

مورفولوژی نوری و کاربرد آن در ژئومورفولوژی

سینا صلحی - دانشجوی دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
عبدالله سیف* - دانشیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۵/۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۳/۱۱

چکیده

ژئومورفولوژیست‌ها برای نمایش ناهمواری‌ها و اشکال ژئومورفیک سطح زمین از مدل‌های مختلفی استفاده می‌کنند؛ یکی از پرکاربردترین آن‌ها مدل سایه-روشن است که با تابش فرضی نور از یک منبع از آن برای تشخیص و نمایش عوارض مختلف ژئومورفیک و فرم‌های خطی استفاده می‌شود. ثابت‌بودن منبع نور و تنوع و پیچیدگی سطوح زمین در بسیاری مواقع مدل‌ها و الگوریتم‌های استاندارد را با محدودیت روبه‌رو و تفسیر عوارض سطح زمین را دشوار می‌کند. برای تصحیح، بهبود، و نمایش هدفمند توپوگرافی از مفهومی با نام «مورفولوژی نوری» استفاده شد. مؤلفه‌های ژئومورفولوژیکی مانند شیب، جهت شیب، فراوانی، و توزیع جهات و میزان و نوع همگرایی-واگرایی سطوح زمین مد نظر قرار گرفت. از چهارده مدل مختلف انحنای^۱ و شش مدل نوسان زوایای آزیموتی و سمت‌الرأسی برای آشکارسازی و تصحیح نمایش عوارض استفاده شد. آنالیز جهتی، مورفولوژیک، و کنتراست بر روی همه مدل‌ها انجام و با نتایج مدل استاندارد مقایسه شد و نحوه عملکرد و ارتباط هر یک با لندفرم‌ها تحلیل شد و کاربردهای رایج آن‌ها در شناسایی لندفرم‌ها تحلیل گردید. همه مدل‌ها در محیط پایتون اجرا و توسط واسط گرافیکی پایتون^۲ طراحی شد. نرم‌افزار Optical Morphology برای اجرای همه مدل‌ها ارائه شد.

کلیدواژگان: برنامه‌نویسی پایتون، ژئومورفولوژی، سایه-رنگ‌زنی محاسباتی، مورفولوژی نوری.

مقدمه

استمپاژ نوری توپوگرافی^۳ روشی برای نمایش سطح زمین به کمک اختلاف درجه روشنایی است. در این فرایند سطح زمین به صورت فرضی تحت تابش اشعه‌های نور قرار می‌گیرد و مقدار درخشندگی هر پیکسل با توجه به جهت قرارگیری و شیب آن به نسبت بردارهای نور تعیین می‌شود. موقعیت قرارگیری منبع نور معمولاً در آزیموت (زاویه افقی)^۴ ۳۱۵ درجه و ارتفاع سمت‌الرأسی (زاویه عمودی)^۵ ۴۵ درجه تنظیم می‌شود. این مقدار پیش‌فرض، در بسیاری موارد، توانایی نمایش بهینه سطح زمین را ندارد و به تصحیح و تغییر نیاز دارد. سایه‌زنی ناهمواری‌ها^۶ تکنیکی برای نمایش توپوگرافی است؛ به طوری که مستقیماً توسط کاربر قابل درک و فهم باشد (جنی و رابر، ۲۰۰۲). دلیل اهمیت نمایش توپوگرافی آن است که سایه‌زنی ناهمواری‌ها چارچوبی برای نمایش سایر عناصر نقشه فراهم می‌آورد (آیموف، ۱۹۸۲). در طی سالیان متمادی،

E-mail: a.safe@geo.ui.ac.ir

* نویسنده مسئول: ۰۹۱۳۳۲۸۹۱۳۴

1. Terrain Curvature
2. Tkinter (Graphical User Interface Programming)
3. Hill shading
4. Horizontal Angle
5. Vertical Angle
6. Digital Elevation Model (DEMs)

کارتوگراف‌ها از تکنیک‌ها و مدل‌های گوناگونی بدین منظور استفاده کرده‌اند (سربریاکوا و هورنی، ۲۰۱۴). فریودولین بکر (۱۸۵۴-۱۹۲۹) نمونه بارزی از مکتب کارتوگرافی سوئیس بود که تکنیک‌های مختلف کارتوگرافی سوئیس را جمع‌آوری و به نام روش‌های سایه‌زنی سوئیس معرفی کرد. این تکنیک‌ها شامل بهبود کنتراست ارتفاعات، کاهش کنتراست دره‌ها، نمایش مناطق کم‌ارتفاع با استفاده از طیف رنگ خاکستری، و اعمال اثر پرسپکتیو هوایی بود (جنی و رابر، ۲۰۰۲). این مجموعه روش‌ها را بعدها کارتوگراف دیگر سوئیس، به نام ادوارد ایمهوف (۱۸۹۵-۱۹۸۶)، گردآوری، اصلاح، و بازبینی کرد. در گذشته، سایه‌زنی ناهمواری‌ها به صورت دستی بر اساس تفسیر کارتوگراف از خطوط منحنی میزان تهیه می‌شد؛ اما امروزه، مدل‌های رقومی ارتفاعی^۱ باعث توسعه و گسترش استفاده از سایه‌زنی ناهمواری‌ها شده است (جنی، ۲۰۰۱b). روش محاسباتی و ریاضی سایه‌زنی به‌وضوح به‌صرفه‌تر خواهد بود؛ زیرا زمان و هزینه‌های کمتری نیاز دارد و از سایه‌زنی دستی ناهمواری‌ها علمی‌تر است (سربریاکوا و هورنی، ۲۰۱۴). در عین حال، از نظر خوانایی، جنبه‌های زیبایی‌شناختی و میزان جزئیات ناخواسته ممکن است مشکلاتی داشته باشد (جنی و رابر، ۲۰۰۲). در نتیجه، روش‌های حاضر نمی‌توانند کاملاً جای‌گزین سایه‌زنی دستی ناهمواری‌ها شوند. نخست لازم بود تکنیک‌های موجود بهبود یابد که البته در زمان نسبتاً طولانی راهکار واقعی برای جای‌گزینی سایه‌زنی دستی وجود نداشت. بنابراین، از رایانه‌ها نه‌تنها برای افزایش سرعت پردازش‌ها استفاده شد، بلکه، به منظور شبیه‌سازی، از سایه‌زنی‌های دستی نیز به دقت هر چه تمام‌تر استفاده شد (سربریاکوا و هورنی، ۲۰۱۴). از روش‌های ریاضی توصیف سطوح، از اواخر قرن نوزدهم، با به‌کارگرفتن قانون کسینوس لامبرت^۲، برای محاسبه درجه روشنایی نقاط واقع بر یک سطح استفاده شد (مولرینگ، ۲۰۱۲؛ ویچل، ۱۸۷۸). بر اساس قانون کسینوس لامبرت، درجه روشنایی نور در ارتباط با کسینوس زاویه برخورد نور است که خود تابعی از شیب و جهت قرارگیری سطح به نسبت منبع نوری است. یولی (۱۹۵۹، ۱۹۶۵، ۱۹۶۶) برای اولین بار قانون کسینوس لامبرت را در تهیه مدل‌های سایه-روشن به‌کار گرفت. این در حالی بود که ویچل (۱۸۷۸) پیشنهاد کرد محاسبه شدت نور به جای یک نقطه بر مبنای میان‌یابی بین چند نقطه مجاور انجام گیرد. بر اساس تجربیات یولی، که به دنبال تصحیح جهات نور بود (یولی، ۱۹۶۷ a)، براسل (۱۹۷۳؛ ۱۹۷۴) رویکرد پیچیده‌تری را پیشنهاد داد که در آن روش‌های بنیادین سایه‌زنی سوئیس (ایمهوف، ۱۹۸۲) را با هم ترکیب کرد. در سال‌های اخیر، جنی (۲۰۰۰؛ ۲۰۰۱ a؛ ۲۰۰۱ b) ساختاری برای تشخیص مقادیر خاکستری^۳ تصویر با استفاده از سایه‌زنی جهتی^۴ مناطق پُرشیب، انعکاس پراکنده^۵ مناطق کم‌ارتفاع، و طیف خاکستری^۶ مناطق مسطح ارائه کرد. این رویکرد جلوه نمایش مدل‌های سایه-روشن را بهبود بخشید؛ اما، به دلیل اتوماتیک‌نبودن این روش‌ها، زمان و هزینه بیشتری نیاز بود. برای مدت زمان طولانی، در تحقیقات قدیمی (تانکا، ۱۹۵۰) تا جدیدتر (هوبس، ۱۹۹۵)، ناهمواری زمین توسط منحنی‌های میزان نشان داده می‌شد. به هر حال، استفاده از منحنی‌های تراز برای بینندگان در حفظ حالت سه‌بعدی سطح زمین چندان کارآمد نیست (مارسیک، ۱۹۷۱). در حال حاضر، منحنی‌های تراز به‌سادگی با استفاده از بسته‌های نرم‌افزاری GIS^۷ قابل تهیه و ترسیم‌اند. نقشه‌کشی جهت شیب (مولرینگ و کیمرلینگ، ۱۹۹۰؛ کیمرلینگ و مولرینگ، ۱۹۸۹) رویکرد دیگری در شبیه‌سازی سایه‌زنی ناهمواری‌های زمین است. با پیشرفت‌های اواخر دهه ۱۹۸۰ میلادی، کلاس‌های جهت شیب و شیب زمین با رنگ‌های مختلف نمایش

1. Orthogonal

2. Lamberts Cosine Law

3. Gray Value

4. Directional Shading

5. Diffuse Reflection

6. Gray Tone

7. Geographic Information System

داده می‌شد. نقشه‌های جهت شیب (منابع آرک جی ای اس، ۲۰۰۸) تلاشی برای نمایش ناهمواری‌ها به حالتی متفاوت و نیز به منظور اصلاح نمایش لندفرم‌های زمین بود. رویکردهای دیگر شامل مواردی است که در ادامه به آن اشاره خواهد شد: ایجاد تصاویر سایه-روشن از سطوح خمیده (گوراد، ۱۹۷۱)؛ آنالیز شبکه‌ای سطح زمین که امکان محاسبه شیب، جهت شیب، انحناء و سایر مشخصات را برای هر سلول در ساختار رستری فراهم می‌کرد (گالت و ویلسون، ۱۹۹۶)؛ محاسبات الگوریتم شیب در مدل رقومی ارتفاعی (جونز، ۱۹۹۸)؛ رویکرد پیکسلی و لگاریتمی (کتزبیل و دویتشر، ۲۰۰۳)؛ نمایش سایه-روشن با استفاده از انحنای زمین (کنلی، ۲۰۰۸، ۲۰۰۹)؛ نوسان روشنایی رنگ‌ها و تغییرات رنگ بر اساس جهت شیب (کنلی، ۲۰۰۹)؛ کنلی و کیمرلینگ، ۲۰۰۱)؛ نورافکنی سطح زمین با استفاده از چند منبع نور (شرکت اسری، ۲۰۰۹)؛ کنلی، ۲۰۰۹)؛ کوکاس و ویبل، ۱۹۹۵)؛ ایجاد سایه-روشن توسط ترکیب جهات مختلف نورافکنی (لوئیزیوس و همکاران، ۲۰۰۷)؛ اعمال مدل‌های سماوی بر روی مدل سایه-روشن (کنلی و کیمرلینگ، ۲۰۰۴)؛ سایه‌زنی با استفاده از سایه‌های پراکنده (وار، ۱۹۸۹)؛ استفاده از بردار نور به جای بردار ثابت، به‌کارگیری تکنیک‌های تصحیح‌کننده در مدل‌های مرسوم که توسط افرادی همچون توتی و همکاران (۲۰۰۷) انجام گرفته است؛ به‌کارگیری فاکتور دید آسمان^۱ که با بخش قابل روئت آسمان و سطح توپوگرافی و درجه پراکنش نور مرتبط است (زاک سک و همکاران، ۲۰۱۱)؛ به‌کارگیری الگوریتم‌هایی که موقعیت تابش خورشید را تغییر می‌دهند (ژو، ۱۹۹۲). عده‌ای به ایجاد سایه-روشن به موازات حیطه کارتوگرافیکی توجه داشته‌اند و هدفشان از سایه‌زنی ناهمواری‌ها نمایش شکل زمین بوده است (باتسون و همکاران، ۱۹۷۵؛ هورن، ۱۹۸۱). در اواخر دهه ۱۹۷۰ و اوایل دهه ۱۹۸۰ میلادی، همبستگی و وابستگی روشنایی سطوح و جهت شیب با استفاده از نقشه انعکاس مطرح شد و روشنایی سطوح تابعی از گرادیان شیب معرفی شد و روابط بین شدت روشنایی و شکل زمین ارائه شد (هورن، ۱۹۸۱؛ هورن و جوهرگ، ۱۹۷۹). نمایش روشنایی با استفاده از رنگ‌های سه‌گانه^۲، پراکنده‌سازی منبع نور توسط نوسان عرضی اشعه‌های نور، تناوب رنگ‌ها، و تمایل منبع نور روش‌هایی هستند که از مشکلات نمایش موضعی سطح زمین جلوگیری می‌کنند (هوبس، ۱۹۹۹). یکی از جدیدترین الگوریتم‌های گرافیکی رایانه‌ای در سایه‌زنی ناهمواری‌ها منحنی‌های پراکنش^۳ است (اورزان و همکاران، ۲۰۱۳)؛ انجمن جغرافی دانان آمریکا، ۲۰۱۴). این الگوریتم بر روی خط‌الرأس‌ها اعمال می‌شود و تصاویر سایه-روشن نرم‌تری ایجاد می‌کند که منحنی‌های پراکنش نامیده می‌شوند؛ این منحنی‌ها فضا را قطع‌بندی می‌کنند و رنگ‌های متفاوتی در هر دو جناح خط‌الرأس ایجاد می‌کنند. روش‌های دیگری برای برجسته‌سازی عوارض سطح زمین ارائه شده است. مثلاً، روش شاخص دید چندجهتی^۴ عوارض سطح زمین را با درگیر کردن چندین منبع نوری بارزسازی می‌کند (پودوبنیکار، ۲۰۱۲). سایه‌زنی ناهمواری‌ها می‌تواند با نرم‌افزارهای گرافیکی، نرم‌افزارهای دربردارنده فیلترها، بافت‌نگاری و رقومی‌سازی دستی انجام پذیرد که یکی از شاخص‌ترین ابزارهای موجود در این زمینه نرم‌افزار فتوشاپ است (جنی، ۲۰۰۹)؛ رایبسون و تروئر، ۱۹۵۷؛ جنی و رابر، ۲۰۰۲)؛ پاترسون، ۲۰۱۴). سایه‌زنی رنگی ناهمواری‌ها با روش دیجیتالی و با استمپاژ رنگ بر روی مدل سایه-روشن قابل اجراست؛ بدین صورت که رنگ‌ها بر اساس ارتفاع و نوسانات سطح توزیع می‌شوند (جنی و هورنی، ۲۰۰۶). در این پژوهش، مجموعه روش‌ها، مدل‌ها، و تکنیک‌هایی که با استفاده از منبع نور و ایجاد کنتراست بین سطوح توپوگرافی، لندفرم‌ها، و عوارض مورفولوژیک زمین را آشکارسازی می‌کنند معادل با واژه مورفولوژی نوری در نظر گرفته شد. با در نظر گرفتن سوابق مطالعاتی موجود، از مدل‌ها و ایده‌های مطرح‌شده در تصحیح و ارتقای کیفیت نمایش لندفرم‌های

