

مدل‌سازی نمایش سطوح ناهموار زمین

فاطمه نعمت‌اللهی - پژوهشگر پسادکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان.
سینا صلحی - دانش آموخته دکتری ژئومورفولوژی دانشگاه اصفهان، اصفهان.
محمد حسین رامشت* - استاد ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۱۶ تأیید نهایی: ۱۳۹۹/۰۹/۱۵

چکیده

منظور از مدل‌سازی نمایش سطوح ناهموار زمین، آنالیز کمی ویژگی‌های فرم‌شناسی سطح زمین است تا بتوان جنبه‌های مختلفی از ویژگی‌های ناهمواری‌های سطح زمین که منظور و مقصود محققین است بارز نمود و بخش‌هایی که کمتر مد نظر است را کمرنگ نمود تا درک ماهیت ناهمواری زمین برای کاربران و محققین آسان‌تر شود. بر حسب کاربرد و نوع تفسیری که از سطوح ناهموار زمین انجام می‌گیرد، تکنیک‌های نمایش سطوح ناهموار زمین می‌تواند تمرکز بیشتری بر سوژه مفسر، گذاشته و به تفسیر و درک بهتر محققین در زمینه مطالعاتشان کمک نماید. در این پژوهش، با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی و به کمک برنامه‌نویسی پایتون، مدل‌های مختلفی در نمایش سطوح ناهموار زمین معرفی گردید. در بخش مدل‌سازی برداری، به مدل‌سازی هاشورزنی ناهمواری‌های زمین مبادرت گردید که نتایج حاصل از آن هاشورزنی خطی سطوح ناهموار با استفاده از مدل‌های MCM، MM، RPM و MSA می‌باشد. در بخش هاشور نقطه‌ای دو مدل نقطه‌ای تصادفی با وزن شیب و وزن انحنا زمین، طراحی و اجرا گردید و در بخش مدل‌سازی رستری نیز در رویکرد اول، سایه‌زنی ترکیبی شامل: ترکیب مدل سایه‌روشن استاندارد با انحنا زمین، مدل‌های تابشی و مدل‌های اثر خط‌الرأس مدنظر قرار گرفت. در این رویکرد ۱۴ نوع انحنا زمین، با نتایج سایه‌زنی استاندارد تلفیق و مدل‌های جدیدی ارائه گردید. در رویکرد دوم مدل‌های تابشی شامل: تابش کل، مستقیم، پراکنده و مدت زمان تابش مستقیم، با سایه‌زنی استاندارد ترکیب و مدل‌های جدیدی ایجاد شد. در رویکرد-های دیگر، طبقات هیپسومتریک، ماکت منحنی میزان و ماکت رنگی منحنی میزان، مدنظر قرار گرفت. مدل‌های فوق‌الذکر که در نمایش سطوح توپوگرافیک زمین کاربرد دارد از نتایج این پژوهش محسوب می‌شود.

واژگان کلیدی: ژئومورفومتری، مدل رقومی ارتفاعی، مدل‌سازی زمین، نمایش سطوح توپوگرافیک.

مقدمه

نمایش سطوح ناهموار زمین از دیدگاه بسیاری از محققین علوم محیطی همچون ژئومورفولوژیست‌ها، هیدرولوژیست‌ها، اقلیم‌شناسان و ... از دیدگاه‌های مختلفی دارای اهمیت است. اهمیت و ضرورت نمایش ناهمواری‌های زمین در بخش تفسیر بصری محققین علوم محیطی، در بخش نمایش و ترسیم و کارتوگرافی نقشه‌های عمومی و تخصصی و نیز از نظر محاسباتی، دارای ارزش و کاربرد است. نمایش شکل ناهمواری‌های زمین بسته به نوع عوارض و هدف از نمایش سطح ناهموار زمین، می‌تواند بخشی از جزئیات ناخواسته را حذف و بخشی از ویژگی‌های ناهمواری اراضی را بارزسازی نماید. بدین منظور روش‌ها، تکنیک‌ها و مدل‌های مختلفی ارائه شده است.

انواع متفاوتی از تکنیک‌های نمایش سطوح ناهموار زمین وجود دارند که نتیجهٔ تکامل در طول زمان و بسیاری از نوآوری‌های تکنولوژیکی هستند (تزتکو^۱، ۲۰۱۸). ناهمواری‌های سطح زمین، نقش اساسی در کنترل فرایندهای سطح و اتمسفر زمین ایفا می‌کنند. رابطهٔ ناهمواری‌ها و فرایندهای سطح زمین بسیار قوی بوده به طوری که درک ماهیت این ناهمواری می‌تواند مستقیماً باعث شفافیت در فهم و درک این فرایندها هم از لحاظ ذهنی و هم از لحاظ محاسباتی شود. بنابراین تحلیل و نمایش ناهمواری‌های سطح زمین، نمونه‌های قابل توجهی در بسیاری از فعالیت‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل‌سازی‌های محیطی، فراهم نموده است (گالنت و هاتچینسون^۲، ۱۹۹۶). ژئومورفولوژیست‌ها و کارتوگراف‌ها از متغیرهایی که از داده‌های ارتفاعی مشتق می‌شوند، در کمی‌سازی شکل و ساختار سطوح توپوگرافیک زمین استفاده می‌کنند (رابینسون و همکاران^۳، ۱۹۹۵؛ ویلسون و گالنت^۴، ۲۰۰۰؛ اسلوکوم و همکاران^۵، ۲۰۰۴؛ لی و همکاران^۶، ۲۰۰۴). هدف کارتوگرافیکی از ترسیم ناهمواری‌های سطح زمین، نمایش لندفرم‌ها و سایر عوارض موجود بر روی سطح زمین می‌باشد و این مسئله، از طریق هاشور زدن و یا روش‌هایی که منجر به شبیه‌سازی واقعی‌تری می‌شوند، انجام می‌پذیرد (آیموهوف^۷، ۱۹۸۲). کارتوگراف‌ها از ساز و کارهای مختلفی همچون رنگ، سایه‌روشن و هاشور استفاده کرده‌اند تا ظاهری سه‌بعدی از نقشه‌ها بر روی سطوح پیوسته و هموار ایجاد نمایند. این روش‌ها را می‌توان به چند کلاس کلی طبقه‌بندی نمود. اول شامل تکنیک‌های است که بر اساس رنگ به همراه اثر پارالاکس می‌باشد. گروه دیگر شامل تفاضل انعکاس رنگ نور در طول موج‌های مختلف است و نهایتاً روش‌هایی که جهت تابندگی را بر اساس جهت قرارگیری سطوح، جابه‌جا می‌نماید (کنلی و کمرلینگ^۸، ۲۰۰۴). سایه‌زنی ناهمواری‌ها یک تکنیک کارتوگرافیکی است که برای نمایش توپوگرافی، مورد استفاده قرار می‌گیرد که از منبع تابش عمودی بر روی سطح ناهموار زمین استفاده می‌کند. نتایج توزیع نور و سایه‌ها یک آرایش سه بعدی از ساختار ژئومورفولوژیکی سطح زمین ایجاد می‌کند، که باعث ظاهر شدن وضعیت ناهمواری چشم‌اندازها می‌گردد. بر خلاف خطوط منحنی میزان، که به کاربر اجازهٔ میان‌یابی ارتفاع سطح زمین را می‌دهد، سایه‌زنی ناهمواری‌ها، بر اساس نوسان پیوستهٔ تن سایه‌ها است که از این طریق فرم سطح توپوگرافی زمین را به صورت بصری، نمایش می‌دهد. خطوط منحنی میزان معمولاً نیازمند دقت زیادی در تعیین و نمایش فرم و ویژگی‌های سطح زمین است و ممکن است در تفسیر سطح زمین چالش برانگیز باشند. فهم سریع توپوگرافی سطح زمین ویژگی ذاتی سایه‌زنی ناهمواری-های زمین است. در نتیجه، سایه‌زنی ناهمواری‌های زمین برای کاربرانی که دارای آموزش کارتوگرافیکی و تخصص کمتری و یا زمان کمتری در تفسیر سطح زمین هستند، مناسب‌تر است. سایه‌زنی ناهمواری‌های زمین در مورد نقشه‌های

1 - Tzvetkov, 2018

2 - Gallant and Hutchinson

3 - Robinson et al., 1995

4 - Wilson and Gallant, 2000

5 - Slocum et al., 2004

6 - Li et al., 2004

7 - Imhof, 1982

8 - Kennelly and Kimerling, 2004

کوچک مقیاس نیز سودمند است؛ به طوری که خطوط منحنی میزان ممکن است غیرقابل تشخیص و یا خواندن باشند (آیموهوف، ۱۹۸۲). از لحاظ تاریخی، سایه‌زنی ناهمواری‌های زمین توسط روش‌های دستی انجام می‌گرفت. خطوط منحنی میزان، خطوط ساختارهای ژئومورفولوژیکی و شبکه‌های هیدرولوژیکی به عنوان چهارچوبی در طراحی مدل‌های سایه‌روشن مورد استفاده قرار می‌گرفتند. یک درک کامل از چشم‌اندازها نیاز بود تا اینکه کارتوگراف‌ها سطح توپوگرافیکی زمین را به یک نقشه هنری تبدیل کنند. کارتوگراف‌ها اصول طراحی دستی سایه‌زنی ناهمواری‌ها را طراحی کرده بودند که سیستم‌های فرم اصلی زمین و جزئیات عوارض سطح زمین، به طور هم‌زمان نمایش داده شوند. عوارض مهم توپوگرافی زمین توسط تنظیم محلی جهت تابش نور بر اساس قرارگیری فضایی عوارض، بارز می‌شوند. سایه‌زنی محلی و شیب‌های روشن شده به کاربران در فهم لندفرم‌های اصلی زمین کمک می‌کنند و همچنین کیفیت نقشه‌ها را از لحاظ زیبایی‌شناسی ارتقا می‌دهند (مارستون و جنی^۱، ۲۰۱۵). از دهه ۱۹۶۰، سایه‌زنی ناهمواری‌های زمین با استفاده از محاسبات کامپیوتری و بر اساس مدل رقومی ارتفاعی به دست می‌آیند. در هر حال، روش‌های سایه‌زنی کنونی روش‌های کارتوگرافیکی قدیمی را منسوخ نموده است. یکی از مشخص‌ترین اختلافات بین روش‌های سایه‌زنی دستی^۲ و محاسباتی^۳، این است که جهت تابش نور معمولاً برای بارزسازی عوارض مبتنی بر روی سطح زمین در روش‌های سایه‌زنی محاسباتی، تنظیم نمی‌گردد. در سایه‌زنی محاسباتی، یک جهت ثابت تابش نور، معمولاً نمی‌تواند تصویر سایه‌روشنی که بتواند به طور مؤثر سطح زمین را به تصویر بکشد، ایجاد کند. معمولاً کارتوگراف‌ها خوانایی و کیفیت زیبایی مدل‌های سایه‌زنی دستی را به سایه‌زنی محاسباتی ترجیح می‌دهند (جنی^۴، ۲۰۰۱). در هر صورت، کارتوگراف‌ها که در سایه‌زنی محاسباتی به دنبال تنظیم جهت تابش نور هستند، نیاز به در نظر داشتن حجم قابل ملاحظه‌ای از محاسبات دارند تا به نتایج مورد نظر دست یابند. جهت استاندارد تابش در مدل‌ها سایه و روشن، جهت شمال غربی است. تابش از جهت شمال غربی عمدتاً مورد ترجیح کاربران است؛ به طوری که به این جهت عادت کرده‌اند، مانند قرارداد نوشتن از چپ به راست (در زبان‌های لاتین) و یا تکنیک‌های ترسیم دیگر (آیموهوف، ۱۹۸۲). در سایه‌زنی دستی، جهت منبع تابش نور تغییر می‌کند تا اینکه یک نمایش بصری تأثیرگذار برای بینندگان ایجاد نماید (یولی^۵، ۱۹۵۹؛ براسل^۶، ۱۹۷۴؛ آیموهوف، ۱۹۸۲؛ کارسن^۷، ۱۹۸۲؛ جنی، ۲۰۰۱؛ هورنی^۸، ۲۰۰۸). کارتوگراف‌های حرفه‌ای چشم‌اندازها را با دقت آنالیز می‌کنند تا عوارض مهم سطح زمین را مشخص کنند؛ به طوری که اثر بصری جزئیات ناخواسته و اضافی را بر روی سطح زمین به حداقل برسانند. روشی که برای نمایش سطح ناهمواری‌های زمین توسط کارتوگراف‌های سوئیسی توسعه یافت، به زیبایی و نمایش جزئیات شناخته می‌شود (تافت^۹، ۱۹۹۰؛ کنلی و استیوارت^{۱۰}، ۲۰۰۶) و می‌تواند به عنوان نمونه بسیار خوبی از مدل نمایش سطح ناهموار زمین، به حساب آید (هادکس^{۱۱}، ۱۹۸۱؛ نولز و استوا^{۱۲}، ۱۹۷۴؛ کیتز^{۱۳}، ۲۰۱۴؛ کولیر و همکاران^{۱۴}، ۲۰۰۳؛ جنی و همکاران^{۱۵}، ۲۰۱۰). از پیشگامان مکتب کارتوگرافی سوئیسی در نمایش ارتفاعات، فریدولین بیکر (۱۸۵۴-۱۹۲۲) و ادوارد ایموهوف (۱۸۹۵-۱۹۸۶) و رادولف

