نشریه علمی پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال هفتم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۸
Vol.7, No.3, Autumn 2019
۱۳۷-۱۵۷
مقاله پژوهشی

جدایش سازندهای زمین‌شناسی بر اساس مورفولوژی آنها با استفاده از تصاویر *SAR* و پیاده‌سازی هندسه فرکتالی در مدل پس‌پراکندگی *IEM* (مطالعه موردی: کمربند کوهزایی زاگرس)

علی غفوری[۱*]، جلال امینی[۲]، مجتبی دهملائیان[۳]، محمدعلی کاووسی[۴]

۱- دکترای فتوگرامتری - دانشکده فنی دانشگاه تهران
۲- استاد دانشکده مهندسی نقشه برداری- دانشکده فنی دانشگاه تهران
۳- دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشکده فنی دانشگاه تهران و عضو قطب علمی سیستمهای الکترومغناطیس کاربردی
۴- استادیار گروه زمین شناسی- دانشکده علوم زمین دانشگاه آزاد شاهرود و رئیس چینه شناسی و رسوب شناسی مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۲۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۱۶

چکیده

تمایز مورفولوژیک سازندهای زمین‌شناسی فرآیند تکمیلی در طی مراحل به نقشه درآوردن سازندهای زمین‌شناسی است که نیازمند انجام بازدیدهای میدانی توأم با اتلاف هزینه و زمان قابل توجه است. به‌علاوه، باتوجه به پرتگاه‌های گسلی و نقاط صعب العبور، امکان عملیات صحرایی برای بازدید همه نواحی در محدوده یک نقشه زمین‌شناسی وجود ندارد. سنجش از دور مایکروویو یا رادار، از طریق تصاویر رادار روزنه مصنوعی (*SAR*) قابلیت فراهم نمودن اطلاعات مورفولوژی و شناسایی و جدایش واحدهای زمین‌شناسی بر اساس بافت سنگ شناسی را داراست. برای این منظور لازم است پس‌پراکندگی سیگنال راداری از سطح مورد مدلسازی واقع شود. مدل معادله انتگرالی (*IEM*) رایجترین و پرکاربردترین مدل از این حیث به شمار می‌رود که زبری سطح را با استفاده از پارامتر آماری جذر متوسط مربع ارتفاعی زبری (*RMS-height*) محاسبه می نماید. حال آنکه این پارامتر به اندازه کافی میزان زبری سطح را اندازه‌گیری نمی نماید، چرا که زبری را صرفاً در راستای قائم اندازه‌گیری می کند و پراکندگی زبری در سطح را در اختیار نمی‌گذارد. لذا در این مقاله از طریق محاسبه ورودی‌های هندسی مدل *IEM* با استفاده از دو پارامتر فرکتالی، میزان تشخیص مورفولوژی سطح ارتقاء یافته است. برای این منظور نقشه زبری سطح از روش پیشنهادی برای تاقدیس اناران (واقع در استان ایلام) با استفاده از تصاویر *ALOS-PALSAR* و *TerraSAR* محاسبه شد. اندازه‌گیری میدانی زبری سطح در سه سایت که هرکدام لیتولوژیهای اصلی منطقه مورد مطالعه را داشتند، بوسیله دوربین توتال استیشن انجام پذیرفت. در مقایسه نقشه واقعیتهای زمینی عملیات میدانی با نقشه زبری سطح محاسبه شده با استفاده از پارامترهای هندسه فرکتالی در محاسبه مدل *IEM*، مشخص شد متوسط انحراف معیار برآورد جذر متوسط مربع ارتفاعی زبری و ضریب پس‌پراکندگی در مقایسه با روش *IEM* کلاسیک بیش از ۱۰٪ کاهش یافته است. همچنین بر اساس نتایج ارزیابی ماتریس تطابق، صحت و دقت نقشه‌های تهیه شده با روش پیشنهادی بیش از ۸۰٪ می‌باشد. علاوه بر این، در این مقاله مقایسه‌ای میان نتایج بدست آمده با مقاله دیگری از نویسندگان همین مقاله صورت پذیرفته است که برتری ۱۰ تا ۱۵ درصدی روش این مقاله را نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: نقشه‌های زمین شناسی، رادار روزنه مصنوعی، مدل معادله انتگرالی.

*نویسنده مکاتبه کننده: تهران - خیابان کارگر شمالی- دانشکده فنی دانشگاه تهران- دانشکده نقشه برداری
تلفن: ۰۹۱۲۴۵۹۴۶۸۵

Email : ali.ghafouri@ut.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.137]

۱- مقدمه

نقشه‌های زمین شناسی در مقیاسهای مختلف با استفاده از دانش و فناوری‌های جدید تهیه می‌شود [۱و۲] که از این میان تصاویر فراطیفی اصلی‌ترین روش تهیه نقشه‌های زمین شناسی بشمار می آید [۱]. لیکن، برای تمایز سازندهای زمین‌شناسی بر اساس خواص سنگ شناسی در نقشه‌های زمین‌شناسی، نمی‌توان به پردازش تصاویر طیفی اکتفا نمود و الزاماً بایستی بازدید میدانی با هدف تکمیل اطلاعات مکانی مرز سازندها صورت پذیرد.

از طرف دیگر با توجه به پرتگاه‌های گسلی و نقاط صعب العبور، امکان عملیات صحرایی برای بازدید همه نواحی در محدوده یک نقشه زمین‌شناسی وجود ندارد [۳و۴]. بررسی نقشه‌های زمین‌شناسی و عوارض موجود در زمین نشان می‌دهد که نه تنها تصاویر ماهواره ای بلکه در برخی موارد زمین‌شناسان باتجربه نیز قادر نیستند تمام عوارض و پدیده های زمین‌شناسی را به نقشه درآورند و از لحاظ اقتصادی نیز صرف دقت و هزینه زیاد نیز توجیه ندارد [۵و۶].

تصاویر ماهواره‌ای فراطیفی بدلیل برخورداری از توان تفکیک مکانی بسیار پایین، قابلیت تشخیص جنس سطح زمین یا به عبارتی بافت تصویر را فراهم نمی‌کنند. طی فرآیند تشخیص و تمایز بافت تصویر[1]؛ جدایش زبری و صافی سرسازندها از طریق تصاویر دارای توان تفکیک مکانی بسیار بالا مقدور است در حالی که این روش برای تهیه نقشه‌های زمین شناسی مقرون بصرفه نمی باشد [۳و۴].

تصاویر سنجش از دور مایکروویو بدلیل برخورداری از قابلیت پلاریزاسیون سیگنال امواج رادار، امکان جدایش جنس بر مبنای زبری سطح را فراهم می آورد. لذا می‌توان اطلاعات حاصل از جدایش زونهای دگرسانی زمین‌شناسی که از پردازش تصاویر فراطیفی بدست می‌آیند را با اطلاعات بدست آمده از جدایش مبتنی بر مورفولوژی سطح، بدست آمده از پردازش داده‌های مایکروویو تکمیل نمود [۵و۷].

هدف این مقاله بهبود روال جدایش و تفسیر مذکور در مطالعات سازندهای زمین شناسی است. از لحاظ زمین‌شناسی، برخی از سازندهای منطقه مورد مطالعه دارای تشابه سنگ شناسی بوده و جدایش آنها بدون بازدیدهای میدانی زمین‌شناسان امکانپذیر نیست [۸و۹]. استفاده از روش پردازش تصاویر *SAR*، برای کاهش این بازدیدها از کاراترین روش‌های تهیه اطلاعات مورفولوژی سازندهاست. از اطلاعات کمربند چین‌خورده-رانده زاگرس بمنظور پیاده‌سازی و ارزیابی روش پیشنهادی استفاده شده است.

برای استفاده از قابلیت تفکیک الگوی هندسی و امکان تشخیص شکل و بافت سطوح زمین شناسی با استفاده از سنجش از دور مایکروویو، لازم است ضمن اطلاع از خواص دی الکتریک سطح، هندسه زبری و صافی سطح مورد مطالعه و مدلسازی قرار گیرد. پس‌پراکندگی امواج مایکروویو از سطوحی که به آنها برخورد می‌نماید غیر از پارامترهای آنتن، تحت تأثیر دو عامل قرار دارد؛ یکی هندسه زبری و صافی[2] سطح و دیگری جنس و خاصیت دی الکتریک[3] سطح [۱۰].

مدل معادله انتگرالی[4] *IEM* رایجترین مدل در این خصوص می‌باشد که از پارامتر جذر متوسط مربع ارتفاعی زبری[5] (که در این مقاله به جهت سهولت در بیان *RMS-height* خوانده می‌شود) به عنوان ویژگی هندسه سطح استفاده می‌کند [۱۱و۱۲]. در محاسبه مدل *IEM* به روش کلاسیک برای هندسه زبری سطح از دو ویژگی *RMS-height* آماری و رابطه معمول تابع هم‌بستگی استفاده می شود، حال آنکه با در نظر گرفتن زبری سطح در راستای افقی و میزان پراکندگی زبری

[1] *Image Texture*

[2] *Surface Roughness and Smoothness*
[3] *Surface Dielectric Properties*
[4] *Integral Equation Model (IEM)*
[5] *Height Root Mean Square (RMS-height)*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOI: 10.29252/jgit.7.3.137]

در سطح می‌توان با استفاده از پارامترهای فرکتالی، به عنوان پارامترهای فرکتالی بر میزان تشخیص مورفولوژی سطح افزود و دقت جدایش زونهای دگرسانی در زمین‌شناسی را ارتقاء بخشید.

پیاده‌سازی هندسه فرکتالی جهت بهبود نتایج مدل *IEM* توسط نویسنگان همین مقاله پیشتر ارائه شده است [۶]؛ که طی آن، محاسبه *RMS-height* و طول هم‌بستگی با استفاده از روابط فرکتالی ارائه شده به ترتیب توسط فرانشتی[1] صورت گرفته و منجر به بهبود نتایج شده است [۱۳]. این مقاله هندسه فرکتال‌های تصادفی را با استفاده از پارامترهای α و η که تخمین آنها با روش بهینه برازش خطی صورت می‌گیرد؛ پیاده‌سازی نموده و مقدار پارامتر هندسی *RMS-height* و نیز تابع هم‌بستگی سطح (که بیشترین تأثیر را بر طبق فانگ[2] در محاسبه *IEM* دارد) برآورد می‌کند[۱۴].