1. Sky View

2. Red-Green-Blue (RGB)

3. Diffusion Curve Algorithm

4. Multidirectional Visibility Index

زمین استفاده شد. استفاده از نور در بارزسازی و نمایش لندفرم‌ها و عوارض مورفولوژیکی زمین با عنوان مورفولوژی نوری انجام خواهد گرفت. روش‌ها و تکنیک‌های موجود در این حیطه مطالعاتی تحلیل و بررسی می‌شوند و ترکیب و تغییر می‌یابند و سرانجام در محیط برنامه‌نویسی پایتون اجرا و کدنویسی و به صورت نرم‌افزار گرافیکی ارائه می‌شوند. در این راستا، از عوارض و لندفرم‌های متنوع موجود در عرصه ایران، شامل لندفرم‌هایی تکتونیکی، هیدروژئومورفولوژی، بادی، مخروط‌افکنه، و گسل، استفاده شد.

مواد و روش‌ها

سایه‌زنی ناهمواری‌ها^۱ با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی در محیط GIS انجام می‌گیرد. از داده‌های رقومی سطحی^۲ منتشرشده توسط آژانس فضایی ژاپن در ماه می و اکتبر ۲۰۱۵ با رزولوشن افقی در حدود ۲۳ متر برای بررسی توپوگرافی منطقه استفاده می‌شود. این داده‌ها از تصاویر ماهواره ALOS به‌دست آمده‌اند (تاکاکو و همکاران، ۲۰۱۴) و از شبکه داده‌های رقومی سطحی با قدرت تفکیک مکانی پنج متر و با پوشش جهانی استخراج شده‌اند. که در حال حاضر دقیق‌ترین داده‌های ارتفاعی در مقیاس بزرگ هستند (تادونو و همکاران، ۲۰۱۴). سایه‌زنی ناهمواری‌ها در محیط GIS با استفاده از رابطه ۱ انجام می‌گیرد (جنی و رابر، ۲۰۰۲).

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

که در این فرمول Ze زاویه سمت‌الرأسی یا عمودی، S زاویه شیب سطح زمین، Az زاویه آزیموتی یا افقی، و As جهت شیب سطح زمین است. ذکر این نکته لازم است که همه متغیرهای فوق به واحد رادیان است. شکل ۱ قطعه کد پایتون تهیه‌شده برای پردازش ساختار رستری است و شکل ۲ مربوط به اجرای مدل سایه-روشن بر اساس رابطه ۱ است.

```
# Row and Column
row = DEM.shape[0] ; column = DEM.shape[1]
r_code = 0
for r in range(row-2):
    r_code+=1
    c_code = 0
    for c in range(column-2):
        #Moving window Definition (3x3)
        c_code+=1
        center = DEM[r_code,c_code] ; N =DEM[r_code-1,c_code]
        NE =DEM[r_code-1,c_code+1] ; NW =DEM[r_code-1,c_code-1]
        S =DEM[r_code+1,c_code] ; SE =DEM[r_code+1,c_code+1]
        SW =DEM[r_code+1,c_code-1] ; W =DEM[r_code,c_code-1]
        E =DEM[r_code+1,c_code]
        z1 = NW ; a = NW ; z4 = W ; d = W ; z7 = SW ; g = SW
        z2 = N ; b = N ; z5 = center ; e = center ; z8 = S ; h = S
        z3 = NE ; c = NE ; z6 = E ; f = E ; z9 = SE ; i = SE
```

شکل ۱. قطعه کد پایتون مربوط به پردازش ساختارهای رستری با استفاده از فایل ASCII

```

Azimuth = 315.0 ; z_factor = 1.0
Zenith_deg = 90-Altitude
Zenith_rad = Zenith_deg*(math.pi/180.0)
Azimuth_math = 360.0 - Azimuth + 90
if Azimuth_math >= 360.0:
    Azimuth_math = Azimuth_math-360.0
Azimuth_rad = Azimuth_math * math.pi/180.0
dz_dx = ((c+2*f+i)-(a+2*d+g))/(8*cellsize)
dz_dy = ((g+2*h+i)-(a+2*b+c))/(8*cellsize)
Slope_rad = math.atan(z_factor*((dz_dx)**2+(dz_dy)**2)**0.5)
if dz_dx != 0:
    Aspect_rad = math.atan2(dz_dy,-1*dz_dx)
    if Aspect_rad < 0:
        Aspect_rad = 2*math.pi+Aspect_rad
if dz_dx == 0:
    if dz_dy>0:
        Aspect_rad = math.pi/2
    elif dz_dy<0:
        Aspect_rad = (2*math.pi)-(math.pi/2)
    else:
        Aspect_rad = Aspect_rad
Hillshade_value = 255.0*((math.cos(Zenith_rad)*math.cos(Slope_rad))+\
    (math.sin(Zenith_rad)*math.sin(Slope_rad)\
    *math.cos(Azimuth_rad-Aspect_rad)))
if Hillshade_value < 0:
    Hillshade_value = 0
Hillshade.write(str(Hillshade_value)+' ')
Hillshade.write('\n')
Hillshade.close()

```

شکل ۲. قطعه کد پایتون مربوط به محاسبه Hill-shade در ساختار رستری با پنجره متحرک ۳ در ۳ پیکسل

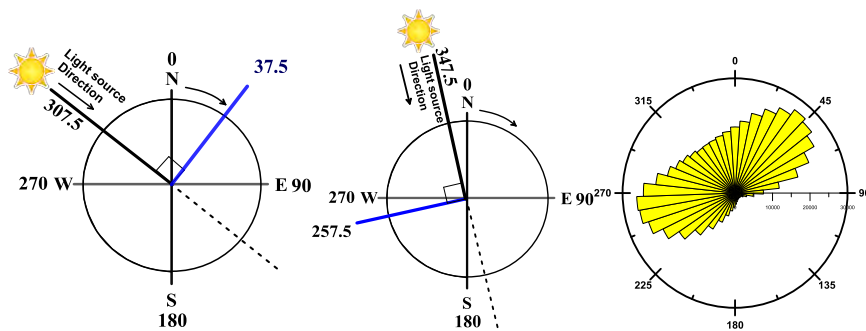
تصحیح آزیموت بر اساس آنالیز توزیع فراوانی جهت شیب (AFDA)^۱

بر اساس ایده‌های مطرح‌شده در کارهای محققان پیشین (شرکت اسری، ۲۰۰۹؛ کنلی، ۲۰۰۹؛ کوکاس و ویبل ۱۹۹۵؛ ژو، ۱۹۹۲؛ ژو و دورر، ۱۹۹۵)، توزیع فراوانی جهت شیب زمین به عنوان مبنای تعیین زاویه آزیموتی منبع نور در نظر گرفته شد. در این مدل، زاویه آزیموتی منبع نور عمود بر جهت با بیشترین فراوانی قرار می‌گیرد. رابطه ۲ نحوه محاسبه زاویه آزیموتی منبع نور در تهیه مدل‌های سایه-روشن را نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned}
 \text{If } As_{\max}(f) \geq 0 \text{ and } \leq 90 &\rightarrow Az = As_{\max}(f) + 270 \\
 \text{If } As_{\max}(f) > 90 \text{ and } < 270 &\rightarrow Az = As_{\max}(f) + 90 \\
 \text{If } As_{\max}(f) \geq 270 \text{ and } < 360 &\rightarrow Az = As_{\max}(f) - 90
 \end{aligned}
 \quad (2)$$

که در این رابطه Az آزیموت تابش نور، As جهت شیب زمین، و $As_{\max}(f)$ حداکثر فراوانی جهت شیب زمین است. توزیع فراوانی جهت شیب می‌تواند تک-مدی^۲، دو-مدی^۳ یا چند-مدی^۴ باشد که، با توجه به هر یک از این حالات، استراتژی خاصی در پیش گرفته می‌شود. در حالت تک-مدی جهت تابش آزیموتی عمود بر جهت با بیشترین توزیع فراوانی در نظر گرفته می‌شود. در حالت دو-مدی، جهت آزیموتی عمود بر هر دو مد قرار داده می‌شود و نتایج با روش میانگین با هم تلفیق می‌شوند. در حالت چند-مدی نیز مراحل به همین منوال خواهد بود. شکل ۳ توزیع فراوانی جهت شیب به صورت دو-مدی است: مد اول برابر با جهت ۳۷/۵ و مد دوم معادل ۲۵۷/۵ درجه است. با استفاده از مدل AFDA جهت آزیموتی تابش منبع نور به ترتیب برابر با ۳۰۷/۵ و ۲۵۷/۵ است. در نتیجه، مدل سایه-روشن با هر یک از این دو جهت ترسیم می‌شود و با روش میانگین با یکدیگر تلفیق می‌شوند (شکل ۳). قطعه‌ای از منبع کد مربوط به اجرای مدل AFDA در شکل ۴ درج شده است.

1. Aspect Frequency Distribution Analysis
2. Modal
3. Bi-Modal
4. Multi-Modal



شکل ۳. مدل شماتیک تصحیح آزیموت با استفاده از مدل آنالیز توزیع فراوانی جهت شیب

```

Z1 = NW ; a = NW ; Z4 = W ; d = W ; Z7 = SW ; g = SW
Z2 = N ; b = N ; Z5 = center ; e = center ; Z8 = S ; h = S
Z3 = NE ; c = NE ; Z6 = E ; f = E ; Z9 = SE ; i = SE
dz_dx = ((c+2*f+i)-(a+2*d+g))/(8*cellsize)
dz_dy = ((g+2*h+i)-(a+2*b+c))/(8*cellsize)
Slope_rad = math.atan(z_factor*((dz_dx)**2+(dz_dy)**2)**0.5)
if dz_dx != 0:
    Aspect_rad = math.atan2(dz_dy,-1*dz_dx)
    if Aspect_rad < 0:
        Aspect_rad = 2*math.pi+Aspect_rad
if dz_dx == 0:
    if dz_dy>0:
        Aspect_rad = math.pi/2
    elif dz_dy<0:
        Aspect_rad = (2*math.pi)-(math.pi/2)
    else:
        Aspect_rad = Aspect_rad
Aspect_deg = Aspect_rad*(180.0/math.pi)
if Aspect_deg>=Angle_start and Aspect_deg< Angle_end:
    list_aspect_count[aspects]+=1
index_max = list_aspect_count.index(max(list_aspect_count))
Aspect_Max = 0
for i in range(int(index_max)):
    Aspect_Max+=5
if Aspect_Max>=0 and Aspect_Max<=90:
    Aspect_Max+=270.0
elif Aspect_Max>90 and Aspect_Max<270.0:
    Aspect_Max+=90.0
elif Aspect_Max>=270.0 and Aspect_Max<= 360.0:
    Aspect_Max-=90.0
Azimuth = Aspect_Max

```

شکل ۴. بخشی از کد پایتون برای محاسبه مدل AFDA

مدل منبع نور چندجهته غیروزنی (UMDLS)^۱

با توجه به ایده لوئیزیوس و همکاران (۲۰۰۷)، که از ترکیب جهات نورافکنی برای اصلاح و بهبود نمایش مدل‌های سایه-روشن استفاده کردند، مدل ترکیبی جهات آزیموتی بدون وزن تعریف شد. در این مدل نور در جهات مختلف بر روی سطح توپوگرافی تابانده می‌شود تا از این طریق ناهمواری‌های زمین و لندفرم‌ها بهتر نمایش داده شود. بدین صورت

که آزیموت‌های ۱۸۰ تا ۳۶۰ درجه با گام ۱ درجه‌ای برای ایجاد مدل سایه-روشن استفاده می‌شود و با تلفیق آن‌ها با استفاده از روش میانگین حسابی مدل آزیموتی بدون وزن به دست می‌آید. رابطه ۳ روش اجرای مدل را نشان می‌دهد.

