

کارایی آنالیز کمی پارامترهای ژئومورفومتریکی در تهیه نقشه حساسیت فرسایش خاک  
(مطالعه موردی: حوضه منج)

مجتبی یمانی<sup>۱</sup> - استاد ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.  
علیرضا عرب عامری - دکترای ژئومورفولوژی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۴/۱۶ تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۱۰/۱۰

چکیده

ژئومورفومتری زیرمجموعه‌ای از ژئومورفولوژی است که دارای رویکرد اندازه‌گیری کمی و کیفی عوارض سطح زمین می‌باشد. ژئومورفومتری شبکه زهکشی در فهم فرآیندهای تشکیل دهنده لندفرم‌ها، خواص فیزیکی خاک و ویژگی‌های فرسایشی آن بسیار مهم است. در این پژوهش با استفاده از آنالیز پارامترهای ژئومورفومتریکی و روش‌های فاکتور ترکیب و VIKOR به اولویت‌بندی فرسایش‌پذیری زیرحوضه‌های حوضه آبخیز منج در استان چهارمحال و بختیاری که یک منطقه حساس به فرسایش می‌باشد، پرداخته شده است. بدین منظور از مدل رقومی ASTER با دقت ۳۰ متر و ArcGIS برای استخراج و آنالیز ۲۲ پارامتر ژئومورفومتریکی که شامل پارامترهای پایه، خطی، شکلی و توپوگرافیک است، استفاده گردید. به منظور صحت‌سنجی روش‌ها از مقادیر عددی فرسایش ویژه استخراج شده برای هر یک از زیرحوضه‌ها استفاده شده است. طبق نتایج پارامترهای تراکم زهکشی، شیب و عدد نفوذ بیشترین تأثیر را در فرسایش‌پذیری داشته‌اند. نتایج حاصل از اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها نشان داد که در هر دو روش زیرحوضه ۱ دارای بیشترین حساسیت به فرسایش است که علت آن بالا بودن مقادیر پارامترهای خطی و توپوگرافیک و پایین بودن مقادیر پارامترهای شکلی در آن می‌باشد. پس از اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها، حوضه منج با مساحت ۷۰/۷۰۷ کیلومتر مربع، از لحاظ حساسیت به فرسایش به ۳ کلاس حساسیت خیلی زیاد، زیاد و متوسط در مدل فاکتور ترکیب و به چهار کلاس حساسیت خیلی زیاد، زیاد، متوسط و کم در مدل VIKOR طبقه‌بندی گردید. مقایسه نتایج حاصل از اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها با مقادیر عددی فرسایش ویژه اندازه‌گیری شده برای هر یک از زیرحوضه‌ها نشان داد که پارامترهای ژئومورفومتریکی دارای کارایی بالایی

در شناسایی مناطق حساس به فرسایش بوده و همچنین روش VIKOR دارای دقت پیش‌بینی بالاتری نسبت به روش فاکتور ترکیب است.

