



دانشگاه گوارز و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و یکم، شماره اول، ۱۳۹۳

<http://jwsc.gau.ac.ir>

## معرفی الگوریتم‌های مختلف جریان، برای تهیه نقشه شاخص خیسی و کربن آلی خاک در بخشی از اراضی لسی، منطقه توشن استان گلستان

\*صدیقه ملکی<sup>۱</sup>، فرهاد خرمالی<sup>۲</sup> و علیرضا کریمی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، آستاد گروه علوم خاک،

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، آستادیار گروه علوم خاک، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۲/۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۴/۱۳

### چکیده

توپوگرافی یکی از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده الگوی مکانی مناطق اشباع می‌باشد که به نوبه خود کلیدی برای فهم و درک بسیاری از تغییرات در خاک‌ها و فرآیندهای هیدرولوژیکی است. شاخص خیسی که از ترکیب مساحت حوضه بالادست و شیب به‌دست می‌آید، معمولاً برای کمی کردن تأثیر توپوگرافی بر فرآیندهای هیدرولوژیکی استفاده می‌شود. از طرفی اثرات متقابل توپوگرافی با اقلیم هر منطقه نیز بر تغییرات مواد آلی خاک، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای کیفیت خاک مؤثر است، که با شاخص خیسی همبستگی بالایی نشان می‌دهد و می‌تواند از طریق این شاخص برآورد شود. این پژوهش با هدف ارزیابی الگوریتم‌های مختلف شاخص خیسی، انتخاب بهترین الگوریتم براساس خصوصیات منطقه و استفاده از آن برای تهیه نقشه کربن آلی خاک در بخشی از اراضی شیب‌دار لسی منطقه توشن، استان گلستان انجام شد. شاخص خیسی براساس الگوریتم‌های تک‌مسیره، دو مسیره و چندمسیره محاسبه شد. به‌منظور انجام این مطالعه ۱۳۵ نمونه خاک به روش سیستماتیک تصادفی از عمق ۰-۲۰ سانتی‌متری برداشت شد. نتایج نشان داد شاخص خیسی محاسبه شده با الگوریتم‌های دو و چندمسیره نسبت به الگوریتم‌های تک‌مسیره همبستگی بیش‌تری با ماده آلی خاک در منطقه دارند. اگرچه در بسیاری از مطالعات انجام شده شاخص خیسی از طریق الگوریتم تک‌مسیره محاسبه می‌شود، که فرض بر این است که تمام جریان از یک سلول تنها به یک سلول دیگر انتقال می‌یابد، اما این فرضیه به‌خصوص در مناطق مسطح با جریان‌های منشعب صحیح نمی‌باشد. در نهایت توصیه می‌شود که در این گونه مطالعات برای کسب نتایج دقیق‌تر، شاخص خیسی با الگوریتم‌های گوناگون محاسبه و بهترین آن‌ها انتخاب شود.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم‌های مختلف جریان، توپوگرافی، شاخص خیسی، کربن آلی خاک

\* مسئول مکاتبه: [elymaleki@yahoo.com](mailto:elymaleki@yahoo.com)

## مقدمه

توپوگرافی بیش‌تر یکی از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده الگوی مکانی مناطق اشباع است که به نوبه خود کلیدی برای فهم و درک بسیاری از تغییرات در خاک‌ها و فرآیندهای هیدرولوژیکی می‌باشد (گربز و همکاران، ۲۰۰۹). توپوگرافی هم‌چنین به‌عنوان یک عامل اولیه کنترل‌کننده تغییرات مکانی شرایط هیدرولوژیکی می‌باشد که توزیع مکانی رطوبت خاک را متأثر می‌سازد و حتی جریان آب زیرزمینی نیز بیش‌تر از توپوگرافی سطح پیروی می‌کند. توپوگرافی نه تنها رطوبت خاک، بلکه به‌طور غیرمستقیم pH خاک را نیز متأثر می‌سازد (سرنسن و همکاران، ۲۰۰۵). بدیهی است که توزیع مکانی رطوبت لایه بالایی خاک، روندی پیچیده دارد که به عوامل طبیعی و فعالیت‌های انسانی بستگی دارد. روند توزیع طبیعی رطوبت خاک (بدون در نظر گرفتن فعالیت‌های انسانی) اصولاً به شکل ظاهری، پستی و بلندی زمین بستگی دارد. به‌عبارت دیگر توزیع مکانی برخی از ویژگی‌های لایه بالایی خاک، مانند توانایی جذب و نگهداشت آب، بیش‌تر توسط پستی و بلندی تعیین می‌شوند (اسوتلتچینی و همکاران، ۲۰۰۳). بنابراین، از شاخص‌های توپوگرافی برای توصیف الگوی مکانی رطوبت خاک استفاده می‌شود.

از طرفی اثرات متقابل توپوگرافی با اقلیم هر منطقه نیز بر تغییرات مواد آلی خاک، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای کیفیت خاک مؤثر است. در مقیاس جهانی، تنوع اقلیم اولین عامل کنترل‌کننده میزان کربن خاک و سرعت چرخه آن و توپوگرافی دومین عامل کنترل‌کننده آن در یک منطقه مشخص می‌باشد (جنی، ۱۹۲۸؛ ساندرمن و همکاران، ۲۰۰۳). رطوبت خاک در نقاط مختلف شیب، حتی بیش‌تر از تغییر یک اقلیم به اقلیم دیگر، با هم اختلاف دارند، به‌طوری‌که در مناطق مرطوب میزان رطوبت خاک در قسمت‌های بالای شیب می‌تواند کم‌تر از پای شیب در منطقه خشک‌تر باشد (اسوتلتچینی و همکاران، ۲۰۰۳)، در نتیجه تجمع مواد آلی بیش‌تر در مناطق پایین شیب که شرایط مرطوب‌تری نسبت به وسط و بالای شیب دارند، بیش‌تر می‌باشد.

