

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 سایه‌است 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 رویه‌رو و تفسیر عوارض سطح زمین را دشوار می‌کند. برای تصحیح، بهمود، و نمایش هدفمند توپوگرافی از مفهومی با نام «مورفولوژی نوری» استفاده شد. مؤلفه‌های ژئومورفولوژیکی مانند شب، جهت شب، فراوانی، و توزیع جهات و میزان و نوع همگرایی - واگرایی سطوح زمین مدنظر قرار گرفت. از چهارده مدل مختلف انتخاب 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 لندرفرم‌ها تحلیل شد و کاربردهای رایج آن‌ها در شناسایی لندرفرم‌ها تحلیل گردید. همه مدل‌ها در محیط پایتون اجرا و توسط واسطه گرافیکی پایتون^۱ طراحی شد. نرم‌افزار Optical Morphology برای اجرای همه مدل‌ها ارائه شد.

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

مقدمه

استنپاژ نوری توپوگرافی^۲ 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 شب آن به نسبت بردارهای نور تعیین می‌شود. موقعیت قرارگیری منبع نور معمولاً در آزیموت (زاویه افقی)^۳ ۳۱۵ درجه و ارتفاع سمت‌الراسی (زاویه عمودی)^۴ 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^۵ تکنیکی برای نمایش توپوگرافی است؛ بهطوری 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 متعدد،

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 سوئیسی 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 بعداً کارتوگراف دیگر سوئیسی، به نام ادوارد آیمهوف (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 به صرفه‌تر 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 نه تنها 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 به کارگرفتن 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، ۱۹۶۷ a)، براسل (۱۹۷۳؛ ۱۹۷۴)، پیشنهاد کرد محاسبه شدت نور به جای یک نقطه بر مبنای میان‌یابی بین چند نقطهٔ مجاور انجام گیرد. بر اساس تجربیات یولی، که به دنبال تصحیح جهات نور بود (یولی، ۱۹۶۷ a)، براسل (۱۹۷۴) رویکرد پیچیده‌تری را پیشنهاد داد که در آن روش‌های بنیادین سایه‌زنی سوئیسی (آیمهوف، ۱۹۸۲) را با هم ترکیب کرد. در سال‌های اخیر، جنی (۲۰۰۱ a؛ ۲۰۰۱ b) ساختاری برای تشخیص مقادیر خاکستری^۳ تصویر با استفاده از سایه‌زنی جهتی^۴ مناطق پُرشیب، انکاس پراکنده^۵ مناطق کمارتفاع، و طیف خاکستری^۶ مناطق مسطوح ارائه کرد. این رویکرد جلوه نمایش مدل‌های سایه-روشن را بهبود بخشید؛ اما، به دلیل اتوماتیک‌بودن 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 به سادگی با استفاده از بسته‌های نرم‌افزاری GIS⁷ 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. Lambert's 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، انحنای، و سایر مشخصات را برای هر سلول در ساختار رستی فراهم می‌کرد (گالت و ویلسون، ۱۹۹۶)؛ محاسبات الگوریتم شیب در مدل رقومی ارتفاعی (جونز، ۱۹۹۸)؛ رویکرد پیکسلی و لگاریتمی (کتزیل 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، به کارگیری تکنیک‌های تصحیح‌کننده در مدل‌های مرسوم که توسط افرادی همچون توتوی و همکاران (۲۰۰۷) انجام گرفته است؛ به کارگیری فاکتور دید آسمان^۱ که با بخش قابل روئت آسمان و سطح توپوگرافی و درجه پراکنش نور مرتبط است (زاک سک و همکاران، ۲۰۱۱)؛ به کارگیری 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 سطح و روابط بین شدت شیب با استفاده از نقشه انعکاس مطرح شد و روشنایی سطح تابعی از گرادیان شیب معرفی شد و روابط بین رنگ‌های روشنایی و شکل زمین ارائه شد (هورن، ۱۹۸۱؛ هورن و جوبرگ، 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 جغرافی‌دانان امریکا، ۲۰۱۴). این الگوریتم بر روی خطالرأس‌ها اعمال می‌شود و تصاویر سایه-روشن نرم‌تری ایجاد می‌کند که منحنی‌های پراکنش نامیده می‌شوند؛ این منحنی‌ها فضا را قطعه‌بندی می‌کنند و رنگ‌های متفاوتی در هر دو جناح خطالرأس ایجاد می‌کنند. روش‌های دیگری برای بر جسته‌سازی 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 رقومی‌سازهای دستی انجام پذیرد که یکی از شاخص‌ترین ابزارهای گرافیکی، نرم‌افزار فتوشاپ است (جنی، ۲۰۰۹؛ راینسون 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 درنظر گرفته شد. با درنظرگرفتن سوابق مطالعاتی موجود، از مدل‌ها و ایده‌های مطرح شده 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

سايهزني ناهمواري‌ها^۱ با استفاده از مدل رقومي ارتفاعی در محیط GIS انجام می‌گيرد. از داده‌های رقومي سطحی^۲ منتشرشده توسط آژانس فضائي ژاپن در ماه می و اکتبر ۲۰۱۵ با رزولوشن افقی در حدود ۲۳ متر برای بررسی توپوگرافی منطقه استفاده می‌شود. اين داده‌ها از تصاویر ماهواره ALOS به دست آمدۀ‌اند (تاکاكو و همكاران، ۲۰۱۴) و از شبکه داده‌های رقومي سطحی با قدرت تفکیک مکاني پنج متر و با پوشش جهانی استخراج شده‌اند. كه در حال حاضر دقیق‌ترین داده‌های ارتفاعی در مقیاس بزرگ هستند (تادونو و همكاران، ۲۰۱۴). سايهزني ناهمواري‌ها در محیط GIS با استفاده از رابطه ۱ انجام می‌گيرد (جنی و رابر، ۲۰۰۲).

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

كه در اين فرمول Ze زاويه سمت‌الرأسی يا عمودی، S زاويه شيب سطح زمین، Az زاويه آزيموتی يا افقی، و As جهت شيب سطح زمین است. ذكر اين نكته لازم است كه همه متغيرهای فوق به واحد رadian 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

1. Analytical Hill-Shading
2. Digital Surface Model (DSM)

```

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 پنجراه متحرک ۳ در ۳ پیکسل

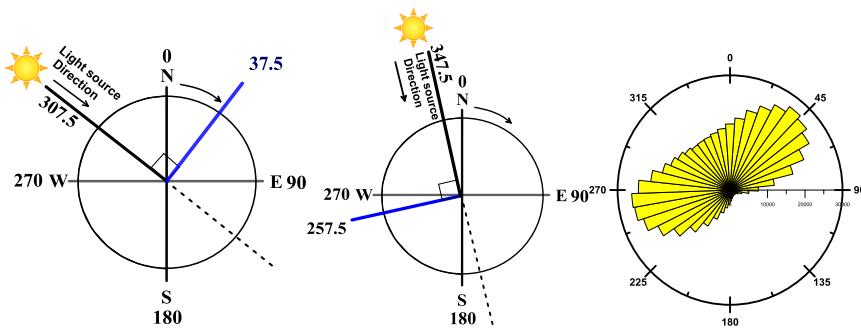
تصحیح آزمیوت بر اساس آنالیز توزیع فراوانی جهت شیب (AFDA^۱)

بر اساس ایده‌های مطرح شده در کارهای محققان پیشین (شرکت اسری، ۲۰۰۹؛ کنلی، ۲۰۰۹؛ کوکاس و ویبل، ۱۹۹۵؛ ژو و دورر، ۱۹۹۵)، توزیع فراوانی جهات شیب زمین به عنوان مبنای تعیین زاویه آزمیوتی منبع نور درنظر گرفته شد. در این مدل، زاویه آزمیوتی منبع نور عمود بر جهت با بیشترین فراوانی قرار می‌گیرد. رابطه ۲ نحوه محاسبه زاویه آزمیوتی 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 آزمیوت تابش نور، As جهت شیب زمین، و $As_{\max(f)}$ حداکثر فراوانی جهت شیب زمین است. توزیع فراوانی جهت شیب می‌تواند تک-مدی، دو-مدی^۲ یا چند-مدی^۳ باشد که، با توجه به هر یک از این حالات، استراتژی خاصی در پیش گرفته می‌شود. در حالت تک-مدی جهت تابش آزمیوتی عمود بر جهت با بیشترین توزیع فراوانی درنظر گرفته می‌شود. در حالت دو-مدی، جهت آزمیوتی 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 $\frac{37}{5}$ و مد دوم معادل $\frac{257}{5}$ درجه است. با استفاده از مدل AFDA جهت آزمیوتی تابش منبع نور به ترتیب برابر با $\frac{307}{5}$ و $\frac{257}{5}$ 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 شب