$$H_{UMDLS} = \frac{\sum_{i=180}^{360} H_i}{180} \quad (3)$$

که در این فرمول H_{UMDLS} مدل منبع نور چندجهته غیروزنی و H_i مدل سایه-روشن تهیه شده با آزیموت تابش نور (i) است. شکل ۵ بخشی از کد پایتون مربوط به اجرای مدل UMDLS را نشان می‌دهد.

```
# UMDLS Model]
Altitude = 45.0 ; z_factor = 1.0
Azimuth = 0
r_code = 0
for r in range(row-2):
    r_code+=1
    c_code = 0
    print 'Process Done = ', (r_code/float(row))*100.0
    for c in range(column-2):
        Mean_Hillshade_Value = 0.0
        for Directions in range(180,361):
            Azimuth+=1
            #Moving window Definition (3x3)
            c_code+=1
            center =DEM[r_code,c_code] ; N =DEM[r_code-1,c_code]
            NE =DEM[r_code-1,c_code+1] ; NW =DEM[r_code-1,c_code-1]
            S =DEM[r_code+1,c_code] ; SE =DEM[r_code+1,c_code+1]
            SW =DEM[r_code+1,c_code-1] ; W =DEM[r_code,c_code-1]
            E =DEM[r_code+1,c_code]
            E1 = NW ; a = NW ; E4 = W ; d = W ; E7 = SW ; g = SW
            E2 = N ; b = N ; E5 = center ; e = center ; E8 = S ; h = S
            E3 = NE ; c = NE ; E6 = E ; f = E ; E9 = SE ; i = SE
            Senith_deg = 90-Altitude
            Senith_rad = Senith_deg*(math.pi/180.0)
            Azimuth_math = 360.0 - Azimuth + 90
            if Azimuth_math >= 360.0:
                Azimuth_math = Azimuth_math-360.0
            Azimuth_rad = Azimuth_math * math.pi/180.0
            ds_dx = ((c+2*f+i)-(a+2*d+g))/(8*cellsize)
            ds_dy = ((g+2*h+i)-(a+2*b+c))/(8*cellsize)
            Slope_rad = math.atan(z_factor*((ds_dx)**2+(ds_dy)**2)**0.5)
            if ds_dx != 0:
                Aspect_rad = math.atan2(ds_dy,-1*ds_dx)
                if Aspect_rad < 0:
                    Aspect_rad = 2*math.pi+Aspect_rad
            if ds_dx == 0:
                if ds_dy>0:
                    Aspect_rad = math.pi/2
                elif ds_dy<0:
                    Aspect_rad = (2*math.pi)-(math.pi/2)
                else:
                    Aspect_rad = Aspect_rad
            Hillshade_value = 255.0*(math.cos(Senith_rad)*math.cos(Slope_rad))+\
                (math.sin(Senith_rad)*math.sin(Slope_rad)*math.cos(Azimuth_rad-Aspect_rad))
```

شکل ۵. بخشی از کد پایتون مربوط به مدل UMDLS

مدل منبع نور چندجهته وزنی (WMDLS)^۱

در این مدل وزن مورد استفاده تعداد پیکسل‌هایی است که دقیقاً در مقابل جهت آزیموتی قرار می‌گیرد. تعداد پیکسل‌هایی که در مقابل جهت تابش نور قرار می‌گیرد به عنوان وزن مستقیم و معکوس استفاده شد. رابطه‌های ۴ و ۵ به ترتیب بیان ریاضی مدل منبع نور چندجهته وزنی مستقیم و معکوس را نشان می‌دهند.

$$H_{WMDLS-direct} = \frac{\sum_{i=180}^{360} H_i \times \frac{1}{As_i}}{\sum As} \quad (4)$$

که در این فرمول، $H_{WMDLS-direct}$ مدل وزنی چندجهته مستقیم، H_i مدل سایه-روشن با جهت آزیموتی تابش i در واحد درجه، و AS_i تعداد پیکسل‌های مقابل به جهت آزیموتی i است.

$$H_{WMDLAS-Reverse} = \frac{\sum_{i=180}^{360} H_i \times AS_i}{\sum AS_i} \quad (5)$$

که در این فرمول، $H_{WMDLAS-Reverse}$ مدل وزنی چندجهته معکوس، H_i مدل سایه-روشن با جهت آزیموتی تابش i در واحد درجه، و AS_i تعداد پیکسل‌های مقابل به جهت آزیموتی i است.

مدل تابندگی منبع نور قائم (VLSI)

روش دیگر در کاهش اثر جهتی مدل‌های سایه-روشن استفاده از منبع نور قائم است. روش تهیه این مدل در رابطه‌های ۶-۸ نشان داده شده است.

$$H_{VLSI} = (H_{Alt90}) \times (H_S \text{ or } H_M) \quad (6)$$

$$H_{VLSI} = \frac{(H_{Alt90}) + (H_S \text{ or } H_M)}{2} \quad (7)$$

$$H_{VLSI} = \frac{(H_{Alt90} \times W) + (H_S \text{ or } H_M)}{W+1} \quad (8)$$

که در این فرمول، H_{VLSI} مدل تابندگی منبع نور قائم، H_{Alt90} مدل سایه-روشن با ارتفاع منبع نور ۹۰ درجه، H_S مدل سایه-روشن استاندارد (ارتفاع ۴۵ درجه و آزیموت ۳۱۵ درجه)، H_M مدل سایه-روشن تصحیح‌شده، و W وزن اثرگذاری مدل تابندگی منبع نور قائم در نتایج خروجی است. در شکل ۶ کد پایتون به منظور محاسبه مدل VLSI نشان داده شده است.

```
# SSM Model = Slope Shading Model
Azimuth = 315.0
Azimuth = 315.0
Zenith_deg = 90-Altitude
Zenith_rad = Zenith_deg*(math.pi/180.0)
dz_dx = ((c+2*f+i)-(a+2*d+g))/(8*cellsize)
dz_dy = ((g+2*h+i)-(a+2*b+c))/(8*cellsize)
Slope_rad = math.atan(z_factor*((dz_dx)**2+(dz_dy)**2)**0.5)
Slope_deg = Slope_rad * (180.0/math.pi)
if dz_dx != 0:
    Aspect_rad = math.atan2(dz_dy,-1*dz_dx)
    if Aspect_rad < 0:
        Aspect_rad = 2*math.pi+Aspect_rad
if dz_dx == 0:
    if dz_dy>0:
        Aspect_rad = math.pi/2
    elif dz_dy<0:
        Aspect_rad = (2*math.pi)-(math.pi/2)
    else:
        Aspect_rad = Aspect_rad
Azimuth_math = 360.0 - Azimuth + 90
if Azimuth_math >= 360.0:
    Azimuth_math= Azimuth_math-360.0
Azimuth_rad = Azimuth_math * math.pi/180.0
Hillshade_value = 255.0*((math.cos(Zenith_rad)*math.cos(Slope_rad))+\
(math.sin(Zenith_rad)*math.sin(Slope_rad)*math.cos(Azimuth_rad-Aspect_rad)))
if Hillshade_value <0:
    Hillshade_value = 0
```

شکل ۶. بخشی از کد پایتون مربوط به مدل VLSI

مدل اثر سایه شیب (SSM)^۱

در این مدل، نقشه شیب با مدل سایه-روشن استاندارد به صورت وزنی میانگین گرفته می‌شود. تأثیر سایه نقشه شیب به بهبود نمایش توپوگرافی زمین کمک می‌کند. شکل ۷ بخشی از کد پایتون برای محاسبه مدل SSM را نشان می‌دهد. رابطه ۹ نحوه محاسبه این مدل را نشان می‌دهد.

$$H_{SSM} = \frac{(S \times W) + (H_S \text{ or } H_M)}{W+1} \quad (9)$$

که در این فرمول، S نقشه شیب و W وزن اثرگذاری سایه شیب در نتایج خروجی است که می‌تواند عدد ۱ و بیشتر تعیین شود. H_S مدل سایه-روشن استاندارد (یا پیش فرض) و H_M مدل سایه-روشن تصحیح شده با هر یک از مدل‌های موجود است.

```
# SSM Model = Slope Shading Model
Azimuth = 315.0
Azimuth = 315.0
Zenith_deg = 90-Altitude
Zenith_rad = Zenith_deg*(math.pi/180.0)
dz_dx = ((c+2*f+i)-(a+2*d+g))/(8*cellsize)
dz_dy = ((g+2*h+i)-(a+2*b+c))/(8*cellsize)
Slope_rad = math.atan(z_factor*((dz_dx)**2+(dz_dy)**2)**0.5)
Slope_deg = Slope_rad * (180.0/math.pi)
if dz_dx != 0:
    Aspect_rad = math.atan2(dz_dy, -1*dz_dx)
    if Aspect_rad < 0:
        Aspect_rad = 2*math.pi+Aspect_rad
if dz_dx == 0:
    if dz_dy>0:
        Aspect_rad = math.pi/2
    elif dz_dy<0:
        Aspect_rad = (2*math.pi)-(math.pi/2)
    else:
        Aspect_rad = Aspect_rad
Azimuth_math = 360.0 - Azimuth + 90
if Azimuth_math >= 360.0:
    Azimuth_math= Azimuth_math-360.0
Azimuth_rad = Azimuth_math * math.pi/180.0
Hillshade_value = 255.0*(math.cos(Zenith_rad)*math.cos(Slope_rad))+\
(math.sin(Zenith_rad)*math.sin(Slope_rad)*math.cos(Azimuth_rad-Aspect_rad))
```

شکل ۷. بخشی از کد پایتون مربوط به مدل SSM

مدل منبع تابش نوسانی با استفاده از معادله نوسان سینوسی (SLSF)^۲

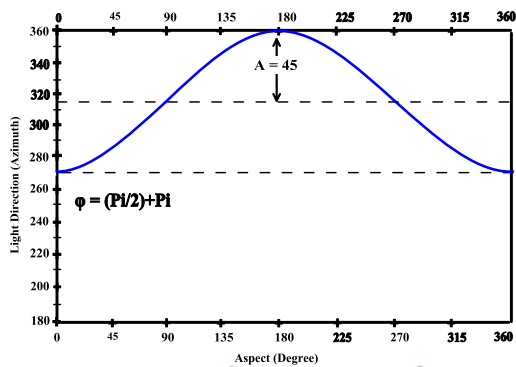
در این مدل با استفاده از معادلات نوسان‌ساز سینوسی منبع تابش نور را تابعی نوسانی از جهت شیب زمین قرار می‌دهند تا از این طریق بتوان نوعی تغییرات نوسانی در منبع تابش نور بسته به تغییرات جهت شیب زمین ایجاد کرد (ورنوسی و هورنی، ۲۰۱۵). فرم این معادله سینوسی در رابطه ۱۰ ملاحظه می‌شود:

$$Az=A \times \sin(\theta+\varphi) + \Delta \quad (10)$$

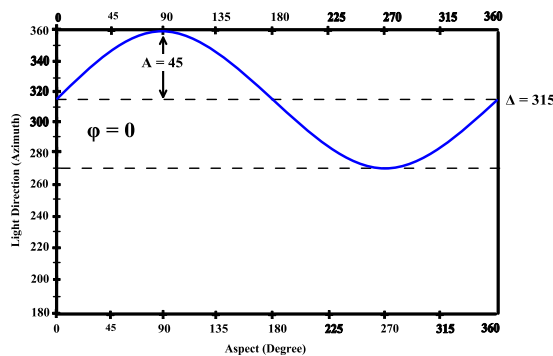
که در این فرمول، A ، θ ، φ ، و Δ به ترتیب آزیموت جهت تابش نور، شدت موج (ارتفاع موج)، جهت شیب زمین به درجه، جابه‌جاکننده افقی، و جابه‌جاکننده عمودی است. ورنوسی و هورنی (۲۰۱۵) از معادله نوسانی سینوسی در بازه 2π استفاده کردند. آن‌ها ارتفاع نوسان موج سینوسی را معادل ۱۷٫۵ درجه در نظر گرفتند. از معادله ورنوسی و هورنی (۲۰۱۵) برای تصحیح و ارتقای کیفیت نمایش مدل سایه-روشن با اعمال تغییراتی استفاده شد. بدین صورت که نوسات ارتفاع

1. Slope Shading Model
2. Sinusoidal Light Source fluctuation

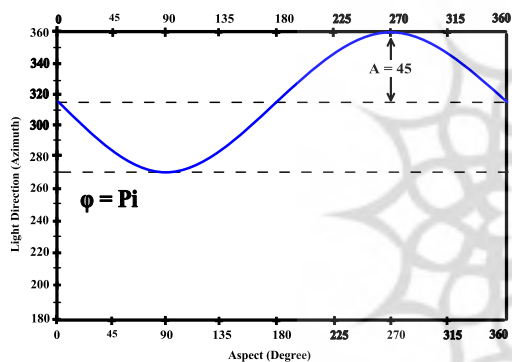
موج سینوسی معادل ۴۵ درجه در نظر گرفته شد و این معادله به بازه‌های $\varphi = \pi$ ، $\varphi = \frac{\pi}{2}$ ، $\varphi = \frac{\pi}{2} + \pi$ ، $\varphi = 0$ شکست و از هر بخش به طور مجزا استفاده شد. معادلات به دست آمده و پارامترهای مربوطه در شکل‌های ۸ و ۹ شده است.



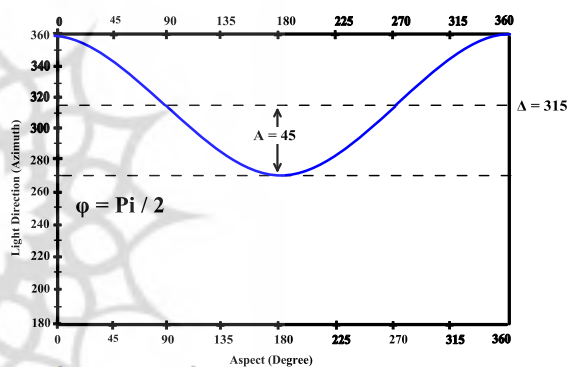
$$Az = 45 \times \sin\left(A_{Rad} + \left(\frac{\pi}{2} + \pi\right)\right) + 315$$



$$Az = 45 \times \sin(A_{Rad}) + 315$$



$$Az = 45 \times \sin(A_{Rad} + \pi) + 315$$



$$Az = 45 \times \sin\left(A_{Rad} + \left(\frac{\pi}{2}\right)\right) + 315$$

```
# SLSF modeling
# Stage 1
Azimuth_stage_1 = Azimuth_stage_1*(math.pi / 180.0)
Azimuth_stage_2 = Azimuth_stage_2*(math.pi / 180.0)
Azimuth_stage_3 = Azimuth_stage_3*(math.pi / 180.0)
Azimuth_stage_4 = Azimuth_stage_4*(math.pi / 180.0)
Hillshade_stage_1 = 255.0*((math.cos(Zenith_rad)*math.cos(Slope_rad))+\
(math.sin(Zenith_rad)*math.sin(Slope_rad)*math.cos(Azimuth_stage_1-Aspect_rad)))
if Hillshade_stage_1 < 0:
    Hillshade_stage_1 = 0
# Stage 2
Hillshade_stage_2 = 255.0*((math.cos(Zenith_rad)*math.cos(Slope_rad))+\
(math.sin(Zenith_rad)*math.sin(Slope_rad)*math.cos(Azimuth_stage_2-Aspect_rad)))
if Hillshade_stage_2 < 0:
    Hillshade_stage_2 = 0
# Stage 3
Hillshade_stage_3 = 255.0*((math.cos(Zenith_rad)*math.cos(Slope_rad))+\
(math.sin(Zenith_rad)*math.sin(Slope_rad)*math.cos(Azimuth_stage_3-Aspect_rad)))
if Hillshade_stage_3 < 0:
    Hillshade_stage_3 = 0
# Stage 4
Hillshade_stage_4 = 255.0*((math.cos(Zenith_rad)*math.cos(Slope_rad))+\
(math.sin(Zenith_rad)*math.sin(Slope_rad)*math.cos(Azimuth_stage_4-Aspect_rad)))
if Hillshade_stage_4 < 0:
    Hillshade_stage_4 = 0
# Writting results
Stage_1.write(str(Hillshade_stage_1)+' ')
Stage_2.write(str(Hillshade_stage_2)+' ')
Stage_3.write(str(Hillshade_stage_3)+' ')
Stage_4.write(str(Hillshade_stage_4)+' ')
Standard.write(str(Hillshade_standard_values)+' ')
```

شکل ۱۰. بخشی از کد پایتون مربوط به مدل SLSF

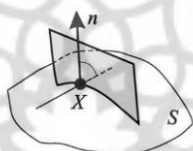
شکل ۱۰ بخشی از کد پایتون تهیه شده به منظور محاسبه مدل SLSF را نشان می دهد. هر یک از معادلات فوق بخشی از معادله موج سینوسی است که در بازه تغییرات جهت شیب ناهمواری ها قرار داده شده است.