در سال‌های اخیر استفاده از متغیرهای توپوگرافی به‌عنوان متغیرهای کمکی برای برآورد خصوصیات خاک، به‌ویژه برای تهیه نقشه کربن آلی خاک توسط پژوهش‌گران مختلف مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات زیادی نیز نشان داده است که موقعیت‌های شیب با میزان رطوبت بیش‌تر، میزان کربن آلی بیش‌تری دارند (استار و همکاران، ۲۰۰۰؛ جانزن و همکاران، ۲۰۰۲). رطوبت خاک که با کربن آلی خاک همبستگی مثبتی نشان می‌دهد را می‌توان با استفاده از متغیرهای توپوگرافی مدل‌سازی

کرد (جنی، ۱۹۴۱؛ جانزن و همکاران، ۲۰۰۲؛ مولر و پیرس، ۲۰۰۳). یکی از برتری‌های مهم داده‌های توپوگرافی این است که به آسانی به‌دست می‌آیند و در مقایسه با سایر ویژگی‌های پویای خاک، با گذشت زمان تغییر زیادی نمی‌کنند. از این‌رو ویژگی‌های توپوگرافی سطحی می‌توانند برای برآورد الگوهای پایدار مکانی عملکرد محصول به‌کار روند که عمده اختلافات به تغییرپذیری مکانی در ویژگی‌های خاک و فراهمی رطوبت مربوط می‌شوند (گرین و همکاران، ۲۰۰۷). به‌عبارت دیگر می‌توان ویژگی‌های توپوگرافی را به‌عنوان عوامل بازتابنده اثر ترکیبی عوامل مؤثر بر رشد گیاه در نظر گرفت. چن و همکاران (۲۰۰۸) نیز رابطه بین کربن آلی خاک و مشخصات عوارض زمین به‌دست آمده از مدل‌های رقومی ارتفاع (DEM) را به‌دست آوردند.

در بین خصوصیات توپوگرافی، شاخص خیزی توپوگرافیک (TWI)<sup>۱</sup> ابزاری مفید و رایج برای توصیف شرایط رطوبتی در مقیاس حوضه می‌باشد (گرین و همکاران، ۲۰۰۹). TWI در مطالعات زیادی به‌منظور تخمین مکانی ویژگی‌های فیزیکی، هیدرولوژیکی و شیمیایی خاک‌ها مورد استفاده قرار گرفته است (ولن و گندولفی، ۲۰۰۲؛ ولش و همکاران، ۲۰۰۱؛ وسترن، ۲۰۰۴). TWI برای بررسی مقیاس‌های مکانی مؤثر بر فرآیندهای هیدرولوژیکی، تعریف مسیرهای جریان هیدرولوژیکی در مدل‌سازی ژئوشیمیایی، تهیه نقشه کربن آلی خاک و هم‌چنین برای تعیین فرآیندهای بیولوژیکی مثل تولید خالص اولیه سالیانه، الگوهای پوشش و کیفیت مکان‌های جنگلی، استفاده شده است (سرنسن و همکاران، ۲۰۰۵).

نتایج مطالعات پیله‌ور شهری و همکاران (۲۰۱۱) نشان دادند که کربن آلی خاک در اراضی تپه‌ماهوری ضرغام‌آباد از خصوصیات پستی و بلندی و فرآیندهای هیدرولوژیکی مرتبط با آن تأثیر زیادی گرفته است. TWI نیز یکی از پارامترهای ورودی مدل رگرسیونی آن‌ها بود، که رابطه مثبت گزارش شده بین شاخص خیزی و کربن آلی خاک به منزله افزایش کربن آلی خاک با رطوبت می‌باشد. پژوهش‌های ایوبی و علیزاده (۲۰۰۶) نیز نتایج مشابهی در مورد ارتباط خصوصیات پستی و بلندی با خصوصیات خاکی نشان داده است.

لوکا و همکاران (۲۰۰۷) نشان دادند که خصوصیات توپوگرافی به‌خصوص شاخص خیزی می‌تواند تهیه نقشه کربن آلی خاک را بهبود ببخشد. سومفلس و داتمن (۲۰۰۸) نیز نشان دادند پراکنش کربن آلی خاک ارتباط بالایی با TWI دارد.

1- Topographic Wetness Index

چن و همکاران (۲۰۰۸) بیان می‌کنند که در بین ویژگی‌های توپوگرافی، TWI می‌تواند به‌عنوان یک پیش‌بینی‌کننده در تهیه نقشه کربن آلی خاک استفاده شود. گو و همکاران (۲۰۰۹) نیز در مطالعه خود به‌منظور پیش‌بینی مقدار ماده آلی با استفاده از ویژگی‌های توپوگرافی در حوضه آبریز سین‌چوان چین بین مقدار ماده آلی خاک با شیب زمین نما ( $r = -0.57$ ) و شاخص خیزی ( $r = 0.30$ ) همبستگی معنی‌دار گزارش کردند. این همبستگی‌ها نشان از مقدار ماده آلی بیشتر در مکان‌های با شیب ملایم و ذخیره رطوبتی بالاتر دارد.

نظریه شاخص خیزی اولین بار به‌وسیله بون و کرکبی (۱۹۷۹) در مدل بارش-رواناب TOPMODEL<sup>۱</sup> معرفی شد که می‌تواند تأثیر توپوگرافی را بر تولید رواناب به‌صورت کمی بیان کند و به‌عنوان یک شاخص فیزیکی، مکان مناطق اشباع سطحی و توزیع مکانی رطوبت خاک را برآورد می‌کند. TWI در مقایسه با ویژگی‌های توپوگرافی ترکیبی دیگر، مانند شاخص توان جریان<sup>۲</sup>، در بسیاری موارد در کاربردهای مربوط به کشاورزی دقیق، استفاده می‌شود که نمونه‌هایی از این کاربردها شامل استفاده از نقشه TWI به‌عنوان شاخصی برای الگوی رطوبت خاک در مزرعه به‌خصوص در اراضی تپه‌ماهوری، ترکیب TWI و ویژگی‌های توپوگرافی اصلی (مانند زاویه شیب، انحنای شیب) با یکدیگر به‌عنوان ورودی برای تهیه نقشه رقومی خاک برای پیش‌بینی توزیع مکانی نوع و ویژگی‌های خاک، در مقیاسی بهتر می‌باشد (کین و همکاران، ۲۰۱۱).

شاخص خیزی به‌وسیله رابطه ۱ قابل محاسبه است (مور و گریسون، ۱۹۹۱).

$$TWI = Ln(A_s / \tan\beta) \quad (1)$$

که در آن،  $A_s$ : سطح ویژه حوضه بر حسب مساحت تجمعی بالادست (مساحت بالادست در واحد طول خط تراز) و  $\beta$ : درجه شیب می‌باشد. این شاخص، گرایش آب را به جمع شدن در هر نقطه از حوضه (بر حسب  $A_s$ ) و تمایل نیروهای گرانشی را به انتقال آب به پایین‌دست (بر حسب  $\tan\beta$ ) به‌عنوان شیب هیدرولیکی تقریبی توصیف می‌کند. در نتیجه محاسبه  $A_s$  و  $\tan\beta$  برای نشان دادن تأثیر عوارض زمین بر روی زه‌کشی محل نیاز می‌باشد (اندرنی و وود، ۲۰۰۳). سطح ویژه حوضه نیز با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود (ویلسون و گالانت، ۲۰۰۰):