- 1 - Marston and Jenny., 2015
- 2 - Manual
- 3 - Analytical
- 4 - Jenny, 2001
- 5 - Yoeli, 1959
- 6 - Brassel, 1974
- 7 - Karsen, 1982
- 8 - Hurni, 2008
- 9 - Tufte, 1990
- 10 - Kennelly and Stewart, 2006
- 11 - Hodgkiss, 1981
- 12 - Knowles and Stowe, 1974
- 13 - Keates, 2014
- 14 - Collier et.al, 2003
- 15 - Jenny et.al, 2010

لوئیزیانگر (۱۸۲۶-۱۸۹۶) هستند که اولین نقشه رنگی ناهمواری‌ها را برای کلوب آلپ سوئیس در سال ۱۸۶۳ (جنی و هورنی^۱، ۲۰۰۶) ایجاد کردند. بیکر روش لوئیزیانگر را از طریق نمایش رنگی طبیعی‌تر ارتقا بخشید (هورنی، ۲۰۰۸) و شبیه‌سازی اثر پرسپکتیو هوایی را در نقشه‌های پرینت شده، از طریق بارزسازی کنتراست در قتل مرتفع، تکمیل نمود (جنی و هورنی، ۲۰۰۶). سایه‌زنی محاسباتی ناهمواری‌های زمین، یک فرایند محاسبات کامپیوتری است که مدل سایه‌روشن ناهمواری‌ها را از مدل رقومی ارتفاعی استخراج می‌کند. مدل سایه و روشن شامل مقادیر خاکستری است که در یک تصویر رستری ذخیره شده‌اند. ویچل (۱۸۷۸)، یک رویکرد ریاضی در محاسبه سایه‌زنی ناهمواری‌های سطح زمین بر اساس قاعده کسینوسی لامبرت در اواخر دهه ۱۹۸۰ ارائه نمود، اما این رویکرد تا میانه قرن بیستم به دلیل نبود زیر ساخت مربوط به کامپیوترها مورد استفاده قرار نگرفت. در دهه ۱۹۶۰، یولی، اولین سایه‌زنی محاسباتی ناهمواری‌ها را با اعمال متد ویچل به کار بست (یولی، ۱۹۶۵، ۱۹۶۶). الگوریتم سایه‌زنی لامبرتی، که مبنای بیشتر مدل‌های سایه‌زنی محاسباتی است در سیستم اطلاعات جغرافیایی به کار گرفته شده است که مقادیر خاکستری را در هر پیکسل از طریق محاسبه زاویه عمودی تابش و سطح نرمال، تعیین می‌کند (یولی، ۱۹۶۵).

پژوهش حاضر سعی در ارائه ایده‌ها و مدل‌های مختلفی در نمایش سطوح ناهموار زمین دارد. در نتیجه با اتکا به مفاهیم ژئومورفومتری و آنالیز رقومی سطح زمین در محیط دیجیتالی و با بهره‌گیری از مدل‌های رقومی زمین و پردازش‌های ماشینی، در جهت ارائه مدل‌های نمایش سطوح ناهموار زمین در ساختارهای برداری (نقطه ای و خطی) و رستری گام برداشته است.

مواد و روش

مراحل شماتیک و خلاصه شده‌ای از پژوهش در شکل (۱) نشان داده شده است. در گام نخست، پایگاه داده رستری تهیه و تنظیم گردید. پایگاه داده رستری شامل داده‌های ارتفاعی است که شامل مدل رقومی سطحی^۲ می‌گردد و در حال حاضر دقیق‌ترین اطلاعات ارتفاعی سطح زمین را در مقیاس جهانی و رایگان در دسترس قرار می‌دهد. در این پژوهش داده‌های رقومی سطحی منتشر شده توسط آژانس فضایی ژاپن در ماه می و اکتبر ۲۰۱۵ با رزولوشن افقی حدود ۲۳ متر، به منظور مدل‌سازی نمایش سطوح ناهموار زمین مورد استفاده قرار گرفته است. این داده‌ها از تصاویر ماهواره ALOS به دست آمده (تاکاگو و همکاران^۳، ۲۰۱۴) که از شبکه داده‌های رقومی سطحی با قدرت تفکیک مکانی پنج متر و با پوشش جهانی استخراج شده و در حال حاضر دقیق‌ترین داده‌های ارتفاعی در مقیاس بزرگ‌اند (تادونو و همکاران^۴، ۲۰۱۴). در گام دوم، شیب^۵ سطح زمین از مدل رقومی سطحی، با استفاده از چهار الگوریتم مختلف در ساختارهای شبکه‌ای برآورد گردید. لایه جهت شیب^۶ نیز به همین منوال محاسبه شد. متوسط نتایج چهار الگوریتم برآورد شیب، به همراه لایه جهت شیب در محاسبه مدل سایه‌روشن استاندارد که معمولاً در سیستم اطلاعات جغرافیایی از آن استفاده می‌شود، مورد استفاده قرار گرفت. در گام بعد، مدل‌سازی نمایش ناهمواری‌های زمین در دو بخش آغاز گردید. در بخش مدل‌سازی برداری، به مدل‌سازی هاشورزنی ناهمواری‌های زمین مبادرت گردید و نتیجه آن در زمینه هاشورزنی خطی سطوح ناهموار، مدل‌های MCM و MM و RPM می‌باشد و در زمینه هاشور نقطه‌ای، دو مدل نقطه‌ای تصادفی با وزن شیب و مدل نقطه‌ای تصادفی با وزن انحنا زمین، مدل‌سازی، و در محیط برنامه نویسی پایتون کدنویسی و اجرا گردید.

1 - Jenny and Hurni, 2006

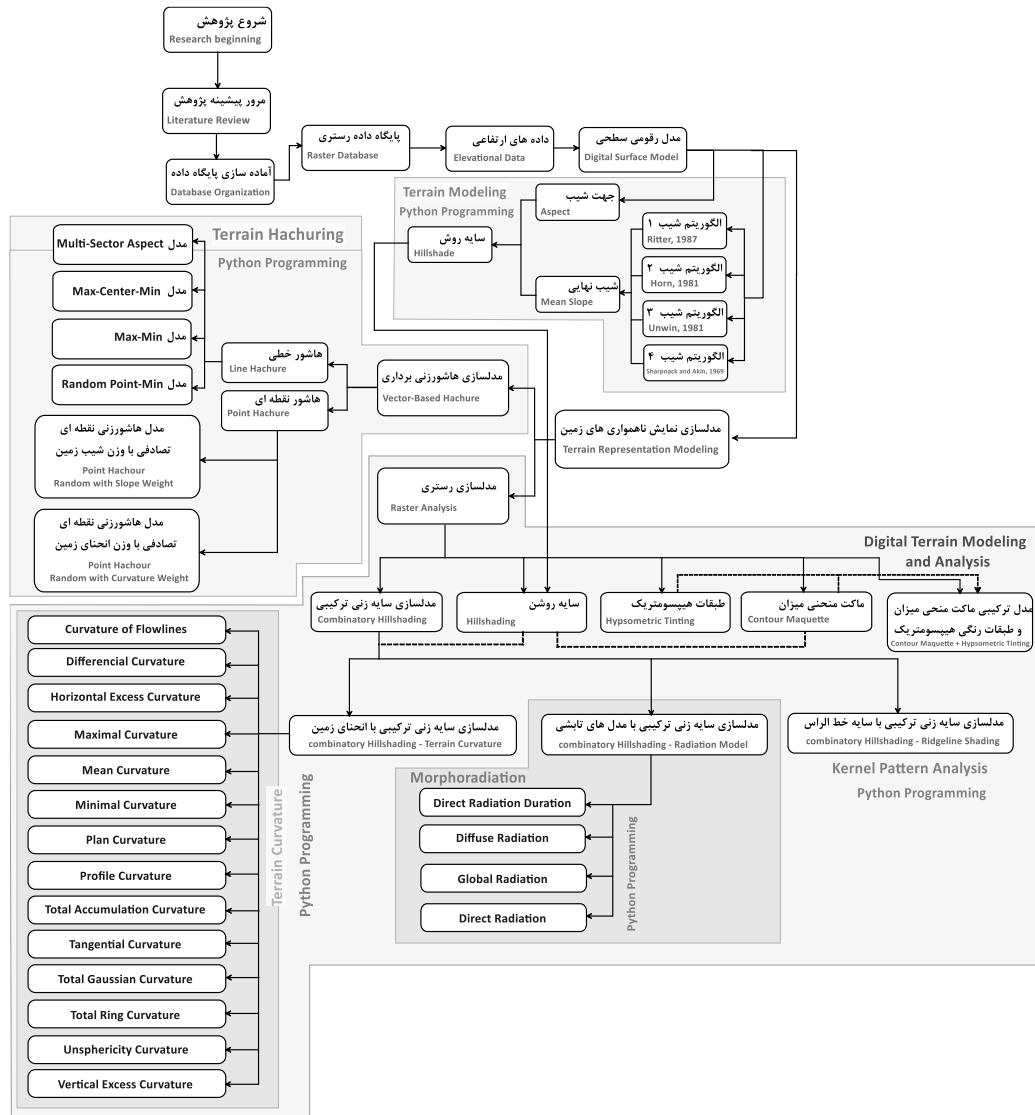
2 - Digital Surface Model (DSM)

3 - Takaku et.al, 2014

4 - Tadono et.al, 2014

5 - Slope

6 - Aspect



شکل ۱: نمودار روند پژوهش

در بخش مدل‌سازی رستری سه رویکرد مدل مدنظر قرار گرفت. در رویکرد اول؛ سایه‌زنی ترکیبی در نظر گرفته شد که شامل: ترکیب مدل سایه‌روشن استاندارد با انواع انحنای زمین، مدل‌های تابشی (مورفودیشن) و مدل‌های اثر خط‌الرأس می‌گردد. ۱۴ نوع انحنای زمین شامل انحنای خطوط جریانی^۱، انحنای دیفرانسیلی^۲، انحنای افقی مازاد^۳، انحنای حداکثری^۴، انحنای متوسط^۵، انحنای حداقلی^۶، انحنای پلان^۷، انحنای پروفیل^۸، انحنای تجمعی کل^۹، انحنای تانژانتی^{۱۰}، انحنای گوسی

- 1 - Curvature of Flow lines
- 2 - Differential Curvature
- 3 - Horizontal Excess Curvature
- 4 - Maximal Curvature
- 5 - Mean Curvature
- 6 - Minimal Curvature
- 7 - Plan Curvature
- 8 - Profile Curvature
- 9 - Total Accumulation Curvature
- 10 - Tangential Curvature

کل^۱، انحنای حلقوی کل^۲، انحنای نا کروی^۳، انحنای عمودی مازاد^۴، مورد استفاده قرار گرفته و با نتایج سایه‌زنی استاندارد تلفیق گردیده و مدل‌های جدیدی در نمایش ناهمواری‌های زمین ایجاد نموده است. در رویکرد دوم؛ مدل‌های تابشی شامل تابش مستقیم^۵، مدت زمان تابش مستقیم^۶، تابش پراکنده^۷ و تابش کل^۸ هر کدام با نتایج سایه‌زنی استاندارد ترکیب شده و مدل‌های جدیدی ایجاد شده است. در رویکرد سوم از اثر سایه خط‌الرأس در نمایش ناهمواری‌های زمین به روش ارائه شده توسط صلحی و سیف (۱۳۹۹) استفاده شد.

محاسبه مقادیر درجات خاکستری مدل سایه‌روشن^۹

به منظور محاسبه مقادیر درجات خاکستری^{۱۰} مدل سایه‌روشن، نیاز به محاسبه شیب و جهت شیب در گام نخست می‌باشد. برای محاسبه درجات خاکستری مربوط به مدل سایه‌روشن استاندارد از رابطه (۱) استفاده شده است؛ به طوری که در این رابطه مشخص است، ورودی‌های مورد نیاز زاویه افقی (آزیموتی) و عمودی (زینیتی) منبع تابش نور، شیب و وجه شیب زمین است. زاویه آزیموتی و زینیتی به ترتیب ۳۱۵ و ۴۵ درجه در نظر گرفته شده است.

$$\text{Hillshade} = 255 \times (\cos(Ze) \times \cos(S)) + (\sin(Ze) \times \sin(S) \times \cos(Az - As)) \quad (1)$$

که در این رابطه، Ze زاویه سمت‌الرأسی تابش نور بر روی سطح توپوگرافی به رادیان، S شیب زمین به رادیان، Az زاویه آزیموتی تابش نور بر سطح توپوگرافی زمین به رادیان و As جهت شیب زمین به رادیان است. در این پژوهش محاسبه شیب و جهت شیب و نهایتاً مقادیر عددی مدل سایه‌روشن با استفاده از تکنیک پنجره متحرک اجرا و کدنویسی گردیده است. شکل (۲) یک پنجره متحرک با ابعاد ۳ در ۳ پیکسل را نشان می‌دهد که به منظور محاسبه لایه شیب، جهت شیب و انحنای مورد استفاده قرار گرفته است.

