewart, Fractals in soil science, Boca Raton : CRC Press, 1998.
- [17] E. Vidal V'azquez, J. Miranda and A. Paz, "Describing soil surface microrelief by crossover length and fractal dimension," Nonlin. Processes Geophys, vol. 14, pp. 223-235, 2007.
- [18] S. D Merrill, C. Huang, T. Zobeck and D. Tanaka, "Use of the chain set for scalesensitive and erosion-relevant measurements of soil surface roughness," in Sustaining the global farm, 2001.
- [19] E. Vidal V'azquez, J. Miranda, M. Alves

and a. Paz Gonz'alez, "Effect of tillage on fractal indices describing soil surface microrelief of a Brazilian Alfisol," Geoderma, vol. 134, p. 428–439, 2006.

- [20] N. Baghdadi, P. Paillou, G. Grandjean, P. Dubois and M. Davidson, "Relationship between profile length and roughness variables for natural surfaces," International Journal of Remote Sensing, vol. 21, no. 17, pp. 3375-3381, 2000.
- [21] M. Zribi, V. Ciarletti and O. Taconet., "Validation of a Rough Surface Model Based on Fractional Brownian Geometry with SIRC and ERASME Radar Data over Orgeval," REMOTE SENS ENVIRON, vol. 73, p. 65–72, 2000.
- [22] G. Di Martino, D. Riccio and I. Zinno, "SAR Imaging of Fractal Surfaces," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vols. Vol. 50, No. 2,, pp. 630-644, 2012.
- [23] C. Huang and J. Bradford, "Applications of a laser scanner to quantify soil microtopography," Soil Sci. Soc. Am. J, vol. 56, pp. 14-20, 1992.
- [24] Summers, R. Soukup and R. Gragg, "Mathematical modeling and computeraided manufacturing of rough surfaces for experimental study of seafloor scattering," IEEE Journal of Oceanic Engineering, , vol. 32, no. 4, pp. 897-914, 2007.
- [25] W. Dierking, "Quantitative roughness characterization of geological surfaces and implications for radar signature analysis," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens, vol. 37, pp. 2397-2412, 1999.



Journal of Geospatial Information Technology Vol.11, No.4, Winter 2024

Research Paper

A new fractal relationship for measuring surface roughness to be used in physical models of radar backscattering

Mohammad Maleki*

Assistant professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Razi University

Abstract

The sensitivity of the microwave waves to the physical and geometrical parameters of the soil has caused the radar remote sensing to have a wide range of applications in various fields. In agricultural and environmental issues, the soil parameters, including its moisture and roughness, have been among the most important issues to the experts, the first of which is related to its physical characteristic and the second one is related to geometrical characteristic. The roughness parameter plays an important role in the soil erosion. And in order to estimate the soil moisture, the roughness must also be studied. The role of each of them in the backscattering of radar waves must be analyzed as well. There are various models to estimate these two parameters from the radar images, among which the most important ones are the IEM and SPM models. As the evaluation of the accuracy of these models in estimating the surface roughness is based on the real ground data, the calculation of the ground roughness is important. In order to measure the ground roughness, there are two methods: Euclidean Geometry and Fractal Geometry. There are many studies that have demonstrated the higher accuracy of the fractal methods in estimating the surface roughness. In order to measure the surface roughness to enter the physical models or to measure the accuracy of the roughness using the inversion of the physical models, various fractal methods have been proposed, which are based on the profile length, while In this study, a new equation for measuring the roughness by fractal method is proposed, which is based on the sampling intervals. This equation has been obtained based on the simulation of different fractal surfaces in a wide range of dimensions. The accuracy of the obtained model is RMSE = 0.12 and R2 = 0.9988. The evaluation results of this equation for the ranges outside the simulation have shown that it is a reliable method with high accuracy for measuring the surface roughness using the fractal method.

Key words : Roughness, Fractal Geometry, Euclidean Geometry, fbm.

Correspondence Address: Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Razi, Kermanshah, Iran. Tel: : +989183367650 Email : mo.maleki1358@gmail.com