**کلیدواژه‌ها:** فرسایش‌پذیری، فرسایش خاک، پارامترهای ژئومورفومتریکی، حوضه منج.

#### ۱- مقدمه

بیش از چند دهه ژئومورفولوژیست‌ها از روش‌های کیفی برای توصیف و بررسی لندفرم‌ها استفاده می‌کردند، لیکن در اوایل دهه ۱۹۶۰ روش‌های کمی وارد مطالعه لندفرم‌ها گردید (Kosmas Pavlopoulos et al., 2009) در ژئومورفولوژی کمی ویژگی‌های فضایی و آماری و همچنین ارتباطات ویژگی‌های نقطه‌ای مورد مطالعه قرار می‌گیرد (Evans, 1972). یکی از علومی که در این زمینه کمک شایانی به ژئومورفولوژی کرده است، دانش ژئومورفومتری است. ژئومورفومتری دانش تجزیه و تحلیل کمی پستی و بلندی‌های سطح زمین و استخراج پارامترهای آن به وسیله مدل رقومی ارتفاعی است (Dehn, 2001; Shary et al., 2002; Pike, 2009; Jang et al., 2013). این علم از تکنیک‌های ریاضی، آماری و پردازش تصاویر برای کمی‌سازی شکل توپوگرافی زمین در مقیاس‌های فضایی مختلف استفاده می‌کند (Shary et al., 2002). هدف اصلی در ژئومورفومتری، استخراج پارامترهای سطح زمین و شکل سطح زمین از مدل رقومی ارتفاعی است که اولی اشاره به خصوصیات پیوسته نظیر شیب، جهت‌شیب دارد و در قالب نقشه‌ها و تصاویر رستری تولید و استخراج می‌شود. دومی اشاره به پدیده‌های مکانی مجزا از هم نظیر مخروط افکنه، شبکه زهکش و خط حوضه آبخیز دارد که به صورت یک نقشه وکتوری و در قالب خطوط، نقشه و چندضلعی تولید می‌شود (Evans, 1972). تأثیر ژئومورفومتری شبکه زهکشی در فهم فرآیندهای تشکیل‌دهنده لندفرم، خواص فیزیکی خاک و ویژگی‌های فرسایشی آن بسیار مهم است (Okumura & Araujo, 2014). با توجه به این که حوضه منج، یک منطقه حساس به فرسایش است و فرسایش خاک سالیانه خساراتی را به مردم منطقه وارد می‌نماید، لذا استفاده از پارامترهای ژئومورفومتریکی کمک شایانی در زمینه شناسایی و اولویت‌بندی مناطقی که حساسیت بیشتری به فرسایش دارند به منظور انجام طرح‌های حفاظتی و مدیریتی در آن می‌کند. حوضه زهکشی به عنوان منشأ فرسایش رودخانه‌ای و هدررفت خاک شناخته می‌شود که از طریق انتقال رواناب‌های سطحی به یک کانال مبنایی را برای آنالیزهای ژئومورفومتری فراهم می‌کند (Patel et al., 2013). فرسایش خاک یک مسئله محیطی جدی در سراسر جهان است که زندگی و دارایی میلیون‌ها انسان را تحت تأثیر قرار داده است و باعث کاهش بهره‌وری خاک از طریق برداشت و حمل خاک‌های سطحی حاصلخیز و همچنین کاهش رشد گیاهان، پرشدن دره‌ها و مخازن از رسوب و تشکیل دلتا در مناطق ساحلی می‌گردد (Gessesse et al., 2015; Prosdociami et al., 2016; Keesstra et al., 2016). در دهه اخیر، آنالیز ژئومورفومتریکی شبکه‌های زهکشی در زمینه‌های مختلفی مانند ارزیابی منابع طبیعی و خطرات زیست‌محیطی مخصوصاً سیلاب‌های ناگهانی در حوضه‌های آبخیز مناطق خشک (Lattif & Sherief, 2012)، ارزیابی پتانسیل

