

تخمین پارامترهای زبری سطح با استفاده از روشهای فرکتالی و فتوگرامتری برد کوتاه

محمد ملکی

استادیار گروه مهندسی عمران - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه ایلام
mo.maleki@ilam.ac.ir

(تاریخ دریافت فروردین ۱۴۰۰، تاریخ تصویب مرداد ۱۴۰۰)

چکیده

امروزه اندازه‌گیری زبری سطح در بسیاری از کاربردهای عمرانی و صنعتی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. یکی از شاخصهای مهم در اندازه‌گیری زبری سطح تعیین بعد فرکتالی می‌باشد. برای تعیین بعد فرکتالی معمولاً از مقطع بردارها به روش تماسی استفاده می‌گردد که این امر در خصوص سطوح با زبری کم ممکن است باعث به هم خوردن بافت سطح شود و در نتیجه اندازه‌گیری زبری با دقت پایینی صورت گیرد. در این مطالعه یک روش سریع و قابل اعتماد بر مبنای روش فتوگرامتری زمینی که یک روش غیر تماسی است، برای اندازه‌گیری بعد فرکتالی و زبری ارائه شده است. مورد مطالعه در این تحقیق، سطح ماسه‌ای است. بعد از اخذ عکس‌های متعدد پوشش‌دار، مدل رقومی ارتفاعی ایجاد گردید. برای اندازه‌گیری صحیح بر روی سطح به کمک ۶ نقطه کنترل، مقیاس‌گذاری و تعیین سیستم مختصات انجام گرفت. دقت مسطحاتی بدست آمده ۱٫۳۳ میلیمتر و دقت ارتفاعی ۰٫۳۲ میلیمتر می‌باشد. به منظور اندازه‌گیری پارامترهای زبری سطح شامل طول همبستگی و ریشه میانگین مربعات ارتفاع (rms-height) پروفیل‌های متعددی از سطح سه بعدی استخراج گردید، مقدار شیب طیف سطح، با استفاده از روش Welch برای هر کدام از این پروفیل‌ها محاسبه شد و بعد فرکتالی با استفاده از این پارامتر محاسبه گردید. نهایتاً با استفاده از بعد فرکتالی، مقدار طول همبستگی و rms-height برای هر کدام از پروفیل‌ها محاسبه شد. در این مطالعه زبری سطح با استفاده از چهار شاخص بعد فرکتالی، طول همبستگی، rms-height و پارامتر Z_s (نسبت مربع میانگین ارتفاع به طول همبستگی) ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که پارامتر Z_s با ضریب همبستگی ۸۱ درصد با بعد فرکتالی برای تمام پروفیل‌ها، شاخص مناسبی برای محاسبه زبری سطح است، دلیل این امر هم عدم وابستگی این شاخص به طول پروفیل می‌باشد. این مطالعه نشان داد که روش فتوگرامتری زمینی روشی بسیار مناسب و قابل اعتماد برای اندازه‌گیری پارامترهای زبری می‌باشد. از مزیت‌های مهم این روش برخلاف دیگر روش‌ها مانند مقطع بردار سوزنی یا لیزری داشتن پروفیل‌های متعدد در هر جهت دلخواه و به هم نخوردن بافت زبری (خصوصاً در سطوح با زبری بسیار کم) در اثر تماس مستقیم مقطع بردار با سطح می‌باشد.

واژگان کلیدی: فتوگرامتری برد کوتاه، مدل سه‌بعدی، زبری سطح، طول همبستگی، rms-height

۱- مقدمه

زبری سطح پارامتری اساسی و کلیدی در تشخیص خصوصیات سطح خاک در کاربردهای مختلف کشاورزی، هیدرولوژی و .. می باشد. در مناطق کشاورزی این پارامتر می تواند به عنوان یک شاخص در حساسیت خاک به فرسایش ناشی از باد باشد. همچنین این پارامتر در نفوذ و جاری شدن و ذخیره آب نقش بسیار مهمی را ایفا می کند. [۱]. زبری خاک به همراه ثابت دی الکتریک مواد نقش اساسی در بازپراکنش امواج الکترومغناطیسی ایفا می کنند [۲]. داشتن اطلاعات مربوط به زبری خاک برای پایش فرسایش خاک بسیار مناسب می باشد. فرسایش خاک و سنگ به وسیله آب، باد و یخ، از پدیده های طبیعی می باشند. همچنین فعالیت های بشری نرخ فرسایش خاک را شتاب بیشتری داده است. افزایش جمعیت و تقاضای بیشتر برای زمین باعث شده است که مناطق جنگلی و کشاورزی و مراتع با سرعت زیادی به مناطق روستایی، شهری و صنعتی تبدیل شوند. این فعالیت حذف پوشش محافظ خاک که خصوصیات بیوفیزیکی و شیمیایی خاک تحت آن شکل گرفته است، می شود. زیان هایی که از بابت این تغییرات به خاک وارد می شود به فاکتورهایی مانند توپوگرافی، شرایط جوی و نوع خاک بستگی دارد. روشهای نامناسب جنگلداری و مدیریت کشاورزی و همچنین چرای بیش از حد در مراتع از عوامل دیگری می باشد که نرخ فرسایش خاک را شتاب داده است [۳]. در کاربردهای عمرانی به منظور ریختن بتن بر روی لایه قبلی، زبری سطح نقش مهمی در چسبندگی دو لایه را ایفا می کند [۴].

زبری سطح تحت عنوان اختلالات سطح خاک تعریف می گردد که به وسیله عواملی مانند بافت خاک، اندازه دانه های خاک و کارهای انجام شده روی زمین مانند شخم زدن و .. ایجاد می گردد. بنابراین زبری نقشی کلیدی در ذخیره آب، نفوذ آب، رسوب و فرسایش خاک دارد [۵]. زبری خاک در مقیاس میکروتوپوگرافی آنقدر کوچک است که اندازه گیری آن با روشهای معمول نقشه برداری زمینی بسیار سخت می باشد. بر اساس نظر Takken و همکاران زبری به چهار دسته تقسیم می شود: (۱) تغییرات ارتفاعی