1- Topography-Based Hydrological Model (TOPMODEL)

2- SPI: Stream Power Index

$$A_s = A/W \quad (2)$$

که در آن،  $A$ : مساحت و  $W$ : شاخص عرض جریان (طول مؤثر خط تراز) می‌باشد. دو موضوع کلیدی در محاسبه TWI، قدرت تفکیک مکانی DEM و انتخاب یک الگوریتم مناسب روندیابی جریان می‌باشند. الگوریتم‌های گوناگونی برای محاسبه TWI وجود دارند که شکل دامنه و تقسیم‌بندی جریان، به‌طور عمده بر الگوهای مکانی TWI تأثیر می‌گذارد. ترکیب اشکال محدب، مقعر و همچنین وجود خطا در داده‌های ارتفاع، انتخاب الگوریتم مناسب جهت جریان را پیچیده می‌کند، که به‌طور عمده بر محاسبه مساحت بالادست، جمع جریان و فرآیندهای دیگر تأثیر می‌گذارد (اندرنی و وود، ۲۰۰۳). بنابراین ترجیح دادن یک الگوریتم خاص جهت جریان بر الگوریتم‌های دیگر عملی نیست. این الگوریتم باید تا حدی براساس وضعیت توپوگرافی انتخاب شود. یک موضوع مهم مربوط به تعیین مسیر جریان که هنوز حل نشده است، روندیابی مسیر جریان در مناطق مسطح می‌باشد. الگوریتم‌های جهت جریان موجود سعی نموده‌اند که این مشکل را کم و بیش حل نمایند اما این موضوع یک محدودیتی برای بیش‌تر روش‌ها می‌باشد (هس، ۲۰۱۰).

الگوریتم‌های تک مسیره جریان (SFD)، رواناب سطحی و زیرسطحی را از یک سلول تنها به یک سلول دیگر بدون در نظر گرفتن سلول‌های مجاور دیگر، محدود می‌کنند و هیچ جریان دو شاخه یا چندشاخه‌ای در آن ممکن نیست (شکل ۱) (هس، ۲۰۱۰). D8 یکی از اولین و ساده‌ترین الگوریتم‌های تک‌مسیره می‌باشد که جریان را از یک سلول به سلول دیگر، تنها در جهت تندترین شیب جریان می‌دهند (اوقالان و مارک، ۱۹۸۴). این روش به‌نسبت ساده است و در دره‌ها نتایج خوبی ارائه می‌دهد اما تعداد زیادی خطوط موازی جریان تولید می‌کند که در اطراف مرزهای حوضه، پیش‌بینی‌کننده خوبی برای جریان نخواهند بود (هس، ۲۰۱۰).

فیرفیلد و لیماری (۱۹۹۱) الگوریتم تک‌مسیره Rho8 را برای کاهش محدودیت الگوریتم D8، به‌دلیل ایجاد خطوط موازی جریان معرفی نمودند. این روش همانند D8 می‌باشد، اما از طریق توزیع احتمالی جریان براساس اختلاف شیب بین سلول مرکزی و سلول‌های اطراف، خطوط موازی جریان را شکسته و جریان را در جهت و شیب ساخته شده منتقل می‌کند.

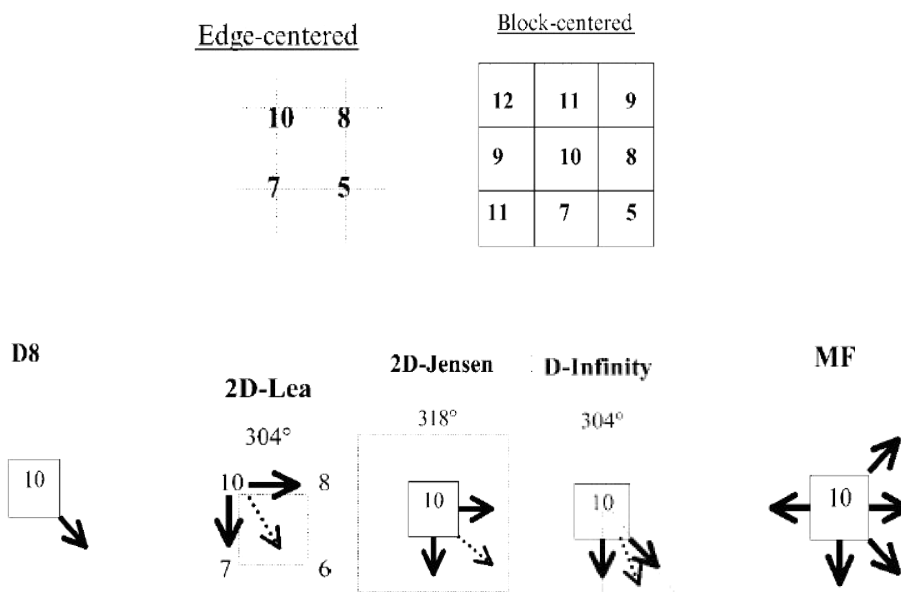
الگوریتم‌های دو مسیره جریان (BFD)<sup>۱</sup>، بدون قابلیت انتشار جریان به بیش از دو جهت اصلی می‌باشند و از این دسته می‌توان به روش‌های 2D-Lea، 2D-Jensen و D-Infinity اشاره نمود. این روش‌ها برای محاسبه مسیر جریان از یک سطح مشخصی استفاده می‌کنند. در روش 2D-Lea با استفاده از ۴ سلول DEM این سطح ایجاد می‌شود تا این که یک زاویه جهت، ۳۶۰ درجه محاسبه شود، اما در روش 2D-Jensen و D-Infinity این سطح با استفاده از ۹ سلول DEM ایجاد می‌گردد و حتی در روش D-Infinity هشت سطح ایجاد می‌شود که سلول مرکزی را احاطه می‌کند (اندرنی و وود، ۲۰۰۳) (شکل ۱).