Z ₅	Z ₂	Z ₆
Z ₁	Z ₀	Z ₃
Z ₈	Z ₄	Z ₇

شکل ۲: پنجره متحرک ۳ در ۳ پیکسلی برای محاسبات شیب، جهت شیب و انحنای زمین

محاسبه شیب^{۱۱} و جهت شیب زمین^{۱۲}

بر اساس پنجره متحرکی با ابعاد ۳ در ۳ پیکسل، الگوریتم‌های مختلف محاسبه شیب ارائه شده است. رابطه (۲) و (۳) شیب را در جهت ستونی و سطری با روش مطرح شده توسط ریتز و زونبرگ و تورن به ترتیب محاسبه می‌کند (ریتز^{۱۳}، ۱۹۸۷؛ زونبرگ و تورن^{۱۴}، ۱۹۸۷). روابط (۴) و (۵)، شیب را در جهت ستونی و سطری به روش هورن به ترتیب محاسبه

1 - Total Gaussian Curvature

2 - Total Ring Curvature

3 - Un-sphericity Curvature

4 - Vertical Excess Curvature

5 - Direct Radiation

6 - Direct Radiation Duration

7 - Diffuse Radiation

8 - Global Radiation

9 - Hill shade

10 - Grayscale Value

11 - Terrain Slope

12 - Terrain Aspect

13 - Ritter, 1987

14 - Zevenbergen and Thorne, 1987

می‌کند (هورن^۱، ۱۹۸۱). الگوریتم سوم (روابط ۶ و ۷) (آنوین^۲، ۱۹۸۱)، شیب را در جهت ستونی و سطری به روش آنوین به ترتیب محاسبه می‌کند و در آخر الگوریتم چهارم، بر اساس روابط (۸) و (۹) (شارپنک و آکین^۳، ۱۹۶۹؛ هنگل و همکاران^۴، ۲۰۰۳) شیب را در جهت ستون و سطری به ترتیب، محاسبه می‌کند.

$$\text{Slope}_{we} = \frac{Z_2 - Z_1}{2 \times d} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\text{Slope}_{ne} = \frac{Z_3 - Z_4}{2 \times d} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\text{Slope}_{we} = \frac{(Z_7 + 2Z_3 + Z_6) - (Z_8 + 2Z_1 + Z_5)}{8 \times d} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\text{Slope}_{sn} = \frac{(Z_6 + 2Z_2 + Z_5) - (Z_7 + 2Z_4 + Z_8)}{8 \times d} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\text{Slope}_{we} = \frac{(Z_7 + \sqrt{2}Z_3 + Z_6) - (Z_8 + \sqrt{2}Z_1 + Z_5)}{(4 + 2\sqrt{2}) \times d} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$\text{Slope}_{sn} = \frac{(Z_6 + \sqrt{2}Z_2 + Z_5) - (Z_7 + \sqrt{2}Z_4 + Z_8)}{(4 + 2\sqrt{2}) \times d} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$G = \text{Slope}_{we} = \frac{(Z_7 + Z_3 + Z_6) - (Z_8 + Z_1 + Z_5)}{6 \times d} \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$H = \text{Slope}_{sn} = \frac{(Z_6 + Z_2 + Z_5) - (Z_7 + Z_4 + Z_8)}{6 \times d} \quad \text{رابطه (۹)}$$

در این پژوهش نتایج هر چهار الگوریتم محاسبه و با هم تلفیق گردید تا نقشه شیب نهایی به دست آید. به منظور محاسبه جهت شیب از رابطه (۱۰) (لی و همکاران، ۲۰۰۴) استفاده شده است.

بعد از محاسبه شیب در جهت ستونی و سطری با استفاده از روابط (۲) تا (۹)، شیب کلی با استفاده از رابطه (۱۰) برای هر یک از الگوریتم‌ها انجام گرفته است.

$$\text{Slope} = \tan \alpha = \sqrt{\text{Slope}_{row}^2 + \text{Slope}_{column}^2} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

شیب در جهت ستونی (Slope_{col}) و در جهت سطری (Slope_{row})، بر اساس روابط (۲) تا (۹) محاسبه گردیده و سپس از تلفیق نتایج آن، لایه جهت شیب نهایی به دست آمده است (رابطه ۱۱).

$$\text{Aspect} = \tan \beta = \frac{\text{Slope}_{col}}{\text{Slope}_{row}} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

۲-۳- محاسبه انحنای زمین^۵

به منظور محاسبه انحناهای چهارده‌گانه سطح زمین ابتدا مقادیر r, s, t, p, q بر اساس پنجره متحرک ۳ در ۳ پیکسلی (شکل ۱) محاسبه (روابط ۱۲ تا ۱۷) و سپس انواع مختلف انحنای زمین با استفاده از این مقادیر محاسبه گردیده است (روابط ۱۸ تا ۳۳).

$$r = \frac{Z_5 + Z_6 + Z_1 + Z_3 + Z_8 + Z_7 - 2 \cdot (Z_2 + Z_0 + Z_4)}{3 \cdot \Delta s} \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

$$s = \frac{Z_6 + Z_8 - Z_5 - Z_7}{4 \cdot \Delta s^2} \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$t = \frac{Z_5 + Z_2 + Z_6 + Z_8 + Z_4 + Z_7 - 2 \cdot (Z_1 + Z_0 + Z_3)}{3 \cdot \Delta s^2} \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$p = \frac{\partial z}{\partial x}, q = \frac{\partial z}{\partial y} \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$p = \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{Z_6 + Z_3 + Z_7 - Z_5 - Z_1 - Z_8}{6 \times \Delta s} \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

$$q = \frac{\partial z}{\partial y} = \frac{Z_5 + Z_2 + Z_6 - Z_8 - Z_4 - Z_7}{6 \times \Delta s} \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

1 - Horn, 1981

2 - Unwin, 1981

3 - Sharpnack and Akin, 1969

4 - Hengl et.al, 2003

5 - Terrain Curvature

با توجه به نشان‌گذاری‌های فوق، انحناى پروفیلی با استفاده از رابطه (۱۸) (یانگ^۱، ۱۹۷۸؛ کرچو^۲، ۱۹۷۳) به دست آمده است.

$$\text{Profile Curvature} = -\frac{p^2.r+2.p.q.r.s+q^2.t}{(p^2+q^2).\sqrt{(1+p^2+q^2)}} \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

انحناى تانژانتی نیز با استفاده از رابطه (۱۹) (کرچو، ۱۹۸۳؛ شری و استفانوف^۳، ۱۹۹۱؛ میتاسوا و هوفیرکا^۴، ۱۹۹۳) محاسبه گردیده است.

$$\text{Tangential Curvature} = -\frac{q^2.r-2.p.q.s+p^2.t}{(p^2+q^2).\sqrt{(1+p^2+q^2)}} \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

انحناى کانتوری که به انحناى پلان نیز معروف است از رابطه (۲۰) (کرچو، ۱۹۷۳؛ ایوانس^۵، ۱۹۷۲) محاسبه شده است.

$$\text{Plan Curvature} = -\frac{q^2.r-2p.q.s+q^2.t}{\sqrt{(1+p^2+q^2)^3}} \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

انحناى متوسط؛ عبارت از میانگین انحناهای متعامد در همهٔ منحنی‌های تماس است که می‌تواند از انحناى پروفیلی و تانژانتی محاسبه گردد (یانگ، ۱۸۰۵). روابط (۲۱) و (۲۲) روش محاسبهٔ انحناى متوسط را نشان می‌دهند.

$$\text{Mean Curvature} = \frac{\text{Profile Curvature}+\text{Tangential Curvature}}{2} \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

$$\text{Mean Curvature} = \frac{q^2.r-2.p.q.s+p^2.t}{(p^2+q^2).\sqrt{1+p^2+q^2}} - \frac{(1+q^2).r-2.p.q.s+(1+p^2).t}{2.(1+p^2+q^2)^{3/2}} \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

انحناى متوسط نشان‌دهندهٔ متوسط تحذب زمین بوده که می‌تواند به طور خاص برای مطالعات ژئومورفولوژیکی استفاده شود. مقادیر مثبت انحناى متوسط در ارتباط با مناطق دارای تجمع سطحی بوده در حالی که مقادیر منفی در مناطق دارای واگرایی، نمایش داده می‌شوند (شری، ۱۹۹۵). شری سیستمی از ۱۲ نوع انحنا پیشنهاد کرده که سه انحناى متوسط، انحراف کروی و دیفرانسیلی برای محاسبهٔ ۹ انحناى دیگر استفاده می‌شود. انحناى انحراف کروی بر اساس روش شری (۱۹۹۵) با استفاده از رابطه (۲۳) محاسبه شده است.

$$\text{Unosphericity Curvature} = \frac{\sqrt{\left(r.\sqrt{\frac{1+q^2}{1+p^2}}-t.\sqrt{\frac{1+p^2}{1+q^2}} \right)^2.(1+p^2+q^2)+ \left(p.q.r.\sqrt{\frac{1+p^2}{1+q^2}}-2.s.\sqrt{(1+q^2).(1+p^2)}+p.q.t.\sqrt{\frac{1+p^2}{1+q^2}} \right)^2}}{2.(1+p^2+q^2)^{3/2}} \quad \text{رابطه (۲۳)}$$

انحناى انحراف کروی، نشان دهندهٔ اختلاف سطح به نسبت کره است و در نتیجه دارای مقدار صفر برای شکلی کروی است. انحناى دیفرانسیلی به صورت نیمی از تفاضل بین انحناى افقی و عمودی تعریف می‌گردد. برای محاسبهٔ این نوع انحنا از رابطه (۲۴) استفاده شده است (شری، ۱۹۹۵).

$$\text{Differential Curvature} = \frac{q^2.r-2.p.q.s+p^2.t}{(p^2+q^2).(1+p^2+q^2)^{1/2}} - \frac{(1+q^2).r-2.p.q.s+(1+p^2).t}{2.(1+p^2+q^2)^{3/2}} \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

از سه انحناى متوسط، انحراف کروی و دیفرانسیلی سایر انحناها شامل: انحناى حداکثر، حداقل، مازاد افقی و عمودی، گوسی، تجمعی کل، دایره‌ای کل و انحناى خطوط جریانى، با استفاده از روابط (۲۵) تا (۳۳) (شری و همکاران، ۲۰۰۲؛ شری، ۱۹۹۵) محاسبه گردیده‌اند.

1 - Young, 1978

2 - Krcho, 1973

3 - Sharyi and Stepanov, 1991

4 - Mitasova and Hofierka

5 - Evans, 1972

$$\text{Minimal Curvature} = \text{Mean}_{\text{Curv}} - \text{Unsphericity}_{\text{Curv}} \quad \text{رابطه (۲۵)}$$

$$\text{Maximal Curvature} = \text{Mean}_{\text{Curv}} + \text{Unsphericity}_{\text{Curv}} \quad \text{رابطه (۲۶)}$$

$$\text{Horizontal excess Curvature} = \text{Unsphericity}_{\text{Curv}} - \text{Differential}_{\text{Curv}} \quad \text{رابطه (۲۷)}$$

$$\text{Vertical excess Curvature} = \text{Unsphericity}_{\text{Curv}} + \text{Differential}_{\text{Curv}} \quad \text{رابطه (۲۸)}$$

$$\text{Total Gaussian Curvature} = \text{Mean}_{\text{Curv}}^2 - \text{Unsphericity}_{\text{Curv}}^2 \quad \text{رابطه (۲۹)}$$

انحنای گوسی را می‌توان به روشی ساده‌تر؛ به طور مستقیم از رابطه (۳۰) (گوس، ۱۸۲۸) محاسبه نمود.

$$\text{Total Gaussian Curvature} = \frac{r.t-s^2}{(1+p^2+q^2)^2} \quad \text{رابطه (۳۰)}$$

$$\text{Total Accumulation Curvature} = \text{Mean}_{\text{Curv}}^2 - \text{Differential}_{\text{Curv}}^2 \quad \text{رابطه (۳۱)}$$

$$\text{Total Ring Curvature} = \text{Unsphericity}_{\text{Curv}}^2 - \text{Differential}_{\text{Curv}}^2 \quad \text{رابطه (۳۲)}$$

فلورینسکی^۱ (۱۹۹۸) انحنای خطوط جریانی که عمود بر خطوط کانتوری است را مطرح می‌سازد (رابطه ۳۳).

$$\text{Curvature of Flowlines} = \frac{(p^2-q^2).s-p.q.(r-t)}{\sqrt{(p^2+q^2)^3}} \quad \text{رابطه (۳۳)}$$

محاسبه تابش خورشیدی^۲ بر مبنای مدل رقومی ارتفاعی

تابش خورشیدی حادث شده بر چشم‌اندازها در یک موقعیت خاص بر اساس الگوریتم میدان دید نیمکره‌ای محاسبه گردیده است. این الگوریتم توسط ریچ و همکاران (ریچ و همکاران، ۱۹۹۴) ارائه شده و بعدها توسط فو و ریچ^۳ (۲۰۰۰، ۲۰۰۲)، توسعه یافته است. مقدار کل تابش محاسبه شده در یک موقعیت مشخص و یا منطقه به عنوان تابش کل در نظر گرفته می‌شود. محاسبه تابش کل، مستقیم و پخش شده، در هر موقعیت مکانی واقع بر سطوح توپوگرافیک زمین محاسبه شده و به عنوان نقشه تابشی آن محدوده جغرافیایی در نظر گرفته می‌شود. در ادامه نحوه محاسبه هر یک از نقشه‌های تابش کل، مستقیم، پراکنده و مدت زمان تابش مستقیم تشریح می‌گردد.