سایه - رنگ زنی^۱ با استفاده از انحنا^۲ زمین^۳

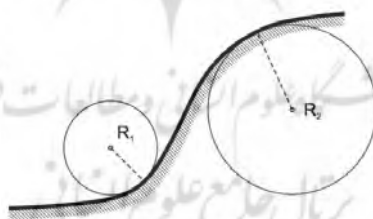
یکی از پارامترهایی که میزان واگرایی و همگرایی سطوح را در جهات مختلف تعیین می کند انحنا^۳ زمین است. یک مفهوم مهم در شناسایی وضعیت هندسی انحنا منحنی مماس^۳ بر سطح است (شکل ۱۱). صفحه قائم عمود به انحنایی است که به صورت $1/r$ تعریف می شود. شعاع دایره ای است که بهترین انطباق را با انحنا در نقطه مفروض دارد (شکل ۱۲). انحنا^۳ k بر صفحه $Z(x)$ از رابطه^{۱۱} محاسبه می شود:

$$k = \frac{\frac{d^2 z}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{1.5}} \quad (11)$$

برای محاسبه انحنا^۳ یک سطح ناهموار، صفحه ای بر روی انحنا قرار داده می شود و با استفاده از رابطه^{۱۱} مشتق جزئی اول و دوم انحنا^۳ مورد نظر به صورت تابع $f(p,q,r,s,t)$ محاسبه می شود.



شکل ۱۱. صفحه عمود بر سطح S در نقطه X انحنایی ناشی از مماس سطح S با صفحه ای است که به طور عمودی از بردار n عبور کرده و به سطح S متعامد است. شکل فوق یک نمونه از منحنی مماس صفحه و سطح را نشان می دهد و با چرخش صفحه حول محور n می توان منحنی های مماس بیشتری نیز ایجاد کرد.

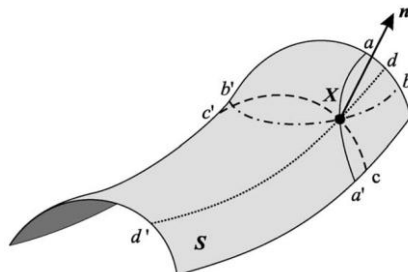


شکل ۱۲. انحنا^۳ $1/r$ صفحه منحنی معکوس شعاع دایره ای است که بهترین انطباق را با این انحنا در نقطه مفروض دارد. به طور قراردادی در علوم زمین، علامت انحنا برای سطوح محدب مثبت ($R2 > 0$) و برای سطوح مقعر منفی ($R1 < 0$) در نظر گرفته می شود.

یک راه مؤثر برای نشان دادن انحناها بر روی شیب انتخاب برخی جهات خاص است (شری و همکاران، ۲۰۰۲). چهار نوع جهت انتخابی بر روی سطوح وجود دارد که می توان از آن ها استفاده کرد (شکل ۱۳). دو نوع از این جهات aa' و bb' به طور فیزیکی توسط میدان جاذبه زمین تعریف می شود و دو جهت دیگر توسط خود سطح تعریف می گردد؛ به گونه ای که cc' حداکثر مقدار انحنا^۳ منحنی مماس و dd' حداقل مقدار آن است. انحنا^۳ مربوط به این جهات به عنوان

1. Hillshading
2. Terrain Curvature
3. Normal Section

انحنای پروفیل (یا عمودی) و انحنای تانژانتی (یا افقی) می‌توانند به صورت محلی برای برآورد تحدب و تقعر مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ۱۳. چهار جهت نرمال بر روی سطح S، n بردار نرمال به سطح S در نقطه X، خط گرادیان، aa' خط کانتور، bb' و cc' منحنی‌های مماس اصلی می‌باشند (شری و همکاران، ۲۰۰۲)

انحنای تانژانتی مقعر نشان‌دهنده همگرایی و انحنای تانژانتی محدب نشان‌دهنده واگرایی خطوط جریانی و انحنای پروفیلی محدب نماینده تسریع جریان است. انحنای پروفیلی، تانژانتی، حداکثر، و حداقل به ترتیب از منحنی‌های مماس aa' ، bb' ، cc' و dd' به دست می‌آیند. از نشان‌گذاری ذیل برای محاسبه انحنای استفاده می‌شود (رابطه ۱۲).

$$r = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}, s = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}, t = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \quad (12)$$

مقادیر r ، s ، t ، p و q در ساختار پردازش‌های رستری با پنجره متحرک به ابعاد ۳ در ۳ سطر و ستون (شکل ۱۴) با استفاده از رابطه‌های ۱۳-۱۸ به دست آمد.

Z1	Z2	Z3
Z4	Z5	Z6
Z7	Z8	Z9

شکل ۱۴. پنجره متحرک به منظور پردازش رستری با ابعاد ۳ در ۳ سطر و ستون

$$r = \frac{Z_1 + Z_3 + Z_4 + Z_6 + Z_7 + Z_9 - 2 \cdot (Z_2 + Z_5 + Z_8)}{3 \cdot \Delta s} \quad (13)$$

$$s = \frac{Z_3 + Z_7 - Z_1 - Z_9}{4 \cdot \Delta s^2} \quad (14)$$

$$t = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_7 + Z_8 + Z_9 - 2 \cdot (Z_4 + Z_5 + Z_6)}{3 \cdot \Delta s^2} \quad (15)$$

$$p = \frac{\partial z}{\partial x}, q = \frac{\partial z}{\partial y} \quad (16)$$

$$p = \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{Z_3 + Z_6 + Z_9 - Z_1 - Z_4 - Z_7}{6 \times \Delta s} \quad (17)$$

$$q = \frac{\partial z}{\partial y} = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 - Z_7 - Z_8 - Z_9}{6 \times \Delta s} \quad (18)$$

با توجه به نشان گذاری های فوق، انحنا ی پروفیلی با استفاده از رابطه ۱۹ (یانگ، ۱۹۷۸؛ کرچو، ۱۹۷۳) به دست آمد.

$$\text{Profile Curvature} = -\frac{p^2.r+2p.q.r.s+q^2.t}{(p^2+q^2)\sqrt{(1+p^2+q^2)}} \quad (19)$$

انحنا ی تانژانتی با استفاده از رابطه ۲۰ (کرچو، ۱۹۸۳؛ شری، ۱۹۹۱؛ میتاسوا و هوفیرکا، ۱۹۹۳) محاسبه شد.

$$\text{Tangential Curvature} = -\frac{q^2.r-2p.q.s+p^2.t}{(p^2+q^2)\sqrt{(1+p^2+q^2)}} \quad (20)$$

انحنا ی کانتوری که به انحنا ی پلان نیز معروف است از رابطه ۲۱ (کرچو، ۱۹۷۳؛ ایوانس، ۱۹۷۲) محاسبه شد.

$$\text{Plan Curvature} = -\frac{q^2.r-2p.q.s+q^2.t}{\sqrt{(1+p^2+q^2)^3}} \quad (21)$$

انحنا ی متوسط عبارت از میانگین انحنا های متعامد در همه منحنی های تماس است که می تواند از انحنا ی پروفیلی و تانژانتی محاسبه شود (یانگ، ۱۸۰۵). رابطه های ۲۲ و ۲۳ روش محاسبه انحنا ی متوسط را نشان می دهند.

$$\text{Mean Curvature} = \frac{\text{Profile Curvature} + \text{Tangential Curvature}}{2} \quad (22)$$

$$\text{Mean Curvature} = \frac{q^2.r-2p.q.s+p^2.t}{(p^2+q^2)\sqrt{1+p^2+q^2}} - \frac{(1+q^2).r-2p.q.s+(1+p^2).t}{2(1+p^2+q^2)^{3/2}} \quad (23)$$

انحنا ی متوسط نشان دهنده متوسط تحدب زمین است که می تواند به طور خاص برای مطالعات ژئومورفولوژیکی استفاده شود. مقادیر مثبت انحنا ی متوسط در ارتباط با مناطق دارای تجمع سطحی است؛ در حالی که مقادیر منفی در مناطق دارای واگرایی نمایش داده می شوند (شری، ۱۹۹۵). شری سیستمی از دوازده نوع انحنا پیشنهاد می کند که سه انحنا ی متوسط، غیرکروی، و دیفرانسیلی برای محاسبه ۹ انحنا ی دیگر استفاده می شود. انحنا ی انحراف کروی بر اساس روش شری (۱۹۹۵) با استفاده از رابطه ۲۴ محاسبه شد.

$$\text{Unsphericity Curvature} = \frac{\sqrt{\left(r \sqrt{\frac{1+q^2}{1+p^2}} - t \sqrt{\frac{1+p^2}{1+q^2}} \right)^2 (1+p^2+q^2) + \left(p.q.r \sqrt{\frac{1+p^2}{1+q^2}} - 2.s.\sqrt{(1+q^2).(1+p^2)} + p.q.t \sqrt{\frac{1+p^2}{1+q^2}} \right)^2}}{2.(1+p^2+q^2)^{3/2}} \quad (24)$$

انحنا ی انحراف کروی نشان دهنده اختلاف سطح به نسبت کره است و در نتیجه دارای مقدار ۰ برای شکلی کروی است. انحنا ی دیفرانسیلی به صورت نیمی از تفاضل بین انحنا ی افقی و عمودی تعریف می شود. برای محاسبه این نوع انحنا از رابطه ۲۵ استفاده شد (شری، ۱۹۹۵).

$$\text{Differential Curvature} = \frac{q^2.r-2p.q.s+p^2.t}{(p^2+q^2).(1+p^2+q^2)^{3/2}} - \frac{(1+q^2).r-2p.q.s+(1+p^2).t}{2(1+p^2+q^2)^{3/2}} \quad (25)$$

از سه انحنا ی متوسط، انحراف کروی، و دیفرانسیلی سایر انحنا ها شامل انحنا ی حداکثر، حداقل، مازاد افقی و عمودی، گوسی، تجمعی کل، دایره ای کل، و انحنا ی خطوط جریانی با استفاده از رابطه های ۲۶-۳۴ (شری و همکاران، ۲۰۰۲؛ شری، ۱۹۹۵) محاسبه شدند.

$$\text{Minimal Curvature} = \text{Mean}_{\text{Curv}} - \text{Unsphericity}_{\text{Curv}} \quad (26)$$

$$\text{Maximal Curvature} = \text{Mean}_{\text{Curv}} + \text{Unsphericity}_{\text{Curv}} \quad (27)$$

$$\text{Horizontal excess Curvature} = \text{Unsphericity}_{\text{Curv}} - \text{Differential}_{\text{Curv}} \quad (28)$$

$$\text{Vertical excess Curvature} = \text{Unsphericity}_{\text{Curv}} + \text{Differential}_{\text{Curv}} \quad (29)$$

$$\text{Total Gaussian Curvature} = \text{Mean}_{\text{Curv}}^2 - \text{Unsphericity}_{\text{Curv}}^2 \quad (30)$$

انحنای گوسی را می‌توان به روشی ساده‌تر به طور مستقیم از رابطه ۳۱ (گوس، ۱۸۲۸) محاسبه کرد.

$$\text{Total Gaussian Curvature} = \frac{r.t-s^2}{(1+p^2+q^2)^2} \quad (31)$$

$$\text{Total Accumulation Curvature} = \text{Mean}_{\text{Curv}}^2 - \text{Differential}_{\text{Curv}}^2 \quad (32)$$

$$\text{Total Ring Curvature} = \text{Unsphericity}_{\text{Curv}}^2 - \text{Differential}_{\text{Curv}}^2 \quad (33)$$

فلورینسکی (۱۹۹۸) انحنای خطوط جریانی را که عمود بر خطوط کانتوری است مطرح می‌کند (رابطه ۳۴).

$$\text{Curvature of Flowlines} = \frac{(p^2-q^2).s-p.q.(r-t)}{\sqrt{(p^2+q^2)^3}} \quad (34)$$