```

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 این طریق ناهمواری‌های زمین و لندفرم‌ها بهتر نمایش داده شود. بدین صورت

1. Un-Weighted Multidirectional Light Source

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 چندجهتی 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 ; s_factor = 1.0
Azimuth = 0
t_code = 0
for t in range(row-2):
    t_code+=1
    c_code = 0
    print 'Process Done = ',(t_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[t_code,c_code] ; N =DEM[t_code-1,c_code]
            NE =DEM[t_code-1,c_code+1] ; NW =DEM[t_code-1,c_code-1]
            S =DEM[t_code+1,c_code] ; SE =DEM[t_code+1,c_code+1]
            SW =DEM[t_code+1,c_code-1] ; W =DEM[t_code,c_code-1]
            E =DEM[t_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
            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
            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(s_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(Zenith_rad)*math.cos(Slope_rad))+\
                (math.sin(Zenith_rad)*math.sin(Slope_rad)*math.cos(Azimuth_rad-Aspect_rad)))

```

شکل ۵. بخشی از کد پایتون مربوط به مدل UMDLS

مدل منبع نور چندجهتی 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 چندجهتی وزنی مستقیم و معکوس را نشان می‌دهند.

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

1. Weighted Multidirectional Light Source

که در این فرمول، $H_{WMDLS\text{-}direct}$ مدل وزنی چندجهتی 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.

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

که در این فرمول، $H_{WMDLAS\text{-}Reverse}$ مدل وزنی چندجهتی 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)^۱

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

$$H_{VLSI} = (H_{Alt\ 90}) \times (H_S \text{ or } H_M) \quad (6)$$

$$H_{VLSI} = \frac{(H_{Alt\ 90}) + (H_S \text{ or } H_M)}{2} \quad (7)$$

$$H_{VLSI} = \frac{(H_{Alt\ 90} \times W) + (H_S \text{ or } H_M)}{W+1} \quad (8)$$

که در این فرمول، H_{VLSI} مدل تابندگی منبع نور قائم، $H_{Alt\ 90}$ 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 تصویح شده، و W وزن اثرباری 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

۱) مدل اثر سایه شیب (SSM)

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 پیشفرض) 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

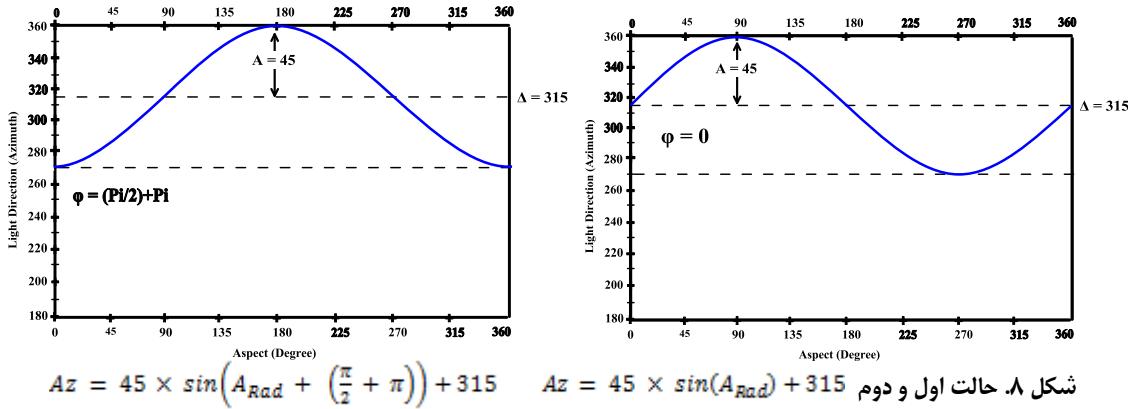
۲) مدل منبع تابش نوسانی با استفاده از معادله نوسان سینوسی (SLSF)

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

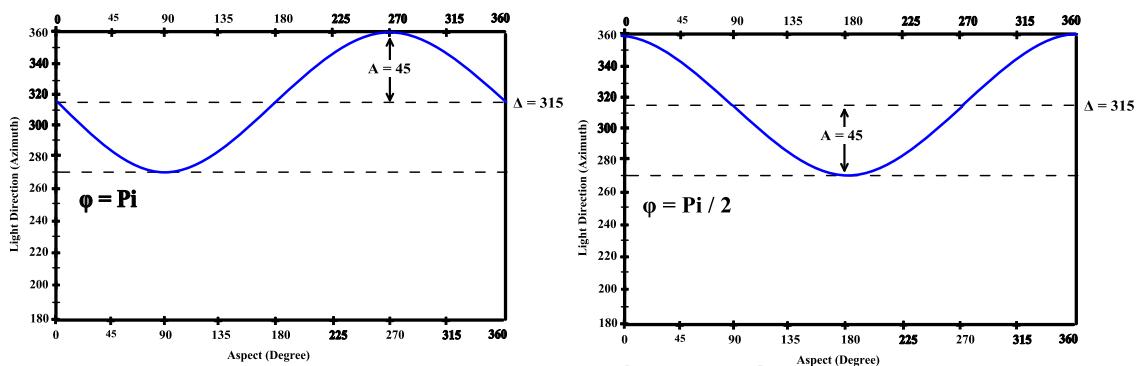
$$Az=A \times \sin(\theta + \varphi) + \Delta \quad (10)$$

که در این فرمول، Az ، φ ، θ و Δ به ترتیب آزیموت جهت تابش نور، شدت موج (ارتفاع موج)، جهت شیب زمین به درجه، جابه‌جاکننده افقی، و جابه‌جاکننده عمودی است. ورنوی و هورنی (۲۰۱۵) از معادله نوسانی سینوسی در بازه 2π استفاده کردند. آن‌ها ارتفاع نوسان موج سینوسی را معادل $17/5$ درجه درنظر گرفتند. از معادله ورنوی و هورنی (۲۰۱۵) برای تصحیح و ارتقای کیفیت نمایش مدل سایه-روشن با اعمال تغییراتی استفاده شد. بدین صورت که نوسات ارتفاع

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



شکل ۸. حالت اول و دوم



شکل ۹. حالت سوم و چهارم

```
# 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
# Writing 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

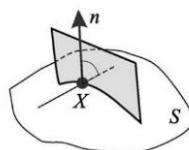
شکل ۱۰ بخشی از کد پایتون تهیه شده به منظور محاسبه مدل SLSF را نشان می دهد. هر یک از معادلات فوق بخشی از معادله موج سینوسی است که در بازه تغییرات جهت شیب ناهمواری ها قرار داده شده است.