الگوریتم‌های چندمسیره جریان<sup>۲</sup> بر خلاف الگوریتم‌های SFD و BFD، اجازه می‌دهد که جریان خروجی از یک سلول به تناسب (بسته به فاصله خطوط تراز)، به سمت سلول‌های مجاور با ارتفاع کم‌تر انتشار یابد. البته این روش می‌تواند خطاهای ناخواسته‌ای را وارد کند، چرا که انتشار جریان از یک سلول، ضرورتاً به همه سلول‌های مجاور با ارتفاع کم‌تر رخ نمی‌دهد، اگرچه الگوریتم‌های چندمسیره (MFD) نمی‌توانند بر محدودیت‌های تعیین جریان در مناطق هموار که شیب‌ها خیلی کوچک می‌شوند، غلبه کنند اما باز هم نتایج بهتری نسبت به الگوریتم‌های SFD و BFD، ایجاد می‌کنند (هس، ۲۰۱۰). روش‌های FD8، FRho8 و Quinn جزو الگوریتم‌های چندمسیره هستند که مشکلات ناشی از الگوریتم‌های تک‌مسیره را از طریق پراکنندگی جریان تا حدود زیادی از بین می‌برند. روش‌های FD8 و Quinn روش‌هایی هستند که بر محدودیت موجود در D8 از طریق پراکنش جریان در جهت‌های مختلف و از بین بردن خطوط موازی جریان غلبه می‌نمایند. اما لازم به ذکر است که روش FD8 در تخمین جریان در دشت‌های آبرفتی به‌طور ضعیفی عمل می‌نماید. روش FRho8 همانند روش‌های ذکر شده که برای تقویت روش D8 معرفی گردیده‌اند، برای روش Rho8 می‌باشد. در این روش ابتدا سلول‌های اطراف مطابق روش Rho8 شناسایی گردیده و سپس براساس شیب سلول‌ها، جریان در چندین جهت مختلف بین سلول‌های اطراف سلول مرکزی توزیع می‌گردد (هس، ۲۰۱۰). گالانت و ویلسون (۱۹۹۶) بیان نمودند که روش‌های FD8 و FRho8 بسیار بهتر از روش D8 می‌باشند زیرا توانایی از بین بردن جریان‌های موازی و غیرواقعی را دارند و نتیجه بهتری ارائه می‌دهند.

1- Biflow Direction (BFD) Algorithms

2- Multiple Flow Direction (MFD) Algorithms

پی‌آی و همکاران (۲۰۱۰)، در پژوهشی اقدام به ایجاد نقشه ماده آلی خاک با استفاده از TWI نمودند و مقایسه‌ای براساس الگوریتم‌های مختلف جریان انجام دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که TWI به دست آمده براساس الگوریتم چندمسیره بهتر می‌تواند رطوبت خاک را نشان دهد و بنابراین همبستگی بیشتری با ماده آلی خاک دارد. پن و همکاران (۲۰۰۴) نیز نشان دادند الگوریتم‌های MFD نتیجه دقیق‌تری نسبت به الگوریتم‌های SFD دارند.



شکل ۱- محاسبه زاویه جریان و روندیابی جریان با استفاده از الگوریتم‌های مختلف.

توضیحات شکل: اعداد نوشته شده در مرکز هر سلول به‌عنوان شماره سلول (شماره پیکسل نقشه) می‌باشند. یعنی در این شکل‌ها سلول ۱۰، سلول مرکزی در نظر گرفته شده، جهت فلش‌ها نیز نشان‌دهنده مسیر جریان و شماره‌های روبروی فلش‌ها مسیر انتقال جریان به شماره سلول مورد نظر می‌باشد.

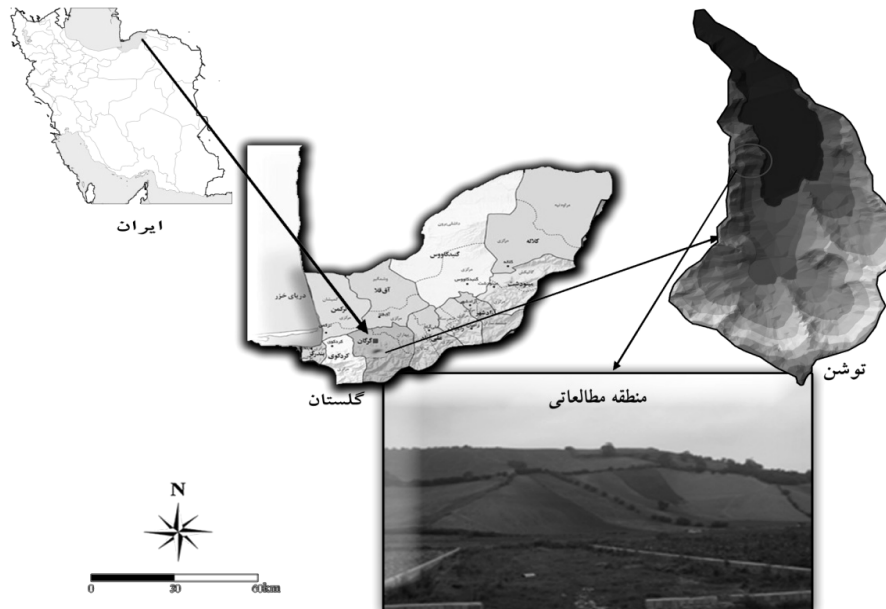
الگوریتم‌های دومسیره (2D-Lea، 2D-Jensen و D-Infinity) برای محاسبه مسیر جریان از یک سطح مشخصی استفاده می‌کنند و زاویه‌های ۳۱۸ و ۳۰۴ درجه (نوشته شده در بالای سلول‌ها) نشان‌دهنده زوایای محاسبه شده برای مسیر جریان در هر یک از روش‌های دومسیره می‌باشد.

توزیع رطوبت در بخش‌های مختلف اراضی شیب‌دار، عامل مهمی در تغییرات ویژگی‌های خاک از جمله کربن آلی خاک می‌باشد. اندازه‌گیری مستقیم تغییرات رطوبت هزینه‌بر و وقت‌گیر است. شاخص خیسی، شاخص مناسبی از تغییرات رطوبت در بخش‌های مختلف اراضی شیب‌دار است. برای محاسبه شاخص خیسی الگوریتم‌های متفاوتی ارائه شده است و ترجیح دادن یک الگوریتم خاص جهت جریان بر الگوریتم‌های دیگر با توجه به مطالعات گذشته که در مناطق دیگر صورت گرفته، عملی نمی‌باشد و این الگوریتم باید تا حدی براساس وضعیت توپوگرافی منطقه انتخاب شود. اراضی شیب‌دار لسی منطقه توشن استان گلستان دارای شیب و جهت‌های متفاوت و کمپلکس می‌باشند و شرایط مناسبی برای بررسی ارتباط کربن آلی خاک با شاخص خیسی محاسبه شده با الگوریتم‌های مختلف و انتخاب بهترین الگوریتم را دارد. با توجه به موارد گفته شده، هدف از این پژوهش، محاسبه الگوریتم‌های مختلف TWI و انتخاب بهترین الگوریتم براساس خصوصیات منطقه و استفاده از این TWI برای تهیه نقشه کربن آلی خاک، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای کیفیت خاک می‌باشد. لازم به ذکر است با توجه به اهمیت کربن آلی خاک، ارائه تکنیک‌های سریع، غیرمستقیم، قابل اطمینان و دقیق برای اندازه‌گیری تغییرات میزان کربن خاک در پاسخ به تغییرات مدیریت روی زمین‌های مختلف مورد نیاز می‌باشند.