محاسبه تابش خورشیدی کل^۴

بخش دیگری از مدل‌های رستری ترکیبی نیاز به محاسبه مؤلفه‌های تابشی (مورفوردیشن) دارد. مؤلفه اول شامل تابش کل می‌شود که از طریق رابطه (۳۴) محاسبه می‌گردد.

$$\text{Global}_{\text{tot}} = \text{Dir}_{\text{tot}} + \text{Dif}_{\text{tot}} \quad \text{رابطه (۳۴)}$$

تابش کل شامل مجموع تابش مستقیم و پراکنده در تمامی بازه زمانی مورد محاسبه می‌باشد.

محاسبه تابش مستقیم خورشیدی^۵

مجموع تابش مستقیم برای یک مکان مشخص، شامل مجموع تابش مستقیم دریافتی از تمامی قطعات تابشی است (رابطه ۳۵).

$$\text{Dir}_{\text{tot}} = \text{Dir}_{\theta,\alpha} \quad \text{رابطه (۳۵)}$$

تابش مستقیم در نقشه قطاع‌های تابشی $(\text{Dir}_{\theta,\alpha})$ ، با مرکزیت زاویه زینتی (θ) و زاویه آزیموتی (α) ، با استفاده از رابطه (۳۶) محاسبه شده است.

$$\text{Dir}_{\theta,\alpha} = S_{\text{Const}} \times \beta^{m(\theta)} \times \text{SunDur}_{\theta,\alpha} \times \text{SunGap}_{\theta,\alpha} \times \cos(\text{AngIn}_{\theta,\alpha}) \quad \text{رابطه (۳۶)}$$

¹ - Florinsky

² - Solar Radiation

³ - Fu and Rich

⁴ - Global Solar Radiation

⁵ - Direct Solar Radiation

در این رابطه، S_{Const} شار خورشیدی در بیرون از اتمسفر در فاصله میانگین زمین تا خورشید است که به عنوان ثابت خورشیدی شناخته می‌شود. ثابت خورشیدی مورد استفاده در محاسبات برابر با ۱۳۶۷ وات بر متر مربع است و این میزان بر مبنای مرکز تابش جهانی^۱ در نظر گرفته شده است. β ضریب گذرایی اتمسفر (متوسط تمامی طول موج‌ها) برای کوتاه‌ترین مسیر گذر اشعه‌های نور از اتمسفر (در جهت زاویه زینتی) می‌باشد. $m(\theta)$ طول نسبی مسیر نور، که به نسبت طول مسیر زینتی و با استفاده از رابطه^(۳۷) محاسبه می‌شود. $SunDur_{\theta,\alpha}$ مدت زمان تحت تابندگی در قطعات تابشی^۲ است. در مورد بیشتر قطعات، برابر با فواصل زمانی (به طور مثال ماه) ضرب در فواصل زمانی ساعتی (به طور مثال نیم ساعتی) است. $SunGap_{\theta,\alpha}$ کسر اختلاف بین نقشه قطعات تابشی و نهایتاً $AngIn_{\theta,\alpha}$ زاویه برخورد بین مرکز قطعات آسمان^۳ و محور عمود به سطح زمین است که از طریق رابطه^(۳۸) محاسبه می‌گردد.

$$m(\theta) = \frac{EXP(-0.000118 \times Elev - 1.638 \times 10^{-9} * Elev^2)}{\cos(\theta)} \quad \text{رابطه (۳۷)}$$

که در این رابطه، θ زاویه زینتی (زاویه عمودی) تابش خورشید و $Elev$ ارتفاع بالاتر از سطح دریا به متر می‌باشد.
 $AngIn_{\theta,\alpha} = \text{acos}(\text{Cos}(\theta) \times \text{Cos}(G_z) + \text{Sin}(\theta) \times \text{Sin}(G_z) \times \text{Cos}(\alpha - G_a))$ رابطه^(۳۸)

که در این رابطه، G_z زاوی زینتی سطحی و G_a زاویه آزیموتی سطحی است. بعد از محاسبه تابش مستقیم در هر پیکسل بر روی مدل رقومی ارتفاعی، مدت زمانی که هر پیکسل تحت تابش مستقیم دارند، نیز محاسبه و به عنوان مدت زمان تابش مستقیم^۴ در نظر گرفته شده است.

محاسبه تابش پراکنده خورشیدی^۵

برای هر یک از قطعات آسمان، تابش پخش شده در مرکز هر بخش در طول بازه‌های زمانی محاسبه گردیده و توسط زاویه برخورد به طوری که در رابطه^(۳۹) ملاحظه می‌گردد تصحیح شده است.

$$Dif_{\theta,\alpha} = R_{glb} \times P_{dif} \times Dur \times SkyGap_{\theta,\alpha} \times Weight_{\theta,\alpha} \times \cos(AngIn_{\theta,\alpha}) \quad \text{رابطه (۳۹)}$$

در این رابطه، R_{glb} تابش کل نرمال شده است و با استفاده از رابطه^(۴۰) محاسبه می‌گردد. P_{dif} بخشی از شار تابشی است که پخش شده است. معمولاً به طوری تقریبی در شرایطی که آسمان کاملاً صاف و بدون ابر است برابر با ۰/۲ و در شرایطی که کاملاً ابری باشد معادل ۰/۷ در نظر گرفته می‌شود. Dur فواصل پی در پی زمانی است که تابش محاسبه می‌شود. $SkyGap_{\theta,\alpha}$ کسر اختلاف در مورد قطعات آسمان است. $Weight_{\theta,\alpha}$ سهمی از تابش پخش شده منشاء گرفته از یک قطعه مشخص از آسمان به نسبت سایر قطعات می‌باشد و نهایتاً $AngIn_{\theta,\alpha}$ زاویه برخورد بین مرکز قطعات آسمان و سطح دریافت کننده تابش می‌باشد.

$$R_{glb} = (S_{Const} \Sigma(\beta^{m(\theta)})) / (1 - P_{dif}) \quad \text{رابطه (۴۰)}$$

بحث و یافته‌های پژوهش

در این پژوهش مدل‌های مختلفی در نمایش ناهمواری‌های زمین تهیه و ارائه گردیده است. بخشی از مدل‌سازی‌ها مربوط به ساختارهای برداری و بخش دیگر مربوط به ساختارهای رستری است که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود.

مدل‌سازی برداری در نمایش ناهمواری‌های زمین

مدل‌سازی برداری نمایش عوارض سطح زمین در دو بخش برداری خطی و نقطه‌ای انجام گرفت.

1 - World Radiation Center (WRC)

2 - Sun Sector

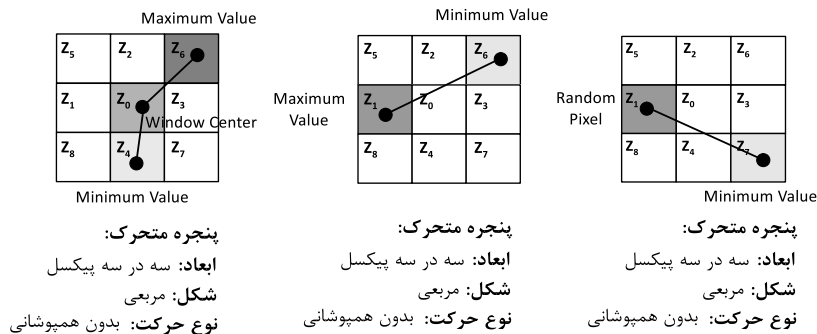
3 - Sky Sector

4 - Direct Radiation Duration

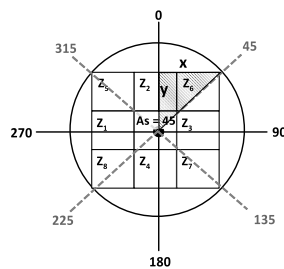
5 - Diffuse Radiation

مدل‌سازی برداری خطی در نمایش ناهمواری‌های سطح زمین

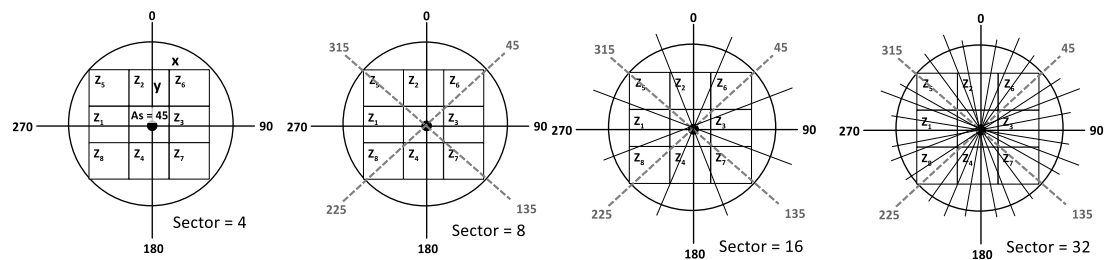
در بخش مدل‌سازی برداری، چهار الگوریتم MCM، MM، RPM و MSA پیکربندی و ارائه گردیده است. این چهار الگوریتم قابلیت ایجاد هاشور خطی بر روی سطوح ناهموار زمین، به منظور ایجاد بعد فضایی از مدل رقومی ارتفاعی را دارا هستند. هر چهار الگوریتم ارائه شده با استفاده از تکنیک پردازش پنجره متحرک عمل می‌نماید و به صورت خودکار هاشورزنی خطی را با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی اعمال می‌کند. شکل (۳) و (۴) به صورت شماتیک نحوه عملکرد این چهار مدل را نشان می‌دهد. در مدل MCM در هر فریم پنجره متحرک، جهت هاشورزنی از پیکسلی که بالاترین ارتفاع را دارد به سمت مرکز پنجره و سپس به سمت پیکسلی که کمترین ارتفاع را دارد، می‌باشد و بدین صورت عملیات هاشورزنی خطی بر روی مدل رقومی ارتفاعی در تمامی بخش‌های شبکه رستری اعمال می‌گردد. در مدل MM جهت هاشور از پیکسل با بیشترین ارتفاع به سمت پیکسل با کمترین ارتفاع در هر فریم پنجره متحرک است و در مدل RPM یک پیکسل به صورت تصادفی در هر فریم پنجره متحرک انتخاب و به سمت پیکسل با کمترین ارتفاع هاشورزنی انجام می‌گردد. نهایتاً در روش MSA جهت شیب زمین به تعدادی بخش یا Sector تقسیم می‌شود که انتخاب تعداد بخش‌ها به عهده اپراتوری است که از مدل استفاده می‌کند. سپس با توجه به اینکه جهت شیب هر پیکسل در شبکه رستری در کدام Sector قرار بگیرد، مرکز هر Sector جهت هاشورزنی در آن پیکسل را تعیین می‌نماید. لازم به توضیح است که نحوه حرکت پنجره متحرک برای اعمال هر چهار روش به صورتی کدنویسی گردید که در هر حرکت هیچ پیکسلی دارای همپوشانی با پنجره قبل نداشته باشد.