سایه-رنگزنی^۱ با استفاده از انحنای زمین^۲

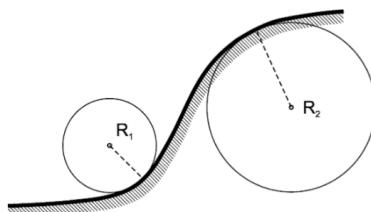
یکی از پارامترهایی که میزان واگرایی و همگرایی سطوح را در جهات مختلف تعیین می کند انحنای زمین است. یک مفهوم مهم در شناسایی وضعیت هندسی منحنی مماس^۳ بر سطح است (شکل ۱۱). صفحه قائم صفحه عمود به انحنایی است که به صورت r^{-1} تعریف می شود. r شعاع دایره ای است که بهترین انطباق را با انحنا در نقطه مفروض دارد (شکل ۱۲). انحنای 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 انحنای یک سطح ناهموار، صفحه ای بر روی انحنا قرار داده می شود و با استفاده از رابطه ۱۱ مشتق جزئی اول و دوم انحنای مورد نظر به صورت تابع $f(p,q,r,s,t)$ محاسبه می شود.



شکل ۱۱. صفحه عمود بر سطح S در نقطه X 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.

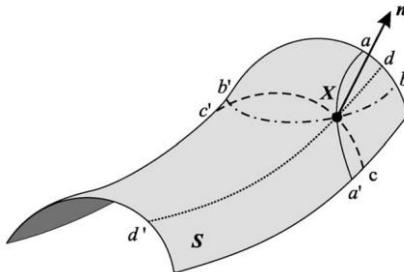


شکل ۱۲. انحنای $1/r$ صفحه منحنی معکوس شعاع دایره ای است که بهترین انطباق را با این انحنا در نقطه مفروض دارد. به طور قراردادی در علوم زمین، علامت انحنا برای سطوح محدب مثبت ($R > 0$) و برای سطوح مقعر منفی ($R < 0$) در نظر گرفته می شود.

یک راه مؤثر برای نشان دادن انحنایها بر روی شیب انتخاب برخی جهات خاص است (شروع و همکاران، ۲۰۰۲). چهار نوع جهت انتخابی بر روی سطوح وجود دارد که می توان از آنها استفاده کرد (شکل ۱۳). دو نوع از این جهات ($a\acute{a}$ و $b\acute{b}$) به طور فیزیکی توسط میدان جاذبه زمین تعریف می شود و دو جهت دیگر توسط خود سطح تعریف می گردد؛ به گونه ای که $c\acute{c}$ حداقل مقدار انحنای منحنی مماس و $d\acute{d}$ حداقل مقدار آن است. انحنای 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 تقرّر مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ۱۳. چهار جهت نرمال بر روی سطح S در نقطه X در سطح S در نقطه X خط گرادیان، $\text{ خط کانتور، } \text{ و منحنی‌های مماس اصلی می‌باشند (شری و همکاران، ۲۰۰۲)$

انحنای تانژانتی مقرر نشان‌دهنده همگرایی و انحنای تانژانتی محدب نشان‌دهنده واگرایی خطوط جريانی و انحنای پروفیلی محدب نماینده تسریع جریان است. انحنای پروفیلی، تانژانتی، حداقل، و حداقل بهترین از منحنی‌های مماس ایجاد 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

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

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

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

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

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

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

با توجه به نشانگذاری‌های فوق، انحنای پروفیلی با استفاده از رابطه ۱۹ (یانگ، ۱۹۷۸؛ کرچو، ۱۹۷۳) به دست آمد.

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

انحنای تانزانتی با استفاده از رابطه ۲۰ (کرچو، ۱۹۸۳؛ شری، ۱۹۹۱؛ میتابوسا و هوفریکا، ۱۹۹۳) محاسبه شد.

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

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

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

انحنای متوسط عبارت از میانگین انحنای‌های متعدد در همه منحنی‌های تماس است که می‌تواند از انحنای پروفیلی و تانزانتی محاسبه شود (یانگ، ۱۸۰۵). رابطه‌های ۲۲ و ۲۳ روش محاسبه انحنای متوسط را نشان می‌دهند.

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

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

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

$$\text{Unsphericity Curvature} = \frac{\left(r.\sqrt{\frac{1+q^2}{1+p^2}} - t.\sqrt{\frac{1+p^2}{1+q^2}} \right)^2 . (1+p^2+q^2) + \left(p.q.r.\sqrt{\frac{1+p^2}{1+q^2}} - 2.s.\sqrt{(1+q^2).(1+p^2)} + p.q.t.\sqrt{\frac{1+p^2}{1+q^2}} \right)^2 }{2.(1+p^2+q^2)^{5/2}} \quad (24)$$

انحنای انحراف کروی نشان‌دهنده اختلاف سطح به نسبت کرده است و در نتیجه دارای مقدار ۰ برای شکلی کروی است. انحنای دیفرانسیلی به صورت نیمی از تفاضل بین انحنای افقی و عمودی تعریف می‌شود. برای محاسبه این نوع انحنا از رابطه ۲۵ استفاده شد (شری، ۱۹۹۵).

$$\text{Differential Curvature} = \frac{q^2.r-2.p.q.s+p^2.t}{(p^2+q^2).(1+p^2+q^2)^{\frac{5}{2}}} - \frac{(1+q^2).r-2.p.q.s+(1+p^2).t}{2.(1+p^2+q^2)^{3/2}} \quad (25)$$

از سه انحنای متوسط، انحراف کروی، و دیفرانسیلی سایر انحنایها شامل انحنای حداکثر، حداقل، مازاد افقی و عمودی، گوسی، تجمعی کل، دایره‌ای کل، و انحنای خطوط جريانی با استفاده از رابطه‌های ۲۶-۳۴ (شری و همکاران، ۲۰۰۲؛ شری، ۱۹۹۵) محاسبه شدند.

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

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

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

$$\text{Vertical excess Curvature} = \text{Unsphericity}_{\text{Curv}} + \text{Diferencial}_{\text{Curv}} \quad (۲۹)$$

$$\text{Total Gaussian Curvature} = \text{Mean}_{\text{Curv}}^2 - \text{Unsphericity}_{\text{Curv}}^2 \quad (۳۰)$$

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

$$\text{Total Gaussian Curvature} = \frac{r \cdot t - s^2}{(1 + p^2 + q^2)^2} \quad (۳۱)$$

$$\text{Total Accumulation Curvature} = \text{Mean}_{\text{Curv}}^2 - \text{Diferencial}_{\text{Curv}}^2 \quad (۳۲)$$

$$\text{Total Ring Curvature} = \text{Unsphericity}_{\text{Curv}}^2 - \text{Diferencial}_{\text{Curv}}^2 \quad (۳۳)$$

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

$$\text{Curvature of Flowlines} = \frac{(p^2 - q^2) \cdot s - p \cdot q \cdot (r - t)}{\sqrt{(p^2 + q^2)^3}} \quad (۳۴)$$