## مواد و روش‌ها

حوضه توشن یکی از زیرحوضه‌های بزرگ قره‌سو در استان گلستان است که در طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۱۶ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۲۶ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۳ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۵۱ دقیقه و در حدواسط حوضه زیارت و حوضه آبخیز انجیرآب در غرب شهرستان گرگان واقع شده است. این حوضه از نظر جغرافیایی در محدوده البرز مرکزی و در زون گرگان-رشت می‌باشد (شکل ۲). میانگین دمای سالانه ۱۶ درجه سانتی‌گراد و میانگین دمای حداقل و حداکثر سالانه به‌ترتیب ۸ و ۲۳/۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. میانگین بارندگی سالانه کل حوضه برابر با ۶۵۲ میلی‌متر و ارتفاع متوسط حوضه ۳۹۷ متر می‌باشد. بیش‌ترین ارتفاع ۱۵۰۰ متر و کم‌ترین آن ۴۰ متر می‌باشد. از نظر زمین‌شناسی، حدود ۵۴/۱ درصد حوضه از رسوبات بادرفتی لسی، ۳۲/۸ درصد از سنگ‌های شیست، ۶/۸ درصد از ماسه‌سنگ و ۶/۳ درصد از رسوبات آبرفتی تشکیل شده است. رژیم رطوبتی و حرارتی خاک‌های مطالعه شده در منطقه توشن به‌ترتیب زیریک (Xeric) و ترمیک (Thermic) می‌باشد.





شکل ۲- موقعیت حوضه توشن در ایران و استان گلستان.

۱۳۵ نمونه خاک به روش سیستماتیک تصادفی از عمق ۲۰-۰ سانتی متری در بخشی از اراضی شب‌دار لسی حوضه به مساحت تقریبی ۱۲ هکتار برداشت شد. همه نمونه‌ها برای آنالیز هوا خشک گردیده و پس از کوبیده شدن از الک ۰/۵ میلی‌متر عبور داده شدند. سپس کربن آلی با اکسیداسیون توسط دی‌کرومات پتاسیم (والکلی و بلاک، ۱۹۳۴) اندازه‌گیری شد.

محاسبه الگوریتم‌های مختلف جریان جهت تهیه شاخص خیزی: مدل رقومی ارتفاع منطقه با میان‌یابی خطوط میزان نقشه توپوگرافی رقومی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ در محیط GIS و در پیکسل‌هایی به ابعاد ۱۰×۱۰ متر تهیه شد. الگوریتم‌های مختلف TWI شامل D8, D-Infinity, Rho8, FD8, FRho8 و Quinn با استفاده از نرم‌افزار TAS 2.05<sup>۱</sup> از مدل رقومی ارتفاع تعیین گردیدند و با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS9.3 ویرایش و خروجی نقشه‌ها گرفته شد.

به‌منظور بررسی روابط بین کربن آلی خاک با الگوریتم‌های مختلف TWI از ضریب همبستگی پیرسون استفاده گردید، که توسط نرم‌افزار SPSS (۲۰۰۲) مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است

1- Terrain Analysis System

قبل از برقراری ضریب همبستگی پیرسون، آزمون نرمالیته کولموگروف-اسمیرنوف انجام گردید و از نرمال بودن داده‌ها اطمینان به دست آمده است. به علاوه مقادیر چولگی ارایه شده در جدول ۱ نیز نتایج آزمون نرمالیته را تأیید می‌نماید.

جدول ۱- توصیف چولگی کربن آلی خاک و روش‌های مختلف TWI.

پارامتر	OC (درصد)	D8	RHO8	D-infinity	FRHO8	FD8	Quinn
چولگی	۰/۵۸	۰/۰۲	۰/۹۰	۰/۷۲	۰/۶۰	۰/۶۹	۰/۱۸

### نتایج و بحث

نتایج ضرایب همبستگی روش‌های مختلف محاسبه TWI و کربن آلی خاک در جدول ۲ آورده شده است. طبق این جدول پارامتر با ضریب همبستگی بالاتر به عنوان بهترین روش برای نشان دادن شرایط رطوبتی منطقه در راستای توجیه کربن آلی خاک در نظر گرفته شد.

جدول ۲- ضرایب همبستگی بین روش‌های مختلف محاسبه TWI و کربن آلی خاک.

OC (درصد)	D8	RHO8	D-infinity	FRHO8	FD8	Quinn
	۰/۳۵**	۰/۲۵**	۰/۴۴**	۰/۴۱**	۰/۴۳**	۰/۴۴**

\*\* همبستگی معنی‌دار در سطح ۱ درصد.

با توجه به نتایج ارایه شده در جدول ۲، TWI به دست آمده با استفاده از الگوریتم Quinn و D-infinity، ضریب همبستگی بالاتری با کربن آلی نشان می‌دهند. همبستگی مثبت بین TWI با درصد ماده آلی نشان‌دهنده افزایش در ظرفیت نگهداشت آب در مناطق با TWI زیاد، در نتیجه پوشش گیاهی بیشتر و به دنبال آن ماده آلی بیشتر در خاک است. به طور کلی نتایج ضرایب همبستگی نشان داد که TWI به دست آمده بر اساس الگوریتم‌های MFD و BFD نسبت به الگوریتم‌های تک‌مسیره (D8 و RHO8) همبستگی بیشتری با ماده آلی خاک دارند بنابراین بهتر می‌توانند وضعیت رطوبت خاک را نشان دهند؛ زیرا در الگوریتم‌های تک‌مسیره، رواناب یک سلول تنها در جهت تندترین شیب جریان می‌یابد. بنابراین، اگر تندترین شیب به طور تصادفی بین دو جهت اصلی و فرعی قرار گیرد SFD نمی‌تواند مسیر صحیح جریان را نشان دهد (هس، ۲۰۱۰). این همبستگی نشان می‌دهد که با