بسیار ریز که عمدتاً به نوع خاک برمی گردد. (۲) زبری اتفاقی^۱ که به دانه بندی خاک مربوط می باشد. (۳) زبری جهت دار^۲ که تغییرات سیستماتیک توپوگرافی را تعریف می کند به عنوان مثال زمینهای شخم زده شده در این گروه قرار می گیرند. (۴) زبری مرتبه بالاتر که تغییرات ارتفاعی میدانی مانند تپه های خاک و .. را شامل می شود. [۶]. در این مطالعه زبری اتفاقی مورد نظر می باشد. روشهای مختلفی برای اندازه گیری زبری سطح پیشنهاد شده است. این روشها عمدتاً به دو دسته روشهای تماسی^۳ مانند اندازه گیری با مقطع بردار سوزنی^۴ و روشهای غیرتماسی^۵ مانند اندازه گیری با مقطع بردار لیزری^۶ لیزر اسکنر زمینی یا تکنیک های فتوگرامتری، تقسیم بندی می شوند [۷]. اینکه کدام یک از این روشها بهتر است به دقت و قدرت تفکیک مورد نیاز، قابل حمل بودن و متحرک بودن دستگاه و هزینه مورد نیاز بستگی دارد [۸]. به کارگیری تکنیک های تماسی مانند مقطع بردار سوزنی اغلب اوقات مشکل می باشد همچنین رزولوشن یا فواصل مقطع برداری در هر دو جهت افقی و ارتفاعی محدود می باشد [۹، ۱۰]. یکی دیگر از معایب این روشها این است که به دلیل تماس مستقیم ممکن است زبری سطح را دچار تغییر و دگرگونی کنند. مقطع بردار لیزری در طول یک مسیر افقی حرکت می کند و با استفاده از لیزر فاصله تا سطح را اندازه گیری می کند. در هر گذر امکان اندازه گیری پروفیل از یک تا پنج متر وجود دارد [۱۱، ۱۲]. استفاده از روشهای لیزر مبنا علی رغم مصرف انرژی زیاد و هزینه بر بودن آنها، دقیق و قابل اعتماد می باشند. یکی از معایب روشهای مقطع بردار چه سوزنی و چه لیزری این است که به دلیل برداشت محدود سطح امکان بازسازی و تشکیل مدل سه بعدی با این روشها وجود ندارد. اگر چه با پروفیل برداریهای متعدد در دو جهت عمودی و افقی این امکان وجود دارد اما انجام دادن این کارها در محیط بیرون کاری سخت و خسته کننده می باشد [۱۳، ۱۴].

^۱ Random roughness

^۲ oriented roughness

^۳ contact method

^۴ pin profilometer

^۵ non-contact method

^۶ laser profilometer

ارزیابی نتایج مورد بررسی قرار می گیرد. نتیجه گیری و پیشنهادات در بخش ۴ آمده است.

هدف اصلی در این تحقیق اندازه گیری زبری سطح با استفاده از بعد فرکتالی و روش فتوگرامتری زمینی می باشد. اخیرا این روش در بسیاری از تحقیقات مورد استفاده قرار گرفته است [۳۵ و ۳۶]

۲- مواد و روشها

هدف از انجام این تحقیق محاسبه پارامترهای زبری سطح با روش غیر تماسی می باشد. اندازه گیری زبری سطح برای بسیاری از کاربردها از اهمیت بالایی برخوردار است به عنوان مثال در اندازه گیری پارامترهای زبری با استفاده از تصاویر راداری، به منظور ارزیابی نتایج می بایست اندازه گیری زمینی زبری انجام گیرد. در بسیاری از مواقع به دلیل بافت خاص سطح نمی توان از روشهای تماسی استفاده نمود به علاوه این روشها ممکن است که بافت سطح و در نتیجه زبری سطح را دچار تغییر نمایند. روش استریو فتوگرامتری یکی از ساده ترین روشها به منظور تهیه مدل سه بعدی می باشد. در دو دهه اخیر با پیشرفت های بسیار زیادی که در ساخت دوربینهای با کیفیت بالا و با قیمت مناسب صورت گرفته است، روش فتوگرامتری به منظور تهیه مدل سه بعدی بیشتر از همیشه مورد توجه بوده است.

روش پیشنهادی در این تحقیق به منظور اندازه گیری پارامترهای زبری سطح شامل rms-height و طول همبستگی، در دو مرحله پیاده سازی شده است. در مرحله اول با استفاده از روش فتوگرامتری برد کوتاه، و اخذ عکس های متعدد، مدل سه بعدی سطح تشکیل گردید. سطح مورد مطالعه برای اندازه گیری زبری، سطح ماسه ای با ابعاد تقریبی 0.7×1.5 متر مربع می باشد. همچنین از دوربین SJ6 LEGEND که مشخصات کامل آن در جدول ۱ آمده است به منظور عکسبرداری استفاده شده است. برای تشکیل مدل سه بعدی از نرم افزار فتو اسکن استفاده شده است.

به منظور ارزیابی دقت مسطحاتی و ارتفاعی مدل سه بعدی از ۶ نقطه کنترل استفاده گردیده است. بعد از ایجاد مدل سه بعدی، پروفیل های طولی متعددی از سطح استخراج گردید. به منظور استخراج مختصات نقاط (واقع

اخیرا تکنیک های فتوگرامتری برد کوتاه قابلیت خود را برای تهیه مدل سه بعدی نشان داده اند [۱۵]. یکی از مزیت های مهم این روش در تهیه مدل های سه بعدی است که امکان استخراج پروفیل های متعدد در جهات مختلف با تنها یک اندازه گیری را فراهم می کند [۱۶].

به کارگیری این روش مستلزم دقت در موقعیت و جهت عکسبرداری نسبت به سطح می باشد. همچنین خطای اعوجاج ناشی از فاصله کانونی دوربین می بایست می نیم شود. نحوه اخذ تصویر می بایست طوری باشد که تصویر سایه دار نباشد که این امر مستلزم داشتن نور کافی به هنگام عکسبرداری می باشد [۱۷]. یکی دیگر از روشهای تهیه مدل سه بعدی استفاده از لیزر اسکنهای سه بعدی زمینی می باشد که می توانند مدل ارتفاعی سطح را با دقت بسیار خوبی ارائه دهند [۱۸، ۱۹]. از معایب این روش می توان به پیچیدگی کالیبراسیون دستگاه و هزینه بالای آن اشاره نمود. در میان روشهایی که ذکر شد نقطه بردار سوزنی و فتوگرامتری دارای پروفیل های ارتفاعی بسیار شبیه به هم هستند.

به طور کلی روش مورد استفاده برای اندازه گیری زبری سطح به عوامل مختلفی مانند هزینه، دقت، امکان حرکت بر روی سطح و .. بستگی دارد [۲۰]. با توجه به رزولوشن محدود و امکان تخریب و دگرگونی زبری سطح به دلیل تماس مستقیم، استفاده از روش تماسی برای سطوح با زبری کوچک، پیشنهاد نمی گردد. در بین روش های غیر تماسی، استفاده از روش فتوگرامتری برد کوتاه بسیار مقرون به صرفه خواهد بود.

این مقاله شامل ۴ بخش است. بعد از قسمت مقدمه، مواد و روشها در بخش ۲ مورد بحث قرار می گیرد. این بخش شامل دو قسمت می باشد در قسمت اول تهیه مدل رقومی با استفاده از روش فتوگرامتری برد کوتاه مورد بحث قرار می گیرد. در این قسمت روش پیشنهادی در شکل ۱ قسمت الف پیاده سازی شده است که در نهایت منجر به تهیه مدل رقومی ارتفاعی با دقت و قدرت تفکیک بالا می شود. در قسمت دوم به استخراج پارامترهای زبری پرداخته شده است. پیاده سازی این روش بر اساس شکل ۱ قسمت ب می باشد. در این قسمت پارامترهای زبری بر اساس چهار شاخص بعد فرکتالی، rms-height، طول همبستگی و Z_s به دست می آیند. در بخش ۳ بحث و

بر روی خط راست) از مدل سه بعدی، از الگوریتم Bresenham استفاده شده است. این الگوریتم برای ترسیم خط به صورت اتوماتیک در تصاویر مورد استفاده قرار می گیرد با استفاده از روش فرکتالی پارامترهای زبری شامل rms-height و طول همبستگی سطح محاسبه گردیدند.