مطالعه مدل‌سازی زبری سطح بر اساس پس‌پراکندگی راداری در سه سایت مختلف انجام گرفته است. اندازه گیری زبری سطح از طریق عملیات نقشه برداری زمینی در سایتها صورت گرفته و مقدار ثابت دی الکتریک از جداول مارتینز[3] و همکاران (۲۰۰۰) برای سایت‌های مذکور استخراج گردیده است [۱۵].

مقادیر σ° برای سایت‌های ذکر شده در دو پلاریزاسیون *hh* و *vv* با روش *IEM* با ورودی‌های کلاسیک و فرکتالی محاسبه می شوند. ورودی‌های کلاسیک مشتمل است بر استفاده از L_{opt} و رابطه طیف قاعده توانی[4] با *RMS-height* آماری و ورودی‌های فرکتالی عبارتند از محاسبه *RMS-height* و تابع هم‌بستگی با لحاظ پارامترهای فرکتالی. شکل(۱) روندنمای استفاده از ورودی‌ها، محاسبه و نهایتاً مقایسه نتایج برای ارزیابی دقت را نشان می‌دهد.

مراحل روندنما به ترتیب عبارتند از:

۱- محاسبه پارامترهای زبری سطح از اندازه‌گیری زمینی در دو روش هندسه اقلیدسی و هندسه فرکتالی

۲- اجرای مدل *IEM* برای ورودی‌های هندسی و نیز ثابت دی الکتریک با در نظر گرفتن پارامترهای آنتن و سکو

۳- تولید *LUT* یا پایگاه داده پارامترهای ورودی در مقابل مقادیر ضریب پس‌پراکندگی

۴- ارزیابی مقادیر ضریب پس‌پراکندگی شبیه‌سازی شده توسط *IEM* با مقادیر اندازه‌گیری شده از تصویر *SAR*

۵- ارزیابی مقادیر *RMS-height* شبیه‌سازی شده از وارون مدل *IEM* با مقادیر اندازه‌گیری شده زمینی

بعد از اجرای مدل با هر کدام از این ورودی‌ها، می‌توان مقدار ضریب پس‌پراکندگی را در هر نقطه متناظر با هر کدام از پیکسلهای تصویر *SAR* محاسبه نمود. نتیجه مقایسه مقادیر متناظر ضریب پس‌پراکندگی حاصل از محاسبه *IEM* و اندازه‌گیری *SAR*، میزان کارائی استفاده از ورودی‌های فرکتالی در مقایسه با ورودی‌های کلاسیک (هندسه اقلیدسی) را نشان می‌دهد.

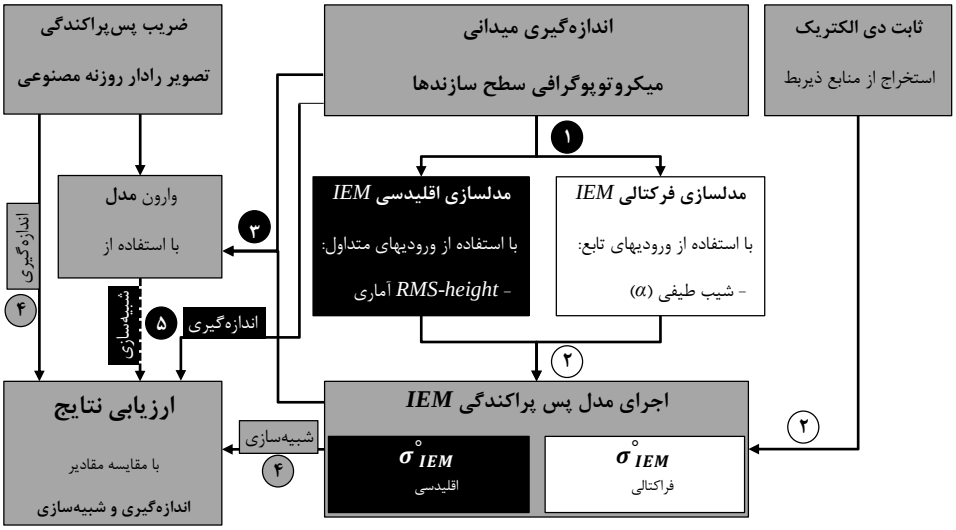
در این مقاله، پس از شرح مختصری از مدل *IEM* و راهکار بهبود آن با استفاده از هندسه فرکتالی، نتایج حاصل از پیاده‌سازی آن بر روی تصویر *SAR* تاقدیس اناران ارائه می گردد. برای ارزیابی نتایج، نقشه واقعیتهای زمینی که به روش نقشه برداری میدانی از محدوده مورد مطالعه تهیه شده است، ملاک برآورد دقت نقشه زبری سطح یا همان نقشه مورفولوژی محاسبه شده قرار می گیرد. لذا توانمندی استفاده از هندسه فرکتالی در مدل *IEM* در مقایسه با مدل کلاسیک از طریق محاسبه انحراف معیار مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری و نیز از روش ماتریس تطابق نقشه محاسبه شده و نقشه واقعیتهای زمینی، قابل کمّی سازی خواهد بود.

نویسندگان این مقاله، روش فرکتالی دیگری را در سال ۱۳۹۴ طی مقاله‌ای با ارائه روابط طول هم‌بستگی و

[1] *Franceschetti*
[2] *Fung*
[3] *Martinez*
[4] *Power-law Spectrum*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOI: 10.29252/jgit.7.3.137]

RMS-height در هندسه فرکتالی پیاده‌سازی کرده بودند. در این مقاله مقایسه‌ای میان نتایج بدست آمده از آن مقاله با نتایج مقاله جاری برای منطقه مطالعاتی صورت پذیرفته است.



شکل۱: روندنمای مطالعه که طی آن کارائی پردازش تصاویر *SAR* در جدایش بهتر واحدهای زمین‌شناسی پیاده‌سازی و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- مدل پس‌پراکندگی سطح *IEM*

همان‌طور که در برخی پژوهش‌های انجام شده تشریح شد [۶و۱۲]، ضریب پس‌پراکندگی سطح مقدار پس‌پراکندگی سیگنال بر واحد سطح می‌باشد؛ نحوه محاسبه این مقدار برای تصاویر ماهواره‌های مختلف متفاوت است و روش محاسبه آن از سوی سازندگان آنها معرفی می‌گردد. طبق تعریف فانگ و همکاران (۱۹۹۲) و تشریح خودشان (۱۹۹۴)، مدل *IEM* رابطه‌ی ضریب پس‌پراکندگی راداری را با پارامترهای زبری سطح، اندازه ثابت دی الکتریک و همچنین زاویه برخورد موضعی سیگنال راداری بیان می دارد. معادله *IEM* برای پس‌پراکندگی همپلاریزه و نیز پلاریزاسیون متقاطع معرفی گردیده است [۱۶]؛ ولیکن با توجه به پیچیدگی و عدم قطعیت رابطه پلاریزاسیون متقاطع [۲]، در این مطالعه صرفاً از معادله همپلاریزه استفاده می‌شود. پارامترهای مورد نیاز *IEM* برای محاسبه ضرایب پس‌پراکندگی عبارتند از: پارامترهای آنتن: فرکانس رادار، پلاریزاسیون و...، پارامترهای سکو: زاویه برخورد و... و همچنین پارامترهای سطح: زبری سطح و ثابت دی الکتریک [۱۶].

معادله *IEM* مقدار پس‌پراکندگی را از مقادیر پارامترهای سطح محاسبه می نماید. با توجه به غیرخطی بودن این معادله، امکان وارون سازی معادله از روش تحلیلی برای محاسبه پارامترهای سطح وجود ندارد، لذا بایستی از روش‌هایی که برای این کار پیشنهاد گردیده است استفاده نمود تا با داشتن پارامترهای تصویربرداری رادار و ضریب پس‌پراکندگی بتوان پارامترهای سطح را محاسبه نمود؛ نظیر روش‌های شبکه عصبی و بیزین[1] [۱۱و۱۷]. از بهترین روشها در این خصوص محاسبه از روی جدول واسط می‌باشد [۱۸و۱۹]، که برای این منظور مقادیر پس‌پراکندگی به ازاء میزان زبری سطح و ثابت دی الکتریک در مقادیر مختلف با استفاده از رابطه(۱)، محاسبه می شود تا پس از آن بتوان با تناظریابی

[1] *Bayesian Methods*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOI: 10.29252/jgit.7.3.137]

معکوس پارامترهای سطح را از جدول واسط استخراج نمود [۱۷].

۳- پیاده‌سازی مدل پس‌پراکندگی *IEM* با ورودی‌های کلاسیک

برای اجرای مدل با هدف انجام محاسبات جدول واسط، لازم است پارامترهای هندسی ورودی مدل بدست آیند. طبق روال معمول، اندازه *RMS-height* از روش آماری مطابق رابطه(۱) محاسبه می شود و از n-اُمین مرتبه تبدیل فوریه تابع هم‌بستگی رابطه(۲) و یا رگرسیون نمایی یا گاوسی آن (یعنی به ترتیب روابط (۵ و ۶) که متداول‌ترین توابع هم‌بستگی هستند [۵]) به عنوان $W^{(n)}$ در مدل *IEM* استفاده می شود.

رابطه(۱)

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}[(\sum_{i=1}^{N} z_i^2) - N\bar{z}^2]} \;\forall\; \bar{z} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} z_i$$

رابطه(۲)

$$\rho(\xi) = \frac{\sum_{i=1}^{N-j} z_i z_{i+j}}{\sum_{i=1}^{N} z_i^2}$$

رابطه(۳)

$$\rho(\xi) = e^{-|\xi|/l}$$

رابطه(۴)

$$\rho(\xi) = e^{-\xi^2/l^2}$$

محاسبه صحیح پارامتر طول هم‌بستگی بدلیل وابستگی به طول پروفیل و عدم استقلال از *RMS-height* همواره دارای دشواری است [۲۰]. مطالعات بغدادی و همکاران (۲۰۰۴) منجر به یافتن پارامتر L_{opt} گردیده، که طول هم‌بستگی را به عنوان تابعی از *RMS-height*، زاویه برخورد و پلاریزاسیون ارائه می نماید [۲]. با توجه به زبری شایان توجه سطوح سازندها (اندازه *RMS-height* بزرگتر از ۳ سانتیمتر) و مطالعات انجام شده برای مناسبتر بودن تابع هم‌بستگی گاوسی برای سطوح زبر [۷]، پارامترهای این روابط را برای تابع هم‌بستگی گاوسی منظور می‌نمائیم.