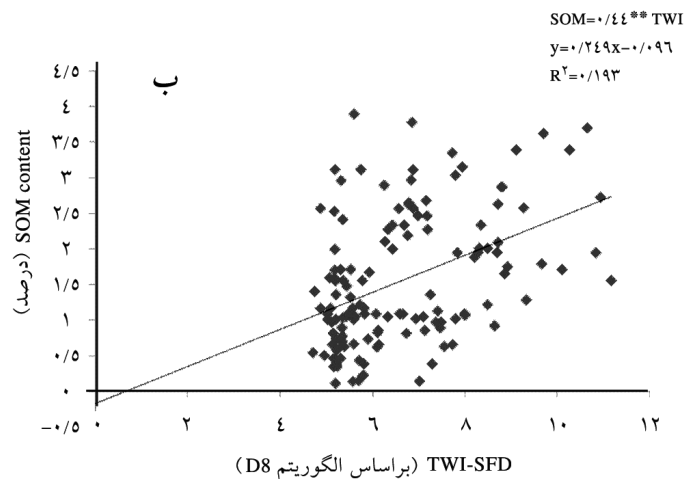
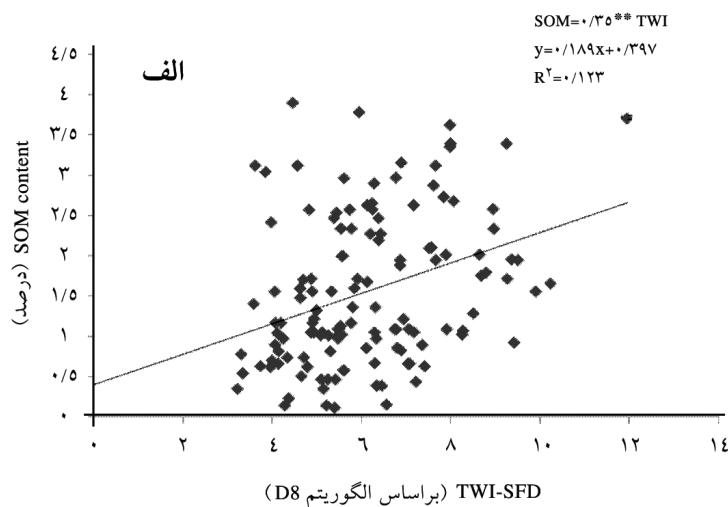
وجود عملیات کشاورزی در محدوده مورد مطالعه، هنوز عامل توپوگرافی و نحوه توزیع رطوبت عامل تعیین‌کننده بر تغییرات کربن آلی خاک است.

همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد  $R^2$  و ضریب رگرسیونی نیز نشان‌دهنده قوی‌تر بودن تخمین الگوریتم Quinn در این مطالعه می‌باشد. که این با نتایج پی‌آی و همکاران (۲۰۱۰)، که در پژوهشی اقدام به ایجاد نقشه ماده آلی خاک با استفاده از TWI نمودند و مقایسه‌ای براساس الگوریتم‌های مختلف جریان دادند مطابقت دارد. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که TWI محاسبه شده براساس الگوریتم چندمسیره بهتر می‌تواند رطوبت خاک را نشان دهد و بنابراین همبستگی بیشتری با ماده آلی خاک دارد. ضرایب همبستگی گزارش شده توسط آن‌ها نیز برای الگوریتم تک‌مسیره (روش D8) و برای الگوریتم چندمسیره (روش Quinn) به ترتیب ۰/۰۷ و ۰/۲۳ می‌باشد.

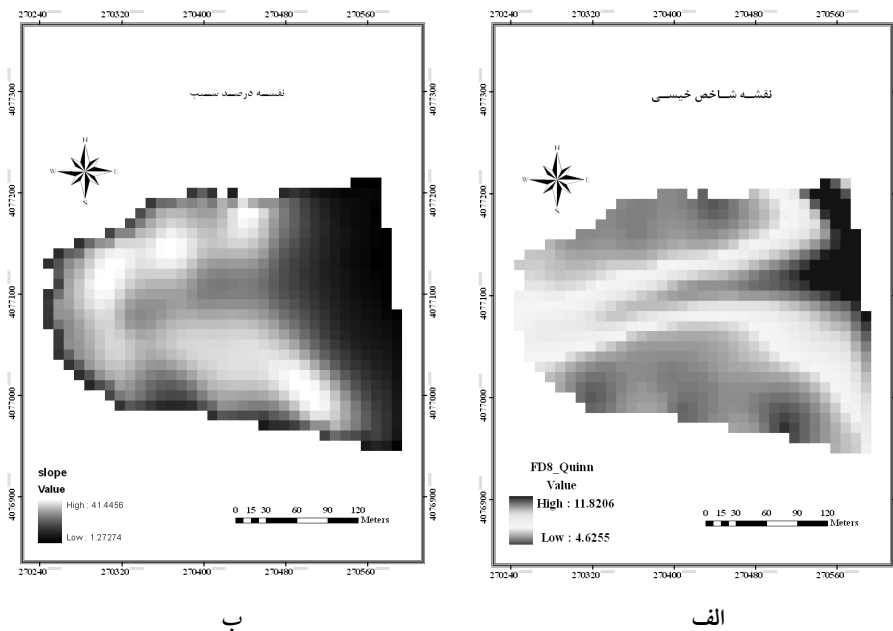
در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که برای هر منطقه، الگوریتم خاصی برای محاسبه TWI وجود دارد و باید برای هر منطقه الگوریتم مناسب با آن منطقه انتخاب شود و استفاده همیشگی از الگوریتم‌های تک‌مسیره که در بسیاری از مقاله‌ها به آن پرداخته شده است، روش مناسب و صحیحی برای مناطق مختلف نخواهد بود. نتایج این پژوهش با نتایج سرنسن و همکاران (۲۰۰۵) که به ارزیابی روش‌های مختلف محاسبه TWI براساس مشاهدات میدانی، در دو منطقه مجزا در جنگل‌های سوزنی‌برگ شمال سوئد پرداختند، مطابقت دارد. آن‌ها بیان نمودند که نمی‌توان برای متغیرهای موجود در دو منطقه یک روش محاسباتی یکسان انتخاب نمود.

همان‌طورکه در شکل ۴ مشخص است، تغییرات TWI در حوضه مطالعاتی بین ۱۱/۸۲-۶/۴ می‌باشد و با مقایسه نقشه شیب و نقشه شاخص خیزی می‌توان دریافت که مناطق مرطوب می‌توانند از مساحت‌های زه‌کشی بزرگ در بالادست و از سطوح خیلی هموار و با شیب ملایم به‌وجود آیند، در حالی که مناطق خشک‌تر با مقدار شاخص کم‌تر، از شیب‌های تندتر و در بالادست ناشی می‌شوند، به‌گونه‌ای که در نقشه نیز پیداست مناطق پایینی شیب و مسیر میانی که دارای تقعر بیشتری نسبت به سایر مناطق است، دارای مقدار شاخص خیزی بالایی می‌باشند. به‌عبارت دیگر، می‌توان گفت که در این حوضه، مناطقی که مقدار TWI مشابهی دارند، در صورتی که شرایط محیطی دیگر آن‌ها (مانند خاک، پوشش گیاهی) یکسان باشد، انتظار می‌رود که درصد رطوبت خاک و در نتیجه پاسخ هیدرولوژیکی آن‌ها به باران، مشابه باشند و یکسان تلقی گردند. اگرچه داشتن رطوبت خاک مشابه به

آن معنا نیست که از نظر کمیت این نقاط با هم یکسان هستند، بلکه اگر مقادیر TWI را طبقه‌بندی کنیم، مناطقی که در یک کلاس قرار می‌گیرند از نظر شرایط رطوبتی تقریباً یکسان هستند و بنابراین با این روش می‌توان مناطقی را که احتمال اشباع شدن آن‌ها در طول وقایع بارندگی وجود دارد و می‌توانند باعث ایجاد رواناب، فرسایش خندقی و زمین لغزش شوند پهنه‌بندی نمود.