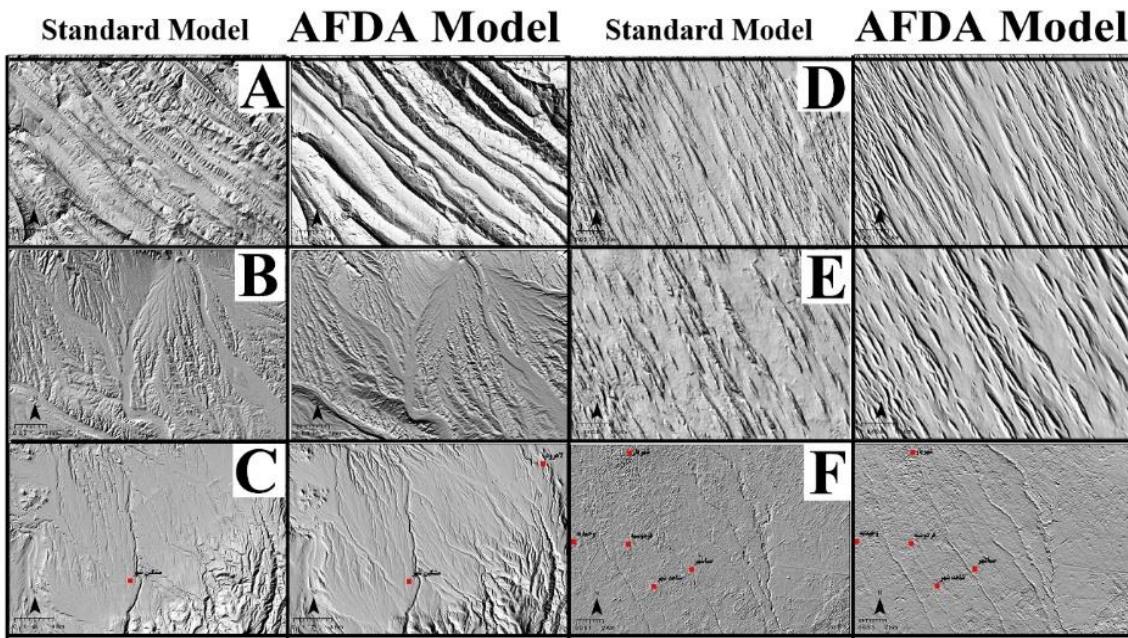
بعد از محاسبه انحنای زمین و ترکیب وزنی آن با مدل سایه-روشن استاندارد می‌توان به مدل‌هایی دست یافت که از اثر انحنا در ایجاد سایه‌زنی توپوگرافیکی استفاده می‌کنند (رابطه ۳۵).

$$\text{Curvature Shading} = \frac{(H_{\text{Standard}} \times W) + (C_{\text{Shader}} \times W)}{100} \quad (۳۵)$$

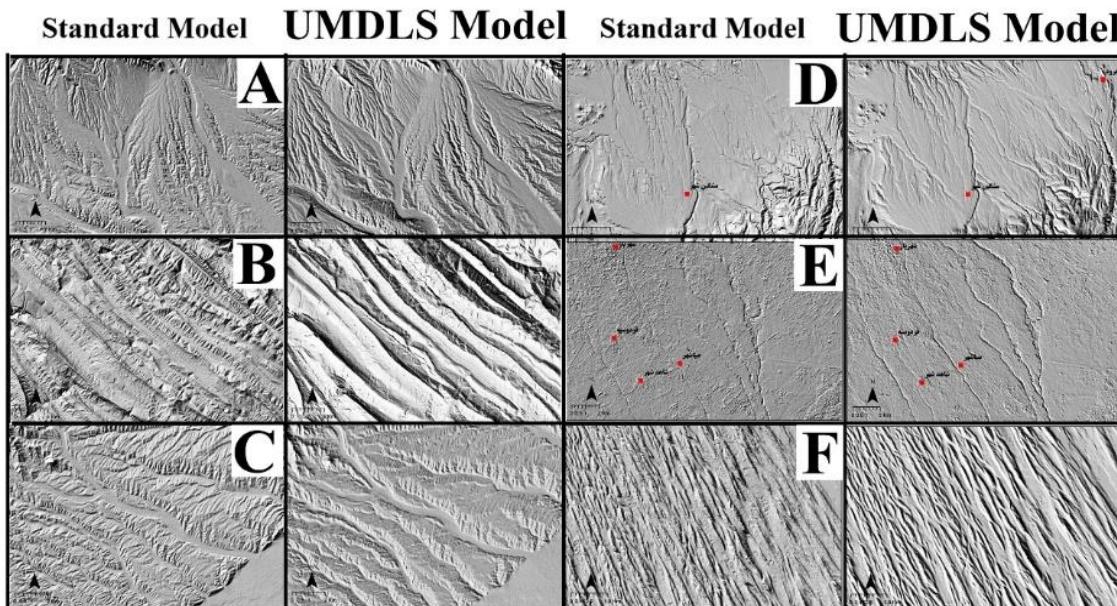
که در این رابطه W وزن تأثیر به درصد (مجموع اوزان بایستی عدد ۱۰۰ باشد)، H_{Standard} مدل سایه-روشن استاندارد (با پارامترهای پیش-فرض)، C_{Shader} میزان انحنای زمین (مدل‌های چهارده‌گانه انحنا) است.

یافته‌های پژوهش

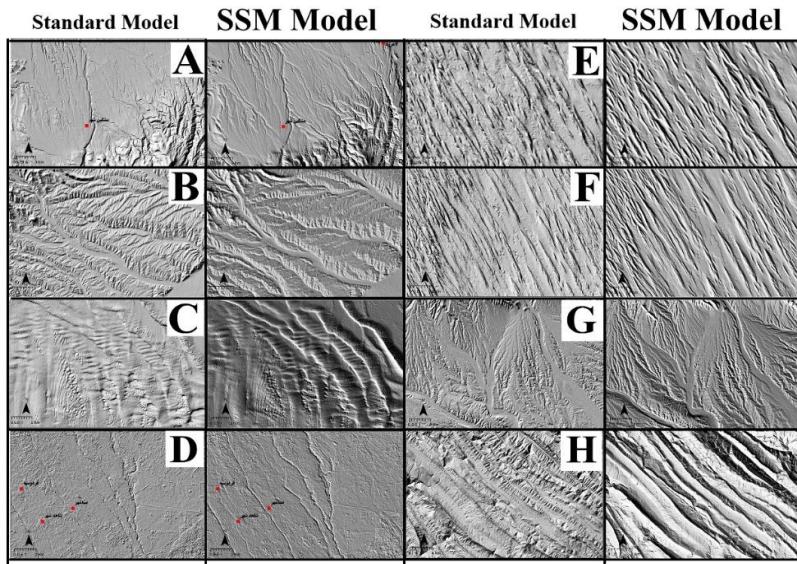
در این پژوهش مورفولوژی نوری با استفاده از مفاهیم سیستم اطلاعات جغرافیایی در محیط برنامه‌نویسی پایتون انجام گرفت. از انواع مدل‌های تصحیح‌کننده و بارزساز استفاده شد. با دخالت برخی مؤلفه‌های توپوگرافیکی همچون شیب و جهت شیب و نیز با تغییر جهات تابش نور بر سطح توپوگرافی، مدل‌های مختلفی برای مورفولوژی نوری سطح توپوگرافی مطرح شد. نحوه عملکرد و منطق محاسباتی هر یک از مدل‌های مطرح شده 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 ذکر شده است و قادر به ذخیره‌سازی نتایج هر مدل به صورت فایل رستری در خروجی است. لندرمها 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.