بطور خلاصه، انچه که در این مقاله از آن به عنوان روش کلاسیک یاد می‌شود عبارتست از استفاده از رابطه(۱) برای محاسبه *RMS-height* و نیز معادله بغدادی و همکاران (۲۰۰۴) به عنوان تابع هم‌بستگی سطح.

۴- پیاده‌سازی مدل پس‌پراکندگی *IEM* با ورودی‌های فرکتالی

بر اساس تعریف یوردانف[1] و همکاران (۱۹۹۵)، تابع زبری سطح به عنوان مجموع طیفهای سطح بصورت رابطه(۵) می‌باشد [۲۱]:

رابطه(۵) $$h(x) = \int e^{ifx} dz(f)$$

که x (مکان) و f (فرکانس) می‌توانند یک یا دوبعدی، متناظر با تابع زبری یک یا دومتغیره باشند. برای سطح همسانگرد، شکل تابع همبستگی سطح را می‌توان از طریق لغزاندن تابع سطح یعنی رابطه(۵) روی شیفت Δ یافته خودش (رابطه (۶)) محاسبه نمود. برای این منظور از ضرب $h(x)$ در مزدوج مختلط مدل شیفت یافته، استفاده می‌شود.

رابطه(۶) $$h^*(x+\Delta) = \int e^{-if'(x+\Delta)} dz^*(f')$$

تابع همبستگی سطح برای فضای یک بعدی (پروفیل خطی) به صورت رابطه(۷) خواهد بود [۱۲]:

رابطه(۷) $$\rho(x) = 2\int_{f_{min}}^{f_{max}} f^{-\alpha} cos(fx) df$$

در این رابطه α پارامتر شیب طیفی است که نحوه محاسبه آن در ادامه تشریح می‌گردد. مقادیر f_{min} و f_{max} محدوده فرکانسی زبری سطح جهت محاسبه تابع هم‌بستگی است.

علاوه بر تابع همبستگی سطح، محاسبه فاکتور هندسی دیگر یعنی *RMS-height* نیز در فضای هندسه فرکتال‌های تصادفی صورت می‌پذیرد. هندسه زبری سطح در دو راستای افقی و قائم قابل محاسبه است. پراکندگی ارتفاعی زبری سطح، *RMS-height* یک معیار آماری ساده در راستای قائم بوده و از طریق محاسبه انحراف معیار زبری سطح قابل دستیابی است. پارامترهای بعد فرکتالی (FD) و همچنین توپوتزی (τ) ضمن بیان میزان پیچیدگی سطح، اندازه زبری سطح و

[1] *Yordanov*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.137]

پراکندگی زبری سطح را در صفحه افقی بیان می‌دارند [۲۲].

معیار زبری سطح، پروفیلهای خطی است که برای محاسبه پارامترها نمونه برداری می‌شوند. بعد فرکتالی می‌تواند از طریق محاسبه شیب متوسط خط رگرسیون به روش کمترین مربعات از نقاط در نمودار $(log(\Delta h)).(log(\Delta x))$ بدست آید [۲۳و۲۴]. در یک پروفیل خطی، بعد فرکتالی و ضریب هورست H قابل محاسبه با داشتن پارامتر شیب طیفی هستند(رابطه(۸) و (۹)) [۲۵و۲۶]:

$$FD = 2 + (1 - \alpha)/2 \quad \text{رابطه(۸)}$$

$$H = (\alpha - 1)/2 \quad \text{رابطه(۹)}$$

شیب طیفی (α) از رگرسیون تابع چگالی طیفی داده‌های حاصل از برداشت زمینی قابل محاسبه است [۲۷و۲۸]. نکته حائز اهمیت اینست که این رگرسیون نمی بایست شامل ترند داده‌های ارتفاعی باشد [۲۹و۳۰]. به عبارت دیگر فرکانس‌های پایین نباید در محاسبه و برازش نقشی داشته باشند [۳۱]. علاوه بر این، برازش خطی بر برازش پلی نومیال تابع چگالی طیفی منجر به نتایج بهتری در این راستا می‌شود [۷و۳۲].

علاوه براین، با داشتن ضریب هورست و عرض از مبداء خط مستقیم *RMS* بر روی محور Y می‌توان توپوتزی را محاسبه نمود [۳۳]. توپوتزی معیاری برای آشفتگی سطح می باشد که نخستین بار توسط فرانشتی (۱۹۹۹) تعریف شد (رابطه(۱۰)).

$$\tau = exp\left[(\frac{\eta}{2} - 2H)\right] \quad \text{رابطه(۱۰)}$$

در این رابطه η عرض از مبداء رگرسیون خطی گراف *rms* در پروفیل نمونه برداری است. برای محاسبه اندازه *RMS-height* در یک پروفیل خطی به طول L، با استفاده از هندسه فرکتالی می‌توان از رابطه(۱۱) که توسط سامرز[1] و همکاران (۲۰۰۷) ارائه شده، استفاده نمود [۲۲و۳۴]:

$$s = \tau^{1-H}\, L^H \quad \text{رابطه(۱۱)}$$

این رابطه علاوه بر اطلاعات آماری زبری سطح، اطلاعات پیچیدگی و آشفتگی سطح یا همان پراکندگی افقی زبری سطح را نیز در خود داراست.

بطور خلاصه، روش پیشنهادی این مقاله استفاده از رابطه(۷) به عنوان تابع همبستگی و نیز رابطه(۱۱) به عنوان رابطه محاسبه *RMS-height* می‌باشد. برای محاسبه این روابط بایستی پارامترهای α و η به شرحی که گفته شد، محاسبه شوند.

۵- سایت‌های مورد مطالعه، داده ها و اندازه‌گیری میدانی

تاقدیس اناران واقع در کمربند چین‌خورده-رانده زاگرس بدلیل دارا بودن سازندهای زمین‌شناسی مختلف موضوع بررسی دگریختگی سنگها بوده است [۸]. از لحاظ زمین‌شناسی، سازندهای گورپی و پابده دارای تشابه سنگ شناسی بوده و جدایش آنها در جاهائیکه شیب توپوگرافی زیاد است امکانپذیر نیست. از طرف دیگر امکان جدایش مرز بالایی سازند پابده با مرز زیرین سازند آسماری آسان نیست و نیاز به بازدیدهای صحرایی دارد (شکل(۲)). استفاده از روش پردازش تصاویر *SAR*، برای کاهش بازدیدهای میدانی زمین‌شناسان از کاراترین روش‌های تهیه اطلاعات مورفولوژی سازندهاست.

[1] *Summers*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.137]



(الف)



(ب)

شکل۲: (الف،ب) تصویر زمینی از رخنمون سازندهای آسماری و پابده که با خط چین از یکدیگر جدا شده اند. عدم امکان تمایز آنها با استفاده از تصاویر ماهواره ای متداول که منجر به دقت پایین نقشه سازندهای زمین‌شناسی می شود، مشهود است.

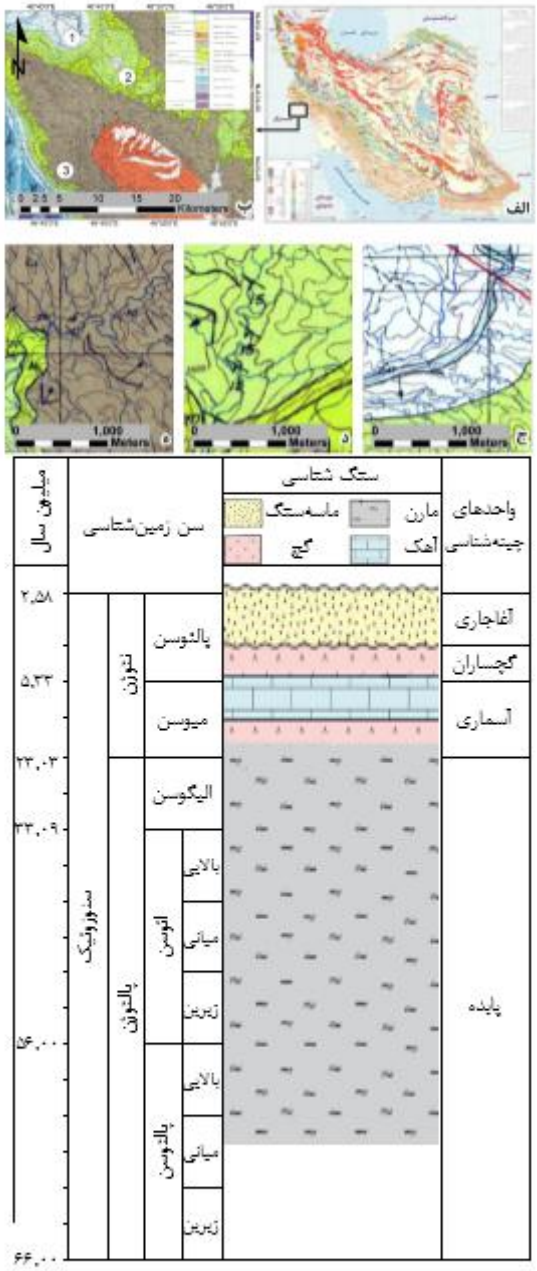
به‌منظور انجام این مطالعه از تصویر *SAR* ماهواره‌های *ALOS PALSAR* در باند *L* و نیز *TerraSAR* در باند *X* و همچنین از نقشه زمین‌شناسی ۱:۵۰،۰۰۰ و نیمرخ های چینه شناسی منطقه در انتخاب سایت‌ها استفاده شده است.

برای ارزیابی صحت نتایج مطالعه حاضر، نتایج محاسبه مدل *IEM* در فرکانسهای *L* و *X* در هر پیکسل با مقادیر پیکسلهای متناظر در اندازه‌گیری *ALOS PALSAR* و *TerraSAR* مقایسه می‌شود. علاوه بر این، نتایج وارون مدل که شبیه‌سازی زبری سطح در قالب پارامتر *RMS-height* می‌باشد با اندازه‌گیری های زمینی این پارامتر مقایسه می‌شود.