آب‌های زیرزمینی و رفتار هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز (Malik et al., 2011)، و اولویت‌بندی حوضه‌های آبخیز به‌منظور حفاظت از منابع آب‌و خاک (Singh et al., 2008) مورد استفاده قرار گرفته است. تکنیک‌های سنجش‌از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی قدرتمندترین ابزار جهت مدیریت حوضه آبخیز و اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها برای حفاظت از منابع آب‌و خاک می‌باشند. همچنین آنالیز کمی حوضه‌های زهکشی تکنیک پایه جهت شناخت ویژگی‌های زیرحوضه‌ها و آنالیز ژئومورفومتریک حوضه‌های زهکشی و شبکه آبراهه است. آنالیز ژئومورفومتریک از طریق اندازه‌گیری پارامترهای پایه، خطی، شکلی و توپوگرافیک شبکه زهکشی امکان‌پذیر است (Chatterjee et al., 2013; Okumura & Araujo, 2014). تاکنون در زمینه ارزیابی کارایی پارامترهای ژئومورفومتریک در اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز و تهیه نقشه فرسایش خاک مطالعات نسبتاً کمی در داخل و خارج از کشور صورت گرفته است به‌گونه‌ای که آمانی و نجفی نژاد در سال ۱۳۹۳ به اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها با استفاده از آنالیز مورفومتری، فنون سنجش‌از دور<sup>۱</sup> و سیستم اطلاعات جغرافیایی<sup>۲</sup> در حوضه آبخیز لهندر در استان گلستان پرداخته‌اند. به‌منظور آنالیز مورفومتری از پارامترهای طول آبراهه، نسبت انشعاب، تراکم زهکشی، ضریب شکل، ضریب گردی، ضریب کشیدگی و ضریب فشردگی استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که از نظر پارامترهای مورفومتری زیرحوضه B5 از بین ۱۱ زیرحوضه دارای بیشترین حساسیت نسبت به فرسایش می‌باشد (آمانی و نجفی، ۱۳۹۳). رحمتی و همکاران در سال ۱۳۹۴ با استفاده از پارامترهای مورفومتریک و روش ترکیب خطی وزنی به اولویت‌بندی سیل‌خیزی زیرحوضه‌های آبخیز استان گلستان پرداخته‌اند؛ بدین‌منظور از ۸ پارامتر مورفومتریک شامل نسبت انشعاب، تراکم زهکشی، ثابت نگهداشت آبراهه، فراوانی آبراهه، ضریب فرم، نرخ بافت زهکشی، نسبت ناهمواری و عدد ناهمواری استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که زیرحوضه‌های ۳، ۱۶ و ۹ دارای اولویت بالاتری نسبت به دیگر زیرحوضه‌ها برای اقدامات آبخیزداری می‌باشند (رحمتی و همکاران، ۱۳۹۴). فلاح و همکاران در سال ۱۳۹۴ با استفاده از پارامترهای مورفومتری و کاربری اراضی به اولویت‌بندی زیرحوضه‌های حوضه آبخیز تالار در استان مازندران پرداخته‌اند؛ بدین‌منظور از پارامترهای مورفومتری خطی (تراکم زهکشی، نسبت انشعاب، فراوانی آبراهه، بافت زهکشی و طول جریان) و پارامترهای مورفومتری شکلی (نسبت کشیدگی، ضریب فشردگی، ضریب گردی، شاخص شکل و فاکتور شکل) استفاده کردند و منطقه را از لحاظ کاربری اراضی به ۵ کلاس مرتع، جنگل، مسکونی، کشاورزی آبی و کشاورزی دیم طبقه‌بندی کردند. طبق نتایج بر مبنای تأثیر دو پارامتر مورفومتری و کاربری اراضی زیرحوضه‌ها را در ۴ اولویت خیلی زیاد، زیاد، متوسط و کم طبقه‌بندی کردند (فلاح و همکاران، ۱۳۹۴). اقبال و سجاد در سال ۲۰۱۴ به اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها با استفاده از پارامترهای مورفومتری و کاربری اراضی پرداخته و زیرحوضه‌ها را به ۳ کلاس اولویت بالا، متوسط و کم جهت اقدامات آبخیزداری تقسیم‌بندی کردند (Iqbal & Sajjad, )

1 Remote Sensing

2 Geography Information System

2014). فرهان و همکاران در سال ۲۰۱۵ به آنالیز کمی پارامترهای ژئومورفومتریکی با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در وادی کراک<sup>۱</sup> پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیدند که بر اساس آنالیز پارامترهای ژئومورفومتریکی منطقه وادی کراک دارای حساسیت بالایی نسبت به فرسایش می‌باشد (Farhan et al., 2015). عرب‌عامری و همکاران در سال ۲۰۱۸ به اولویت‌بندی فرسایش‌پذیری زیرحوضه‌های حوضه آبخیز قائم شهر و تهیه نقشه فرسایش خاک با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیدند که روش ویکور دارای کارایی بالاتری نسبت به روش‌های دیگر در تهیه نقشه فرسایش خاک با استفاده از پارامترهای مورفومتری می‌باشد (Arabameri et al., 2018). هدف از این پژوهش آنالیز کمی پارامترهای ژئومورفومتریکی و تهیه نقشه حساسیت فرسایش‌پذیری خاک با استفاده از الگوریتم توافقی ویکور و روش فاکتور ترکیب می‌باشد. استفاده از پارامترهای ژئومورفومتریکی در شناسایی مناطق حساس به فرسایش در کنار روش‌های ویکور و فاکتور ترکیب نوآوری این تحقیق نسبت به مطالعات پیشین می‌باشد. به‌منظور صحت‌سنجی مدل از روش PSIAC<sup>۲</sup> استفاده گردید.