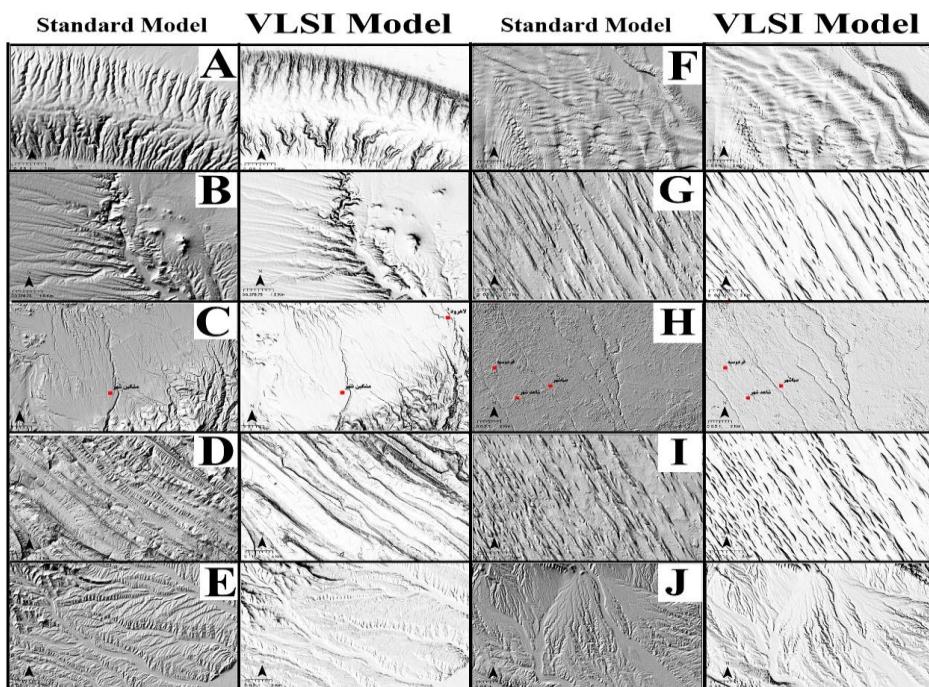
شکل ۱۵. نتایج خروجی مدل AFDA در عوارض ژئومورفولوژیکی نمونه: A: چین‌های فشرده زاگرس (ارتفاعات شمال غرب دنا); B: مخروطهای قدیم فرسایش یافته و شیارشیارشده در منطقه غرب اصلاحندوز پارس‌آباد (آذربایجان); C: دشت آتش‌فشانی شمال مشکین‌شهر؛ D و E: کلوت‌های شرق شهداد (لوت)؛ F: خندق‌های رودخانه‌ای جنوب‌شرق شهریار



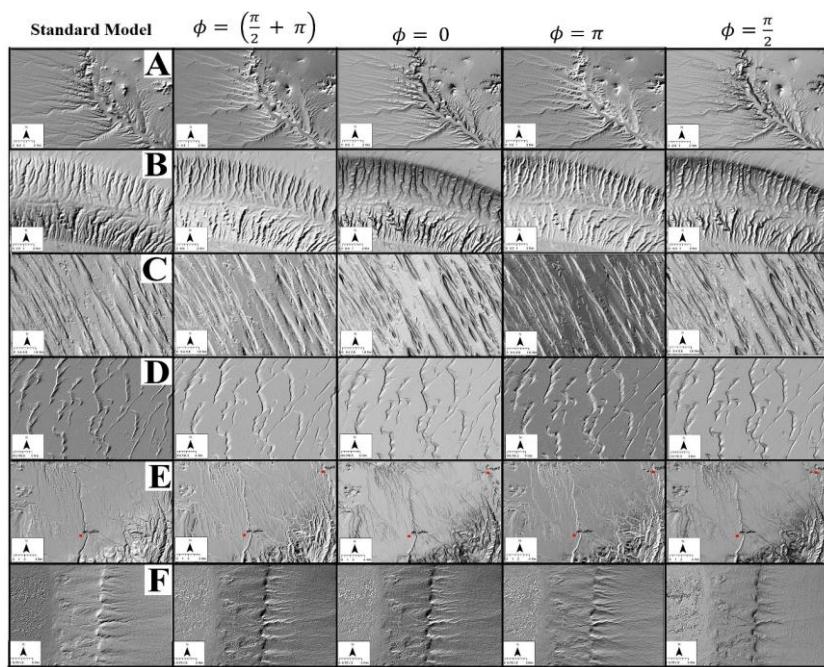
شکل ۱۶. نتایج خروجی مدل UMDLS در عوارض ژئومورفولوژیکی نمونه: A: مخروطهای قدیم فرسایش یافته و شیارشیارشده در منطقه غرب اصلاحندوز پارس‌آباد (آذربایجان)؛ B: چین‌های فشرده زاگرس (ارتفاعات شمال غرب دنا)؛ C: مخروط‌افکنهای قدیمی و فرسایش یافته و خندق‌شده شمال خمارلو (کلیبر آذربایجان)؛ D: دشت آتش‌فشانی شمال مشکین‌شهر؛ E: خندق‌های رودخانه‌ای جنوب‌شرق شهریار؛ F: کلوت‌های شرق شهداد (لوت)



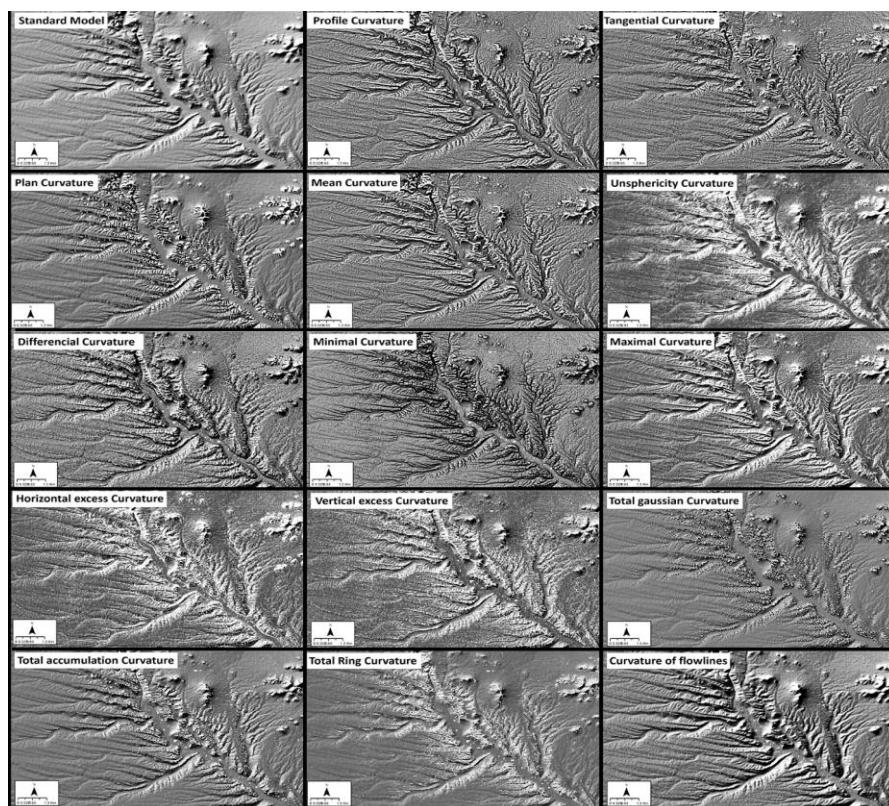
شکل ۱۷. نتایج خروجی مدل SSM در عوارض ژئومورفولوژیکی نمونه: A: دشت آتش‌فشانی شمال مشکین شهر؛ B: مخروط‌افکنهای قدیمی و فرسایش‌یافته و خندقی شده شمال خمارلو (کلیبر آذربایجان)؛ C: تپه‌های ماسه‌ای جنوب‌شرق جندق؛ D: خندق‌های رودخانه‌ای جنوب شرق شهریار؛ E و F: کلوت‌های شرق شهداد (لوت)؛ G: مخروط‌های قدیم فرسایش‌یافته و شیارشیارشده در منطقه غرب اصلاحندوز پارس‌آباد (آذربایجان)؛ H: چین‌های فشرده زاگرس (ارتفاعات شمال غرب دنا)