ابتدا مقدار شیب تابع طیف سطح محاسبه می شود و به کمک آن بعد فرکتالی و در نتیجه پارامترهای زبری سطح محاسبه می گردند. شکل ۱ مراحل انجام تحقیق را در هر دو مرحله نشان می دهد.

جدول ۱- مشخصات دوربین مورد استفاده در این مطالعه

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
SJ6 LEGEND	3264 x 2448	0/28 mm	0/0958 x 0/0958 μm	No



شکل ۱- متدولوژی اندازه گیری پارامترهای زبری سطح. الف: روش تهیه مدل سه بعدی با استفاده از روش فتوگرامتری زمینی و استخراج مدل سه بعدی. ب: روش اندازه گیری پارامترهای زبری با استفاده از پروفیل های طولی استخراج شده از مدل سه بعدی شامل (rms-height) و (l طول همبستگی)

زبری در آن ایجاد شده است. ابعاد تقریبی جعبه که ماسه در داخل آن ریخته شده است $0.15 \times 0.7 \times 1.5$ متر می باشد. به منظور اندازه گیری زبری سطح شاخص های متعددی پیشنهاد شده است. در این مطالعه از روش فرکتالی که مبتنی بر اندازه گیری بعد فرکتالی و اندازه شیب تابع طیف سطح می باشد، استفاده گردیده است. به منظور تهیه مدل سه بعدی، ابتدا عکسهای متعدد پوشش دار از سطح اخذ گردید. عکس های متعدد متوالی بر روی نوارهای نسبتا موازی گرفته شد، تا حد ممکن سعی بر این بود که عکسبرداری عمود بر سطح انجام گیرد. به منظور ایجاد مدل سه بعدی عکس ها هم در جهت طولی و هم در جهت عرضی به صورت پوشش دار با حداقل پوشش

۳- پیاده سازی و ارزیابی نتایج

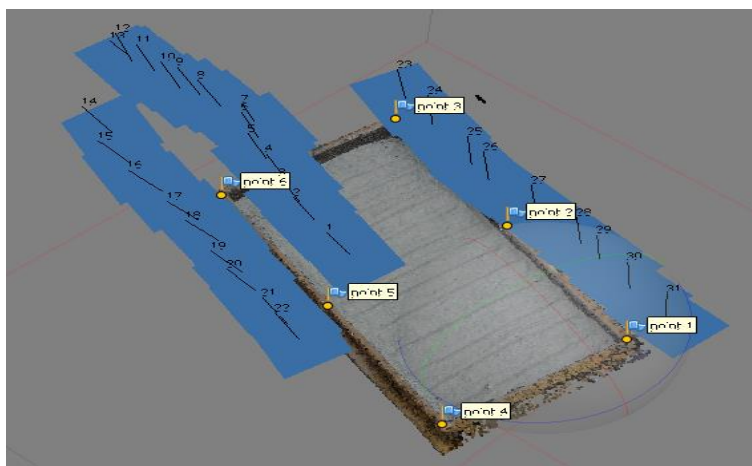
۳-۱- تهیه مدل رقومی ارتفاعی با استفاده از روش فتوگرامتری برد کوتاه

استفاده از روشهای فتوگرامتری برد کوتاه به منظور تهیه مدل های سه بعدی به منظور تعیین زبری قابلیت خود را به عنوان یک روش قوی و دقیق در کاربردهای مختلف نشان داده اند [۲۱].

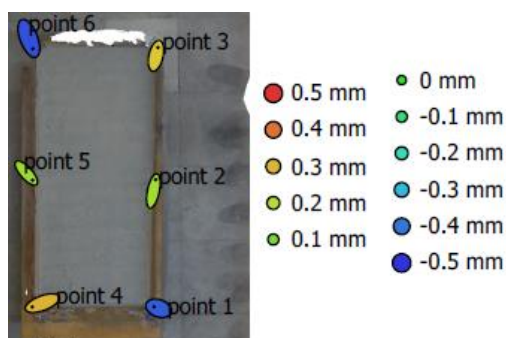
در این مطالعه از روش فتوگرامتری برد کوتاه استفاده شده است. مشخصات دوربین مورد استفاده در جدول شماره یک آمده است. سطح مورد مطالعه برای اندازه گیری زبری، سطح ماسه ای است که چندین شیار به منظور ایجاد

شکل ۲ موقعیت محل های عکسبرداری از صحنه را نشان می دهد. بعد از اخذ عکس ها، کالیبراسیون و معرفی پارامترهای دوربین انجام گرفت، تناظر یابی نقاط به منظور پیدا نمودن نقاط مشترک، تشکیل ابر نقاط و ایجاد DTM و منحنی های میزان در نرم افزار photo scan انجام گرفت.

۷۰ در صد اخذ شده اند. عکس ها در فاصله حدوده ۱/۵ متری از سطح گرفته شدند که در این فاصله ابعاد زمینی پوشش داده شده توسط هر عکس $1/25 \times 1/67$ متر مربع می باشد. رزولوشن تصویر و ابعاد عکس ها برای اندازه گیری زبری سطح مناسب می باشند و این مقادیر تقریباً مشابه مطالعات مشابه در این خصوص می باشد [۲۳و۲۲].



شکل ۲- موقعیت محل های عکسبرداری (۳۱ نقطه تصویربرداری) به همراه سطح تصویربرداری و ۶ نقطه کنترل



شکل ۳- بیضی خطای مربوط به نقاط کنترل: موقعیت نقاط توسط علامت های مشکی نشان داده شده است. هر کدام از بیضی ها مقدار خطای مسطحاتی مربوط به هر نقطه را نشان می دهد. مقدار خطای ارتفاعی هم به وسیله رنگ مربوطه که در لژاند کنار آمده است مشخص می شود

به منظور اندازه گیری صحیح و ایجاد سیستم مختصات بر روی مدل زمینی شش نقطه کنترل با مختصات مسطحاتی و ارتفاعی به مدل معرفی گردید. بر روی مدل نقاط به همراه مختصات زمین آنها معرفی گردید و سرشکنی خطاها انجام شد، دقت ارتفاعی و مسطحاتی به دست آمده به ترتیب $0/32$ و $1/32$ میلی متر به دست آمد. این دقت برای اندازه گیری زبری سطح کافی می باشد و همچنین در مقایسه با کارهای مشابه [۲۴] دقت بسیار مناسبی است. جدول ۲ مقدار خطای محاسبه شده برای هر نقطه و شکل ۳ بیضی خطای مربوط به هر کدام از نقاط کنترل را نشان می دهد.