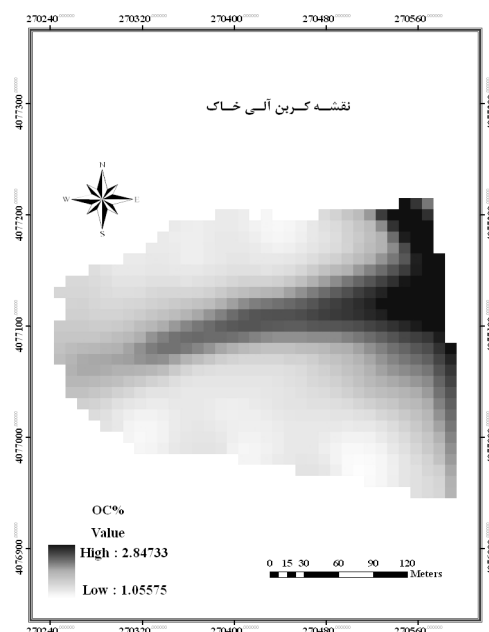
شکل ۳- همبستگی خطی بین ماده آلی و TWI- محاسبه شده براساس الگوریتم الف (D8) و ب (Quinn).



شکل ۴- (الف) نقشه شاخص خیزی (TWI) براساس الگوریتم Quinn در منطقه و (ب) نقشه شیب منطقه.

در نهایت نقشه کربن آلی خاک براساس ارتباط رگرسیونی به دست آمده بین TWI براساس الگوریتم Quinn (به عنوان متغیر مستقل) و کربن آلی خاک (به عنوان متغیر وابسته) در محیط ArcGIS9.3 تهیه گردید (شکل ۵). نقشه مورد نظر نشان می دهد با افزایش ارتفاع و درجه شیب میزان کربن آلی خاک کاهش، و از قسمت های بالای شیب به سطوح پایین شیب افزایش می یابد. باید بیان گردد که ضریب  $R^2$  پایین بین کربن آلی خاک و TWI را نیز می توان به دلیل کوچک بودن منطقه مطالعاتی و مقدار قدرت تفکیک مکانی DEM (۱۰ متر) که بر نتایج محاسبه های TWI تأثیر می گذارد دانست. قدرت تفکیک مکانی نقشه DEM باید متناسب با اهداف مدل سازی انتخاب شود اما متأسفانه بیش تر براساس داده های قابل دسترس و جنبه های اقتصادی تعیین می شود. اگر قدرت تفکیک مکانی خیلی کم شود و طول دامنه ها هم به نسبت کوچک شود، TWI معناداری نمی تواند به دست آید. به طوری که اندرنی و وود (۲۰۰۳) با استفاده از نقشه های DEM با قدرت تفکیک مکانی های مختلف دریافتند که تغییرات TWI در بین سلول های مجاور، با افزایش اندازه سلول، کاهش می یابد. از این رو در منطقه مورد مطالعه می توان با استفاده از DEM با قدرت تفکیک مکانی

بالتر و اندازه سلول‌های کوچک‌تر همبستگی قوی‌تر، ضریب  $R^2$  بالاتر بین کربن و شاخص خیزی و در نهایت نقشه‌هایی با کیفیت بالاتر به دست آورد.



شکل ۵- نقشه کربن آلی خاک با استفاده از TWI (براساس الگوریتم Quinn).

### نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که می‌توان از TWI به‌عنوان متغیری برای شبیه‌سازی وضعیت رطوبتی و تخمین کربن آلی خاک استفاده نمود که نمونه‌ای از روش‌های غیرمستقیم، کم‌هزینه و قابل اعتماد برای پیش‌بینی کربن آلی خاک و یا خصوصیات خاکی پرهزینه، که بتوانند همبستگی بالایی با این شاخص نشان دهند، محسوب می‌شود. پیشنهاد می‌شود برای تهیه نقشه‌های معتبرتر که تغییرپذیری بیش‌تری از کربن آلی خاک در این منطقه را توجیه نماید، بهتر است از مدل رقومی ارتفاعی دقیق‌تر و با قدرت تفکیک مکانی بالاتر برای بهبود دقت TWI استفاده گردد. همچنین پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آینده الگوریتم‌های مختلف TWI در مناطق وسیع‌تری از حوضه مطالعاتی با یکدیگر مقایسه گردد تا اختلاف نتایج به‌صورت ملموس‌تری مشاهده گردد.

منابع

1. Ayoubi, S., and Alizadeh, M. 2006. Soil surface attributes prediction using digital topographic model in Mehr catchment, Sabzevar, Khorasan province. *J. Sci. Technol. Agric. Natur. Resour.* 10: 85-97.
2. Beven, K.J., Kirkby, M.J. 1979. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrology Science Bulletin.* 24: 43-69.
3. Chen, C.Y., Chen, L.K., Yu, F.C., Lin, S.C., Lin, Y.C., Lee, C.L., Wang, Y.T., and Cheung, K.W. 2008. Characteristics analysis for the flash flood-induced debris flows. *Natural Hazards.* 47: 245-261.
4. Chen, C.Y., and Yu, F.C. 2011. Morphometric analysis of debris flows and their source areas using GIS. *Geomorphology.* 129: 387-397.
5. Endreny, T.A., and Wood, E.F. 2003. Maximizing spatial congruence of observed and DEM-delineated overland flow networks. *Inter. J. Geograp. Inf. Sci.* 17: 7. 699-713.
6. Fairfield, J., and Leymarie, P. 1991. Drainage networks from grid digital elevation models. *Water Resources Research.* 27: 709-717.
7. Gallant, J., and Wilson, J. 1996. TAPES-G: A grid based terrain analysis program for the environmental sciences. *Computers and Geosciences.* 22: 713-722.
8. Grabs, T., Seibert, J., Bishop, K., and Laudon, H. 2009. Modeling spatial patterns of saturated areas: A comparison of the topographic wetness index and a dynamic distributed model. *J. Hydrol.* 373: 15-23.
9. Green, T.R., Salas, J.D., Martinez, A., and Erskine, R.H. 2007. Relating crop yield to topographic attributes using Spatial Analysis Neural Networks and regression. *Geoderma.* 139: 23-37.
10. Guo, P.T., Liu, H.B., and Wu, W. 2009. Spatial prediction of soil organic matter using terrain attributes in a hilly area. *International Conference on Environmental Science and Information Application Technology.* Wuhan, China. 3: 759-762.
11. Hass, J. 2010. Soil moisture modeling using TWI and satellite imagery in the Stockholm region. Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden. 103p.
12. Janzen, H.H., Ellert, B.H., and Anderson, D.W. 2002. Organic matter in the landscape. P 905-909, In: Lal, R. (Ed.), *Encyclopedia of Soil Science.* Marcel Dekker, Inc. New York.
13. Jenny, H. 1928. Relation of climatic factors to the amount of nitrogen in soils. *J. Amer. Soc. Agron.* 20: 900-912.
14. Jenny, H. 1941. *Factors of Soil Formation-a System of Quantitative Pedology.* McGraw-Hill, New York, USA, 281p.
15. Luca, C., Si, B.C., and Farrell, R.E. 2007. Upslope length improves spatial estimation of soil organic carbon content. *Can. J. Soil Sci.* 87: 291-300.