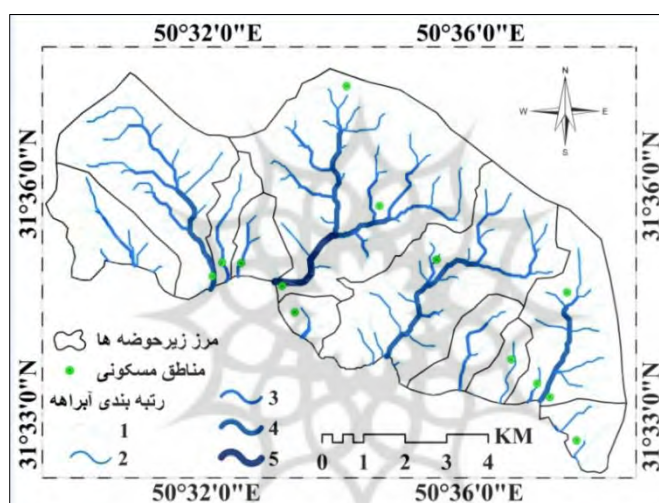
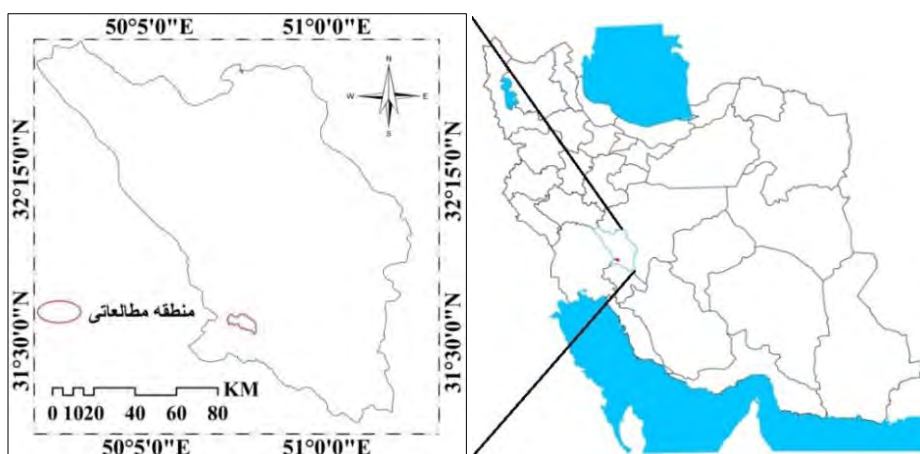
## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز منج با مساحت ۷۰/۲۱ کیلومتر مربع در فاصله تقریبی ۱۸۷ کیلومتری جنوب غربی شهر کرد در استان چهارمحال و بختیاری قرار گرفته است. گستره این حوضه بین مختصات جغرافیایی ۵۰ درجه و ۲۹ دقیقه و ۲۹ ثانیه تا ۵۰ درجه و ۳۸ دقیقه و ۲۳ ثانیه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۳۲ دقیقه و ۱۴ ثانیه تا ۳۱ درجه و ۳۷ دقیقه و ۳۲ ثانیه طول شرقی عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). حداکثر ارتفاع حوضه واقع در قسمت غرب حوضه با ارتفاع ۱۹۹۹ و حداقل ارتفاع واقع در قسمت جنوب غربی حوضه با ارتفاع ۱۱۰۰ متر از سطح دریاست. از نظر تقسیمات حوضه‌ای محدوده مطالعاتی حوضه آسمانگر جزئی از حوضه آبریز رودخانه کارون می‌باشد. روستاهای آسمانگر، تیرسامان، بیدله، کلواری منج و قلعه سومی در این حوضه واقع‌اند.