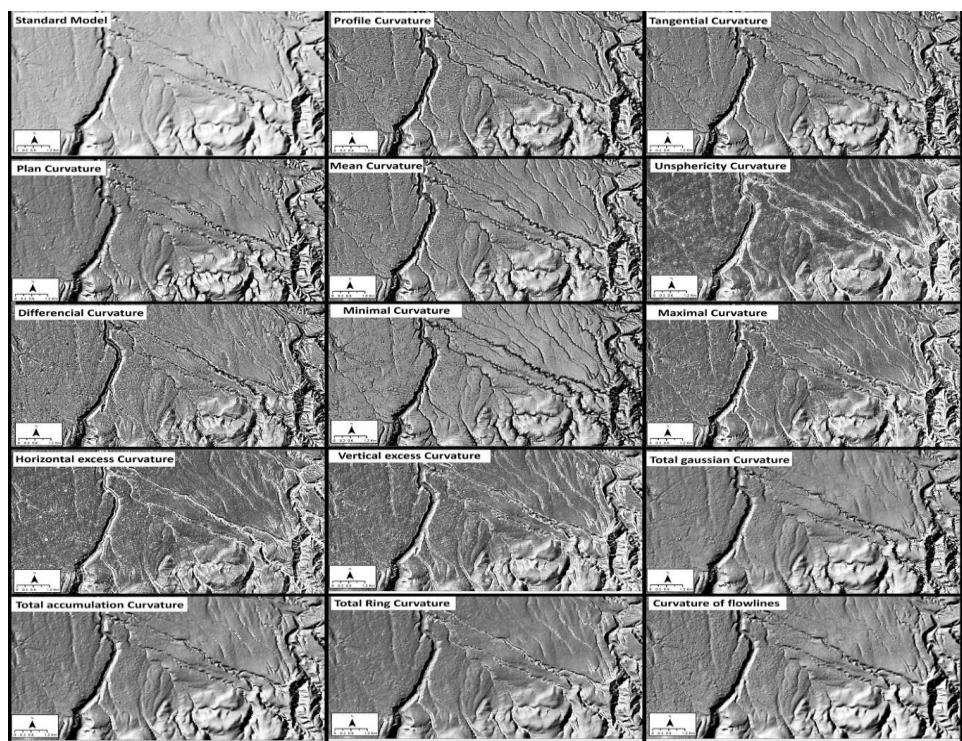
شکل ۱۸. نتایج خروجی مدل VLSI در عوارض ژئومورفولوژیکی نمونه: A: شکاف‌ها و دره‌های عرضی کلوز واقع در غرب باب‌النار (جهرم فارس)؛ B: گالی‌های توسعه‌یافته شمال غرب گنداب (شهرستان شاهرود)؛ C: دشت آتش‌فشانی شمال مشکین شهر؛ D: چین‌های فشرده زاگرس (ارتفاعات شمال غرب دنا)؛ E: مخروط‌افکنهای قدیمی و فرسایش‌یافته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



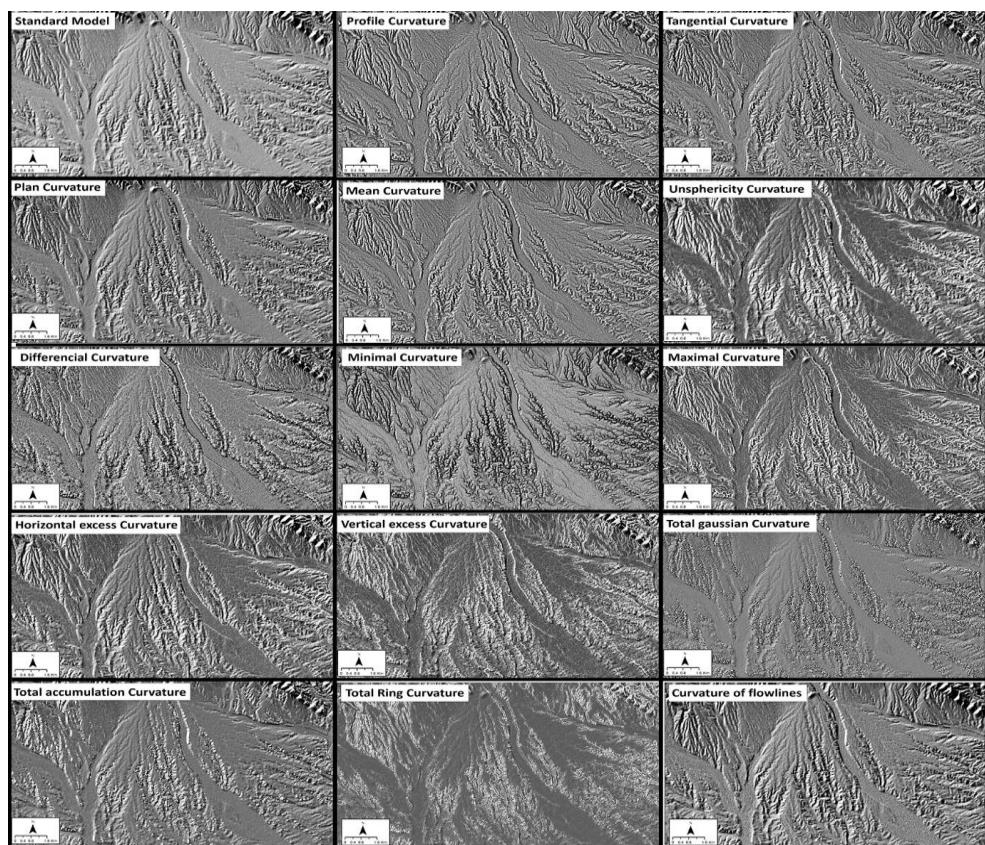
شکل ۱۹. نتایج خروجی مدل SLSF در عوارض ژئومورفولوژیکی نمونه: A: گالی‌های توسعه‌یافته شمال غرب گنداب (شهرستان شاهروود); B: شکاف‌ها و دره‌های عرضی کلوز واقع در غرب باب‌النار (جهرم فارس); C: کلوت‌های شرق شهداد (لوت); D: تچه‌های ماسه‌ای عرضی و دبلیو واقع در غرب جندق; E: دشت آتش‌فشنای شمال مشکین شهر؛ F: گسل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



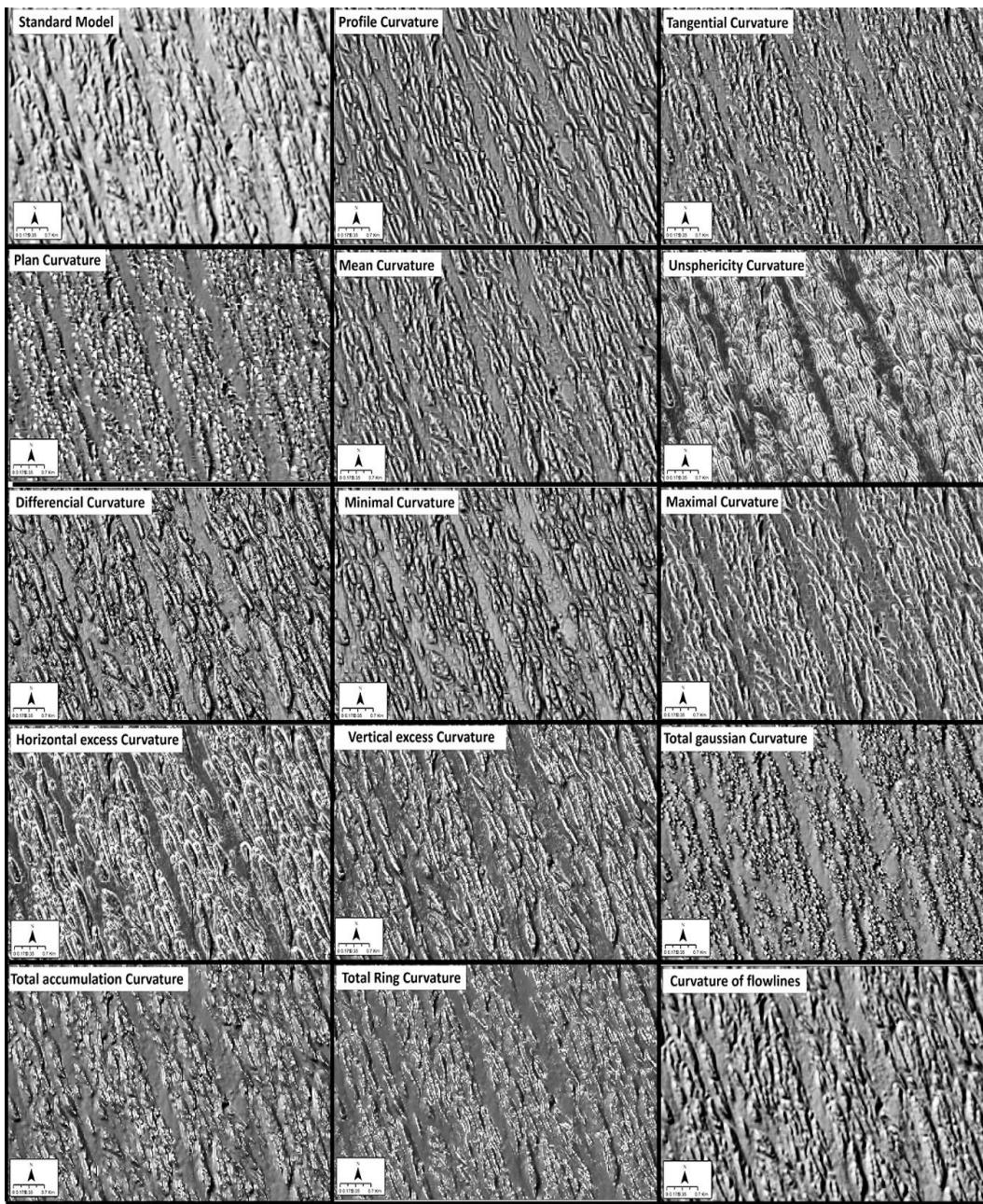
شکل ۲۰. مدل استفاده از انحنای زمین (چهارده روش انحنای زمین)، گالی‌های توسعه‌یافته شمال غرب گنداب (شهرستان شاهروود)