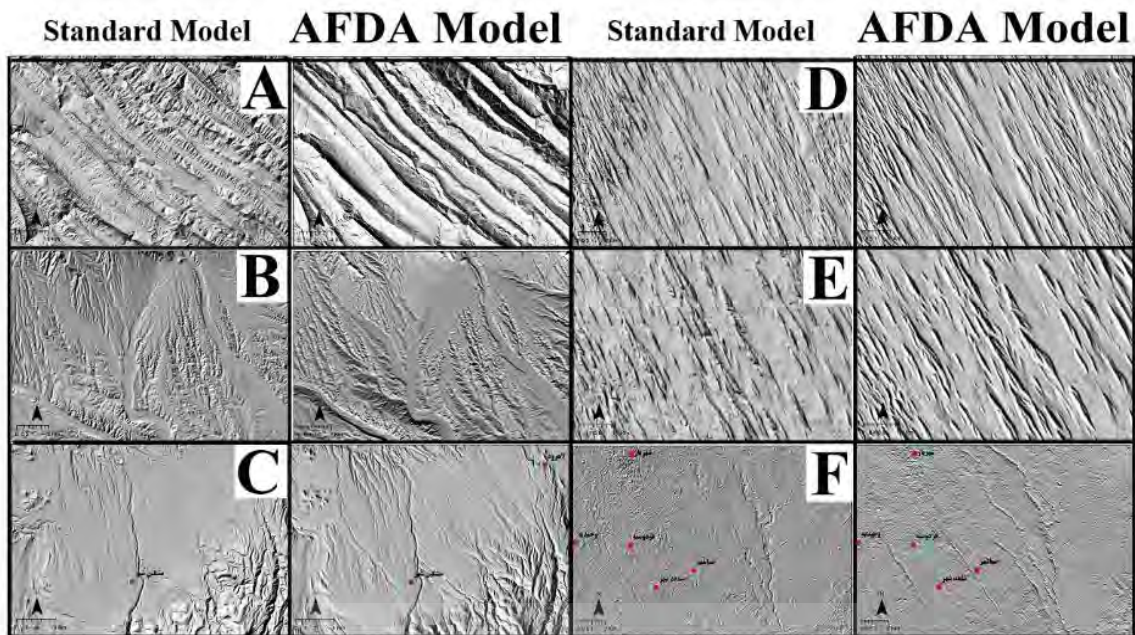
بعد از محاسبه انحنای زمین و ترکیب وزنی آن با مدل سایه-روشن استاندارد می‌توان به مدل‌هایی دست یافت که از اثر انحنای در ایجاد سایه‌زنی توپوگرافیکی استفاده می‌کنند (رابطه ۳۵).

$$\text{Curvature Shading} = \frac{(H_{\text{Standard}} \times W) + (C_{\text{Shader}} \times W)}{100} \quad (35)$$

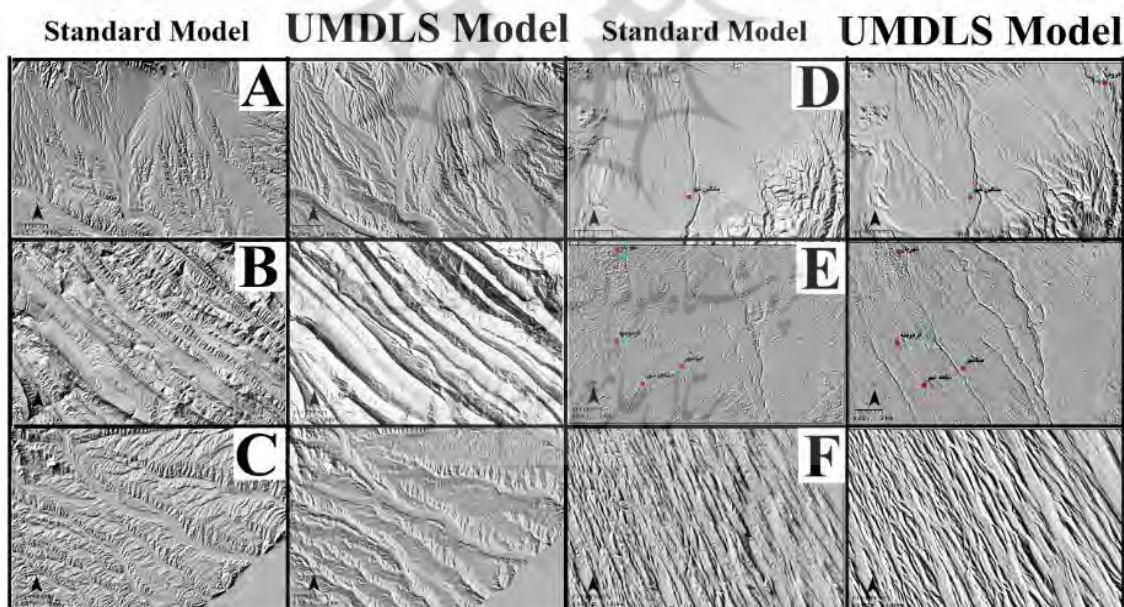
که در این رابطه W وزن تأثیر به درصد (مجموع اوزان بایستی عدد ۱۰۰ باشد)، H_{Standard} مدل سایه-روشن استاندارد (با پارامترهای پیش-فرض)، و C_{Shader} میزان انحنای زمین (مدل‌های چهارده‌گانه انحنای) است.

یافته‌های پژوهش

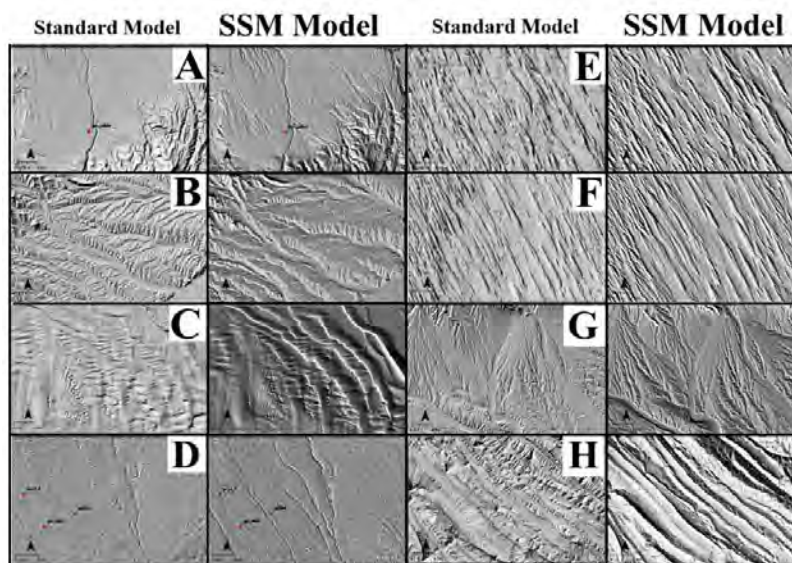
در این پژوهش مورفولوژی نوری با استفاده از مفاهیم سیستم اطلاعات جغرافیایی در محیط برنامه‌نویسی پایتون انجام گرفت. از انواع مدل‌های تصحیح‌کننده و بارزساز استفاده شد. با دخالت برخی مؤلفه‌های توپوگرافیکی همچون شیب و جهت شیب و نیز با تغییر جهات تابش نور بر سطح توپوگرافی، مدل‌های مختلفی برای مورفولوژی نوری سطح توپوگرافی مطرح شد. نحوه عملکرد و منطق محاسباتی هر یک از مدل‌های مطرح‌شده با نگاه ژئومورفولوژیکی تفسیر و تحلیل شد. همه مدل‌ها در محیط برنامه‌نویسی پایتون کدنویسی و اجرا شد و نتایج به صورت نرم‌افزار Optical Morphology ارائه شد (شکل ۲۴). این نرم‌افزار قادر به استفاده از مدل رقومی ارتفاعی برای تهیه خودکار مجموعه-مدل‌های ذکرشده است و قادر به ذخیره‌سازی نتایج هر مدل به صورت فایل رستری در خروجی است. لندفرم‌ها و عوارض ژئومورفولوژیکی مختلفی از مناطق مختلف ایران انتخاب و نتایج خروجی هر یک از مدل‌ها ارائه شد. شکل‌های ۱۵-۲۳ نتایج به دست آمده از هر مدل در مقایسه با مدل سایه-روشن استاندارد را نشان می‌دهند.



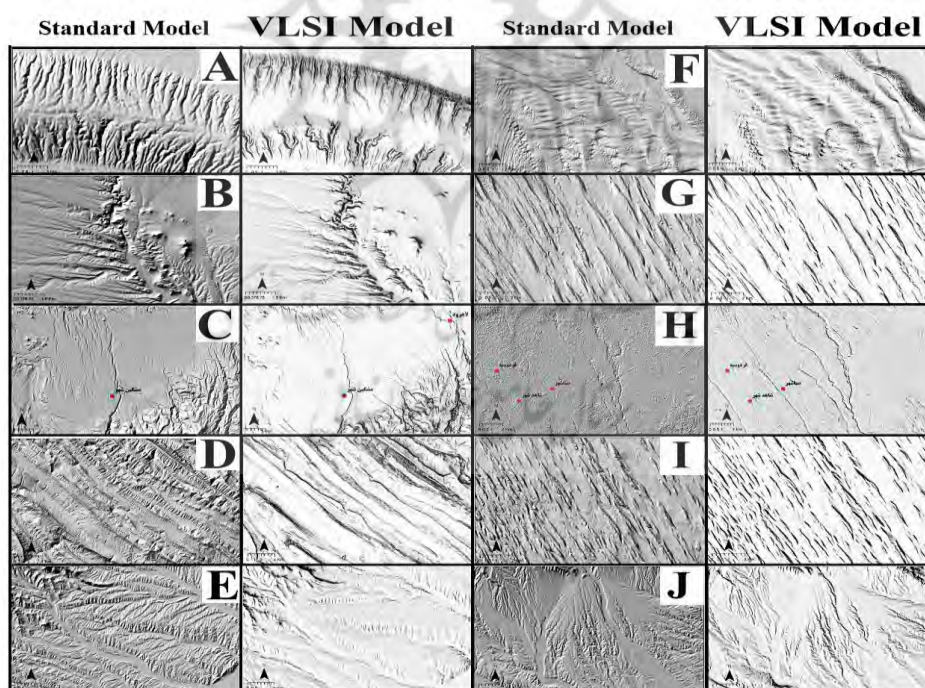
شکل ۱۵. نتایج خروجی مدل AFDA در عوارض ژئومورفولوژیکی نمونه: A: چین‌های فشرده زاگرس (ارتفاعات شمال غرب دنا)؛ B: مخروط‌های قدیم فرسایش یافته و شیارشیار شده در منطقه غرب اصلاندوز پارس آباد (آذربایجان)؛ C: دشت آتش‌فشانی شمال مشکین شهر؛ D و E: کلات‌های شرق شهداد (لوت)؛ F: خندق‌های رودخانه‌ای جنوب شرق شهریار



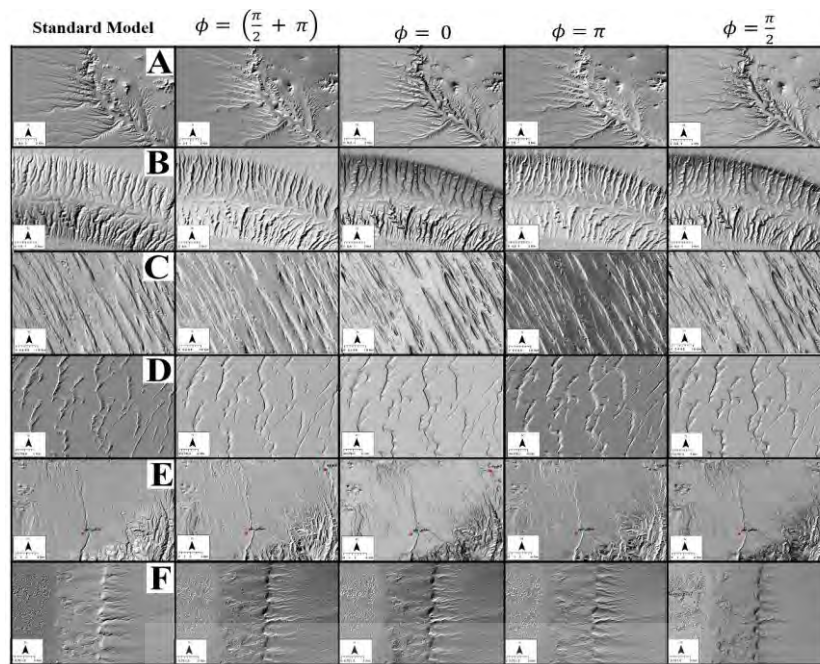
شکل ۱۶. نتایج خروجی مدل UMDLS در عوارض ژئومورفولوژیکی نمونه: A: مخروط‌های قدیم فرسایش یافته و شیارشیار شده در منطقه غرب اصلاندوز پارس آباد (آذربایجان)؛ B: چین‌های فشرده زاگرس (ارتفاعات شمال غرب دنا)؛ C: مخروط‌افکنه‌های قدیمی و فرسایش یافته و خندقی شده شمال خمارلو (کلیبر آذربایجان)؛ D: دشت آتش‌فشانی شمال مشکین شهر؛ E: خندق‌های رودخانه‌ای جنوب شرق شهریار؛ F: کلات‌های شرق شهداد (لوت)