هدف، جدایش مورفولوژیک سطح زمین منطقه در سه سایت انتخابی است. منطقه مورد مطالعه، در نزدیکی ایلام در محدوده طول جغرافیایی *46°35′-46°50′ E* و عرض جغرافیایی *32°55′-33°05′ N* واقع شده است. در این منطقه سازند آسماری بر روی سازند پابده واقع شده و سازند آسماری نیز در زیر سازند گچساران واقع شده است. شکل(۳) نقشه توپوگرافی و زمین‌شناسی منطقه، موقعیت سایت‌های محل اندازه‌گیری زمینی و نمودار چینه شناسی منطقه را نشان می‌دهد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.137]



شکل۳: منطقه و موقعیت سایت‌های مورد مطالعه بر روی تاقدیس «ناران»؛ الف) منطقه مورد مطالعه در ایران؛ ب) موقعیت سایت‌های مورد مطالعه بر روی نقشه زمین‌شناسی؛ ج) سایت۱ واقع بر سازند پابده-گورپی‌صاف؛ د) سایت۲ واقع بر سازند آسماری-زیر و خشن؛ ه) سایت۳ بر روی سازند گچساران یا زیری متوسط؛ و) نمودار چینه شناسی منطقه.

سایت۱ بر روی سازند پابده واقع شده که ماهیت فرسایشی زیادی دارد و بر روی زمین عموماً به صورت خاک دیده می شود. سازند پابده (Pd) به سن پالئوسن تا الیگوسن بوده و دوران دوم و سوم زمین‌شناسی را تفکیک می‌نماید. بُرش الگوی آن در شمال مسجدسلیمان، به ضخامت ۷۹۸ متر، اندازه‌گیری شده و از مارن، آهک و شیل تشکیل شده است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOI: 10.29252/jgit.7.3.137]

سایت۲ بر سازند آسماری قرار گرفته کـه فرسایشـهای فیزیکی و شیمیایی، بر روی آن تأثیر زیـادی نداشـته و حالت صخره ای آن مشهود است. سازند آسـماری (*As*) به سن اولیگوسن تا میوسن پایینی است. بُـرش الگـوی آن به ضخامت ۳۱۴ متر اندازه‌گیری شده است و شامل سـنگ آهـک‌هـای مقـاوم کـرم تـا قهـوه‌ای رنـگ بـا ریخت‌شناسی کوه ساز می‌باشد.

سایت۳ بر سازند گچساران واقع شده است. این سـایت در مقایسه بـا سـایت‌هـای ۱ و ۲ از وضـعیت میانـه ای برخوردار است، چرا که این سازند علیرغم برخورداری از حالت صخره ای، بر اثر فرسایش و آلتراسـیونهای ایجـاد شده، سطح آن را خرده سـنگ پوشـانده اسـت. سـازند تبخیری گچساران (*Gs*) از مناطق فروافتادگی دزفـول-لرستان تا خلیج فارس گسترش دارد. در نواحی شـمالی به سن میوسن پیشین بوده و یک واحد سنگی با رفتـار شکل‌پذیر است، از همین‌رو، در سطح زمین بُرش کامـل ندارد ولی بُرش الگوی آن تـا ۱۶۰۰ متـر ضـخامت دارد. سنگ نمک، انیدریت، مارن‌های رنگارنگ، سنگ‌آهـک و مقداری شیل بیتومین‌دار، بدون نظم چینه‌ای، واحدهای اصلی سازند گچساران هسـتند. در جـدول(۱) جزئیـات هندسی آنها بطور جداگانه ارائه می شوند.

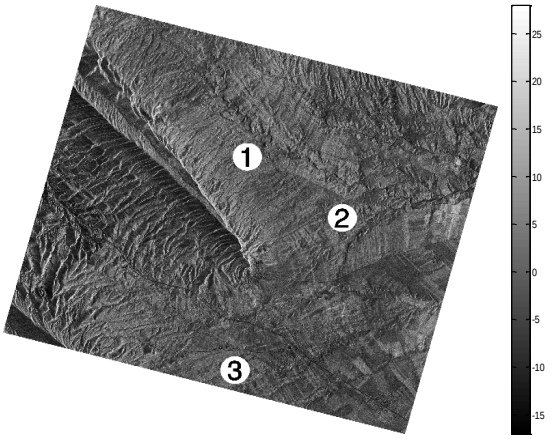
شکل(۴) موقعیت سایت‌های اندازه‌گیری زمینی بر روی تصویر ضریب پس‌پراکندگی تصویر *SAR* منطقـه مـورد مطالعـه را نشـان مـی دهنـد و تصـویر هـر کـدام از سایت‌های اندازه‌گیری در شکل(۵) دیده می شود.

جدول۱: مقادیر متوسط پارامترهای هندسی سطح سایت‌های مورد مطالعه

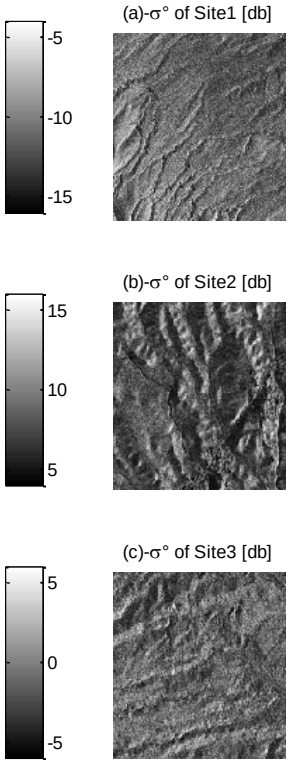
	سایت۱ (سازند پابده)	سایت۲ (سازند آسماری)	سایت۳ (سازند گچساران)
موقعیت *(WGS 84 Coordinate System)*	*E*۴۶° ۴۶ ' *N*۱۲° ۳۳ ' *m*.۱۰۰۰	*E*۳۸° ۴۶ ' *N*۱۲° ۳۳ ' *m*.۱۵۰۰	*E*۴۸° ۴۶ ' *N*۰۶° ۳۳ ' *m*. ۷۰۰
مقدار *RMS-height* (σ) - سانتیمتر	۰,۲±۲,۶	۰,۴±۵,۳	۰,۳±۳,۲
مقدار طول هم‌بستگی (l) - سانتیمتر	۲,۲±۲۹	۳,۹±۱۰	۳,۱±۲۲

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.137]



شکل۴: تصویر *TerraSAR-X* منطقه و موقعیت سایت‌های مورد مطالعه بر روی تاقدیس «اناران»



شکل۵: ضریب پس‌پراکندگی بر روی تصویر *TerraSAR-X* در هر کدام از سایت‌های مورد مطالعه بر روی تاقدیس «اناران»؛ (*a*) سایت۱؛ (*b*) سایت۲؛ (*c*) سایت۳

ارزیابی نتایج پیاده‌سازی روش این مقاله، نیازمند اندازه‌گیری میدانی زبری سطح می‌باشد. لذا داده‌های میدانی زبری سطح در سه سایت با مورفولوژی متفاوت بکمک دوربین توتال استیشن برداشت گردید. برداشت میدانی در قالب شبکه ای از نقاط صورت پذیرفته تا محاسبه پارامترهای هندسی برای پروفیلهای متعدد قابل محاسبه باشد. محاسبه پارامترهای *RMS-height*، α و η در راستای یک پروفیل خطی زیکزاک به طول ۵ متر در سطح هر کدام از سایت‌ها انجام گرفت.

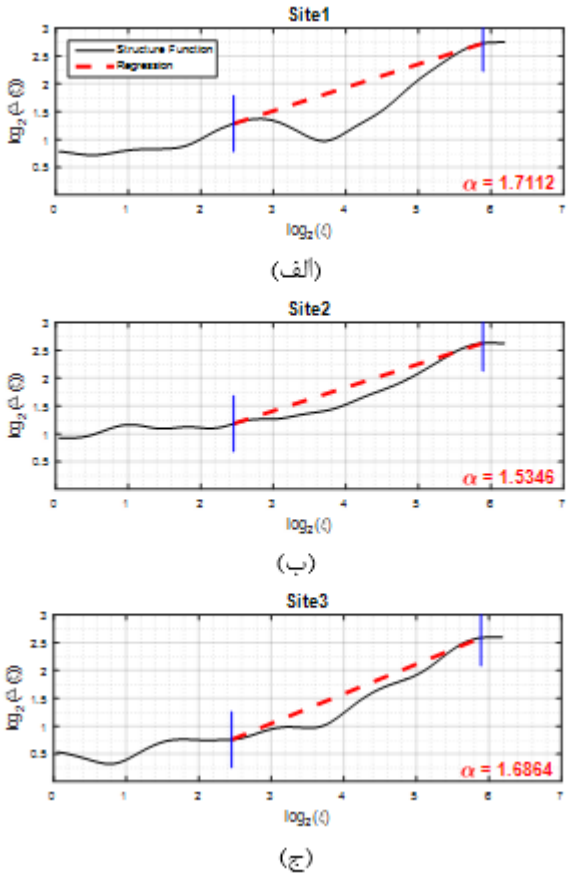
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOI: 10.29252/jgit.7.3.137]

۶- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

در این بخش نحوه استفاده از تصویر *TerraSAR* جهت محاسبه زبری سطح از سه حالت پیاده‌سازی مدل *IEM* توضیح داده می شود. محاسبه و اجرای مدل بر روی تصویر ۱۰۰×۱۰۰ پیکسل از سه سایت متفاوت انجام می گیرد و نتیجه محاسبه یک ماتریس ۱۰۰×۱۰۰ از *RMS-height* هر سایت خواهد بود. توضیح اینکه، محاسبه *RMS-height* از ضریب پس‌پراکندگی با وارون سازی مدل *IEM* انجام می گیرد. نهایتاً در پایان همین بخش، ارزیابی تطابق مقادیر محاسبه شده *RMS-height* از هر روش و در هر سایت، با مقادیر اندازه‌گیری شده صورت می پذیرد.