جدول ۲- مقدار خطای مسطحاتی و ارتفاعی برای هر کدام از نقاط کنترل و خطای مجموع

Label	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	Total (mm)
نقطه ۱	-۰/۶۲۳	۰/۲۲۱	-۰/۴۴۲	۰/۷۹۵
نقطه ۲	۰/۳۱۷	۱/۵۵	۰/۱۵۸	۱/۵۸۹
نقطه ۳	۰/۲۶۱	۱/۱۵۱	۰/۲۸۱	۱/۲۱۴
نقطه ۴	-۱/۳۸۸	-۰/۵۱۷	۰/۳۱	۱/۵۱
نقطه ۵	۰/۸۷۸	-۰/۹۶۹	۰/۱۵۵	۱/۳۱۶
نقطه ۶	۰/۵۵۴	-۱/۴۳۶	-۰/۴۶	۱/۶۰۷
Total	۰/۷۷	۱/۰۸	۰/۳۲	۱/۳۷

تغییرات ارتفاعی سطح به وسیله پارامتر rms-height که از رابطه ۱ به دست می آید بیان می گردد:

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

$$\bar{z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i$$

که z ارتفاع اندازه گیری شده می باشد.

پارامتر دیگر که به عنوان شاخص زبری استفاده می شود و آن عبارت از است از تغییرات زبری در جهت افقی، طول همبستگی می باشد. طول همبستگی توسط تابع خود همبستگی بیان می گردد این تابع درجه همبستگی بین ارتفاع $z(x)$ را در نقطه x و ارتفاع $z(x+p)$ را به فاصله p از x اندازه گیری می کند. این تابع مطابق رابطه ۲ بیان می گردد:

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

در رابطه ۲، Δx فواصل نمونه برداری و r جابجایی مکانی می باشد.

اندازه گیری طول همبستگی به دلیل وابستگی به تغییرات ارتفاعی زبری و همچنین طول پروفیل، بسیار دشوار می باشد [۲۷ و ۲۸].

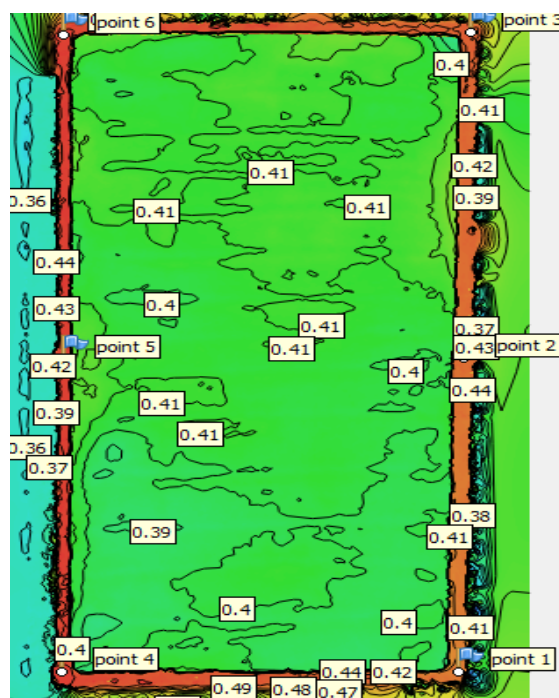
هر چه قدر مقدار طول همبستگی بزرگتر باشد تغییرات زبری در جهت افقی کمتر خواهد بود. در بسیاری از موارد از جمله در بازپراکنش های راداری تاثیر طول همبستگی نادیده گرفته می شود.

شاخص های متعددی برای زبری معرفی شده اند که هر کدام از آنها در مطالعات مختلفی به کار گیری شده اند. در این مطالعه ابتدا با استفاده از الگوریتم Bresenham ۸ تا پروفیل طولی در راستای محور x و y استخراج گردید. شکل ۵ پروفیل های طولی را نشان می دهد. پروفیل های ۱ تا ۴ در راستای محور y به طول ۱/۳۰ متر و پروفیل های ۵ تا ۹ در راستای محور x به طول ۰/۶ متر می باشد.

یکی از روشهای موثر به منظور مطالعه زبری سطح، بعد فرکتالی می باشد. بعد فرکتالی یکی از خصوصیات بسیار مهم در هندسه فرکتالی است که کاربردهای بسیار زیادی در حوزه های مختلف شامل پردازش تصویر، آنالیز تصویر، طبقه بندی و همچنین توصیف خصوصیات تصویر مانند زبری و نرمی تصویر را دارد [۲۹]. سطوح طبیعی می توانند با روش فرکتال مدلسازی گردند به این دلیل که

بعد از سرشکن نمودن خطاها و مقیاس گذاری، مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک 1.5mm ایجاد شد همچنین منحنی میزانها با فواصل 1 cm بر روی مدل سه بعدی تولید گردیدند. شکل ۴ مدل DTM و منحنی میزان ها مربوط به سطح را نشان می دهد.

بعد از ایجاد مدل سه بعدی در هر جهت که لازم باشد می توان پروفیل ارتفاعی را استخراج نمود و پارامترهای زبری مربوط به آن را محاسبه کرد. در این مطالعه پروفیل های طولی از مدل رقومی ارتفاعی بر اساس الگوریتم Bresenham استخراج گردیدند. این الگوریتم به منظور استخراج مختصات نقاطی که بر روی یک خط مستقیم می باشند، به کار می رود [۲۵]. پروفیل های متعددی از مدل ارتفاعی استخراج و سپس با استفاده از شاخصهای مختلف از جمله روش فرکتالی، پارامترهای زبری محاسبه شده است.



شکل ۴- مدل سه بعدی و منحنی میزانهای مربوط به مدل سه بعدی. فاصله منحنی میزانها 1cm و قدرت تفکیک مدل سه بعدی 1.5mm می باشد. محدوده مورد مطالعه محدود، ناحیه بین نقاط یک تا ۶ می باشد. اعداد نشان دهنده ارتفاع منحنی های میزان می باشند

۳-۲- محاسبه زبری سطح با استفاده از شاخصهای مختلف

زبری سطح را می توان به عنوان تغییرات توپوگرافی سطح تعریف نمود. این تغییرات در توپوگرافی هم در جهت ارتفاعی و هم در جهت افقی اتفاق می افتد [۲۶].

ابتدا از مدل سه بعدی ۸ پروفیل طولی در جهات محور x و y استخراج گردید. با به کارگیری روش Welch مقدار شیب طیف سطح α برای تمام پروفیل های محاسبه می شود. روش welch روشی است برای تخمین چگالی طیف با داشتن α و از روابط ۵ و ۶ مقدار rms-height و طول همبستگی محاسبه می گردند.

مقدار α عبارت است از شیب تابع طیف توان^۳ این مقدار از برازش خطی بر روی تابع طیف توان در مقیاس لگاریتمی محاسبه می شود.