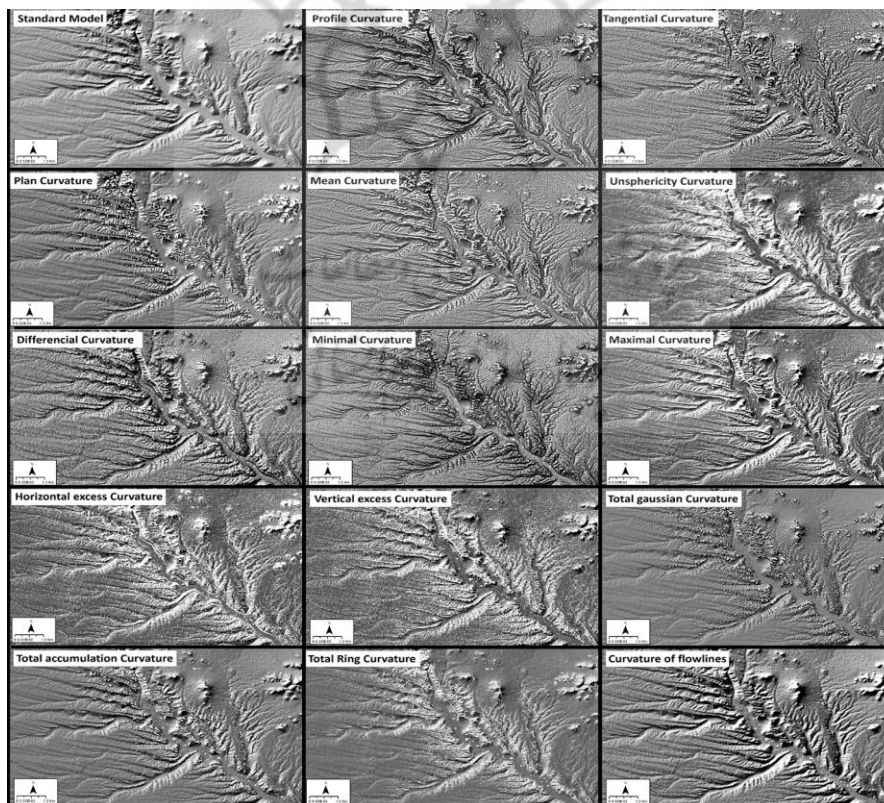
شکل ۱۷. نتایج خروجی مدل SSM در عوارض ژئومورفولوژیکی نمونه: A: دشت آتش‌فشانی شمال مشکین‌شهر؛ B: مخروط‌افکنه‌های قدیمی و فرسایش‌یافته و خندقی‌شده شمال خمارلو (کلیبر آذربایجان)؛ C: تپه‌های ماسه‌ای جنوب‌شرق جندق؛ D: خندق‌های رودخانه‌ای جنوب شرق شهریار؛ E و F: کلوت‌های شرق شه‌هداد (لوت)؛ G: مخروط‌های قدیم فرسایش‌یافته و شیارشمارشده در منطقه غرب اصلاندوز پارس‌آباد (آذربایجان)؛ H: چین‌های فشرده زاگرس (ارتفاعات شمال غرب دنا)



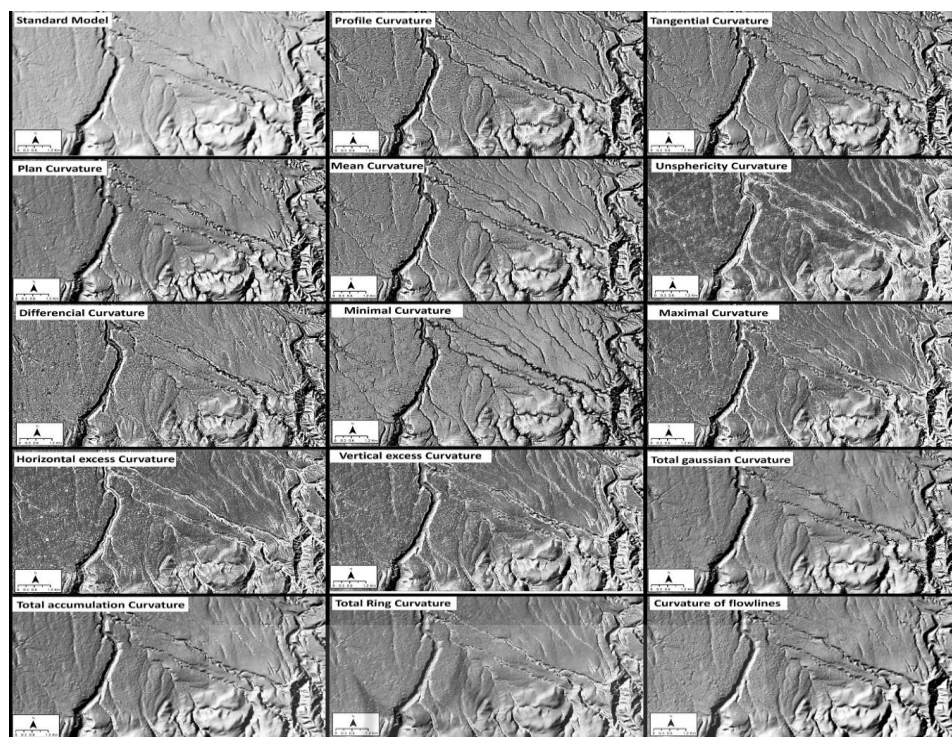
شکل ۱۸. نتایج خروجی مدل VLSI در عوارض ژئومورفولوژیکی نمونه: A: شکاف‌ها و دره‌های عرضی کلوز واقع در غرب باب‌النار (جهرم فارس)؛ B: گالی‌های توسعه‌یافته شمال غرب گنداب (شهرستان شاهرود)؛ C: دشت آتش‌فشانی شمال مشکین‌شهر؛ D: چین‌های فشرده زاگرس (ارتفاعات شمال غرب دنا)؛ E: مخروط‌افکنه‌های قدیمی و فرسایش‌یافته و خندقی‌شده شمال خمارلو (کلیبر آذربایجان)؛ F: تپه‌های ماسه‌ای جنوب‌شرق جندق؛ G و I: کلوت‌های شرق شه‌هداد (لوت)؛ H: خندق‌های رودخانه‌ای جنوب شرق شهریار؛ J: مخروط‌های قدیم فرسایش‌یافته و شیارشمارشده در منطقه غرب اصلاندوز پارس‌آباد (آذربایجان)



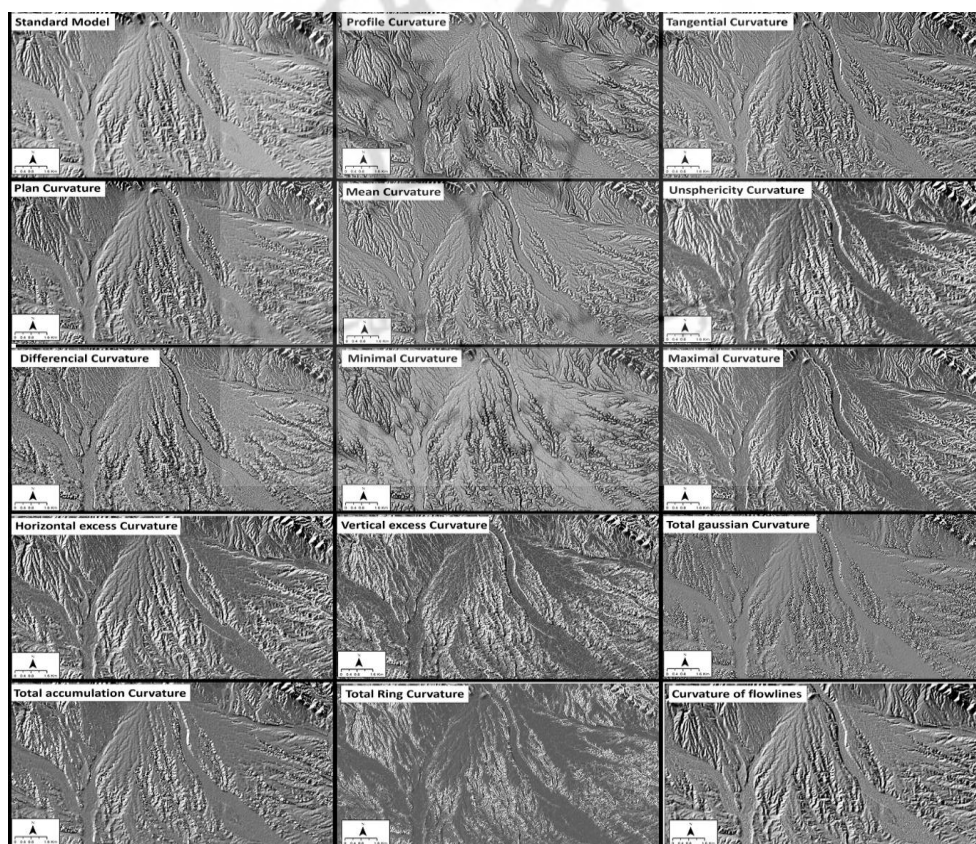
شکل ۱۹. نتایج خروجی مدل SLSF در عوارض ژئومورفولوژیکی نمونه: A: گالی‌های توسعه‌یافته شمال غرب گنداب (شهرستان شاهرود); B: شکاف‌ها و دره‌های عرضی کلوز واقع در غرب باب‌النار (جهرم فارس); C: کلوت‌های شرق شه‌داد (لوت); D: تپه‌های ماسه‌ای عرضی و دلیو واقع در غرب جندق; E: دشت آتش‌فشانی شمال مشکین‌شهر; F: گسل دهشیر- بافت (سیستم پیشین رودی گسلی) واقع در بخش شرقی کویر ابرکوه



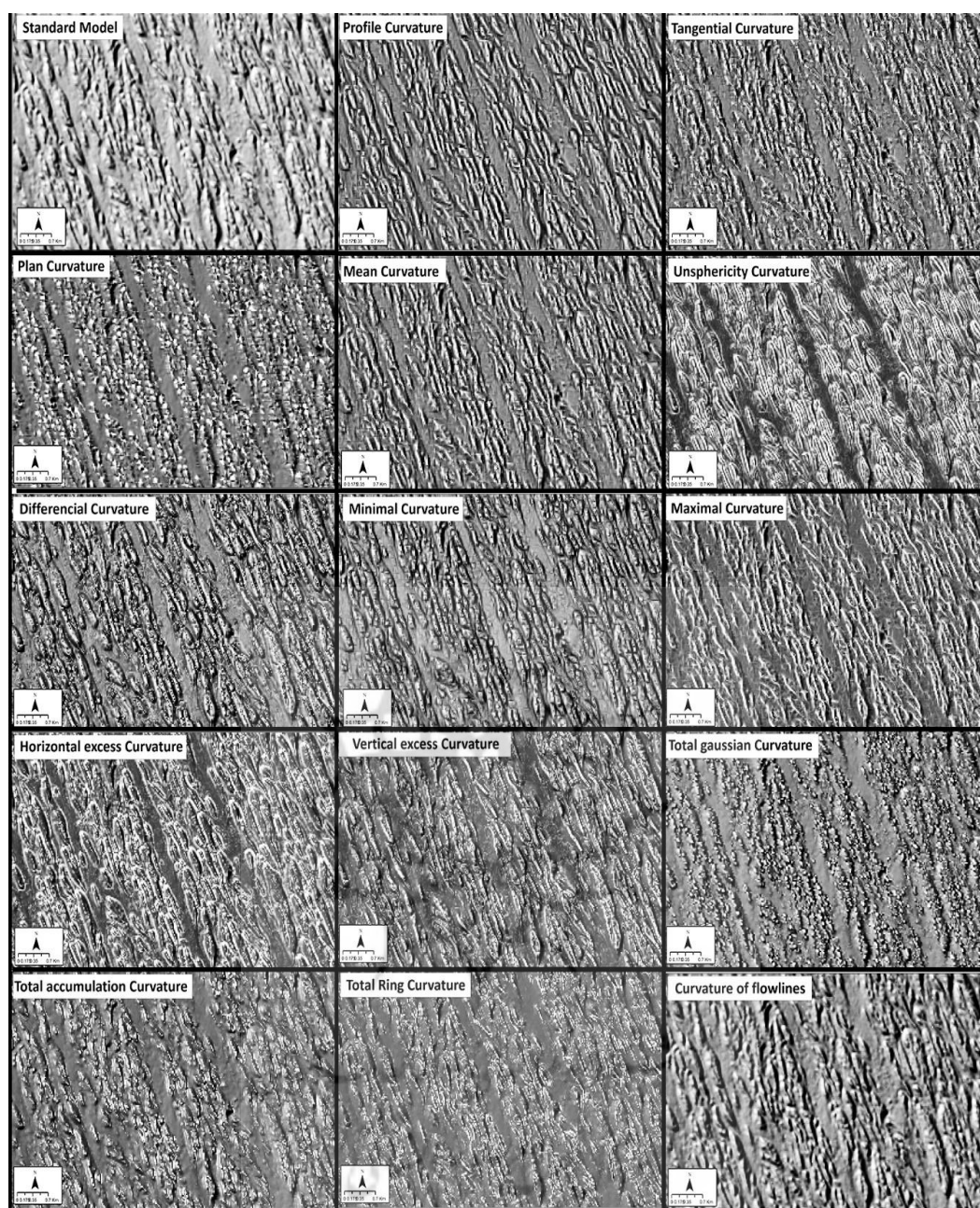
شکل ۲۰. مدل استفاده از انحناى زمین (چهارده روش انحناى زمین)، گالی‌های توسعه‌یافته شمال غرب گنداب (شهرستان شاهرود)



شکل ۲۱. مدل استفاده از انحنای زمین (چهارده روش انحنای زمین)، دشت آتش‌فشانی شمال مشکین شهر



شکل ۲۲. مدل استفاده از انحنای زمین (چهارده روش انحنای زمین)، مخروط‌های قدیم فرسایش یافته و شیارشیارشده در منطقه غرب اصلاندوز پارس‌آباد (آذربایجان)



شکل ۲۳. مدل استفاده از انحناى زمین (چهارده روش انحناى زمین)، کلوتهای شرق شهداد (کرمان)

جدول‌های ۱ و ۲ به ترتیب ساختار کلی مدل‌ها و کاربرد هر یک در ژئومورفولوژی را نشان می‌دهند. آنالیزهای کمی (توپوگرافیک) نتایج همه مدل‌ها به طور متوسط در تمام لندفرم‌ها و عوارض نمونه انجام گرفت. این آنالیزها شامل آنالیز آماری (متوسط درجات خاکستری)، جهت‌ی، مورفولوژیک (خط‌الرأس - خط‌القعر)، و کنتراست بین مدل‌های استاندارد و در مقایسه با مدل‌های سایه-رنگ‌زن است (جدول‌های ۳ و ۴). درجات خاکستری بین ۰-۲۵۵ است که ۰ معادل سیاه و ۲۵۵ معادل رنگ سفید است و می‌تواند نمایندهٔ درجهٔ تیرگی و روشنایی مدل‌های سایه-رنگ‌زن باشد.