با استفاده از رابطه(۱)، اندازه *RMS-height* آماری و همچنین از طریق محاسبات تابع همبستگی گاوسی مدل *IEM* کلاسیک قابل محاسبه بوده و با داشتن مقادیر ثابت دی الکتریک در هر کدام از سایتها می‌توان مقدار σ^0_{hh} و همچنین σ^0_{vv} را برای سطح سایتها محاسبه نمود.

جدایی از این روش، با استفاده از رابطه(۷)، اندازه *RMS-height* و از رابطه(۱۱)، مقدار تابع هم‌بستگی به عنوان پارامترهای ورودی فرکتالی محاسبه می‌شوند. شکل(۶) محاسبه شیب طیفی (α) برای سایت‌های مورد مطالعه را بطور جداگانه از طریق برازش خطی بر تابع چگالی طیفی و سپس محاسبه شیب آن خط نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود، مشابه محاسبات شبیه‌سازی فرانشتی و همکاران [۳۵]، سطح زبرتر سایت۲ نسبت به سایت۱ موجب بزرگتر بودن مقدار پارامتر α شده است. علاوه بر این، بطور مشابه، برای سطح با زبری متوسط سایت۳ از مقداری تقریباً متوسط برای این پارامتر برخوردار است.

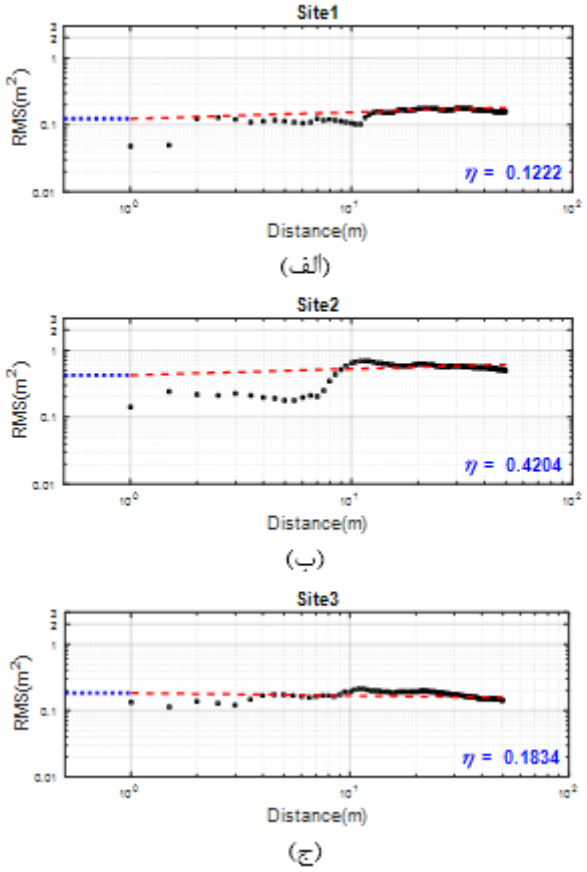


شکل۶: محاسبه پارامتر شیب طیفی (α) هندسه زبری سطوح سایت‌های۱، ۲ و ۳ (به ترتیب الف، ب و ج).

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOI: 10.29252/jgit.7.3.137]

با داشتن پارامتر شیب طیفی تابع هم‌بستگی سطح قابل محاسبه خواهد بود (رابطه۷). ولیکن برای رابطه(۱۱) و محاسبه *RMS-height* با روش فرکتالی به پارامتر دیگری نیاز می‌باشد. شکل(۷) محاسبه پارامتر عرض از مبداء رگرسیون خطی گراف *rms* (η) برای سایت‌های مورد مطالعه را بطور جداگانه نشان می‌دهد.

مقادیر پارامتر η بر خلاف پارامتر شیب طیفی (α) برای سطوح صاف‌تر مقدار کوچکتری دارد، لذا مقدار این پارامتر برای سایت۱ بسیار کوچک بوده و در سطح متوسط سایت۳ مقداری بیشتر است. سایت۲ که زبرترین سایت است، نیز بیشترین مقدار را دارد.



شکل۷: محاسبه پارامتر عرض از مبداء رگرسیون خطی گراف *rms* (η) زبری سطوح سایت‌های۱، ۲ و ۳ (به ترتیب الف، ب و ج).

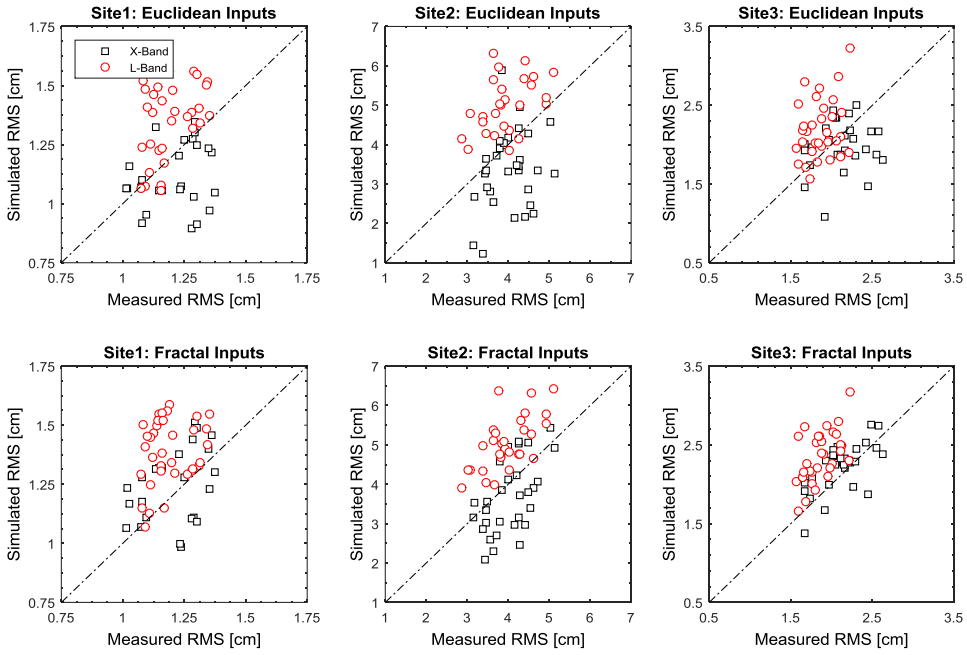
آنچه برای تمایز مورفولوژیک سطح سازندها نیاز است، اندازه زبری سطح سازندهاست. مدل *IEM* در پیاده‌سازی مستقیم، اندازه ضریب پس‌پراکندگی را از پارامترهای سطح محاسبه می نماید؛ لذا همانطور که در بخش۲ گفته شد، محاسبه پارامترهای سطح مستلزم استفاده از وارون مدل *IEM* می‌باشد.

در این مقاله، برای ارزیابی روش‌های محاسبه گفته شده در بخش‌های۳ و ۴، لازم است پارامتر زبری سطح (*RMS-height*) شبیه‌سازی شده از وارون مدل *IEM* با مقدار زبری سطح (*RMS-height*) اندازه‌گیری شده مقایسه گردد. برای این مقایسه از نمودارهای نقطه ای که در آن پیکسل‌های منتخب (۳۰ پیکسل) با یکدیگر مقایسه می شوند و همچنین نمودار میله ای میانگین مقادیر *RMS-height* استفاده می‌شود. علاوه بر این‌ها، اندازه انحراف معیار نتایج در قالب یک جدول مقایسه می شوند.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOI: 10.29252/jgit.7.3.137]

شکل(۸)، به ترتیب از راست به چپ در سایت‌های ۱، ۲ و ۳، تقابل محاسبه ضریب پس‌پراکندگی بر اساس نتایج شبیه سازی معادله *IEM* در دو حالت هندسه کلاسیک و فرکتالی را در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری ماهواره در تصویر *SAR* نشان می‌دهد.

واقع شدن دقیق یک نقطه بر روی خط مورب هر نمودار نشان دهنده آنست که مقدار شبیه‌سازی شده پیکسل مربوطه با مدل *IEM* با مقدار اندازه‌گیری شده دقیقاً برابر است، لذا در این نمودارها، میزان دور بودن نقاط از خط مورب نشان از خطای شبیه سازی دارد.



شکل۸: میزان صحت شبیه سازی پس‌پراکندگی با معادله *IEM* در مقایسه با پس‌پراکندگی اندازه‌گیری شده *SAR* در دو باند فرکانسی *L* و *X* به ترتیب از راست به چپ در سایت‌های ۱، ۲ و ۳؛ (ردیف بالا): استفاده از هندسه کلاسیک؛ (ردیف پایین): استفاده از هندسه فرکتالی.

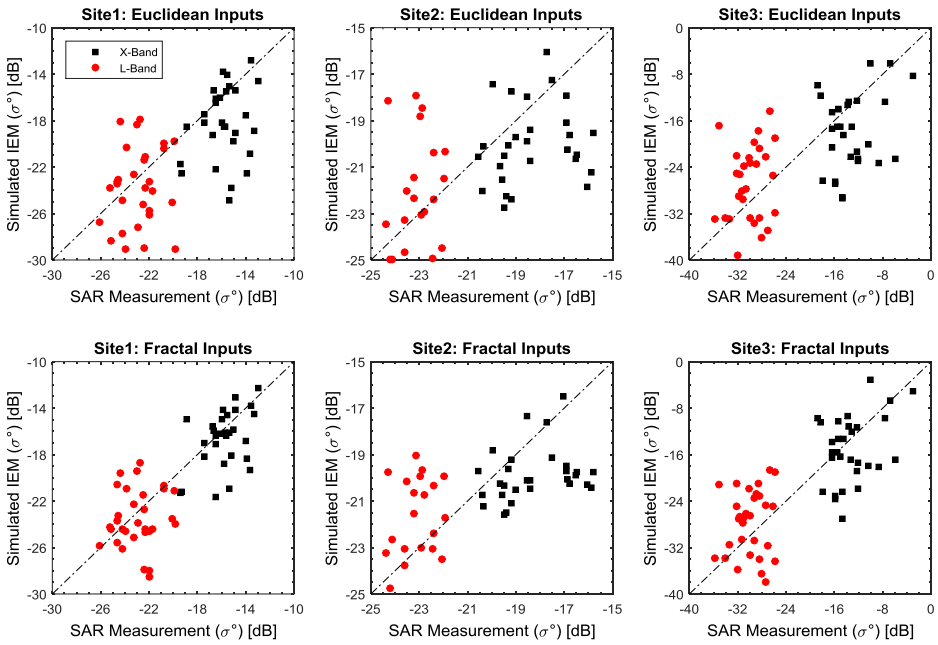
در جدول(۲)، اندازه انحراف معیار *RMS-height* محاسبه شده در روش‌های محاسبه درج گردیده است. به عبارت دیگر میزان پراکندگی آماری نتایج محاسبه در هر پلاریزاسیون در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری میدانی نشان داده شده است. هر چقدر اندازه انحراف معیار کوچکتر باشد، میزان صحت و دقت داده‌های شبیه‌سازی شده بالاتر است. براین اساس، میزان بهبود ناشی از استفاده از هندسه فرکتالی با توجه به تنوع سنگ شناسی سایت‌های ۱ الی ۳، بطور میانگین در حدود ۱۱٪ می‌باشد.