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



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



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

جدول‌های ۱ و ۲ به ترتیب ساختار کلی مدل‌ها و کاربرد هر یک در ژئومورفولوژی را نشان می‌دهند. این 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 درست است که معادل سیاه و ۲۵۵ معادل رنگ سفید است و می‌تواند نماینده درجه 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 شبیه پیکسل عمل	Aspect Frequency Distribution Analysis	AFDA	این مدل بر اساس توزیع فراوانی جهت شبیه 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 آزموتی بدون وزن	Unweighted Multi-Directional Light Source	UMDLS	در این مدل منبع تابش نور غیرثابت 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 آزموتی 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 آزموت تابش منبع نور قرار می‌گیرند به صورت وزنی اثرگذار می‌شوند. در نتیجه، تعداد بیشتر پیکسل‌هایی به سمت منبع آزموتی نور وزن بیشتری به خود اختصاص می‌دهند. نتایج بدست آمده 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 وزن دهی است؛ بدین صورت که تعداد پیکسل‌هایی که هم‌جهت با منبع نور هستند وزن معکوس می‌گیرند و تأثیرشان کمتر می‌شود.
۵	مدل اثر سایه شبیه	Slope Shading Model	SSM	در این مدل منبع تابش نور بر سطح توپوگرافی با ارتفاع ۹۰ درجه تهیه می‌شود و نتایج بدست آمده 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 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.
۷	مدل های ارتفاعی تحریکی	Profile Shading Model Tangential Curvature Shading Model Plan Curvature Shading Model Un-Sphericity Curvature Shading Model Mean Curvature Shading Model Differential Curvature Shading Model Maximal Curvature Shading Model Minimal Curvature Shading Model Horizontal Excess Curvature Shading Model Vertical Excess Curvature Shading Model Total Gaussian Curvature Shading Model Total Accumulation Curvature Shading Model Flowlines Curvature Shading Model	PCSM TCSM PCSM UCCSM MCSM DCSM MaCSM MiCSM HECSM VECSM TGCSM TACSM FCSM TRCSM	مدل‌های انحنای زمین هر یک بر بخش خاصی از توپوگرافی متغیر کر می‌شوند. نحوه قرارگیری صفحه تماس با سطح توپوگرافی می‌تواند ساختارهای متفاوتی از ناهمواری‌های زمین را بازرسازی کند. در هر یک از روش‌های چهارده‌گانه محاسبه انحنای بخش خاصی از توپوگرافی لندفرم‌های زمین مد نظر قرار می‌گیرد که بسته به هدف و نوع لندفرم‌ها از انحنای متناسب می‌توان استفاده کرد. به طور کلی، مدل‌های انحنای زمین می‌توانند تحدب و تقرع سطوح ناهموار زمین را تشخیص دهند و از این طریق مناطق همگایی و واگرایی سطحی را تعیین کنند.

Terrain Curvature Shading Models (TCSM)