جدول ۱. ساختار کلی مدل‌های مورفولوژی نوری

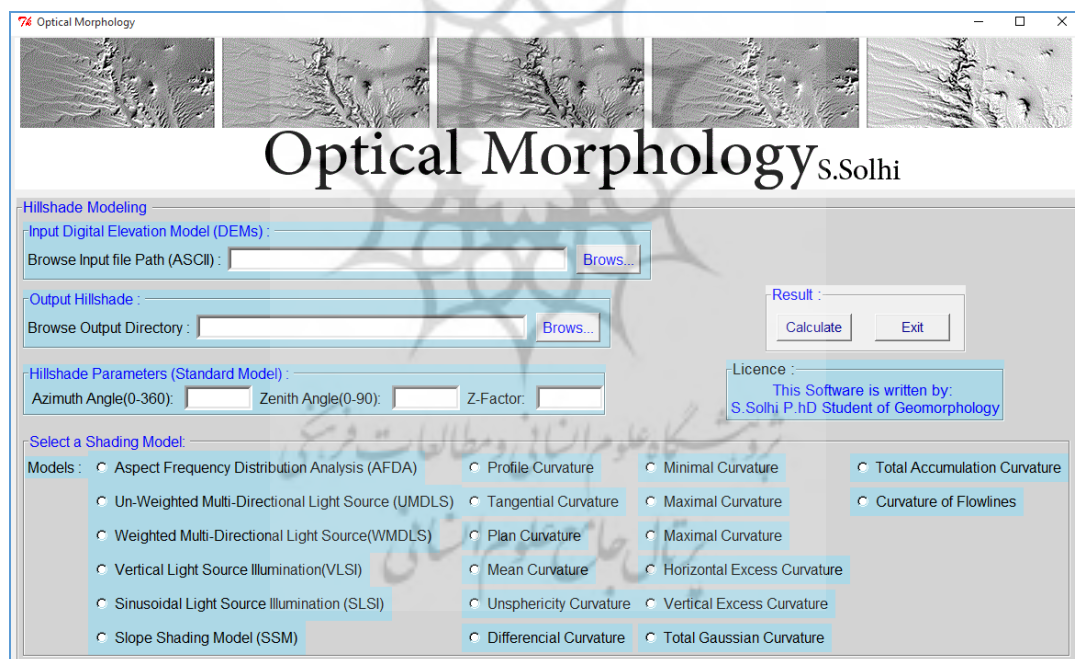
ردیف	نام مدل	نام لاتین	نام اختصاری	ساختار کلی مدل
۱	مدل آنالیز توزیع فراوانی جهت شیب	Aspect Frequency Distribution Analysis	AFDA	این مدل بر اساس توزیع فراوانی جهت شیب بر حسب پیکسل عمل می‌کند. سه حالت کلی امکان‌پذیر است: منحنی توزیع فراوانی تک-مدی، دو-مدی، و چند-مدی. بسته به هر یک از حالات آنالیز سایه-روشن صورت می‌گیرد.
۲	مدل جهات آزمون‌ی بدون وزن	Unweighted Multi-Directional Light Source	UMDLS	در این مدل منبع تابش نور غیر ثابت است و در بین جهات ۱۸۰ تا ۳۶۰ درجه جابه‌جا می‌شود و نتایج با هم تلفیق و به صورت یک مدل سایه-روشن ارائه می‌شوند.
۳	مدل جهات آزمون‌ی وزنی-مستقیم و معکوس	Weighted Multi-Directional Light Source	WMDLS (Direct - Reverse)	ساختار این مدل شبیه مدل ۲ است؛ با این تفاوت که در این مدل تعداد پیکسل‌هایی که در مقابل آزمون‌ی تابش منبع نور قرار می‌گیرند به صورت وزنی اثرگذار می‌شوند. در نتیجه، تعداد بیشتر پیکسل‌های به سمت منبع آزمون‌ی نور وزن بیشتری به خود اختصاص می‌دهند. نتایج به‌دست‌آمده با روش میانگین وزنی با هم ترکیب می‌شوند.
۴	مدل منبع تابش نور قائم	Vertical Light Source Illumination	VLSI	ساختار کلی این مدل کاملاً مشابه حالت قبل است و تنها تفاوت در نوع وزن‌دهی است؛ بدین صورت که تعداد پیکسل‌هایی که هم‌جهت با منبع نور هستند وزن معکوس می‌گیرند و تأثیرشان کمتر می‌شود.
۵	مدل اثر سایه شیب	Slope Shading Model	SSM	در این مدل منبع تابش نور بر سطح توپوگرافی با ارتفاع ۹۰ درجه تهیه می‌شود و نتایج به‌دست‌آمده با مدل سایه-روشن استاندارد (Standard Model) تلفیق می‌شود.
۶	مدل منبع تابش نور با نوسان سینوسی	Sinusoidal Light Source Fluctuation	SLSF	این مدل از اثر سایه-روشن به‌دست‌آمده از نقشه شیب استفاده می‌کند و با تلفیق آن با مدل استاندارد باعث بهبود و تصحیح کیفی نمایش مدل‌های سایه-روشن می‌شود.
۷	مدل‌های اثر انحنا زمین	Terrain Curvature Shading Models (TCSM)		این مدل از معادلات سینوسی برای ایجاد نوسان در منبع تابش نور بر سطح توپوگرافی استفاده می‌کند و با استفاده از جابه‌جایی‌های افقی، عمودی، و ارتفاع موج سینوسی نتایج مختلفی ارائه می‌کند.
				<p>PCSM Profile Shading Model</p> <p>TCSM Tangential Curvature Shading Model</p> <p>PCSM Plan Curvature Shading Model</p> <p>UCCSM Un-Sphericity Curvature Shading Model</p> <p>MCSM Mean Curvature Shading Model</p> <p>DCSM Differential Curvature Shading Model</p> <p>MaCSM Maximal Curvature Shading Model</p> <p>MiCSM Minimal Curvature Shading Model</p> <p>HECSM Horizontal Excess Curvature Shading Model</p> <p>VECSM Vertical Excess Curvature Shading Model</p> <p>TGCSM Total Gaussian Curvature Shading Model</p> <p>TACSM Total Accumulation Curvature Shading Model</p> <p>FCSM Flowlines Curvature Shading Model</p> <p>TRCSM Total Ring Curvature Shading Model</p>

جدول ۲. کاربرد مدل‌های مورفولوژی نوری در مطالعات ژئومورفولوژیکی

ردیف	مدل	کاربرد
۱	AFDA	این مدل همواره سعی می‌کند منبع آزیموتی تابش نور را عمود بر جهت قرارگیری حداکثر فراوانی پیکسل‌ها قرار دهد و در جهت بارزسازی شیارها، دره‌ها، و کلیه خطوط و شکستگی‌های مورفولوژیکی هم‌راستا با جهت گرادانی ناهمواری‌های اصلی عمل کند. این مدل برای بارزسازی شبکه‌های کانسکوتی نیز مناسب است. نوع دیگری از این مدل قابل استخراج است؛ به‌طوری‌که بعد از تحلیل توزیع فراوانی جهت شیب منبع تابش نور هم‌راستا با بیشترین فراوانی پیکسلی قرار می‌گیرد. در این حالت شبکه دره‌ها و شیارهای فرعی، که عمود بر جهت گرادانی شیب هستند، مورد توجه بیشتری قرار می‌گیرند و بارزسازی می‌شوند. این مدل برای واضح‌سازی و تمرکز بر بریدگی‌ها، شیارها، دره‌ها، و شبکه‌های زهکشی آبسکوتی و سابسکوتی مناسب است. عوارض یخچالی شامل سیرک‌های یخچالی، دره‌های فرعی، و بسیاری عوارض مورفولوژیکی دیگر از این طریق قابل واضح‌سازی و بارزسازی‌اند.
۲	UMDLS	این مدل به دلیل استفاده از منبع نور چندگانه تأثیر سایه‌های جهتی با کنتراست بالا را کاهش می‌دهد و در نتیجه باعث وضوح بیشتر سایه‌ها می‌شود. این مدل، علاوه بر کاهش تأثیر سایه‌ها و اغراق جهتی ناهمواری، می‌تواند به نمایش متعادل و متناسب‌تر توپوگرافی در جهات مختلف منجر شود. در مواردی که شرایط توپوگرافی بسیار پیچیده و ضرایب ناهمواری سطح مقادیر زیادی را نشان می‌دهد، استفاد از این مدل می‌تواند در بهبود نمایش عوارض مورفولوژیکی مؤثر باشد.
۳	WMDLS	عملکرد این مدل شبیه به UMDLS است، ولی در این مدل از تعداد پیکسل‌ها به عنوان وزن استفاده می‌شود. تعداد پیکسل‌هایی که به سمت منبع تابش نور قرار می‌گیرند وزن بالاتری به خود اختصاص می‌دهند و در نتیجه تأثیر بیشتری در نتایج خروجی خواهند داشت. حالت دیگری از این مدل وجود دارد که در آن به تعداد پیکسل‌هایی که به سمت منبع تابش نور قرار می‌گیرند وزن معکوس اختصاص داده می‌شود. این مدل، علاوه بر آنکه منبع نور چندجهته دارد و باعث کاهش کنتراست سایه-روشن می‌شود، از طریق کاهش اغراق غیرواقعی به درک بهتر از سطح روبه زمین کمک می‌کند.
۴	VLSI	این مدل با استفاده از تابش منبع نور قائم به بهبود نمایش لبه‌های عوارض ژئومورفولوژیکی، خطالرأس‌ها، و خطوط‌های توپوگرافیکی کمک می‌کند. این مدل باعث کاهش اغراق جهتی توپوگرافی و خطای ذهن ناشی از منبع نور جهتی می‌شود و تصویری بهتر از برجستگی‌ها، خطالرأس‌ها، برآمدگی‌ها، و چین‌وچروک‌های مورفولوژیک سطح زمین در ذهن بیننده ایجاد می‌کند. در این روش خطالرأس‌ها (خطالرأس‌های اصلی و فرعی: خطالرأس‌های هم‌راستا بر جهت شیب، خطالرأس‌های عمود بر جهت شیب) و خط‌الغرها (خط‌الغرها اصلی و فرعی: خط‌الغرها هم‌راستا بر جهت شیب، خطالرأس‌های عمود بر جهت شیب) به‌خوبی بارزسازی می‌شوند و برای تشخیص و ترسیم محدوده سیرک‌های یخچالی، محدوده دره‌ها، مرز حوضه‌ها و زیرحوضه‌ها، کانال‌های زهکشی و شبکه گالی‌ها و همچنین رمپ‌های مورنی در مناطق یخچالی، بریدگی‌های رسوبی بدنه مخروط‌افکنه‌ها، و بریدگی‌های پایکوهی و گلاسی‌ها مناسب است.
۵	SSM	نتایج به‌دست‌آمده از این مدل شباهت زیادی به مدل ۴ دارد؛ تنها تفاوت در استفاده از اثر سایه‌های شیب به جای تابش نور از منبع قائم است. نوع استفاده و کاربردهای آن نیز تا حدودی مشابه مدل قبلی است.
۶	SLSF	این مدل به‌شدت باعث توزیع همگن سایه‌ها بر سطح توپوگرافی می‌شود. نوع نمایش ناهمواری‌ها کمتر تحت تأثیر اغراق‌های جهتی قرار می‌گیرد و تصور ذهن انسان از نوع، جهت، و شدت برآمدگی‌های توپوگرافی به واقعیت نزدیک‌تر می‌شود. مدل‌های مختلف انحنای زمین بر ساختارهای مختلف توپوگرافی زمین متمرکز می‌شوند و هر یک بخشی از شکل ناهمواری‌های زمین را توصیف می‌کنند.
۷	Terrain Curvature Shading Models (TCSMs)	برخی از مدل‌های انحنای باعث واضح‌سازی و بارزسازی خطالرأس‌ها، لبه‌ها، خطوط، مرز پارسل‌ها، و مرز شبکه‌های زهکشی می‌شوند. آن‌ها تمرکز چشم را به سمت خطالرأس‌های فرعی و خطوط تقسیم آب مابین ناهمواری‌های حوضه منحرف می‌کنند. مدل‌های انحنای پروفیلی، تانژانتی، پلان، متوسط، و حداقلی در این دسته طبقه‌بندی می‌شوند. به‌طور کلی، نتایج به‌دست‌آمده از این گروه، معمولاً نتایج مطلوبی دارد و در نمایش ناهمواری‌های زمین عملکرد بسیار خوبی از خود نشان می‌دهد.
		مدل‌های انحنای دیفرانسیلی، افقی، عمودی، و خطوط جریان‌ی تمایل به نمایش روشن توپوگرافی دارند. از نتایج به‌دست‌آمده از این مدل‌ها برای ترکیب با نقشه‌های دیگر به‌طور هم‌زمان (با استفاده از قابلیت شفاف‌سازی) به‌خوبی می‌توان استفاده کرد. درجه بارزسازی لبه در این مدل‌ها بسیار زیاد است. در توپوگرافی‌های پیچیده و مرکب استفاده از این مدل‌ها می‌تواند با محدودیت‌هایی همراه شود.
		مدل‌های گوسی و جمعی نتایج مشابهی دارند. حساسیت چندانی به شیارها، لبه‌ها، و شکستگی‌های کم‌عمق پوسته زمین ندارند و بیشتر چین‌خوردگی‌های اصلی و عمیق را بارزسازی می‌کنند.
		مدل‌های انحنای دایره‌ای، حداکثری، و انحراف کروی نتایج نسبتاً مشابهی دارند؛ ولی درجه تیرگی و روشنایی آن‌ها با یکدیگر اختلاف دارد. این گروه باعث افزایش کنتراست لبه‌ها، بریدگی‌ها، شکستگی‌ها، و دره‌ها به نسبت خطالرأس‌ها و برآمدگی‌ها می‌شوند. این گروه برای نمایش جزئیات و چین‌وچروک‌های محلی مناسب نیستند و بهتر است در این شرایط از مدل‌های دیگر استفاده شود.