یکی از نکات بسیار مهم در محاسبه α این است ابتدا باید detrending روی طیف توان صورت بگیرد به عبارت دیگر مقدار α می بایست شامل قسمتهای trend نباشد [۳۵ و ۳۴] برای محاسبه α از روش Welch استفاده شده است، با داشتن α با استفاده از روابط ۵ و ۶ پارامترهای زبری شامل rms-height و طول همبستگی محاسبه گردید. شکل ۶ نحوه محاسبه پارامتر α را برای تمام پروفیلها نشان می دهد. تابع طیف توان با استفاده از روش welch تخمین زده می شود [۳۶]. همانطور که در شکل ۶ مشخص است مقادیر

trend در محاسبه α در نظر گرفته نشده اند. خط قرمز نشان دهنده تابع رگرسیون خطی می باشد. با توجه به اینکه پارامترهای افقی و قائم زبری مستقل از یکدیگر نیستند، به منظور تلفیق تاثیر آنها شاخص دیگر توسط zeribi و دیگران (۲۰۰۲) معرفی شد [۳۶]، این شاخص در رابطه ۷ آمده است:

$$Z_s = \frac{s^2}{l} \quad (7)$$

در رابطه فوق s مقدار rms-height و l طول همبستگی می باشد. جدول ۳ شامل Z_s نیز می باشد. بعد از محاسبه α مقادیر s و l (روابط ۵ و ۶) و همچنین Z_s برای هر کدام از پروفیلها محاسبه گردید که نتایج در جدول ۳ آمده است.

فرکتال ها می توانند سطوح با خصوصیات scale invariance و خود متشابه را به نحو مناسبی مدل سازی نمایند. بعد فرکتالی مهمترین خصیصه ای است که برای بیان زبری سطوح فرکتالی مورد استفاده قرار می گیرد. هر چه قدر بعد فرکتال بیشتر باشد زبری مربوط به آن سطح بیشتر است و برعکس [۳۰].

با استفاده از هندسه فرکتالی پدیده های طبیعی می توانند بر اساس تابع توانی^۱ نشان داده شوند. تابع خود همبستگی برای یک پروفیل طولی در هندسه فرکتالی بر اساس رابطه ۳ می باشد [۳۱].

$$Ax = 2\pi^{D-1} \int_{kmin}^{kmax} k^{T-1-\alpha} \cos(kx) dk \quad (3)$$

که k شماره موج^۲ T بعد توپولوژیکی و α شیب تابع طیف سطح می باشد که مقدار آن در محدوده $T < \alpha < T + 2$ می باشد. برای پروفیل طولی مقدار بعد توپولوژیکی برابر $T=1$ می باشد بنابراین $1 < \alpha < 3$ [۳۲]. رابطه بین بعد فرکتالی با و α مطابق رابطه ۴ می باشد:

$$\begin{aligned} \alpha &= 2H + 1 \\ H &= D - 2 \\ \alpha &= 2D - 3 \end{aligned} \quad (4)$$

در رابطه فوق D بعد فرکتالی و H پارامتر هورست می باشد.

با استفاده از پارامتر شیب طیف سطح (α) می توان پارامترهای زبری شامل rms-height و طول همبستگی را برای پروفیل طولی از رابط ۵ و ۶ محاسبه نمود [۳۳].

$$s = \sqrt{\frac{cL^{\alpha-1}}{\alpha-1}} \quad (5)$$

$$l = \frac{(\alpha-1)^2 L}{2(2\alpha-1)} \quad (6)$$

در روابط ۵ و ۶، s عبارت است از rms-height و l طول همبستگی فرکتالی، c ثابت طیف سطح و α شیب طیف سطح می باشد.

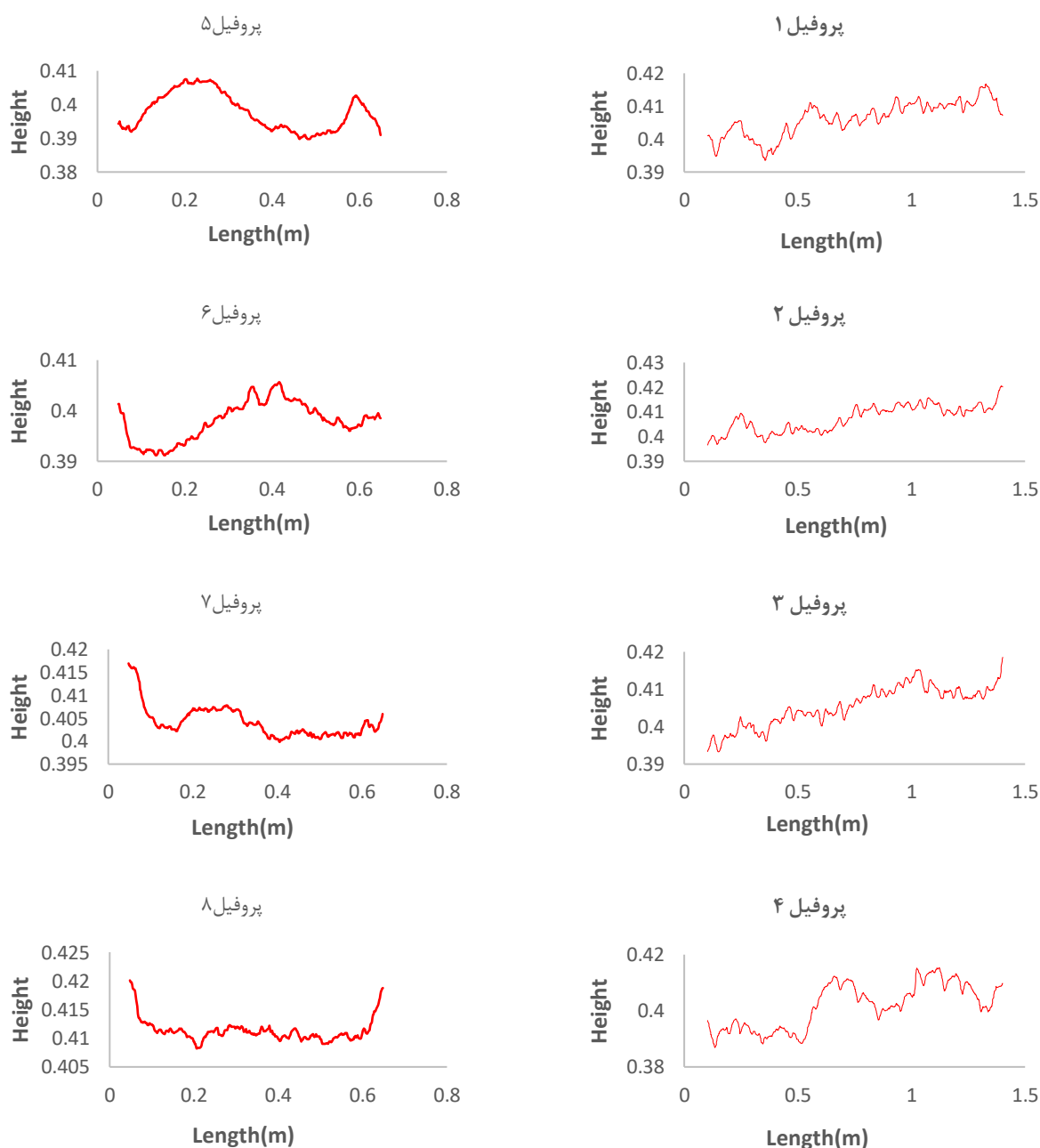
در این مطالعه از روش فرکتالی برای محاسبه پارامترهای زبری استفاده می گردد. متدولوژی محاسبه این پارامترها در شکل ۱ قسمت ب نشان داده شده است.