1 Wadi Kerak

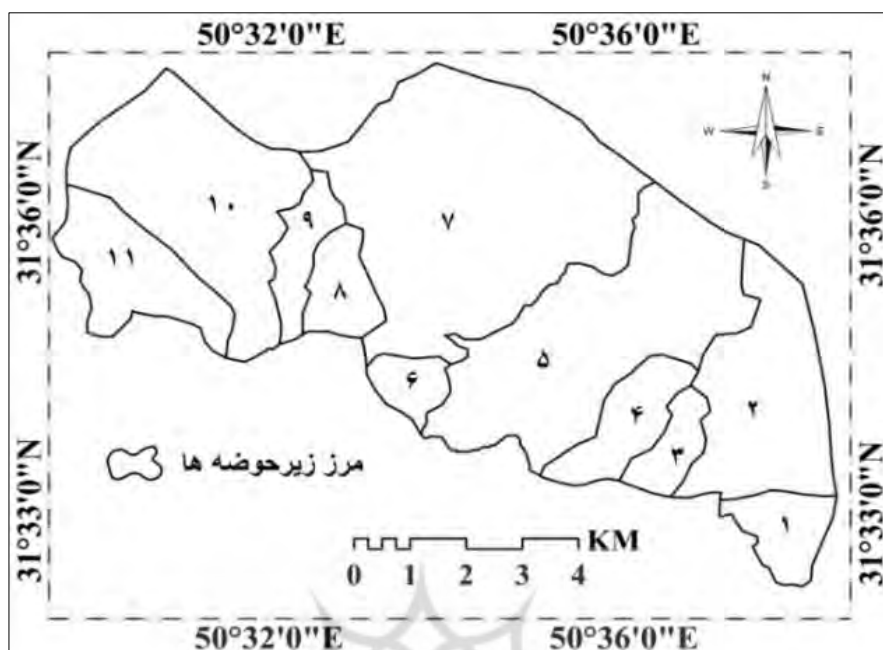
2 Pacific Southwest Inter-Agency Committee



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی

## ۲-۲- روش پژوهش

پژوهش حاضر از نوع کاربردی است. در این پژوهش از آنجایی که واحدهای هیدرولوژیک مبنای بررسی پارامترهای ژئومورفومتریک می‌باشند، لذا با استفاده از شبکه آبراهه‌ها و منحنی‌های ارتفاعی نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ و داده‌های رقومی ارتفاعی حاصل از تصاویر آستر نسخه دوم (با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر) در محیط ArcGIS10.4 و به‌کارگیری الحاقیه Arc Hydro و SAGA GIS v.3.0.0 اقدام به تدقیق مرز واحدهای هیدرولوژیک و تعیین زیرحوضه‌ها گردید (شکل ۲).



شکل ۲- زیرحوضه‌های حوضه آبخیز منج

پس از تعیین مرز زیرحوضه‌ها، رتبه‌بندی آبراهه‌ها بر اساس سیستم رتبه‌بندی آبراهه‌ها ارائه شده توسط استرالر (Strahler, 1957) انجام گرفت. داده‌های رقومی ارتفاعی حاصل از تصاویر آستر نسخه دوم مبنای استخراج پارامترهای ژئومورفومتریک پایه، خطی، شکلی و توپوگرافیک گردید. پارامترهای ژئومورفومتریک مذکور، به کمک نرم‌افزار ArcGIS10.4 و به‌کارگیری الحاقیه Arc Hydro و روابط ارائه شده در جدول ۱ محاسبه و داده‌های مورد نیاز بای مرحله بعد تهیه شد. با توجه به این‌که داده رقومی ارتفاعی (DEM-ASTER-30m) مبنای محاسبه پارامترها می‌باشد. قبل از محاسبه پارامترهای ژئومورفومتریک با استفاده از الحاقیه Arc Hydro اقدام به پیش‌پردازش و آماده‌سازی داده رقومی ارتفاعی (DEM-ASTER-30m) در محیط نرم‌افزار ArcGIS10.4 شد. پس از استخراج و آنالیز پارامترهای ژئومورفومتریک در هر یک از زیر حوضه‌ها، اقدام به اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها با استفاده از الگوریتم ویکور و روش فاکتور ترکیب گردید و سپس نقشه حساسیت فرسایش خاک در منطقه مطالعاتی با هر دو روش تهیه گردید. به‌منظور صحت‌سنجی روش‌ها از روش PSIAC استفاده گردید. مراحل تحقیق در شکل ۳ نشان داده شده است.