ادامه جدول ۴. آنالیز کمی مدل‌های سایه-رنگ‌زن (انحنای زمین) و مقایسه آن‌ها با مدل استاندارد

Curvature Shading Model														
Curvature of flowlines	Differential Curvature	Horizontal excess curvature	Maximal Curvature	Mean Curvature	Minimal Curvature	Plan Curvature	Profile Curvature	Tangential Curvature	Total Gaussian Curvature	Total accumulation Curvature	Total ring Curvature	Un-Sphericity Curvature	Vertical excess Curvature	
کنتراست جهت کنتراست جهت بین جهت شمال و جنوب در مدل سایه- رنگ‌زن	۲۲۲	۶۰	۵۷	۵۴۸	۴۳۹	۵۲۰	۰۰۹	۵۱۳	۵۱۵	۳۱۵	۲۳۸	۲۱۰	۶۷۷	۵۲۸
کنتراست جهت بین جهت شرق و غرب در مدل سایه- رنگ‌زن	۲۹۱	۸۱۳	۹۸۲	۸۲۵	۵۴۱	۵۲۹	۷۴۸	۶۴۴	۶۶۱	۴۱۳	۳۳۶	۳۴۳	۱۱۴۱	۹۰۲
کنتراست جهت بین جهت شمال و جنوب در مدل استاندارد	۱۳۳۳	۱۳۳۳	۱۳۳۳	۱۳۳۳	۱۳۳۳	۱۳۳۳	۱۳۳۳	۱۳۳۳	۱۳۳۳	۱۳۳۳	۱۳۳۳	۱۳۳۳	۱۳۳۳	۱۳۳۳
کنتراست جهت بین جهت شرق و غرب در مدل استاندارد	۱۳۸۳	۱۳۸۳	۱۳۸۳	۱۳۸۳	۱۳۸۳	۱۳۸۳	۱۳۸۳	۱۳۸۳	۱۳۸۳	۱۳۸۳	۱۳۸۳	۱۳۸۳	۱۳۸۳	۱۳۸۳



شکل ۲۴. نرم‌افزار گرافیکی Optical Morphology V.1، تهیه‌شده در محیط برنامه‌نویسی پایتون

بحث و نتیجه‌گیری

در بسیاری مواقع مدل‌های سایه-روشن به تصحیح و تغییراتی نیاز دارند تا بتوانند توصیف بهتری از وضع توپوگرافیکی و مورفولوژی زمین ارائه کنند. رویکردهای متفاوتی در این زمینه وجود دارد: یکی از رویکردهای مد نظر این پژوهش بررسی وضعیت شیب و جهت شیب زمین است تا از این طریق تغییرات و تصحیحات مورد نظر اعمال شود. رویکرد دیگری که در این پژوهش دنبال شد استفاده از میزان انحنای زمین و الگوی تغییرات آن در جهات مختلف به عنوان

عاملی قدرتمند در نحوه نمایش اشکال ژئومورفیک سطح زمین است. سهولت و خودکار شدن الگوریتم‌ها و مدل‌های یادشده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای تصحیح، بهبود، و نمایش هدفمند توپوگرافی و عوارض ژئومورفیک از مفهومی با عنوان مدل مورفولوژی نوری استفاده شد و در محیط برنامه‌نویسی پایتون کدنویسی و اجرا گردید. در این راستا، چهارده مدل مختلف انحنای زمین^۱ و شش مدل تغییر زوایای آزمایشی و سمت‌الرأسی منبع نور برای شناسایی و آشکارسازی عوارض مورفولوژیک استفاده شد. آنالیز کمی شامل آنالیز عددی جهتی، مورفولوژیک (خط‌الرأس - خط‌القعر)، و آنالیز کنتراست بر روی همه مدل‌ها انجام گرفت. نتایج این آنالیزهای کمی در انتخاب مدل مناسب به منظور مقاصد مورفولوژیک مفید باشد. نهایتاً، مجموعه این بیست مدل توسط واسطه گرافیکی پایتون^۲ کدنویسی و به نرم‌افزار Optical Morphology V.1 تبدیل و ارائه شد. این نرم‌افزار قادر به اجرای خودکار همه مدل‌های مورد بررسی و ذخیره‌سازی نتایج در فایل رستری به فرمت ASCII است.



1. Terrain Curvature
2. Tkinter (Graphical User Interface Programming)

منابع

- ArcGIS Resources (2008). *Aspect-slope map*, <http://blogs.esri.com/esri/arcgis/> (last accessed: 7 April 2014).
- Association of American Geographers (AAG) (2014). *AAG Annual Meeting*. <http://meridian.aag.org>.
- Batson, R.M.; Edwards, K. and Eliason, E.M. (1975). Computer-generated shaded relief images, *Journal of Research of the US Geological Survey*, 3(4): 401-408.
- Brassel, K. (1973). *Modelle und Versuche zur automatischen Schraglichtschattierung (Ein Beitrag zur Computer-Kartographie)*, ETH, Zurich.
- Brassel, K. (1974). A model for automatic hill-shading, *The American Cartographer*, 1(1): 15-27.
- El-Sheimy, N.; Valeo, C. and Ayman, H. (2005). *Digital Terrain Modeling Acquisition, Manipulation, and Applications*, Artech House, London.
- ESRI (2009). *ArcGIS Desktop Help V.9*, Environmental Systems Research Institute, California, United states.
- Evans, I.S. and Chorley, R.J. (1972). *Spatial Analysis in Geomorphology (General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics)*, Harper & Row, PP. 17-90.
- Florinsky, I.V. (1998). Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models, *International Journal of Geographical Information Science*, 12(1): 47-62.
- Gallant, J.C. and Wilson, J.P. (1996). TAPES-G: A Grid-based Terrain Analysis Program for the Environmental Sciences, *Computers & Geosciences*, 22(7): 713-722.
- Gauss, K.F. (1828). Disquisitiones generales circa superficies curvas, *Commentationes Societatis Regiae Scientiarum Gottingensis*, 6: 99-146.
- Gouraud, H. (1971). Continuous shading of curved surfaces, *Computers, IEEE Transactions on*, 100(6): 623-629.
- Hobbs, K.F. (1999). An investigation of RGB multi-band shading for relief visualization, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 1(3): 181-186.
- Horn, B.K.P. (1981). Hill shading and the reflectance map, *Proceedings of the IEEE*, 69(1): 14-47.
- Horn, B.K.P. and Sjoberg, R.W. (1979). Calculating the reectance map, *Applied Optics*, 18(11): 1770-1779.
- Imhof, E. (1982). *Cartographic Relief Presentation*, Walter de Gruyter, New York and Berlin.
- Jenny, B. (2000). *Computergestutzte Schattierung in der Kartograe*, ETH, Zurich.
- Jenny, B. (2001a). Computergestutzte Schattierung, *Kartographische Bausteine*, 18: 61 -69.
- Jenny, B. (2001b). An Interactive Approach to Analytical Relief Shading, *Cartographica, The International Journal for Geographic Information and Geo-visualization*, 38(1): 67-75.
- Jenny, B. (2009). *Software for terrain mapping*, <http://terraincartography.com/>(last accessed: 7 April 2014).
- Jenny, B. and Hurni, L. (2006). Swiss-style color relief shading modulated by elevation and by exposure to illumination, *The Cartographic Journal*, 43(3): 198-207.
- Jenny, B. and Raber, S. (2002). *Relief shading (Online)*, Zurich Institute of Cartography, ETH. Online (accessed 8 July 2009): www.reliefshading.com.
- Jones, K.H. (1998). A comparison of algorithms used to compute hill slope as a property of the DEM, *Computers & Geosciences*, 24 (4): 315-323.
- Katzil, Y. and Doytsher, Y. (2003). A logarithmic and sub-pixel approach to shaded relief representation, *Computers & Geosciences*, 29(9): 1137-114.

- Kennelly, P.J. (2008). Terrain maps displaying hill-shading with curvature, *Geomorphology*, 102(3): 567-577.
- Kennelly, P.J. (2009). Hill-shading techniques to enhance terrain maps, In *Proceedings of the 24th International Cartographic Conference*, PP. 15-21.
- Kennelly, P.J. and Kimerling, A.J. (2001). Modifications of Tanaka's illuminated contour method, *Cartography and Geographic Information Science*, 28(2): 111-123.
- Kennelly, P.J. and Kimerling, A.J. (2004). Hillshading of terrain using layer tints with aspect-variant luminosity, *Cartography and Geographic Information Science*, 31(2): (67-77).
- Kimerling, A.J. and Moellering, H. (1989). The development of digital slope-aspect displays, In *uto Carto 9: Ninth International Symposium on Computer-Assisted Cartography*, PP. 241-244.
- Krcho, J. (1973). Morphometric analysis of relief on the basis of geometric aspect of ifeld theory, *Acta Geographica Universitatis Comenianae, Geographico-Physica*, 1(1): 7-233.
- Krcho, J. (1983). Teoretická koncepcia a interdisciplinárne aplikácie komplexného digitálneho modelu reliéfu pri modelovaní dvojdimenzionálnych poli, *Geografická časopis*, 35(3): 265-291.
- Loisios, D.; Tzelepis, N. and Nakos, B. (2007). A methodology for creating analytical hill-shading by combining different lighting directions, In *Proceedings of the 23rd International Cartographic Conference*, August 4-10, Moscow, Russian.
- Lukas, K. and Weibel, R. (1995). Assessment and improvement of methods for analytical hillshading, In *Proceedings of the 17th International Cartographic Conference*, Barcelona, Spain, 3-9 September 1995.
- Marsik, Z. (1971). Automatic relief shading, *Photogrammetria*, 27(2): 57-70.
- Mitvov, H. and Hoifërka, J. (1993). Interpolation by regularized spline with tension, II Application to terrain modelling and surface geometry analysis, *Mathematical Geology*, 25(6): 657-669.
- Moellering, H. (2012). Perspectives on 3-D visualization of spatial geodata and future prospects, *True-3D in Cartography Springer*, 1-19.
- Moellering, H. and Kimerling, A.J. (1990). A new Digital Slope-aspect Display Process, *Cartography and Geographic Information Systems*, 17(2): 151-159.
- Orzan, A.; Bousseau, A.; Barla, P.; Winnemoller, H.; Thollot, J. and Salesin, D. (2013). Diffusion curves: a vector representation for smooth-shaded images, *Communications of the ACM*, 56(7): 101-108.
- Panigrahi, N. (2014). *Computing in Geographic Information Systems*, by Taylor & Francis Group, LLC, Minnesota, USA.
- Patterson, T. (2014). *Shaded relief: Ideas and techniques about relief presentation on maps*, <http://www.hadedrelief.com>.
- Patterson, T. and Jenny, B. (2010). *Shaded relief archive*, <http://shadedreliefarchive.com>.
- Podobnikar, T. (2012). Multidirectional visibility index for analytical shading enhancement, *The Cartographic Journal*, 49(3): 195-207.
- Robinson, A.H. and Thrower, N.J.W. (1957). A new method of terrain representation, *Geographical Review*, 47(4): 507-520.
- Serebryakova, M. and Hurni L. (2014). *Automatic Adjustment of Image Sharpness in Relief Shading*, Master Thesis, Advisor: Prof. Dr. Lorenz Hurni, Advisor: Dr. Fabio Veronesi, Institute of Cartography and Geoinformation Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering Swiss Federal Institute of Technology.

- 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. and Stepanov, I.N. (1991). On the second derivative method in geology, *Doklady AN SSSR*, 319(2): 456-460.
- Shary, P.A.; Sharaya, L.S. and Mitusov, A.V. (2002). Fundamental quantitative methods of land surface analysis, *Geoderma*, 107(12): 1-32.
- Surfer® 13. (2017). Golden Software, LLC, www.goldensoftware.com, Colorado.
- Tadono, T.; Ishida, H.; Oda, F.; Naito, S.; Minakawa, K. and Iwamoto, H. (2014). Precise Global DEM Generation by ALOS PRISM, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2(4): 71-76.
- Takaku, J; Tadono, T. and Tsutsui, K. (2014). Generation of High Resolution Global DSM from ALOS PRISM, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL(4): 243-248.
- Tanaka, K. (1950). The relief contour method of representing topography on maps, *Geographical Review*, 40(3): 444-456.
- Tutic, D.; Lapaine, M. and Posloncec-Petric, V. (2007). Some experiences in analytical relief shading, In Petrovic, D., editor, *Proceedings of 5th Mountain Cartography Work- shop, International Cartographic Association, Commission on Mountain Cartography*, Ljubljana, PP. 249-258.
- Veronesi, F., Hurni, L., (2015). A GIS tool to increase the visual quality of relief shading by automatically changing the light direction, *Computers & Geosciences*, 74: 121-127.
- Ware, C. (1989). Fast hill shading with cast shadows, *Computers & Geosciences*, 15(8): 1327-1334.
- Wiechel, H. (1878). Theorie und Darstellung der Beleuchtung von nicht gesetzmässig gebildeten Flächen mit Rücksicht auf die Bergzeichnung, *Civilingenieur*, 24, PP. 335-364.
- Yoeli, P. (1959). Relief shading, *Surveying and Mapping*, 19(2): 29-232.
- Yoeli, P. (1965). Analytical hill shading, *Surveying and Mapping*, 25(4): 573-579.
- Yoeli, P. (1966). Analytical hill shading and density, *Surveying and Mapping*, 26(2): 253 -259.
- Yoeli, P. (1967a). Die Richtung des Lichtes bei analytischer Schattierung, *Kartographische Nachrichten*, 2: 37-44.
- Yoeli, P. (1967b). The mechanization of analytical hill shading, *The Cartographic Journal*, 2: 82-88.
- Young, M. and Evans, I. (1978). *Terrain analysis: program documentation, Report 6 on Grant DA-ERO-591-73-G0040*, Statistical characterization of altitude matrices by computer, Department of Geography, University of Durham, UK, PP. 1-27.
- Young, T. (1805). An essay on the cohesion of fluids, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 95: 65-87.
- Zaksek, K.; Ostir, K. and Kokalj, Z. (2011). Sky-view factor as a relief visualization technique, *Remote Sensing*, 3(2): 398-415.
- Zhou, Q. (1992). Relief shading using digital elevation models, *Computers & Geo-sciences*, 18(8): 1035-1045.
- Zhou, X. and Dorrer, E. (1995). An adaptive algorithm of shaded-relief images from DEMs based on wavelet transform. In *Digital photogrammetry and remote sensing 95*, SPIE Proceedings Series, volume 26(46): 212-224.