شکل ۳: سه مدل پیشنهادی هاشورزنی برداری سطوح ناهموار زمین: مدل MCM (تصویر سمت چپ)، مدل هاشورزنی برداری MM (تصویر وسط)، و مدل هاشورزنی برداری RPM (تصویر راست)



شکل ۴: سیستم هاشورزنی برداری بر اساس مدل MSA

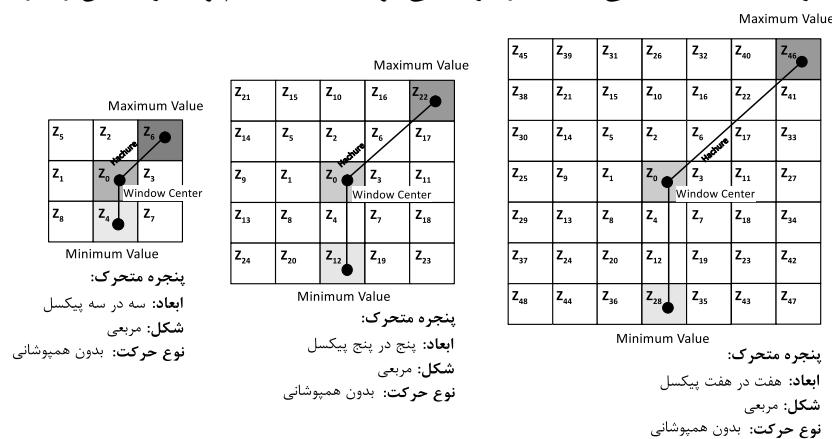


شکل ۵: تأثیر قطعه‌بندی جهت در هاشورزنی برداری سطوح ناهموار زمین در مدل MSA

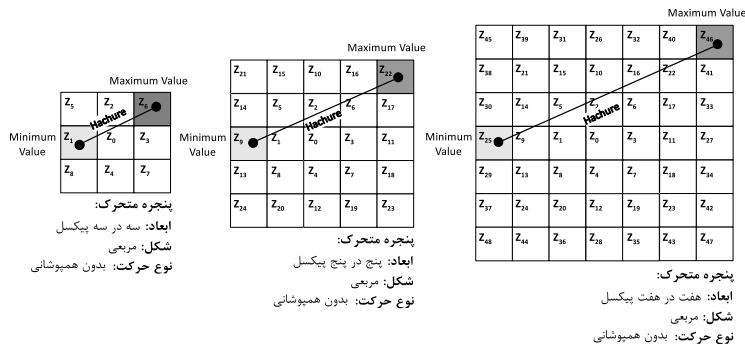
شکل (۵) نحوه بخش‌بندی هر فریم پنجره متحرک در ایجاد هاشور خطی با استفاده از مدل پیشنهادی MSA را نشان می‌دهد. به طوری که در شکل مشاهده می‌شود تعداد بیشتر بخش‌ها انعطاف بیشتری به هاشورزنی خطی می‌دهد.

تغییر مقیاس هاشورزنی خطی در مدل‌های هاشورزنی خطی

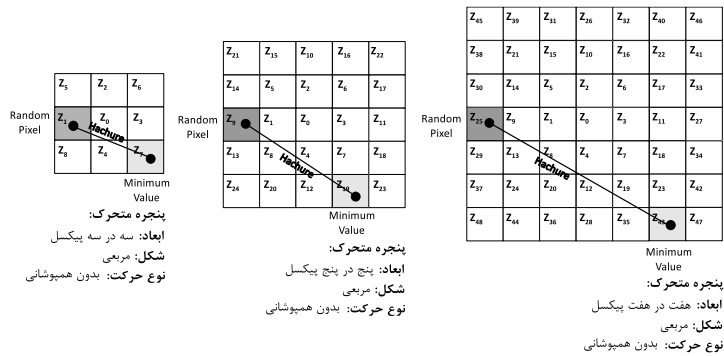
نکته قابل توجه و دارای اهمیت در مورد هر یک از چهار مدل پیشنهادی در هاشورزنی خطی سطوح ناهموار زمین، آن است که هر چهار مدل قابلیت تغییر و تنظیم مقیاس را داشته و می‌توان تراکم و نحوه هاشورزنی را متناسب با سایز پنجره متحرک تغییر داد. در نتیجه قابلیت تنظیم مقیاس با ابعاد محدوده و کاربرد مورد نظر را خواهد داشت که این موضوع از نقاط قوت این مدل‌ها محسوب می‌گردد. اشکال (۶) تا (۸) نحوه تغییر مقیاس هاشورزنی بر اساس تغییرات ابعاد پنجره متحرک را نشان می‌دهد. در ارتباط با مدل هاشورزنی خطی MSA بایستی ذکر گردد که این مدل از طریق تغییر ابعاد پنجره متحرک و نیز تعداد Sector هایی که به کار گرفته می‌شوند، قابلیت تنظیم و تغییر مقیاس را دارد.



شکل ۶: تغییر مقیاس هاشورزنی برداری در مدل MCM در ساختار کرنلی با ابعاد مختلف (۳، ۵ و ۷ پیکسل)

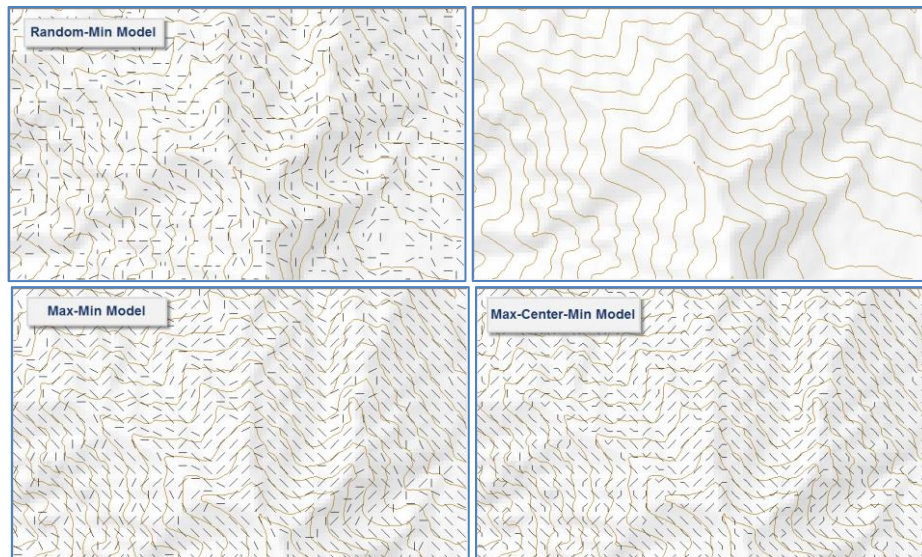


شکل ۷: تغییر مقیاس هاشورزنی برداری در مدل MM در ساختار کرنلی با ابعاد مختلف (۳، ۵ و ۷ پیکسل)



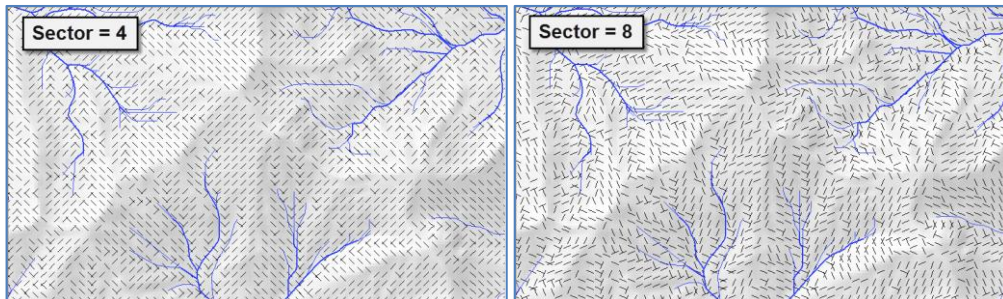
شکل ۸: تغییر مقیاس هاشورزنی برداری در مدل RPM در ساختار کرنلی با ابعاد مختلف (۳، ۵ و ۷ پیکسل)

نتایج به کارگیری مدل‌های هاشورزنی برداری خطی که در بخش قبلی در مورد آنها توضیحاتی ارائه شد در اشکال (۹) تا (۱۲) نشان داده شده است. شکل (۹) نتایج هاشورزنی خطی بر اساس مدل‌های پیشنهادی MCM، MM و RPM را نشان می‌دهد.

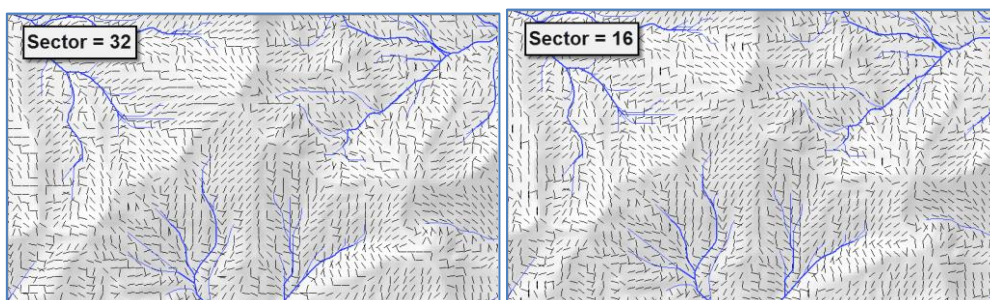


شکل ۹: نتایج هاشورزنی برداری بر سطح توپوگرافی زمین با استفاده از مدل‌های RPM (تصویر بالا سمت چپ)، مدل MM (تصویر پائین سمت چپ) و مدل MCM (تصویر پائین سمت راست)

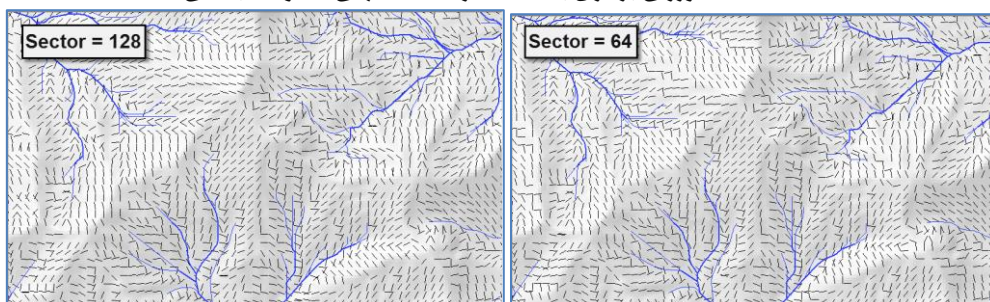
نتایج استفاده از مدل هاشورزنی خطی MSA با تعداد Sector ۴ و ۸ بخشی در شکل (۱۰) و استفاده از تعداد Sector ۱۶ و ۳۲ بخشی در شکل (۱۱) و تعداد Sector ۶۴ و ۱۲۸ بخشی در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۰: هاشورزنی برداری با استفاده از قطعات جهتی ۴ و ۸ بخشی



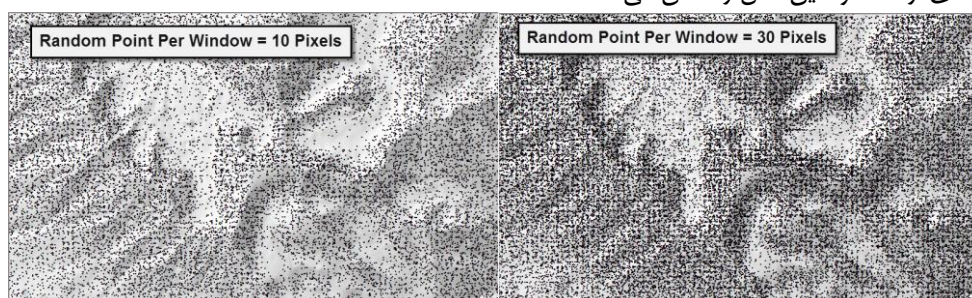
شکل ۱۱: هاشورزنی برداری با استفاده از قطعات جهتی ۱۶ و ۳۲ بخشی



شکل ۱۲: هاشورزنی برداری با استفاده از قطعات جهتی ۶۴ و ۱۲۸ بخشی

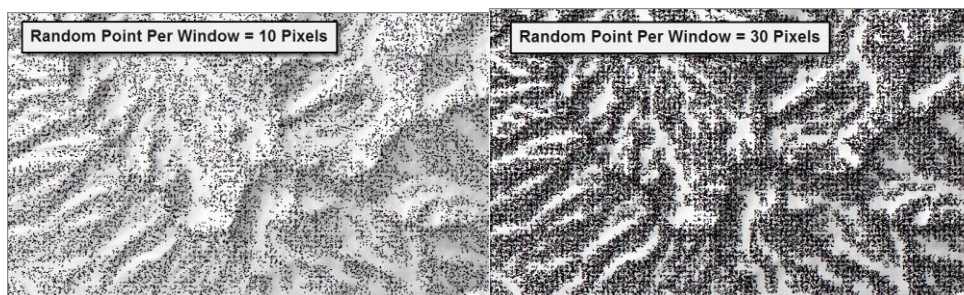
مدل‌سازی برداری نقطه‌ای در نمایش ناهمواری‌های سطح زمین

در بخش دوم هاشورزنی برداری سطوح ناهموار زمین، دو مدل پیشنهادی نقطه‌ای ارائه گردید. هر کدام از این دو مدل با استفاده از تعدادی نقطه تصادفی که تعداد آن توسط کاربر مدل تعیین می‌گردد، سطوح ناهموار زمین را نمایش می‌دهند. در حالت دوم میزان شیب زمین اثر وزنی در تعداد نقاط تصادفی داشته به صورتی که در مناطقی که شیب زمین افزایش می‌یابد تعداد نقاط تصادفی افزایش و در بخش‌هایی که شیب زمین کاهش می‌یابد، تراکم نقاط نیز کاهش می‌یابد. شکل (۱۳) نمونه‌ای از عملکرد این مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳: ایجاد الگوی هاشور ابر نقطه‌ای تصادفی با وزن شیب زمین (Slope)

در حالت دوم که بسیار شبیه به حالت قبلی است، تنها اختلاف در وزن تأثیرگذار بر تراکم نقاط تصادفی است؛ به طوری که در این حالت انحنای متوسط زمین به عنوان وزن تعیین تراکم نقاط تصادفی انتخاب می‌گردد. شکل (۱۴) نمونه‌ای از نتایج اعمال این مدل در نمایش سطوح ناهموار زمین را نشان می‌دهد.