جدول ۱- محاسبه پارامترهای ژئومورفومتریک پایه، خطی، شکلی و توپوگرافیک

مرجع	توضیحات	رابطه	پارامترها	
Horton (1945)	مساحت سطح حوضه به کیلومتر مربع	-	(A) <sup>۱</sup>	پارامترهای پایه
Horton (1945)	محیط حوضه به کیلومتر	-	(P) <sup>۲</sup>	
Horton (1945)	رتبه‌بندی سلسله مراتبی	-	(U) <sup>۳</sup>	
(Strahler, 1957)	تعداد آبراهه‌های تمامی رتبه‌ها		(Nu) <sup>۴</sup>	
Nooka et al (2005)	طول حوضه به کیلومتر	$L_b = 1.321 \times A^{0.568}$	(Lb) <sup>۵</sup>	
Horton (1945)	طول جریان به کیلومتر	-	(Lu) <sup>۶</sup>	
Horton (1945)	Lu. طول کل آبراهه‌ها، Nu. تعداد کل آبراهه‌ها	$L_s = L_u / N_u$	(Lsm) <sup>۷</sup>	
Schumm (1956)	تعداد آبراهه‌های یک رده (Nu) به تعداد تعداد آبراهه‌های رده بعدی (Nu+1)	$R_b = N_u / N_u + 1$	(Rb) <sup>۸</sup>	پارامترهای خطی
Horton (1945)	میانگین نسبت‌های انشعاب تمامی رده‌ها	-	(Rbm) <sup>۹</sup>	
Horton (1945)	Lu. طول تمامی رتبه‌های آبراهه به کیلومتر، A. مساحت حوضه به کیلومتر مربع.	$D_d = L_u / A$	(Dd) <sup>۱۰</sup>	
Horton (1945)	Nu. تعداد کل رتبه‌های آبراهه، A. مساحت	$F_u = N_u / A$	(Fu) <sup>۱۱</sup>	
Horton (1945)	Nu. تعداد کل رتبه‌های آبراهه، P. محیط	$T = N_u / P$	(T) <sup>۱۲</sup>	
Horton (1945)	Dd. تراکم زهکشی	$L_o = 1 / 2 D_d$	(Lo) <sup>۱۳</sup>	
Horton (1945)	Fu. فراوانی آبراهه، Dd. تراکم زهکشی	$I_f = F_u \times D_d$	(If) <sup>۱۴</sup>	
Horton (1945)	مساحت حوضه، Lu. طول آبراهه‌ها	$C = \frac{A}{\sum_{i=1}^n L_u}$	(C) <sup>۱۵</sup>	
Horton (1945)	Lb. طول آبراهه به کیلومتر، A. مساحت حوضه	$R_f = A / L_b^2$	(Rf) <sup>۱۶</sup>	
Nooka et al (2005)	Lb. طول آبراهه به کیلومتر، A. مساحت حوضه	$B_s = L_b^2 / A$	(Bs) <sup>۱۷</sup>	

- 1 Basin Area (A)
- 2 Basin perimeter (P)
- 3 Stream order (U)
- 4 Number of Streams (Nu)
- 5 Basin length (Lb)
- 6 Stream Length (Lu)
- 7 Mean stream length (Lsm)
- 8 Bifurcation ratio (Rb)
- 9 Mean bifurcation ratio (Rbm)
- 00 Drainage density (Dd)
- 11 Stream frequency (Fu)
- 22 Texture Ratio (T)
- 33 Length of Overland Flow (Lo)
- 44 Infiltration number (If)
- 55 constant of channel maintenance (C)
- 66 Form Factor (Rf)
- 77 Shape Factor (Bs)