^۳ Power spectral density

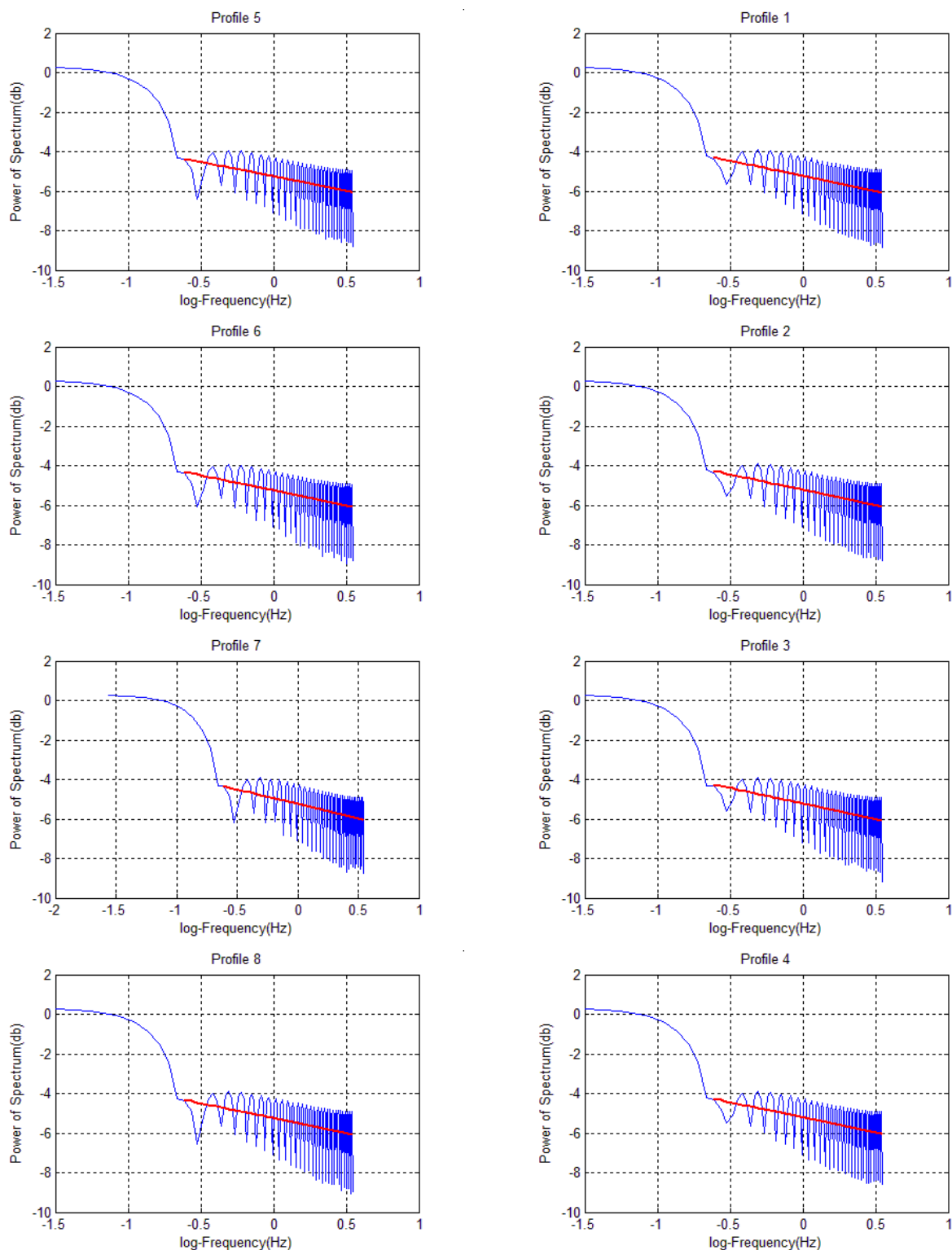
^۱ Power low
^۲ Wave number

جدول ۳- پارامترهای زبری (rms-height: s ، بعد فرکتالی: D ، پارامتر Z_s و طول همبستگی: l) پروفیل‌های مختلف سطح

شماره پروفیل	D	$s(cm)$	$Z_s(cm) \times 10^{-3}$	$l(m)$
۱	۱,۱۲۶۵	۰,۱۸	۰,۷۲	۰,۴۴۱
۲	۱,۱۲۴۳	۰,۱۵	۰,۵	۰,۴۴۲۴
۳	۱,۱۲۳۶	۰,۱۴	۰,۴۷	۰,۴۴۲۸
۴	۱,۱۳۴۱	۰,۲۴	۱,۳	۰,۴۳۶۳
۵	۱,۱۵۳۱	۰,۲۴	۲,۹۷	۰,۱۹۶۲
۶	۱,۱۳۲۸	۰,۱۵	۱,۱۶	۰,۲۰۲
۷	۱,۱۴۹۸	۰,۱۷	۱,۵۲	۰,۱۹۷۱
۸	۱,۱۲۹۸	۰,۱۵	۱,۱۶	۰,۲۰۲۸



شکل ۵- پروفیل‌های طول استخراج شده از مدل سه بعدی فتوگرامتری: پروفیل‌های ۱ تا ۴ در راستای محور y و پروفیل‌های ۵ تا ۸ در راستای محور x (طول و ارتفاع بر حسب متر)



شکل ۶- محاسبه پارامتر شیب طیف توان α با استفاده از رگرسیون خطی بر روی تابع چگالی توان psd در مقیاس لگاریتمی. در این محاسبه مقدار trend برای تمام پروفیلها در محاسبه α در نظر گرفته نشده است.

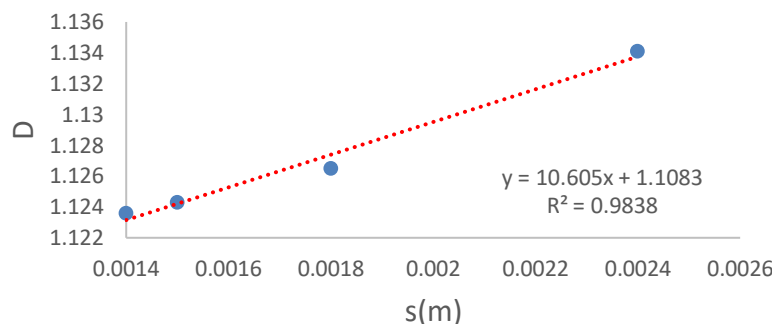
۳-۳- نتایج و ارزیابی

جدول ۳ نتایج مربوط به پارامترهای زبری را نشان می دهد. پروفیل های ۱ تا ۴ دارای طول برابر $1/30m$ و پروفیل های ۴ تا ۸ دارای طول $0.06m$ می باشند. نتایج به

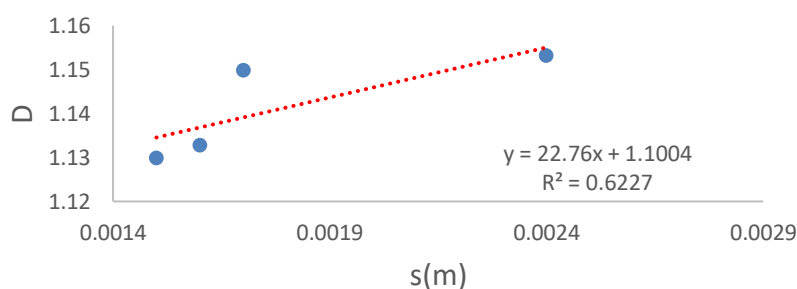
دست آمده در جدول ۳ نشان می دهد که طول همبستگی ارتباط خطی با طول پروفیل دارد به طوری نسبت میانگین طول همبستگی برای پروفیل های ۱ تا ۴ به میانگین طول همبستگی پروفیل های ۵ تا ۸ برابر $2/21$ می باشد و نسبت طول این پروفیل ها برابر $2/17$

می باشد و این نشان دهنده ارتباط خطی بین این دو می باشد. این ارتباط خطی به وسیله F. Bretar و دیگران در [۱۸] نتیجه گرفته شده است. پارامتر s به شدت تابع طول پروفیل می باشد به این صورت که مقایسه بین s ها می بایست در شرایط طول پروفیل یکسان صورت گیرد.