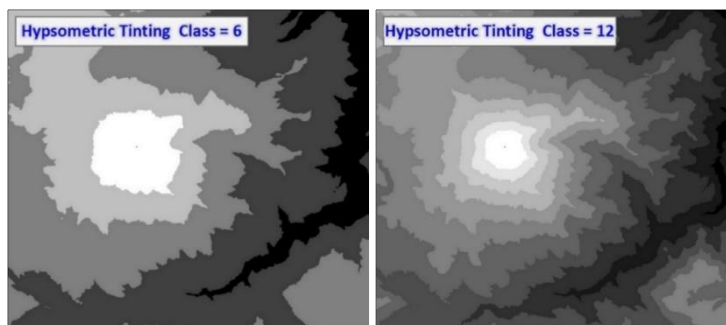
شکل ۱۴: ایجاد الگوی هاشور ابر نقطه‌ای تصادفی با وزن انحنای زمین (Curvature)

مدل‌سازی رستر-پایه در نمایش ناهمواری‌ای سطح زمین

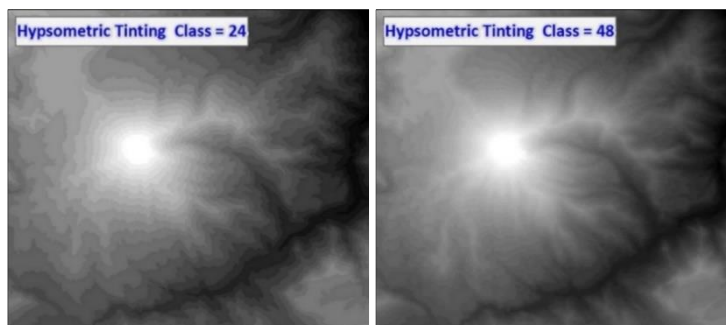
شاخهٔ دوم از مدل‌سازی‌ها، مربوط به نمایش سطوح ناهموار با استفاده از ساختارهای رستری است. این شاخه شامل ۵ گروه می‌گردد که در ادامه به توضیح و ارائه نتایج مربوط به هر کدام پرداخته می‌شود.

مدل بخش‌بندی هیپسومتریک^۱ در نمایش ناهمواری‌های سطح زمین

گروه نخست شامل رنگ‌بندی یا بخش‌بندی هیپسومتریک می‌گردد. در بسیاری از نقشه‌ها از این تکنیک در نمایش سطوح ناهموار زمین استفاده می‌گردد. تعداد کلاس‌ها، فاصلهٔ طبقاتی بین کلاس‌ها، نوع رنگ، رنگ‌های پیوسته و گسسته همگی در نتایج این مدل تأثیرگذار است. در شکل (۱۵) و (۱۶) چند نمونه از نتایج این مدل با استفاده از تعداد کلاس‌های هیپسومتریک مختلف نشان داده شده است.



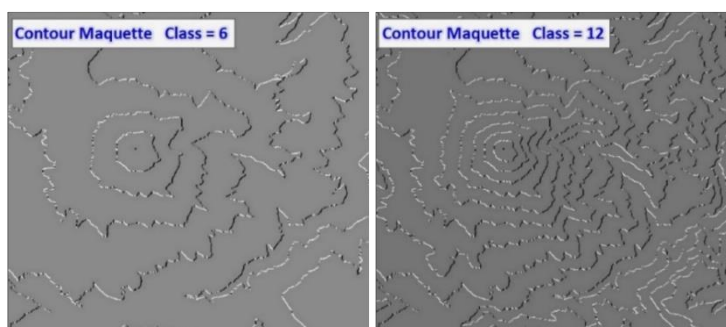
شکل ۱۵: استفاده از رنگ‌های هیپسومتریک در نمایش ناهمواری‌های زمین تعداد Tint معادل ۶ و ۱۲ است



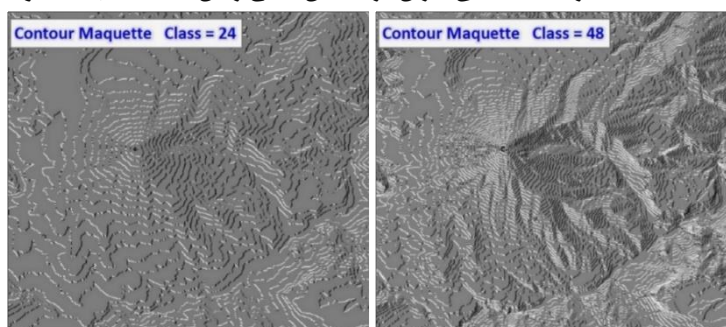
شکل ۱۶: استفاده از رنگ‌های هیپسومتریک در نمایش ناهمواری‌های زمین تعداد Tint معادل ۲۴ و ۴۸ است

مدل ماکت منحنی میزان^۱ در نمایش ناهمواری‌های سطح زمین

بخش دیگری از مدل‌سازی رستر-پایه در نمایش ناهمواری‌های سطح زمین مربوط به تهیه مدل ماکت منحنی میزان می‌باشد. مدل‌های منحنی میزان در واقع ترکیبی از طبقات هیپسومتریک و مدل سایه-روشن استاندارد هستند. بدین صورت که ابتدا طبقه‌بندی هیپسومتریک انجام و سپس مدل سایه‌روشن تهیه می‌گردد. نتایج مدل ماکت منحنی میزان در اشکال (۱۷) و (۱۸) نمایش داده شده است. در ترسیم مدل ماکت منحنی میزان، تعداد کلاس‌های طبقه‌بندی دارای اهمیت است به طور نمونه در این اشکال تعداد کلاس‌ها ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ در نظر گرفته شده است.



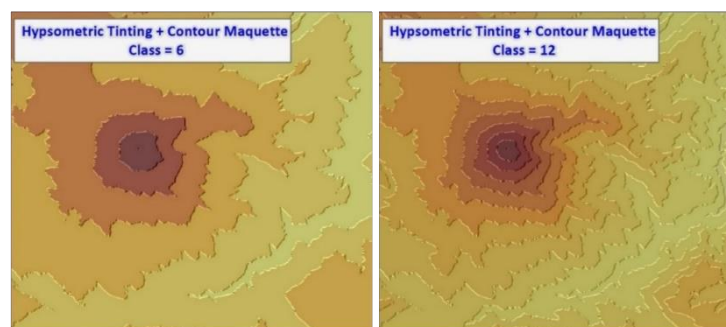
شکل ۱۷: استفاده از ماکت منحنی میزان در نمایش سطح زمین - تعداد طبقات ۶ و ۱۲



شکل ۱۸: استفاده از ماکت منحنی میزان در نمایش سطح زمین - تعداد طبقات ۲۴ و ۴۸

مدل ماکت رنگی منحنی میزان^۲ در نمایش ناهمواری‌های سطح زمین

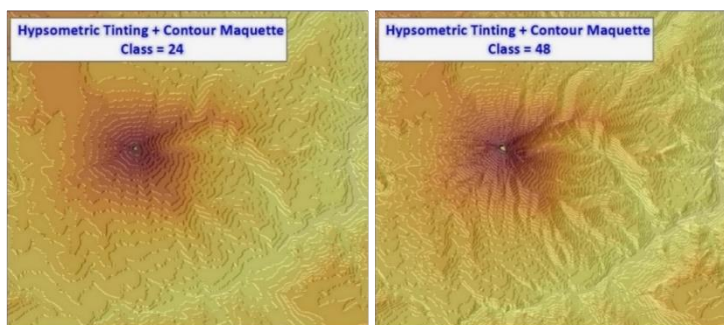
بعد از تهیه مدل ماکت منحنی میزان، اگر این مدل و مدل طبقات هیپسومتریک را با نسبت مشخصی باهم ترکیب کنیم، مدل ماکت رنگی منحنی میزان به دست می‌آید. نمونه‌ای از این مدل در شکل (۱۹) و (۲۰) نشان داده شده است.



شکل ۱۹: استفاده ترکیبی از ماکت منحنی میزان و طبقات هیپسومتریک رنگی در نمایش سطح زمین تعداد کلاس ۶ و ۱۲

1 - Contour Maquette

2 - Colored Contour Maquette



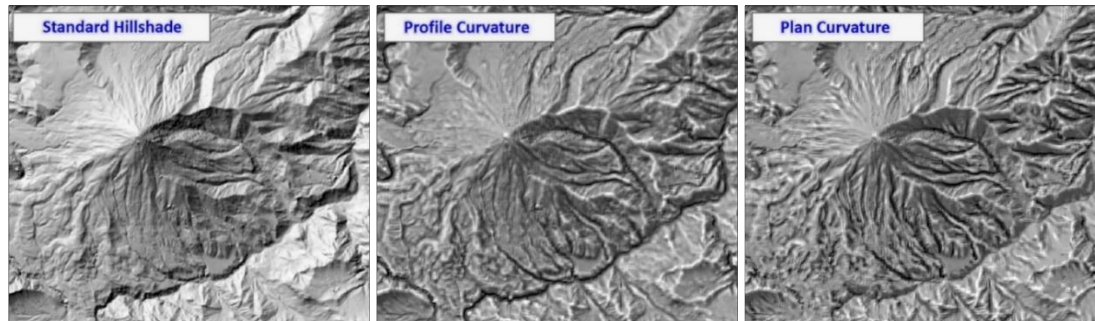
شکل ۲۰: استفاده ترکیبی از ماکت منحنی میزان و طبقات هیپسومتریک رنگی در نمایش سطح زمین تعداد کلاس ۲۴ و ۴۸

مدل‌سازی سایه‌زنی ترکیبی

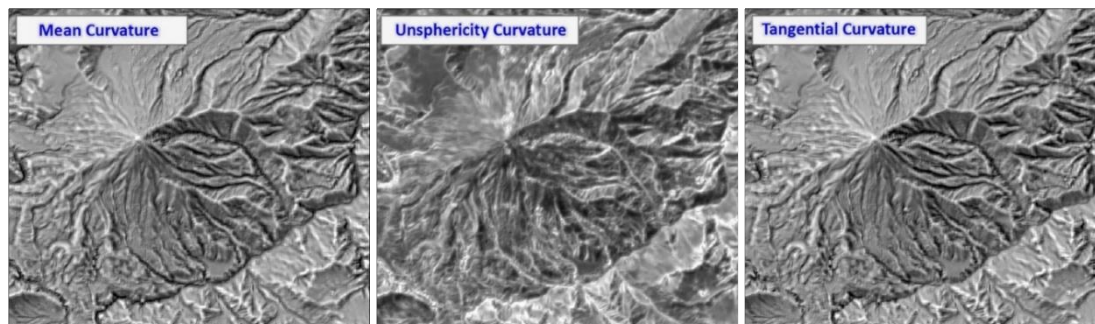
بخش دیگری از مدل‌های رستر-پایه در نمایش سطوح ناهموار زمین مربوط به مدل‌های ترکیبی است که مدل سایه‌روشن استاندارد را با مؤلفه‌های دیگری همچون انواع انحنای زمین (شامل ۱۴ نوع مختلف از انحنای زمین)، تابش (تابش مستقیم، تابش پراکنده و مدت زمان تابش مستقیم) و اثر سایه خط‌الرأس‌ها، ترکیب و تلفیق می‌کند.

مدل‌سازی سایه‌زنی ترکیبی با استفاده از مدل‌های انحنای زمین

بر اساس ۱۴ مدل مختلف انحنای زمین که نحوه محاسبه آنها در بخش روش‌شناسی مطرح شد، نقشه‌های انحنای تپیه و با مدل سایه‌روشن استاندارد به نسبت مشخصی (۷۰ به ۳۰) ترکیب شده است. نتایج در اشکال (۲۱) تا (۲۵) نمایش داده شده است.