شکل(۹)، میزان صحت شبیه سازی *RMS-height* با وارون معادله *IEM* در دو باند فرکانسی *L* و *X* در مقایسه با *RMS-height* اندازه‌گیری شده نمودار میله ای اندازه متوسط *RMS-height* محاسبه شده از روش‌های سه گانه در پیاده‌سازی مدل *IEM* در سه سایت و همچنین مقدار متوسط *RMS-height* حاصل از اندازه‌گیری زمینی را نشان می‌دهد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOI: 10.29252/jgit.7.3.137]

جدول۲: اندازه انحراف معیار در دو باند فرکانسی L و X در روش‌های پیاده‌سازی مدل *IEM*

	سایت۱		سایت۲		سایت۳	
انحراف معیار اندازه*RMS-height* در محاسبه با هندسه کلاسیک	باند L	۱,۴۲	باند L	۱,۹۶	باند L	۱,۹۲
	باند L	۱,۶۱	باند X	۰,۹۳	باند X	۱,۷۵
انحراف معیار اندازه*RMS-height* در محاسبه با هندسه فرکتالی	باند L	۲,۰۳	باند L	۱,۶۸	باند L	۱,۲۲
	باند L	۱,۸۵	باند X	۱,۷۹	باند X	۱,۴۵

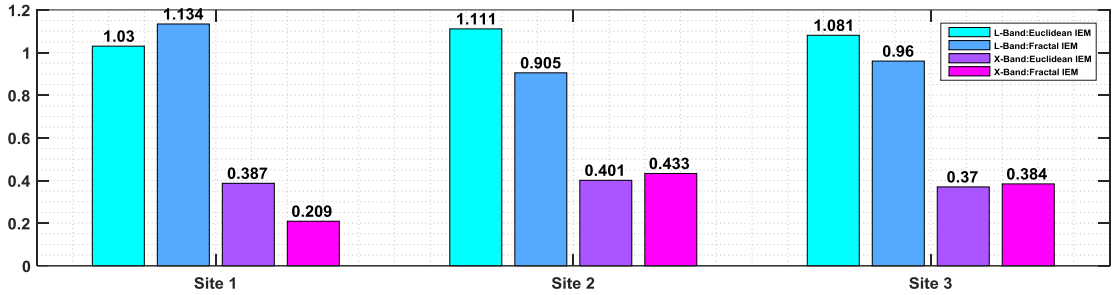


شکل۹: میزان صحت شبیه سازی *RMS-height* با وارون معادله *IEM* در دو باند فرکانسی L و X در مقایسه با *RMS-height* اندازه‌گیری شده به ترتیب از راست به چپ در سایتهای ۱، ۲ و ۳؛ (ردیف بالا): استفاده از هندسه کلاسیک؛ (ردیف پایین): استفاده از هندسه فرکتالی.

شکل(۱۰)، نمودار میله‌ای اندازه انحراف معیار *RMS-height* محاسبه شده از دو روش در پیاده‌سازی مدل *IEM* در سه سایت برای دو باند فرکانسی L و X را نشان می‌دهد. هر چقدر اندازه انحراف معیار کمتر باشد، نشان می‌دهد شبیه‌سازی مقدار *RMS-height* صحیح‌تر و دقیق‌تر صورت پذیرفته و معیاری برای میزان کارائی آن روش در پیاده‌سازی مدل *IEM* می‌باشد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.137]



شکل۱۰: اندازه انحراف معیار *RMS-height* محاسبه شده در دو باند فرکانسی L و X در سه سایت در روش‌های پیاده‌سازی مدل *IEM*

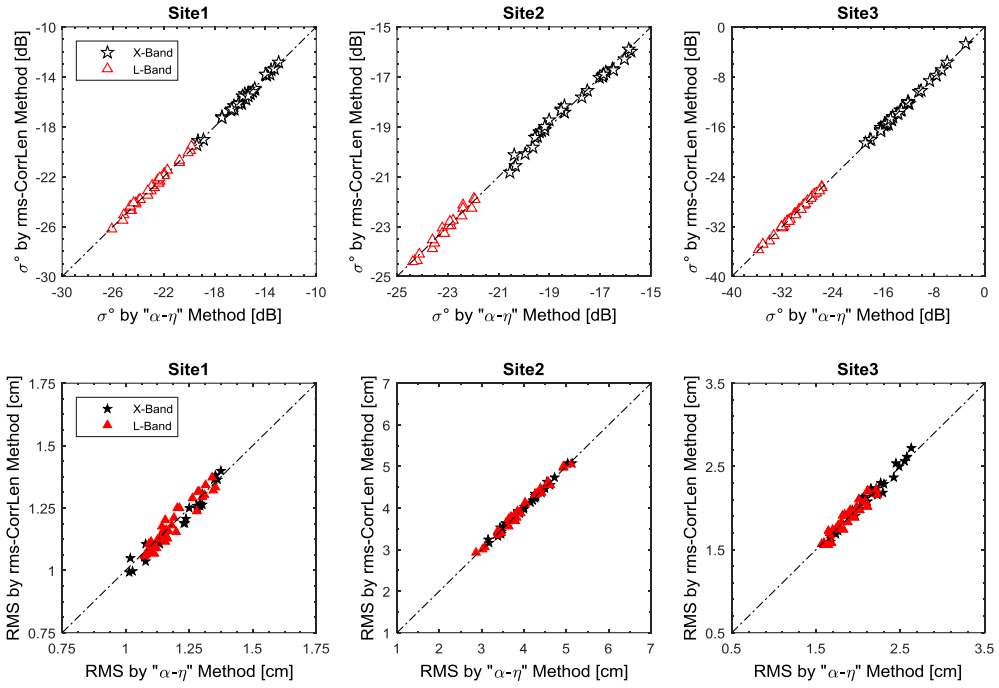
نویسندگان این مقاله در پژوهشی دیگر در سال ۱۳۹۴ [۶] با استفاده از هندسه فرکتال‌های تصادفی، از روشی دیگر پارامترهای ورودی مدل *IEM* را محاسبه نمودند. در اینجا، روش مقاله مذکور را برای داده‌های ماهواره‌ای و زمینی این مقاله مورد استفاده قرار می‌دهیم. نتایج بدست آمده با استفاده از روش این مقاله به میزان یکنواختی بهتر از روش مقاله مورد اشاره است. جهت مقایسه نتایج روش آن مقاله با نتایج روش این مقاله، مشابه نمودارهای شکل‌های(۸ و ۹)، در شکل(۱۱)، به ترتیب مقادیر شبیه‌سازی پس‌پراکندگی از معادله *IEM* با ورودی‌های دو روش (سه نمودار بالا) و سپس مقادیر شبیه‌سازی *RMS-height* از وارون *IEM* دو روش (سه نمودار پایین) با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

در شکل‌های(۱۱ و ۱۲) که به منظور مقایسه روش این مقاله و مقاله سال ۱۳۹۴ [۶] ارائه گردیده اند، روش این مقاله اصطلاحاً روش «α-η» و روش مقاله سال ۱۳۹۴ اصطلاحاً روش *rms-CorrLen* نامیده شده‌اند.

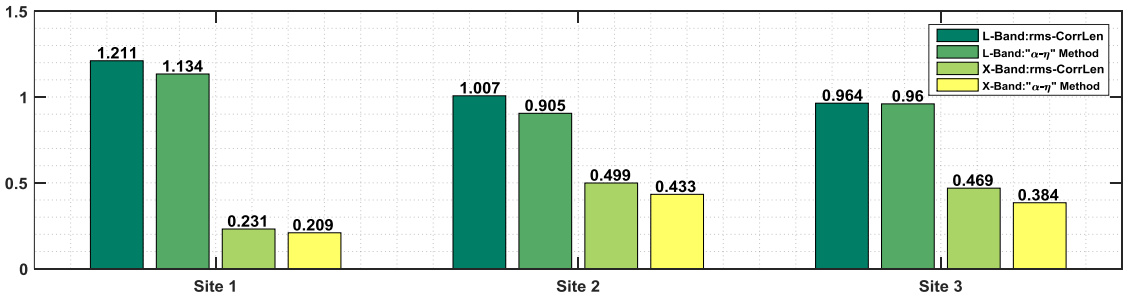
شکل(۱۲)، نمودار میله‌ای اندازه انحراف معیار *RMS-height* محاسبه شده از روش مقاله سال ۱۳۹۴ [۶] و این مقاله در پیاده‌سازی وارون مدل *IEM* (برای بدست آوردن *RMS-height* زبری سطح) در سه سایت برای دو باند فرکانسی L و X را نشان می‌دهد. هر چقدر اندازه انحراف معیار کمتر باشد، نشان می‌دهد شبیه‌سازی مقدار *RMS-height* در روش آن مقاله، صحیحتر و دقیقتر صورت گرفته و معیاری برای میزان کارائی آن روش در پیاده‌سازی مدل *IEM* می‌باشد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.137]



شکل۱۱: میزان مشابهت نتایج شبیه سازی با معادله *IEM* و نیز وارون آن در سه سایت در مقایسه روش این مقاله (روش «*α-η*») و مقاله سال ۱۳۹۴ [۶] (روش *rms-CorrLen*) برای دو باند فرکانسی *L* و *X*؛ (ردیف بالا): میزان مشابهت نتایج شبیه سازی پس‌پراکندگی با معادله *IEM* ؛ (ردیف پایین): میزان مشابهت نتایج شبیه سازی اندازه *RMS-height* با وارون معادله *IEM*.