جدول ۲. کاربرد مدل‌های مورفولوژی نوری در مطالعات ژئومورفولوژیکی

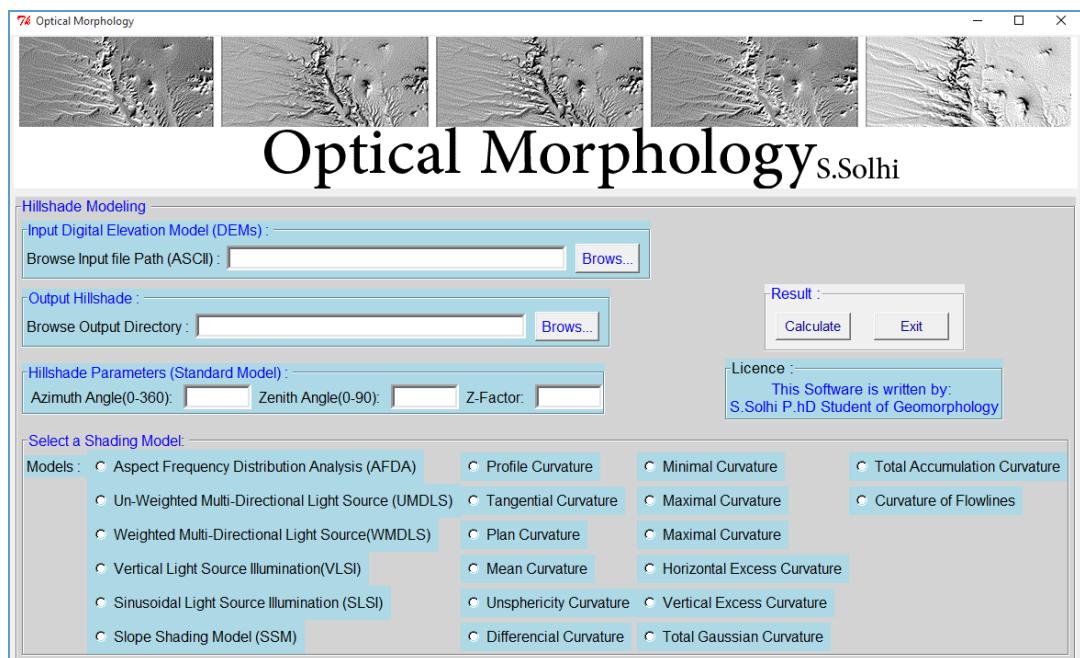
ردیف.	مدل	کاربرد
۱	AFDA	این مدل همواره سعی می‌کند منبع آریمتوی تابش نور را عمود بر جهت قرارگیری حداقل فراوانی پیکسل‌ها قرار دهد و در جهت بازسازی شیارها، دره‌ها، و کلیه خطوط و شکستگی‌های مورفولوژیکی هم راستا با جهت گردایانی ناهمواری‌های اصلی عمل کند. این مدل برای بازسازی شبکه‌های کانسکوتی نیز مناسب است. نوع دیگری از این مدل قابل استخراج است؛ بهطوری که بعد از تحلیل توزیع فراوانی جهت شب منبع تابش نور هم راستا با بیشترین فراوانی پیکسلی قرار می‌گیرد. در این حالت شبکه دره‌ها و شیارهای فرعی، که عمود بر جهت گردایانی شبب هستند، مورد توجه بیشتری قرار می‌گیرند و بازسازی می‌شوند. این مدل برای واضح‌سازی و تمرکز بر بردگی‌ها، شیارها، دره‌ها، و شبکه‌های زهکشی، اسکوتی و ساسکوتی مناسب است. عوارض بخچالی شامل سیرک‌های بخچالی، دره‌های فرعی، و سیاری عوارض مورفولوژیکی دیگر از این طریق قابل واضح‌سازی و بازسازی‌اند.
۲	UMDLS	این مدل به دلیل استفاده از منبع نور چندگانه تأثیر سایه‌های جهتی با کتراست 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 معادل و مناسب‌تر توپوگرافی در جهات مختلف منجر شود در مواردی که شرایط توپوگرافی بسیار پیچیده و ضرباب ناهمواری سطح مقادیر زیادی را نشان می‌دهد، استفاده 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 تابع خروجی خواهد 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 اینکه منبع نور چندجهته دارد و باعث کاهش کتراست سایه-روشن می‌شود از طریق کاهش اغراق غیرواقعی به درک بهتر از سطح رویه زمین کمک می‌کند.
۴	VLSI	این مدل با استفاده از تابش منبع نور قائم به بهبود نمایش لبه‌های عوارض ژئومورفولوژیکی، خطالراس‌ها، و خطوهای توپوگرافیکی کمک می‌کند. این مدل باعث کاهش اغراق جهتی توپوگرافی و خطای دهن ناشی از منبع نور جهتی می‌شود و تصویری بهتر از بر جستگی، خطالراس‌ها، برآمدگی‌ها، و چن وجوه کهای مورفولوژیک سطح زمین در ذهن بیننده ایجاد می‌کند. در این روش خطالراس‌ها (خطالراس‌های اصلی و فرعی؛ خطالتعرهای هم راستا بر جهت شبب، خطالراس‌های عمود بر جهت شبب) و خطالتعرهای (خطالتعرهای اصلی و فرعی؛ خطالتعرهای هم راستا بر جهت شبب، خطالراس‌های عمود بر جهت شبب) به خوبی بازسازی می‌شوند و برای تشخیص و ترسیم محدوده سیرک‌های بخچالی، محدوده دره‌ها، مرز حوضه‌ها و زیرحوضه‌ها، کانال‌های زهکشی و شبکه‌گالی‌ها و همچنین رمپ‌های مومنی در مناطق بخچالی، برآمدگی‌های رسوبی بدنۀ مخروطافکنه‌ها، و برآمدگی‌های پایکوهی و گلاسی‌ها مناسب است.
۵	SSM	نتایج به دست آمده از این مدل شباهت زیادی به مدل ۴ دارد؛ تهها تقاضوت در استفاده از اثر سایه‌های شبب به جای تابش نور از منع قائم است. نوع استفاده و کاربردهای آن نیز تا حدودی مشابه مدل قبلی است.
۶	SLSF	این مدل به شدت 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.
۷	Terrain Curvature Shading Models (TCSMs)	مدل‌های مختلف انحنای زمین بر ساختارهای مختلف توپوگرافی زمین متصرک می‌شوند و هر یک بخشی از شکل ناهمواری‌های زمین را توصیف می‌کند. برخی از مدل‌های اینجا باعث واضح‌سازی و بازسازی خطالراس‌ها، لبه‌ها، خطوط، مرز شبکه‌های زهکشی می‌شوند. آن‌ها تمرکز چشم را به سمت خطالراس‌های فرعی و خطوط تقسیم آب مابین ناهمواری‌های حوضه منحرف می‌کنند. مدل‌های اینجا پروفیلی، تائزاتی، پلان، متوسط، و حداقلی در این دسته طبقه‌بندی می‌شوند به طور کلی، نتایج به دست آمده از این گروه، معمولاً نتایج مطلوبی دارد و در نمایش ناهمواری‌های زمین عملکرد بسیار خوبی از خود نشان می‌دهد. مدل‌های اینجا دیفرانسیلی، افقی، عمودی، و خطوط جریانی تتمیل به نمایش روشن توپوگرافی دارند. از نتایج به دست آمده از این مدل‌ها برای ترکیب با نقشه‌های دیگر به طور همزمان (با استفاده از قابلیت شفاف‌سازی) به خوبی می‌توان استفاده کرد. درجه بارزسازی لبه در این مدل‌ها بسیار زیاد است. در توپوگرافی‌های پیچیده و مرکب استفاده از این مدل‌ها می‌تواند با مدل‌های گوسی و تجمیع نتایج مشابهی دارد. حساسیت چنانی به شیارها، لبه‌ها، و شبکه‌های کم عمق پوسته زمین ندارند و بیشتر چن خودگی‌های اصلی و عمیق را بازسازی می‌کنند. مدل‌های اینجا دایره‌ای، حداقلی، و انحراف کروی نتایج نسبتاً مشابهی دارند؛ ولی درجه تیرگی و روشنایی آن‌ها با یکدیگر اختلاف دارد. این گروه باعث افزایش کتراست لبه‌ها، برآمدگی‌ها، شبکه‌گالی‌ها، و دره‌ها به نسبت خطالراس‌ها و برآمدگی‌ها می‌شوند. این گروه برای نمایش جزئیات و چن وجوه کهای محلی مناسب نیستند و بهتر است در این شرایط از مدل‌های دیگر استفاده شود.

جدول ۳. آنالیز کمی مدل‌های سایه-رنگزن و مقایسه آن‌ها با مدل استاندارد (درجات خاکستری -۰- ۲۵۵)

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

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	
کتراست جهتی														
کتراست جهتی بن														
جهت شمال و خوب	۲۲۲	۷۰۰	۵۷۷	۰۴۸	۴۳۹	۰۲۰	۰۰۹	۰۱۳	۰۱۰	۲۱۰	۲۲۸	۲۱۰	۷۷۷	۰۲۸
- در مدل سایه-														
رنگ‌زن														
کتراست جهتی بن														
جهت شرق و غرب	۲۹۱	۸۱۳	۹۸۲	۸۲۰	۰۴۱	۰۲۹	۷۸۸	۷۶۴	۶۶۱	۴۱۳	۳۳۶	۲۴۲	۱۲۴۱	۹۰۲
- در مدل سایه-														
رنگ‌زن														
کتراست جهتی بن														
جهت شمال و خوب	۲۲۲۲	۲۲۲۲	۲۲۲۲	۲۲۲۲	۲۲۲۲	۲۲۲۲	۲۲۲۲	۲۲۲۲	۲۲۲۲	۲۲۲۲	۲۲۲۲	۲۲۲۲	۲۲۲۲	۲۲۲۲
- در مدل استاندارد														
کتراست جهتی بن														
جهت شرق و غرب	۲۲۸۲	۲۲۸۲	۲۲۸۲	۲۲۸۲	۲۲۸۲	۲۲۸۲	۲۲۸۲	۲۲۸۲	۲۲۸۲	۲۲۸۲	۲۲۸۲	۲۲۸۲	۲۲۸۲	۲۲۸۲
- در مدل استاندارد														



شکل ۲۴. نرم افزار گرافیکی Optical Morphology V.1، تهیه شده در محیط برنامه نویسی 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 شب و جهت شب زمین است تا 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 خودکارشندن 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 آزمیوتی 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 واسط 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/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 Trans- actions 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 field theory, *Acta Geographica Universitatis Comenianae, Geographico-Physica*, 1(1): 7-233.
- Krcho, J. (1983). Teoretická concepcia a interdisciplinárne aplikacie komplexného digitalného modelu reliéfu pri modelovaní dvojdimenzionálnych polí, *Geografický 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.
- Mitášová, H. and Hofierka, 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](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, Commision 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.