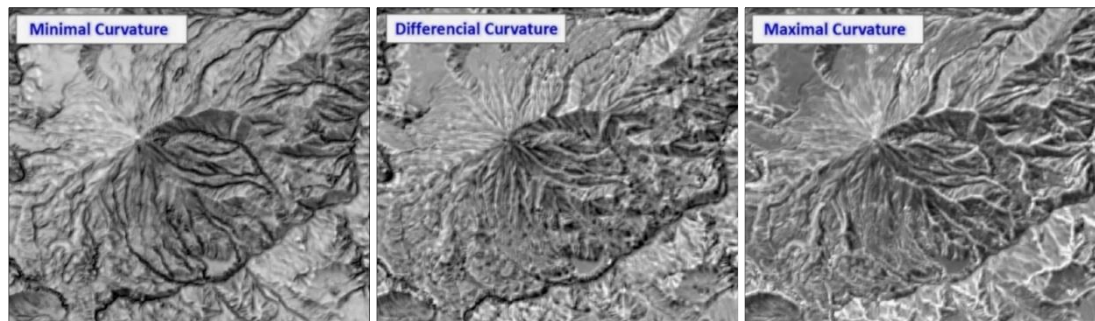
شکل ۲۱: نمایش ناهمواری‌های سطح زمین با استفاده از اثر سایه‌زنی انحنای زمین (شامل انحنای (Plan, Profile)



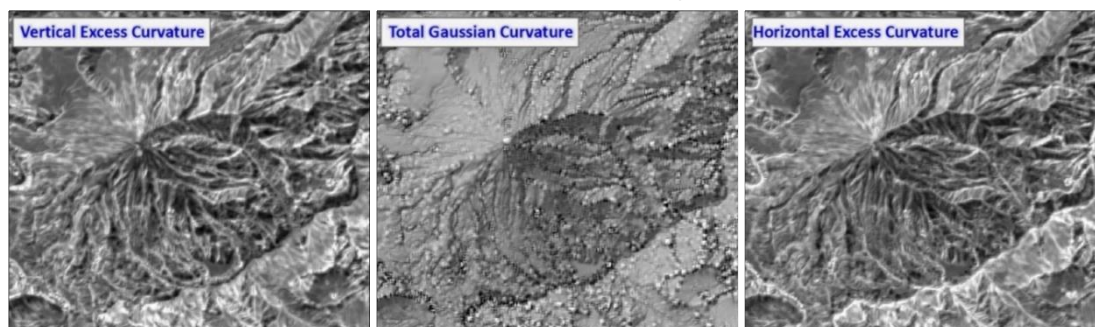
شکل ۲۲: نمایش ناهمواری‌های سطح زمین با استفاده از اثر سایه‌زنی انحنای زمین (شامل انحنای (Plan, Tangential)

شکل (۲۱) مدل ترکیبی مدل سایه‌روشن استاندارد با انحنای پروفیلی و پلان را نشان می‌دهد. همچنین شکل (۲۲) مدل ترکیبی مدل سایه‌روشن استاندارد با انحنای تانژانتی، انحنای متوسط و کروی را نمایش می‌دهد. به طوری که در اشکال

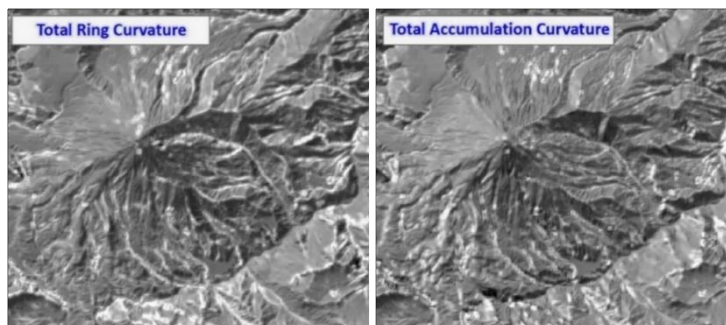
مشاهده می‌شود، هر لایه انحنا بخش خاصی از ویژگی‌ها و مشخصات توپوگرافیک و ژئومورفولوژیک را بارز ساخته و آشکار می‌کند و می‌تواند بسته به هدف، مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ۲۳: نمایش ناهمواری‌های سطح زمین با اثر سایه‌زنی انحنای زمین (شامل انحنای Minimal, Differential, Maximal)



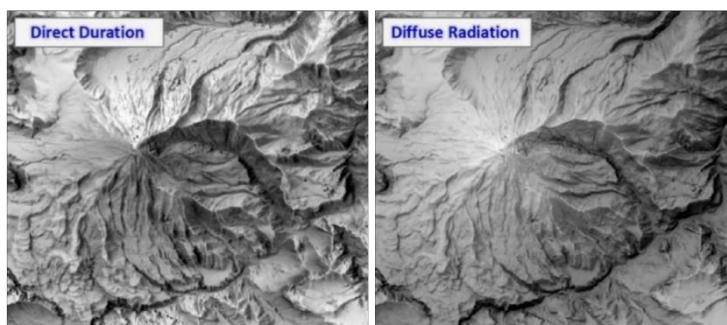
شکل ۲۴: نمایش ناهمواری‌های سطح زمین با اثر سایه‌زنی انحنای زمین (شامل انحنای Horizontal and Vertical Excess, Total Gaussian)



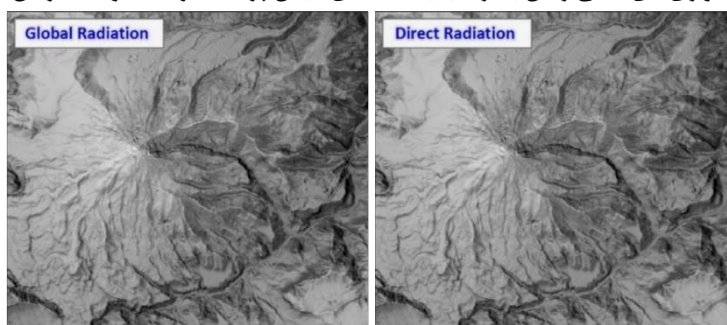
شکل ۲۵: نمایش ناهمواری‌های سطح زمین با اثر سایه‌زنی انحنای زمین (شامل انحنای Total Ring, Total Accumulation)

مدل‌سازی سایه‌زنی ترکیبی با استفاده از مدل‌های تابشی (مورفوردیشن)

مدل‌های تابشی (مورفوردیشن) در اصل مدل‌سازی نحوه توزیع و دریافت تابش بر سطوح ناهموار زمین است. محاسبه مدل‌های تابشی شامل تابش کل، تابش مستقیم، تابش پراکنده و مدت زمان تابش مستقیم، همانگونه که در بخش روش‌شناسی مطرح گردید، انجام گرفت و با نسبت مشخصی (۷۰ به ۳۰) با مدل سایه‌روشن استاندارد ترکیب گردید که نتایج هر کدام در اشکال (۲۶) و (۲۷) نشان داده شده است.



شکل ۲۶: نمایش ناهمواری‌های سطح زمین با ترکیب با نقشه‌های تابش پراکنده (راست) و مدت زمان تابش مستقیم (چپ)



شکل ۲۷: نمایش ناهمواری‌های سطح زمین با ترکیب با نقشه‌های تابش مستقیم (راست) و تابش کل (چپ)

مدل‌سازی سایه‌زنی ترکیبی با استفاده از مدل‌های اثر خط‌الرأس

در بخش آخر از مدل‌سازی ترکیبی رستر-پایه بر اساس خط‌الرأس‌ها در نمایش سطوح ناهموار زمین، بهره گرفته شد. در این بخش با استفاده از روش پیشنهادی سیف و صلحی (۱۳۹۹)، لایه خط‌الرأس‌ها استخراج و با نسبت مشخصی با مدل سایه‌روشن استاندارد ترکیب گردید که نتایج آن در اشکال (۲۸) و (۲۹) نمایش داده شده است. ابعاد پنجره متحرک به کار گرفته شده در تهیه خط‌الرأس‌ها به عنوان فاکتور مقیاس در تنظیم لبه‌های خط‌الرأس‌ها و خط‌القعرها عمل می‌نماید. به طوری که در اشکال (۲۸) و (۲۹) مشاهده می‌شود، ابعاد کوچکتر پنجره متحرک، جزئیات بیشتر شده و با افزایش سایز پنجره متحرک جزئیات حذف و نتایج کلی‌سازی می‌شوند.



شکل ۲۸: استفاده از سایه خط‌الرأس و خط‌القعر در نمایش سطح زمین (ابعاد پنجره متحرک ۵، ۷، ۹)



شکل ۲۹: استفاده از سایه خط‌الرأس و خط‌القعر در نمایش سطح زمین (ابعاد پنجره متحرک ۱۱، ۱۳، ۱۵)

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

نمایش سطوح ناهموار زمین در بخش کارتوگرافی و تهیه نقشه‌های پایه، نقشه‌های زمین‌شناسی، نقشه‌های توپوگرافیکی، نقشه‌های ژئومورفولوژی و بسیاری نقشه‌های دیگر دارای اهمیت بوده و کاربردهای گسترده‌ای دارد. علاوه بر این در تفسیر بصری و شناسایی لندفرم‌های زمین نیاز به مدل‌های مختلفی است تا بخش‌های خاصی از سطوح ناهموار زمین را بارزسازی و آشکار سازد، تا متخصصین بتوانند تفسیر بهتری از ویژگی‌های سطح زمین ارائه نمایند. مدل‌سازی سطوح ناهموار زمین با استفاده از ایده‌های مختلف و روش‌ها و تکنیک‌های مختلف می‌تواند در ارتقا و بهبود نمایشی سطوح زمین در کاربردهای مختلف تأثیرگذار باشد. در این پژوهش با تأکید بر موضوع مدل‌سازی نمایش سطوح ناهموار زمین، روش‌ها و مدل‌های مختلفی، هم در بخش ساختارهای برداری (خطی و نقطه‌ای) و هم در بخش ساختارهای رستری، ارائه گردیده است. همچنین روش‌ها و مدل‌های مختلفی ارائه گردیده که می‌تواند در طیف گسترده‌ای از مطالعات محیطی و روش‌ها و تکنیک‌های کارتوگرافیکی کاربرد داشته باشد. در جدول ۱ لیستی از مدل‌های ارائه شده در این پژوهش به همراه نحوه کارکرد و عملکرد آنها ارائه گردیده و در جدول ۲ کاربرد هر یک از آنها بیان شده است.

جدول ۱: نوع و نحوه عملکرد مدل‌های ارائه شده در نمایش سطوح ناهموار زمین

نحوه عملکرد	نام مدل	نوع نمایش	نوع توپولوژی	ساختار داده مدل
در این روش دایره جهتی بر روی پنجره متحرک به ابعاد ۳ در ۳ پیکسل قرار گرفته و تعداد بخشهای جهتی یا Sector ها با توجه به دلخواه کاربر به ۴، ۸، ۱۶ و ... بخش تقسیم شده و بر مبنای جهت شیب زمین هاشور خطی ترسیم می‌گردد.	Multi Sector Aspect (M.S. A)	هاشور خطی	خطی	برداری
در این روش پیکسلی که حداکثر ارتفاع را در پنجره متحرک را دارد، به مرکز پنجره متحرک و سپس به پیکسلی که حداقل ارتفاع را دارد متصل می‌نماید.	Max-Center-Min (M.C.M)			
در این روش پیکسلی که دارای حداکثر ارتفاع است را به پیکسل با کمترین ارتفاع متصل می‌کند و جهت هاشور با جهت گرادبان شیب هم راستا می‌شود.	Max-Min (M.M)			
در این بخش در محدوده مختصاتی پنجره متحرک یک نقطه به صورت تصادفی ایجاد و سپس به سمت پیکسلی که حداقل ارتفاع را دارا است عملیات هاشورزنی انجام می‌گردد.	Random Point Min (R.P.M)			
در این روش یک ابر نقطه‌ای بر روی سطح توپوگرافی زمین ایجاد می‌گردد، نکته قابل توجه آن است که سیستم تفکیک دهنده سطوح ناهموار زمین در این مدل، استفاده از اختلاف تراکم نقاط با وزن شیب زمین می‌باشد. به طوری که هر قدر شیب زمین افزایش یابد، تراکم نقاط تصادفی که در آن باند شیب ایجاد می‌گردد، افزایش خواهد یافت.	هاشور وزنی نقطه‌ای با وزن شیب زمین	هاشور نقطه‌ای	نقطه‌ای	
در این روش، ابر نقطه‌ای بر روی سطح زمین ایجاد می‌گردد تا از این طریق شکل ناهمواری زمین هاشورزنی گردد بدین منظور از انحنای زمین به منظور وزن در ایجاد تعداد نقاط تصادفی استفاده می‌شود.	هاشور وزنی نقطه‌ای با وزن انحنای زمین			

رشته‌ای شبکه‌ای ارتفاعی - روشن	شبکه‌ای	ترکیب با انحنا زمین	در این بخش از ۱۴ نوع انحنا مختلف زمین به عنوان عامل تعدیل‌کننده مدل سایه-روشن استاندارد استفاده می‌شود.
		ترکیب با مدل های تابشی	در این بخش از نتایج به دست آمده از مدل‌های زمین-تابشی به عنوان سایه تصحیح‌کننده بر روی مدل سایه-روشن استاندارد مورد استفاده قرار می‌گیرد.
		ترکیب با سایه خط الرأس	در این روش در مرحله نخست لبه‌های خط‌الرأس با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی استخراج شده و سپس به عنوان سایه تصحیح‌کننده با مدل سایه - روشن استاندارد ترکیب می‌گردد.
	رشته‌ای	طبقات هیسومتریک	در این بخش مدل رقومی ارتفاع در طبقات گسسته طبقه‌بندی مجدد شده و از این طریق سطوح ناهموار زمین با استفاده از رنگ‌های هیسومتریک نمایش داده می‌شود.
		ماکت منحنی میزان	در این روش به سطوح هیسومتریک حالت عمق اضافه می‌شود و سطوح منحنی میزان به صورت سطوح پلکانی باعث ایجاد بعد سوم در نمای سطوح ناهموار زمین می‌گردد. در این مدل از طبقه‌بندی مدل رقومی ارتفاعی زمین و مدل سایه روشن برای ایجاد ماکت منحنی میزان استفاده می‌گردد.
		ترکیب ماکت منحنی میزان و طبقات هیسومتریک	در این مدل با ترکیب ماکت منحنی میزان و طبقات هیسومتریک علاوه بر ایجاد بعد سوم در نمایش تغییرات ارتفاعی سطح زمین، از تغییرات تدریجی رنگ نیز استفاده می‌شود که در افزایش خوانایی و زیبایی نمایش ناهمواری‌های زمین تأثیرگذار است.