پارامتر بعد فرکتالی D ارتباط مستقیمی با s دارد. در شرایط طول پروفیل یکسان ملاحظه می شود که با افزایش بعد فرکتالی D پارامتر s به صورت خطی افزایش می یابد. شکل ۷ رابطه بین این دو پارامتر را برای دو دسته پروفیل نشان می دهد.



(الف)



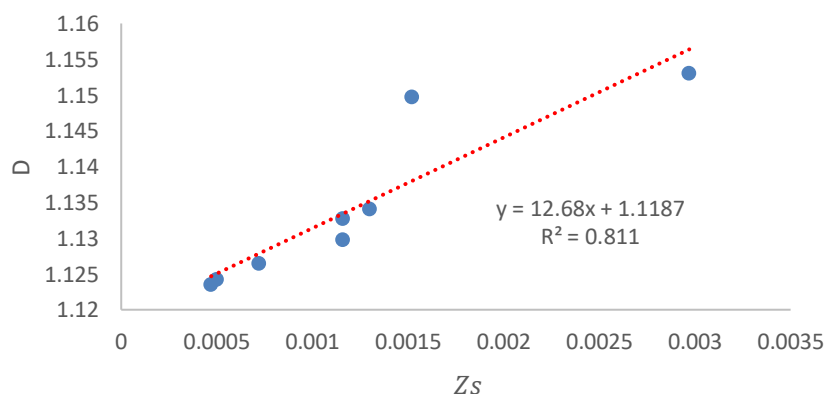
(ب)

شکل ۷- رابطه بین بعد فرکتالی و rms-height برای دو دسته پروفیل ها الف: پروفیل های ۱ تا ۴ ب: پروفیل های ۵ تا ۸

همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است در شرایط طول پروفیل یکسان، هر چه قدر rms-height افزایش می یابد، بعد فرکتالی هم به صورت خطی افزایش پیدا می کند.

پارامتر Z_s همانطور که از جدول ۳ معلوم است ارتباطی با طول پروفیل ندارد و با بعد فرکتالی D رابطه

خطی مستقیم دارد. برای تمام پروفیلها هر چه قدر مقدار بعد فرکتالی بیشتر باشد مقدار Z_s نیز به صورت خطی افزایش پیدا می کند که با مطالعه zribi و دیگران در [۳۷] کاملاً مطابقت دارد. همبستگی خطی بسیار خوبی بین پارامتر بعد فرکتالی و Z_s مشاهده می شود مقدار R^2 برابر 0.81 می باشد.



شکل ۸- رابطه بین Z_s و بعد فرکتالی برای تمام پروفیل ها مستقل از طول پروفیل

۴- نتیجه گیری و پیشنهادات

هدف در این مطالعه نشان دادن قابلیت های روش فتوگرامتری برد کوتاه در تهیه مدل ارتفاعی سه بعدی می باشد. مدل سه بعدی دارای کاربردهای مختلف از جمله مطالعه زبری سطح می باشد. یکی از مزیت های مهم این روش در مطالعه سطوحی که دارای زبری حساس می باشند به طوری که با تماس با سطح، زبری آن دچار دگرگونی و تغییر می شود. امروزه دوربینهای با قدرت تفکیک بالا این امکان را می دهند که تصاویر با کیفیت بالا که یکی از ملزومات تهیه مدل سه بعدی دقیق می باشد، تهیه گردند. در این مطالعه مدل رقومی ارتفاعی با دقت بسیار بالای ۰/۳۲ mm ارتفاعی و ۱/۳۲mm مسطحاتی تهیه گردید. قدرت تفکیک مدل رقومی تهیه شده ۱/۵mm می باشد که این قدرت تفکیک امکان مطالعه سطوح با زبری حساس را فراهم می کند. بعد از تهیه مدل سه بعدی به منظور استخراج پارامترهای زبری از روش فرکتالی استفاده شد. این روش به عنوان یک روش موثر در مطالعه زبری مورد توجه می باشد. پارامترهای زبری شامل rms-height و طول همبستگی با روش فرکتالی محاسبه گردید. نتایج به دست آمده که طول همبستگی ارتباط خطی با طول

پروفیل دارد. همچنین مقدار rms-height نیز کاملاً مستقل از طول همبستگی نمی باشد. در این مطالعه نشان داده شد که پارامتر Z_s کاملاً مستقل از طول پروفیل می باشد و برای تمام پروفیلها با طول های متفاوت افزایش این پارامتر با بعد فرکتالی به صورت تابع خطی می باشد به این معنی که هر چقدر بعد فرکتالی افزایش پیدا می کند این پارامتر هم افزایش می یابد و بر عکسی. به طور کلی نتایج به دست آمده از این مطالعه نشان داد که اولاً روش فتوگرامتری برد کوتاه در تهیه مدل سه بعدی برای مطالعه زبری برای سطوح با زبری مختلف روش موثر و کارایی می باشد که می توان بر اساس آن مدل رقومی ارتفاعی با دقت بسیار بالا و قدرت تفکیک بالا تهیه نمود. این امر در بسیاری از کاربردها به خصوص در مطالعه بازپراکنش تصاویر راداری به منظور اندازه گیری پارامترهای زمینی زبری می تواند به خوبی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین روش فرکتالی هم روشی قابل اعتماد برای استخراج پارامترهای زبری می باشد. می توان درآینده از این روش برای محاسبه زبری سطح زمینی به منظور استخراج پارامترهای زبری و رطوبت در تصاویر راداری نیز استفاده نمود.