16. Moore, I.D., and Grayson, R.B. 1991. Landson. Digital terrain Modeling: A review of hydrological, Geomorphological and Biological application. *Hydrol. Process.* 5: 3-30.
17. Mueller, T.G., and Pierce, F.J. 2003. Soil carbon maps: Enhancing spatial estimates with simple terrain attributes at multiple scales. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 67: 258-267.
18. O'Callaghan, J., and Mark, D. 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing.* 28: 323-344.
19. Pan, F., Peters-Lidard, C.D., Sale, M.J., and King, A.W. 2004. A comparison of geographical information system-based algorithms for computing the TOPMODEL topographic index. *Water Resour. Res.* 40: 1-11.
20. Pei, T., Qin, C., Zhu, A., Yang, L., Luo, M., Li, B., and Zhou, Ch. 2010. Mapping soil organic matter using the topographic wetness index: A comparative study based on different flow-direction algorithms and kriging methods. *Ecological Indicators.* 10: 3. 610-619.
21. Pilevar Shahri, A.R., Ayoubi, Sh., and Khademi, H. 2011. Comparison of artificial neural network (ANN) and multivariate linear regression (MLR) models to predict soil organic carbon using digital terrain analysis (Case Study: Zargham Abad Semirom, Isfahan Province). *J. Water Soil.* 24: 6. 1151-1163. (In Persian)
22. Qin, C.Z., Zhu, A.X., Pei, T., Li, B.L., Scholten, T., Behrens, T., and Zhou, C.H. 2011. An approach to computing topographic wetness index based on maximum downslope gradient. *Precision Agriculture.* 12: 32-43.
23. Sanderman, J., Amundson, R.G., and Baldocchi, D.D. 2003. Application of eddy covariance measurements to the temperature dependence of soil organic matter mean residence time. *Global Biogeochemical Cycles.* 17: 2. 1061.
24. Sorensen, R., Zinko, U., and Seibert, J. 2005. On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observation. *Hydrology and Earth System Sciences.* 10: 101-112.
25. SPSS for Windows (Microsoft). 2002. Release. 11.5. Copyright. Inc.
26. Starr, G.C., Lal, R., Malone, R., Hothem, D., Owens, L., and Kimble, J. 2000. Modeling soil carbon transported by water erosion processes. *Land Degradation and Development.* 11: 83-91.
27. Sumfleth, K., and Duttmann, R. 2008. Prediction of soil property distribution in paddy soil landscapes using terrain data and satellite information as indicators. *Ecological Indicators.* 8: 485-501.
28. Svetlitchnyi, A.A., Plotnitskiy, S.V., and Stepovaya, O.Y. 2003. Spatial distribution of soil moisture content within catchments and its modeling on the basis topographic data. *J. Hydrol.* 277: 50-60.



29. Walkley, A., and Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.
30. Welsch, D.L., Kroll, C.N., Mc Donnell, J.J., and Burns, D.A. 2001. Topographic controls on the chemistry of subsurface stormflow. *Hydrol. Process.* 15: 10. 1925-1938.
31. Western, A.W. 2004. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes. *J. Hydrol.* 286: 1-4. 113-134.
32. Whelan, M.J., and Gandolfi, C. 2002. Modelling of spatial controls on denitrification at the landscape scale. *Hydrol. Process.* 16: 7. 1437-1450.



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 21(1), 2014*  
<http://jwsc.gau.ac.ir>

## **Introducing different flow direction algorithms to map topographic wetness index and soil organic carbon in a loess hillslope of Toshan area, Golestan Province, Iran**

**\*S. Maleki<sup>1</sup>, F. Khormali<sup>2</sup> and A.R. Karimi<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>M.Sc. Graduated, Dept. of Soil Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, <sup>2</sup>Professor, Dept. of Soil Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, <sup>3</sup>Assistant Prof., Dept. of Soil Science, Ferdowsi University of Mashhad

Received: 02/20/2013; Accepted: 07/04/2013

### **Abstract**

Topography is one of the major factors controlling the spatial pattern of saturated areas, which in turn is a key to understand much of the variability in soils and hydrological processes. The topographic wetness index (TWI) which combines local upslope contributing area and slope, is commonly used to quantify topographic control on hydrological processes. On the other hand, the interaction of topography with the climate affects the distribution of soil organic matter (SOM) as one of the most effective soil quality parameters that has been shown to correlate with TWI and can be predicted by TWI. The main objective of this study was to evaluate different flow direction algorithms of TWI and to select suitable algorithm for the study area and to map soil organic carbon in a loess hillslope of Toshan area, Golestan Province, Iran. TWI was calculated by single flow direction (SFD), biflow direction (BFD) and multiple flow direction algorithms (MFD). 135 Samples were collected at random systematic method (0-20 cm depth). The results showed D-Infinity (BFD) and MFD algorithms in the study area had stronger correlation with SOM than SFD (D8 and RHO8) algorithms. However TWIs used in most studies are calculated using a SFD algorithm, which assumes that all water from a grid cell flows into only one neighboring cell. But this assumption is not always valid, especially in areas with low relief where movement of water may be divergent. Finally, TWI is suggested to be calculated with different algorithms so that the best method could be selected to obtain accurate results.

**Keywords:** Flow direction algorithms, Soil organic carbon, Topography, Topographic wetness index

---

\* Corresponding Author; Email: [elymaleki@yahoo.com](mailto:elymaleki@yahoo.com)