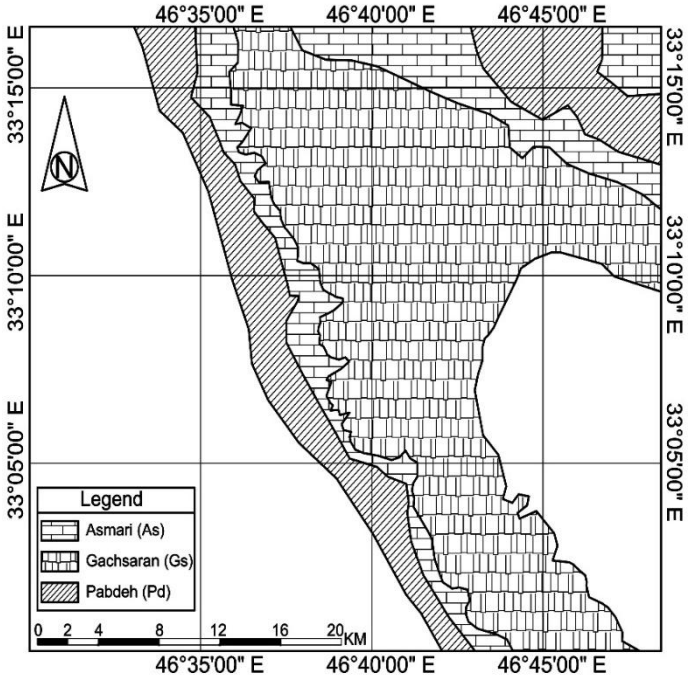
شکل۱۲: اندازه انحراف معیار *RMS-height* محاسبه شده در دو باند فرکانسی *L* و *X* در سه سایت در مقایسه روش این مقاله (روش «*α-η*») و مقاله سال ۱۳۹۴ [۶] (روش *rms-CorrLen*) برای دو باند فرکانسی *L* و *X* در روش‌های پیاده‌سازی مدل *IEM* با ورودی‌های فرکتالی

شکل(۱۳) نقشه تهیه شده از منطقه مورد مطالعه که در شکل(۳-ب) نشان داده شده است را ارائه می‌نماید. این نقشه از طریق طبقه بندی نظارت شده و پهنه بندی به روش بیشترین شباهت که بر روی نتایج محاسبه وارون مدل *IEM* از مقادیر پس‌پراکندگی تصویر *TerraSAR-X* حاصل گردیده تهیه شده است.

دقت محاسبات وارون مدل *IEM* برای بدست آوردن اندازه زبری سطح در محدوده نقشه مذکور از طریق مقایسه با نقشه شکل(۳-ب) و از طریق روش ماتریس تطابق قابل ارزیابی است.

جدول(۳)، ماتریس تطابق تهیه نقشه زمین‌شناسی شکل(۱۱) را ارائه می‌دهد و در ادامه، دقت طبقه‌بندی برای هر کدام از سازندها و نیز صحت کلی محاسبه می‌شود.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]
[DOI: 10.29252/jgit.7.3.137]



شکل۱۳: نقشه زمین‌شناسی منطقه بر اساس پردازش پلاریمتریک تصویر *SAR* و طبقه بندی نظارت شده نتایج با داشتن اطلاعات زبری سطح

جدول۳: ماتریس تطابق نقشه زبری سطح حاصل از پردازش تصویر رادار روزنه مصنوعی در مقابل نقشه مورفولوژی برداشت شده

نقشه زبری سطح	نقشه مورفولوژی حاصل از اندازه گیری: پایده	آسماری	گچساران	کواترنری	جمع سطرها
پایده	۴۲۸۶۲	۶۳	۷۱۵	۴۱۴	۴۴۰۵۴
آسماری	۳۰۶۰	۳۴۱۵۳	۴۰۱	۸۱	۳۷۶۹۵
گچساران	۵۶۱	۳۳۰۳	۱۲۳۹۴	۹۹	۱۶۳۵۷
کواترنری	۱۹۱	۴۶۲	۵۱	۱۱۹۰	۱۸۹۴
جمع ستونها	۴۶۶۷۴	۳۷۹۸۱	۱۳۵۶۱	۱۷۸۴	۱۰۰۰۰۰

دقّت طبقه بندی

پایده/گورپی: ۹۷٪ آسماری: ۹۱٪ گچساران: ۷۶٪ کواترنری: ۶۲٪

صحت کلّی:

(۴۲۸۶۲+۳۴۱۵۳+۱۲۳۹۴+۱۱۹۰) / ۱۰۰،۰۰۰ = ۹۱٪

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.137]

۷- بحث

در این مقاله استفاده از مدل پس‌پراکندگی *IEM* به منظور مطالعه مورفولوژی زمین در کمربند چین‌خورده-رانده زاگرس با استفاده از داده‌های ماهواره *ALOS PALSAR* و *TerraSAR* پیاده‌سازی گردید. در این چارچوب، از دو روش متفاوت برای محاسبه پارامترهای ورودی مدل *IEM* در محاسبه مورفولوژی سه سایت متفاوت در آن منطقه استفاده شد. استفاده از هندسه فرکتالی در مدلسازی پس‌پراکندگی بهترین نتیجه را در محاسبه هندسه سطح ارائه می‌دهد. پیاده‌سازی هندسه فرکتالی از طریق محاسبه شیب طیفی (α) و پارامتر عرض از مبداء رگرسیون خطی گراف *rms* (η) منجر به تطابق بیشتر و بهتر تابع هم‌بستگی با سطح می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی پس‌پراکندگی *IEM* با پس‌پراکندگی اندازه‌گیری شده توسط تصویر *SAR* و نیز شبیه‌سازی وارون مدل برای پارامتر *RMS-height* با اندازه‌گیری زمینی مقایسه گردیده است.

نمای شماتیک شکل‌های(۸ و ۹) و مقادیر انحراف معیار در جدول(۲) و نیز نمودار میله‌ای شکل(۱۰)، بهبود کلی در اثر استفاده از هندسه فرکتالی را برای سرسازندهای زمین شناسی با اندازه های زبری مختلف در هر کدام از فرکانسها نشان می دهد. ولیکن، می توان استنباط نمود که سطوح زبرتر در فرکانسهای پایینتر رفتار فرکتالی دارند و در فرکانسهای بالاتر این سطوح صافتر هستند که هندسه فرکتالی برای آنها مناسب تر بشمار می رود. به عبارت دیگر، سطوح زبر در فرکانسهای بالا و سطوح کمتر زبر در فرکانسهای پایین دارای رفتار غیر فرکتالی می‌باشند. تابع هم‌بستگی نمایی برای سطح صاف سایت۱ با مورفولوژی سازند پابده و تابع هم‌بستگی گاوسی برای سطح زبر سایت۲ با مورفولوژی سازند آسماری نتیجه بهتری ارائه می‌دهد. نتایج برای سایت۳ که پوشیده از سازند گچساران است، به گونه ایست که هندسه فرکتالی با اختلاف قابل توجهی کارائی بالاتری در قیاس با هندسه اقلیدسی را نشان می‌دهد.

به منظور مشخص نمودن کیفیت روشی که این مقاله ارائه کرده است در قیاس با روش قبلی ارائه شده توسط نویسندگان این مقاله، مقایسه‌ای میان نتایج در نمودار شکل(۱۱) قابل مشاهده است. نتایج محاسبه انحراف معیار روشهای مقاله مذکور و این مقاله حکایت از برتری ۱۰ تا ۱۵ درصدی روش این مقاله در ارائه انحراف معیار کمتر دارد.

جدول(۳) که ماتریس تطابق را به عنوان یکی از روشهای قابل استناد در پایش طبقه بندی ارائه می‌نماید، دقت طبقه‌بندی نقشه شکل(۱۳) را ارائه می‌کند. تهیه نقشه‌های زمین شناسی، جدایش واحدهای زمین شناسی (از جمله سرسازندها) با استفاده از تصاویر نوری و روشهای جدایش طیفی انجام می‌گیرد. جدایش واحدهای سنگ شناسی همگن و همجنس با روش جدایش طیفی امکانپذیر نیست؛ حال آنکه با استفاده از مدلسازی پس‌پراکندگی الکترومغناطیس در چینه و رسوب شناسی، این امکان فراهم می‌شود که واحدهای زمین شناسی (زون‌های فرسایشی) به میزان شایانی بر اساس جنس (زبری و صافی) تفکیک شوند.

۸- نتیجه گیری

بر مبنای محاسبه انحراف معیار، استفاده از هندسه فرکتالی به میزان ۱۰٪ بهتر از هندسه کلاسیک در برآورد زبری سطح موفق عمل می‌کند. در هر کدام از فرکانسهای راداری قابلیت محاسبه مورفولوژی برای اندازه مشخصی از زبری سطح وجود دارد. استفاده از دو باند *L* و نیز *X* این مهم را به تفکیک نشان داد. علاوه بر این، رفتار فرکتالی هم در فرکانسهای مختلف و اندازه‌های مختلف زبری تفاوت دارد. سطوح صاف‌تر در مقابل فرکانسهای بالاتر رفتار فرکتالی بیشتری دارند و برعکس.

با روش پیشنهادی این مقاله جهت تهیه نقشه زبری سطح، امکان در نظر گرفتن مورفولوژی سازندها نیز در

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.137]

کنار طیف نگاری، دقت تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی را می‌افزاید. همچنین، با این روش می‌توان با اطلاعات مورفولوژی بدست آمده، مقیاس نقشه‌های زمین‌شناسی را نیز بهبود بخشید. طبقه بندی به روش برآورد بیشترین شباهت نتایج محاسبه *RMS-height* میکروتوپوگرافی سطح و تولید نقشه زبری سطح از مقادیر *RMS-height* بدست آمده از وارون مدل *IEM* که منجر به بدست آمدن نقشه ژئومورفولوژی می‌شود، بازدیدهای میدانی زمین شناسان را به میزان قابل توجهی می‌کاهد.