مراجع

- [1] P. Beckmann and A. Spizzichino, The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces., Artech House, 1987, p. 503.
- [2] E. Vidal Vázquez , J. Vivas Miranda and A. Paz Gon, "Characterizing anisotropy and heterogeneity of soil surface microtopography using fractal models.," Ecological Modelling, p. 337–353., 2005.
- [3] J. RIQUIER, "A world assessment of soil degradation," Nature and Resources, vol. 18, pp. 18-21, 1982.
- [4] B.ozcan,R. Schwermann and J. Blankenbach, "A Novel Camera-Based Measurement System for Roughness Determination of Concrete" , Materials MDPI 2021, 14, 158. doi.org/10.3390/ma14010158
- [5] O. J. Amoah , D. M. Amatya and S. Nnaji, "Quantifying watershed surface depression storage: determination and application in a hydrologic model," Hydrol. Process, pp. 2401–2413., 2013.
- [6] I. Takken , L. Beuselinck , J. Nachtergaele, G. Govers and J. Poesen, "Spatial evaluation of a physically-based distributed erosion model (LISEM)," Catena, pp. 37, 431–447, 1999.
- [7] N. Verhoest, H. Lievens, W. Wagner, j. Álvarez-Mozos, M. Moran and F. Mattia, "On the soil roughness parameterization problem in soil moisture retrieval of bare surfaces from synthetic aperture radar," Sensors, pp. 8, 4213–4248, 2008.
- [8] J. E. M. Thomsen, R. Baartman¹ , T. Barneveld, Starkloff and J. Stolte, "Soil surface roughness: comparing old and new measuring methods and application in a soil erosion model," SOIL, pp. 399-410, 2015.
- [9] R. A. Dexter, "Effect of rainfall on the surface micro-relief of tilled soil.," Journal of Terramechanics, pp. 14,11-22, 1977.

- [10] . R. García Moreno, A. Saa Requejo, A. M. Tarquis Alonso, S. Barrington and M. C. Díaz, "A method for measuring soil surface roughness. Geoderma,," Shadow analysis, pp. 146,201-208, 2008.
- [11] P. Bertuzzi , J. M. Caussignac, P. Stengel and G. Morel, "An automated, noncontact laser profile meter for measuring soil roughness in situ," Soil Science, vol. 149, pp. 169-178, 1990.
- [12] X. Blaes and P. Defourny, "Characterizing bidimensional roughness of agricultural soil surfaces for SAR modeling," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, no. 46, p. 4050–4061, 2008.
- [13] M. J. Davidson, T. Le Toan, F. Mattia, G. Satalino, T. Manninen and M. Borgeaud, "On the characterization of agricultural soil roughness for radar remote sensing studies," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, no. 38, pp. 630-640, 2000.
- [14] E. Vidal Vázquez, J. Vivas Miranda and A. Paz González, "Characterizing anisotropy and heterogeneity of soil surface microtopography using fractal models.," Ecological Modeling, no. 182, p. 337–353, 2005.
- [15] J. Chandler, J. Fryer and A. Jack, "Metric capabilities of low-cost digital cameras for close range surface measurement," The Photogrammetric Record, no. 20, p. 12–26, 2005.
- [16] M. Aguilar, F. Aguilar and J. Negreiros, "Off-the-shelf laser scanning and close-range digital photogrammetry for measuring agricultural soils microrelief," Biosystems Engineering, no. 103, p. 504–517, 2009.
- [17] R. García Moreno, A. Saa Requejo, A. Tarquis Alonso, S. Barrington and M. Díaz, "). Shadow analysis: A method for measuring soil surface roughness," Geoderma, no. 146, pp. 201-208, 2008.
- [18] J. Eitel, C. Williams, L. Vierling, O. Al-Hamdan and F. Pierson, "Suitability of terrestrial laser scanning for studying surface roughness effects on concentrated flow erosion processes in rangelands," Catena, no. 87, pp. 398-407, 2011.
- [19] S. Haubrock, M. Kuhnert, S. Chabrillat, A. Güntner and H. Kaufmann, "Spatiotemporal variations of soil surface roughness from in-situ laser scanning," Catena, no. 79, p. 128–139, 2009.
- [20] Soumya Ranjan and N. Mishra, "An improved method to estimate the fractaldimension of colour images," Perspectives in Science , pp. 412-416, 2016.
- [21] F. Bretar, M. Arab-Sedze , J. Champion, M. Pierrot-Deseilligny, E. Heggy and S. Jacquemoud . , "An advanced photogrammetric method to measure surface roughness: Application to volcanic terrains in the Piton de la Fournaise, Reunion Island," Remote Sensing of Environment, no. 135, pp. 1-11, 2013.
- [22] Tristram D.L, IRVINE-FYNN,, Enoc SANZ-ABLANEDO, Nick RUTTER, Mark W. SMITH and Jim H. CHANDLER, "Instruments and Methods Measuring glacier surface roughness using plot-scale, close-range digital photogrammetry," Journal of Glaciology, vol. 60, no. 223, pp. 957-969, 2014.
- [23] T. Ullmann and G. Stauche, "Surface Roughness Estimation in the Orog Nuur Basin (Southern Mongolia) Using Sentinel-1 SAR Time Series and Ground-Based. Remote Sens. 2020, 12, 3200; doi:10.3390/rs12193200
- [24] J. Bresenham, "Algorithm for computer control of a digital plotter," IBM Systems Journal, no. 4, pp. 25-30, 1965.
- [25] J. Bennett and L. Mattsson, Introduction to surface roughness and scattering., Washington, D.C: Optical Society of America,, 1999, p. 130.
- [26] P. Dubois, J. Van Zyl and T. Engman, "Measuring soil moisture with imaging radars," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 33, no. 4, pp. 915-926, 1995.
- [27] M. Zribi, V. Ciarletti, O. Taconet, J. Paillé and P. Boissard, "Characterisation of the soil structure and microwave backscattering based on numerical three-dimensional surface representation: Analysis with a fractional brownian model," Remote sensing of environment, vol. 72, no. 2, pp. 15-169, 2000.
- [28] Misganu Debella-Gilo, "Bare-earth extraction and DTM generation from photogrammetric point clouds including the use of an existing lowerresolution DTM," International Journal of Remote Sensing, vol. 37, no. 13, pp. 3104-3124, 2016.
- [29] 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.
- [30] O. Yordanov and K. Ivanova, "Description of surface roughness as an approximate self-affine random structure," Surf. Sci, vol. 331, pp. 1043-1049, 1995.

- [31] G. Rasigni, A. Llebaria, M. Lafraxo, V. Buat, M. Rasigni and F. Abdellani, "Autoregressive process for characterizing statistically rough surfaces," J. Opt. Soc. Am. A, vol. 10, pp. 1257-1262, 1993.
- [32] 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.
- [33] P. Durst, G. Mason, B. McKinley and A. Baylot, "Predicting rms surface roughness using fractal dimension and psd parameters," J. Terramech, vol. 48, pp. 105-111, 2011.
- [34] A. Ghafouri, J. Amini, M. Dehmollaian and M. A. Kavooosi, "Better Estimated IEM Input Parameters Using Random Fractal Geometry Applied on Multi-Frequency SAR Data," Remote Sens, vol. 9, no. 445, 2017.
- [35] F. Wang, B. Zhang, D. Yang, W. Li and Y. Zhu, "Sea-state observation using reflected beidou geo signals in frequency domain," IEEE Geosci. Remote Sens. Lett, vol. 13, pp. 1656-1660, 2016.
- [36] M. Zribi and M. Dechambre, "A new empirical model to retrieve soil moisture and roughness from C-band radar data. Remote Sensing of Environment, 84, 42-52.," Remote Sensing of Environment, no. 84, pp. 42-52, 2002.