جدول ۲: کاربردهای مدل‌های ارائه شده در نمایش سطوح ناهموار زمین

کاربرد	نام مدل
نمایش جهت شیب زمین، ایجاد بافت بر روی سطح توپوگرافی زمین، تجسم ناهمواری، افکت کارتوگرافیکی	Multi Sector Aspect (M.S. A)
بازسازی جهت شیب اراضی، تجسم بافت ناهمواری، ایجاد الگوی ناهمواری، افکت کارتوگرافیکی	Max-Center-Min (M.C.M)
بازسازی و بازسازی جهت شیب گرادبان، نمایش جهت شیب اراضی، افکت کارتوگرافیکی	Max-Min (M.M)
ایجاد بافت توپوگرافی، تعدیل اثر جهت توپوگرافی زمین، افکت کارتوگرافیکی	Random Point Min (R.P.M)
افکت کارتوگرافیکی، بازسازی اسکلت ناهمواری‌ها زمین، نمایش غیر مستقیم شیب اراضی	هاشور وزنی نقطه ای با وزن شیب زمین
افکت کارتوگرافیکی، بازسازی سطوح محدب و مقعر، بازسازی اسکلت ناهمواری‌های زمین، نمایش ناهمواری‌ها و ارتفاعات	هاشور وزنی نقطه ای با وزن انحنا زمین
بازسازی خط‌الرأس‌ها و خط‌القعرها، تفکیک و نمایش حوضه‌های آبی، بازسازی حوضه‌های زهکشی، کاربردهای هیدرولوژیکی، نقشه‌ها و اطلس‌های کوه آبنگاری	ترکیب با انحنا زمین
نقشه‌های اقلیمی، پوشش گیاهی، توان ریشی گیاهی، افکت کارتوگرافیکی، بازسازی برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌ها	ترکیب با مدل های تابشی
بازسازی شبکه خط‌الرأس، تفکیک حوضه‌های زهکشی، مطالعات هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی، افکت کارتوگرافیکی	ترکیب با سایه خط الرأس
افکت کارتوگرافیکی، نمایش تغییرات ارتفاعی، بازسازی و نمایش واحدهای ژئومورفیک و واحدهای ناهموار اراضی	طبقات هیسومتریک
نقشه‌های باتیمتری (عمق سنجی)، نمایش چاله‌ها و حوضه‌های بسته داخلی (پلایاها، دریاچه‌های خشک شده و حوضه‌های فرونشسته)، واحدهای ناهمواری، نمایش فانتزی سطح زمین	ماکت منحنی میزان
نقشه‌های باتیمتری (عمق سنجی دریاها و اقیانوس‌ها)، نمایش چاله‌ها و حوضه‌های بسته داخلی با تأکید بر تغییرات ارتفاعی و عمق تغییرات	ترکیب ماکت منحنی میزان و طبقات هیسومتریک

مدل‌های ارائه شده تنها از مدل رقومی ارتفاعی مشتق شده و نیاز به داده‌های میدانی و خاص ندارد که این نکته از ویژگی‌ها و نقاط قوت این مدل‌ها به شمار می‌آیند. به محققین و پژوهشگران آتی پیشنهاد می‌شود که به توسعه و تکامل

مدل‌ها، روش‌ها و تکنیک‌های این حیطه مطالعاتی پردازند و سعی در خلق مدل‌های کاربردی و خلاقانه نمایند. زمینه مدل‌سازی رقومی سطوح ناهموار زمین، در بخش تحلیلی و نمایش، بستر مناسبی در مطالعات علوم محیطی ایجاد می‌نماید و در قالب پژوهش‌هایی بنیادین و پایه می‌تواند منجر به خلق و پویایی علمی و پژوهشی در این بخش گردد.

منابع

- صلحی، س.، سیف، ع.، ۱۳۹۹. مدل‌سازی الگوی کرنل در تشخیص لندفرم‌های زمین (با تأکید بر لندفرم‌های یخچالی و مجاور یخچالی) در محدوده کمربند کوهستانی البرز، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۵۲، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۹، ص ۲۷۱ - ۲۹۴.
- Brassel, K. 1974. *A model for automatic hill-shading. The American Cartographer*, 1(1), 15-27.
- Collier, P., Forrest, D., & Pearson, A. 2003. *The representation of topographic information on maps: the depiction of relief. The Cartographic Journal*, 40(1), 17-26.
- Evans, I. S. (1972). *General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. Spatial analysis in geomorphology*, 17-90.
- FU, P. 2000. *A Geometric Solar Radiation Model with Applications in Landscape Ecology. Ph. D. Thesis, Department of Geography, University of Kansas.*
- Florinsky, I. V. (1998). *Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models. International Journal of Geographical Information Science*, 12(1), 47-62.
- Fu, P., & Rich, P. M. 2000. *The solar analyst 1.0 user manual. Helios Environmental Modeling Institute, (HEMI), USA*
- Fu, P., & Rich, P. M. 2002. *A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry. Computers and electronics in agriculture*, 37(1-3), 25-35.
- Gallant, J. C., & Hutchinson, M. F. 1996. *Towards an understanding of landscape scale and structure. In Proceedings of the Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling (pp. 21-26).*
- Hengl, T., Gruber, S., & Shrestha, D. P. 2003. *Digital terrain analysis in ILWIS. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation Enschede, The Netherlands*, 62.
- Hodgkiss, A. G. 1981. *Understanding maps: a systematic history of their use and development, Wm Dawson & Son, Folkstone.*
- Horn, B. K. 1981. *Hill shading and the reflectance map. Proceedings of the IEEE*, 69(1), 14-47.
- Hurni, L. 2008. *Cartographic mountain relief presentation. In Mountain mapping and visualisation: proceedings of the 6th ICA mountain cartography workshop (pp. 11-15).*
- Imhof, E. 1982. *Cartographic relief presentation. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.*
- Jenny, B., & Hurni, L. 2006. *Swiss-style colour relief shading modulated by elevation and by exposure to illumination. The Cartographic Journal*, 43(3), 198-207.
- Jenny, B. 2001. *An interactive approach to analytical relief shading. Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 38(1-2), 67-75.
- Jenny, B., Hutzler, E., & Hurni, L. 2010. *Scree representation on topographic maps. The Cartographic Journal*, 47(2), 141-149.
- Karssen, A. J., & AJ, K. 1982. *Mask hill shading: a new method of relief representation, ITC Journal.*
- Keates, J. S. 2014. *Understanding maps. Routledge.*
- Kennelly, P., & Stewart, J. 2006. *A uniform sky model to enhance shading of terrain and urban elevation models. Cartography and Geographic Information Science*, 33(1), 21-36.
- Kennelly, P. J., & Kimerling, A. J. 2004. *Hillshading of terrain using layer tints with aspect-variant luminosity. Cartography and Geographic Information Science*, 31(2), 67-77.
- Knowles, R. D., & Stowe, P. W. E. 1974. *Europe in maps: topographical map studies of*

- Western Europe. 1* (1974). Longman.
- Krcho, J. (1973). *Morphometric Analysis of Relief on the Basis of Geometric Aspect of Field Theory* (= *Acta Geographica Universitatis Comenianae*). *Geographico-physica*.
 - Krcho, J. (1983). *Teoretická koncepcia an interdisciplinárne aplikácie komplexného digitálneho modelu reliéfu pri modelovaní dvojdimenzionálnych poli*. *Geografický Cas*, 35, 265-291.
 - Li, Z., Zhu, C., & Gold, C. 2004. *Digital terrain modeling: principles and methodology*. CRC press.
 - Marston, B. E., & Jenny, B. 2015. *Improving the representation of major landforms in analytical relief shading*. *International Journal of Geographical Information Science*, 29(7), 1144-1165.
 - Mitasova, H., & Hofierka, J. (1993). *Interpolation by regularized spline with tension: II. Application to terrain modeling and surface geometry analysis*. *Mathematical geology*, 25(6), 657-669.
 - Rich, P. M., & Fu, P. 2000. *Topoclimatic habitat models*. In *Proceedings of the fourth international conference on integrating GIS and environmental modeling* (pp. 2-8).
 - Rich, P., Dubayah, R. C., Hetrick, W., & Saving, S. 1994. *Using viewshed models to calculate intercepted solar radiation: applications in ecology*. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers*. In *American Society of Photogrammetry and Remote Sensing* (pp. 524-529).
 - Ritter, P. 1987. *A vector-based slope and aspect generation algorithm*. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53(8), 1109-1111.
 - Robinson, A. H., Morrison, J. L., Muehrcke, P. C., Kimerling, A. J., & Guptill, S. C. 1995. *Elements of Cartography—6th Ed*, 544 pp. New York, John Willey & Sons.
 - Sharpnack, D. A. 1969. *An algorithm for computing slope and aspect from elevations*. *Photogrammetric Engineering*, 35(3), 247-248.
 - Sharyi, P., & Stepanov, I. N. (1991). *On the second derivative method in geology*. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 319(2), 456-460.
 - Shary, P. A. (1995). *Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures*. *Mathematical Geology*, 27(3), 373-390.
 - Shary, P. A., Sharaya, L. S., & Mitusov, A. V. (2002). *Fundamental quantitative methods of land surface analysis*. *Geoderma*, 107(1-2), 1-32.
 - Slocum, T., McMaster, R., Kessler, F., & Howard, H. 2004. *Thematic Cartography and Geographic Visualization*. Upper Saddle River, NJ, 4.
 - Tadono, T., Ishida, H., Oda, F., Naito, S., Minakawa, K., & Iwamoto, H. 2014. *Precise global DEM generation by ALOS PRISM*. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2(4), 71.
 - Takaku, J., Tadono, T., & Tsutsui, K. 2014. *Generation of high – resolution global DSM from ALOS prism*. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2(4).
 - Tufte, E. R. 1990. *Envisioning information* (No. 511.5 T914e). Graphic Press.
 - Tzvetkov, J. (2018). *Relief visualization techniques using free and open source GIS tools*. *Polish Cartographical Review*, 50(2), 61-71.
 - Unwin, D. J. 1981. *Introductory spatial analysis* (Vol. 748). Taylor & Francis.
 - Wiechel, H. 1878. *Theorie und Darstellung der Beleuchtung von nicht gesetzmässig gebildeten Flächen mit Rücksicht auf die Bergzeichnung*. *Civilingenieur*, 24, 335-364.
 - Wilson, J. P., & Gallant, J. C. 2000. *Digital terrain analysis*. *Terrain analysis: Principles and applications*, 6(12), 1-27.
 - Yoëli, P. 1959. *Relief shading*. *Surveying and Mapping*, 19(2), 229-232.
 - Yoëli, P. 1965. *Analytical hill shading*. *Surveying and Mapping*, 25(4), 573-579.
 - Yoëli, P. 1966. *Analytical hill shading and density*. *Surveying and Mapping*, 26(2), 253-259.

- Young, M. (1978). *Terrain analysis: program documentation. Statistical characterisation of altitude matrices by computer: Report*, 5.
- Young, T. (1805). III. *An essay on the cohesion of fluids. Philosophical transactions of the royal society of London*, (95), 65-87.
- Zevenbergen, L. W., & Thorne, C. R. 1987. *Quantitative analysis of land surface topography. Earth surface processes and landforms*, 12(1), 47-56.