علی‌رغم کارائی نتایج در مقاله سال ۱۳۹۴ نویسندگان همین مقاله، مقایسه صورت گرفته نشان می‌دهد روش «α-η» ارائه شده در این مقاله از کارائی مطلوبتری در سایتهای مورد مطالعه در این مقاله برخوردار است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از ادارات نقشه برداری، پژوهش و فناوری و زمین‌شناسی مدیریت اکتشاف بابت همکاری در تأمین اطلاعات هندسه سطح و زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و همچنین، معاونت پژوهشی دانشکده فنی دانشگاه تهران بابت تأمین تصاویر *SAR* تشکر و قدردانی می نمایند. همچنین از داوران محترم نشریه وزین «مهندسی فناوری اطلاعات مکانی» که نکات ارزشمند ایشان در جهت تکمیل مقاله استفاده شد، مراتب سپاسگزاری را اعلام می‌دارد.

مراجع

[1] Z. Li et al., "A review on the geological applications of hyperspectral remote sensing technology," in Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS), 2012 4th Workshop on, 2012, pp. 1-4.

[2] A. Ghafouri, "Top-Geological Formations Surface RoughnessModeling in SAR Image," Geomatics Engineering, School of Surveying and Geospatial Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Iran, PhD. Thesis, 2017.

[3] F. K. Lutgens, ESSENTIALS OF GEOLOGY/FREDERICK LUTGENS, EDWARD J. TARBUCK. 2006.

[4] C. Du, F. Yang, X. Xu, X. Xu, and M. Peng, "Coal mine geological hazardous body detection using surface ground penetrating radar velocity tomography," in Ground Penetrating Radar (GPR), 2014 15th International Conference on, 2014, pp. 339-344: IEEE.

[5] N. E. Verhoest, H. Lievens, W. Wagner, J. Álvarez-Mozos, M. S. Moran, and F. Mattia, "On the soil roughness parameterization problem in soil moisture retrieval of bare surfaces from synthetic aperture radar," Sensors, vol. 8, no. 7, pp. 4213-4248, 2008.

[6] A. Ghafouri, J. Amini, M. Dehmollaian, and M. Kavoosi, "Random Fractals Geometry in Surface Roughness Modeling of Geological Formations using Synthetic Aperture Radar Images," Journal of Geomatics Science And Technology, Iranian Society for Surveying & Geomatics Engineering, vol. 5, no. 2, pp. 97-108, 2015.

[7] 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 Sensing, vol. 9, no. 5, p. 445, 2017.

[8] A. Aghanabati, Geology of Iran. Geological Survey & Mineral Explorations of Iran (GSI), 2004.

[9] H. Motiei, Stratigraphy of Zagros (Treatise on the Geology of Iran, no. 1). Geological Survey & Mineral Explorations of Iran

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.137]

(GSI), 1993, pp. 60-151.

[10]A. K. Fung, Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications. Artech House, 1994.

[11]H. Irena, "Inversion of surface parameters using Polarimetric SAR," Ph. D. thesis, 2001, Germany, 2001.

[12]A. Ghafouri, J. Amini, M. Dehmollaian, and M. Kavoosi, "Measuring Surface Roughness of Geological Rock Surfaces in SAR Data using Fractal Geometry," Comptes Rendues Geosciences, 2017.

[13]G. Franceschetti, A. Iodice, M. Migliaccio, and D. Riccio, "Scattering from natural rough surfaces modeled by fractional Brownian motion two-dimensional processes," IEEE transactions on antennas and propagation, vol. 47, no. 9, pp. 1405-1415, 1999.

[14]A. K. Fung and K. S. Chen, "An update on the IEM surface backscattering model," Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, vol. 1, no. 2, pp. 75-77, 2004.

[15]A. Martinez and A. P. Byrnes, Modeling dielectric-constant values of geologic materials: An aid to ground-penetrating radar data collection and interpretation. Kansas Geological Survey, University of Kansas, 2001.

[16]A. Ghafouri, J. Amini, M. Dehmollaian, and M. A. Kavoosi, "Morphological discrimination amongst geological rock surfaces of Zagros thrust belt via SAR backscattering modelling," Earth Observation and Geomatics Engineering, vol. 1, no. 2, pp. 131-141, 2017.

[17]H. Mazaheri Tehrani, "Soil Moisture Estimation with Polarimetric SAR Data," Geomatics Engineering, University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada, PhD. Thesis, 2014.

[18]B. W. Barrett, E. Dwyer, and P. Whelan, "Soil moisture retrieval from active spaceborne microwave observations: An evaluation of current techniques," Remote Sensing, vol. 1, no. 3, pp. 210-242, 2009.

[19]K. Chen, W. Kao, and Y. Tzeng, "Retrieval of surface parameters using dynamic learning neural network," Remote Sensing, vol. 16, no. 5, pp. 801-809, 1995.

[20]N. Baghdadi, J. A. Chaaya, and M. Zribi, "Semiempirical calibration of the integral equation model for SAR data in C-band and cross polarization using radar images and field measurements," Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, vol. 8, no. 1, pp. 14-18, 2011.

[21]S. Panchev, Random Functions and Turbulence: International Series of Monographs in Natural Philosophy. Elsevier, 2013.

[22]J. E. Summers, R. J. Soukup, and R. F. Gragg, "Mathematical modeling and computer-aided manufacturing of rough surfaces for experimental study of seafloor scattering," Oceanic Engineering, IEEE Journal of, vol. 32, no. 4, pp. 897-914, 2007.

[23]E. V. Vázquez, J. Miranda, and A. P. González, "Describing soil surface microrelief by crossover length and fractal dimension," Nonlinear Processes in Geophysics, vol. 14, no. 3, pp. 223-235, 2007.

[24]M. Zribi, "Développement de nouvelles méthodes de modélisation de la rugosité pour la rétrodiffusion hyperfréquence de la surface du sol," 1998.

[25]P. J. Durst, G. L. Mason, B. McKinley, and A. Baylot, "Predicting RMS surface roughness using fractal dimension and PSD parameters," Journal of Terramechanics, vol. 48, no. 2, pp. 105-111, 2011.

[26]O. Yordanov and I. Atanasov, "Self-affine random surfaces," The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems, vol. 29, no. 2, pp. 211-215, 2002.

[27]O. I. Yordanov and N. I. Nickolaev, "Self-affinity of time series with finite domain power-law power spectrum," Physical

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.137]

Review E, vol. 49, no. 4, p. R2517, 1994.

[28] K. Falconer, Fractal geometry: mathematical foundations and applications. John Wiley & Sons, 2004.

[29] I. S. Atanasov and O. I. Yordanov, "Approximate self-affinity and autocovariance function models of ballistic deposits," in Nano-Crystalline and Thin Film Magnetic Oxides: Springer, 1999, pp. 293-300.

[30] O. I. Yordanov and N. I. Nickolaev, "Approximate, saturated and blurred self-affinity of random processes with finite domain power-law power spectrum," Physica D: Nonlinear Phenomena, vol. 101, no. 1, pp. 116-130, 1997.

[31] G. Leclerc, N. Beaulieu, and F. Bonn, "A simple method to account for topography in the radiometric correction of radar imagery," International Journal of Remote Sensing, vol. 22, no. 17, pp. 3553-3570, 2001.

[32] C. C. W. Fadzal et al., "Welch power spectral density of EEG signal generated from dyslexic children," in Region 10 Symposium, 2014 IEEE, 2014, pp. 560-562: IEEE.

[33] C.-h. Huang and J. M. Bradford, "Applications of a Laser Scanner to Quantify Soil Microtopography," (in English), Soil Science Society of America Journal, vol. 56, no. 1, 1992.

[34] G. Franceschetti and D. Riccio, Scattering, Natural Surfaces, and Fractals. Academic Press, 2006.

[35] G. Franceschetti, A. Iodice, S. Perna, and D. Riccio, "Efficient simulation of airborne SAR raw data of extended scenes," Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 44, no. 10, pp. 2851-2860, 2006.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.137]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.7, No.3, Autumn 2019

Research Paper

Discrimination of Geological Top-Formations by their Morphology through SAR Images and via Fractal Geometry implementation in IEM Backscattering Model(Case Study: Zagros Thrust Belt)

Ali Ghafouri.[1*], Jalal Amini[2], Mojtaba Dehmollaian[3] , Mohammad Ali. Kavoosi [4]

1- PhD in Photogrammetry, Dept. of Surveying Engineering, Collage of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
2- Professor, Dept. of Surveying Engineering, Collage of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
3- Associate Professor, School of Electrical and Computer Eng, University of Tehran. Center of Excellence on Applied Electromagnetic Systems
4- Head of Stratigraphy and Sedimentology, Exploration Directorate of National Iranian Oil Company, Iran

Abstract

Morphological discrimination of geological top-formations is the supplemental procedure of geological mapping; so in situ measurements to register geomorphological data are unavoidable; though due to the impassable and fault cliffs field operations to visit all areas within a geological map is almost impossible. Microwave or radar remote sensing, via synthetic aperture radar (SAR) images is capable to obtain the surface morphology and alteration zones discrimination on the basis of lithology texture. For this purpose, it is necessary to model the surface roughness against microwave signal backscattering; among available models, Integral Equation Model (IEM) is the most famous one, in which surface roughness is calculable via roughness height statistical parameter (RMS-height). Whereas, this parameter is not capable enough to measure, since it measures the surface roughness merely in vertical direction, and roughness dispersion on the surface is not included. To apply the proposed method of geomorphological mapping, the roughness map for the area of concern which is the northern part of Anaran anticline (located between Dehloran and Ilam cities in Iran) using ALOS-PALSAR and TerraSAR images is computed. Field micro-topography measurement is performed on three different sites containing the main lithologies of the case study, using surveying total station. It is clarified in comparison of roughness map with the ground truth, that using fractal geometry parameters in IEM model computation, the standard deviation had more than 10% of decrease, in comparison with conventional IEM calculations. In addition, in this paper, a comparison is made between the results obtained with another article from the authors to the results gained by the method of this article, which shows a 10 to 15 percent advantage of this paper method.

Key words: *Geology Mapping, Synthetic Aperture Radar, Integral Equation Model (SimWeight), Mazandaran province.*

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-10-31]

[DOI: 10.29252/jgit.7.3.137]

Correspondence Address. *Department of Geomatics, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.*
Tel: *+98 912 459 4685.*
Email : *ali.ghafouri@ut.ac.ir*