## ادامه جدول ۱

مرجع	توضیحات	رابطه	پارامترها	
Schumm (1956)	A. مساحت حوضه، $L_b$ . طول حوضه به کیلومتر	$R_e = 1.128 \sqrt{A/L_b}$	(Re) <sup>۱</sup>	پارامترهای شکلی
Horton (1945)	P. محیط حوضه، A. مساحت حوضه	$Cc = P/2\sqrt{\pi A}$	(Cc) <sup>۲</sup>	
Miller (1953)	$\pi = 3.14$ . مساحت حوضه P. محیط	$R_c = 4 \times \pi \times A/p^2$	(Rc) <sup>۳</sup>	
Moore et al (1991)	Dd. تراکم زهکشی، Bh. ناهمواری حوضه به متر	$R_n = D_d \times (B_h/1000)$	(Rn) <sup>۴</sup>	پارامترهای توپوگرافی
Horton (1945)	h. حداکثر ارتفاع به متر، h <sub>1</sub> . حداقل ارتفاع به متر	$B_h = h - h_1$	(Bh) <sup>۵</sup>	
Schumm (1956)	Bh. ناهمواری حوضه، $L_b$ . طول حوضه به کیلومتر	$Rh = B_h/L_b$	(Rh) <sup>۶</sup>	
Nautiyal (1994)	$\Delta H$ . اختلاف ارتفاع حوضه، A مساحت	$sm = \frac{\Delta H}{\sqrt{A}} \times 100$	(S) <sup>۷</sup>	

\*A محیط، P مساحت، U. رتبه آبراهه، Nu. تعداد کل آبراهه،  $L_b$ . طول حوضه،  $L_u$ . طول آبراهه،  $L_{sm}$ . میانگین طول آبراهه، Rb. نسبت انشعاب، Rbm. میانگین نسبت انشعاب، Dd. تراکم زهکشی، Fu. فراوانی آبراهه، T. نرخ بافت زهکشی، Lo. طول جریان خشکی، If. عدد نفوذ، C. ثابت نگهداشت آبراهه، Rf. فاکتور فرم، Bs. فاکتور شکل، Re. نسبت کشیدگی، Cc. نسبت فشردگی، Rc. نسبت گردی، Rn. عدد ناهمواری. Bh. ناهمواری حوضه، Rh. نسبت ناهمواری، S. شیب.

۲-۳- الگوریتم توافقی ویکور<sup>۸</sup> (VIKOR)

روش ویکور به عنوان یک روش قابل کاربرد برای پیاده‌سازی در تصمیم‌گیری چندمعیاره معرفی شد. ای روش بر رتبه بندی و انتخاب از مجموعه‌ای از گزینه‌ها با وجود معیارهای متناقض متمرکز است. راه حل توافقی که اساس آن توسط Yu و Zeleny در سال ۱۹۸۴ تأسیس شده بود، روش ویکور برای رتبه‌بندی گزینه‌ها می‌تواند در مراحل زیر توصیف گردد (Opricovic & Tzeng, 2004): گام نخست: تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری (Huang et al, 2009).

- 1 Elongation Ratio (Re)
- 2 Compactness Coefficient (Cc)
- 3 Circularity Ratio (Rc)
- 4 Ruggedness number (Rn)
- 5 Basin relief (Bh)
- 6 Relief ratio (Rh)
- 7 Slope (S)
- 8 Vlse Kriterijumsk Optimizacija Kompromisno Resenje



$$D = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

گام دوم. محاسبه ماتریس نرمالیزه: در روش ویکور از روش خطی برای نرمال سازی استفاده می گردد (رابطه ۱).

$$RIJ = \frac{X_{IJ}}{\sum_1^M X_{ij}} \quad (1)$$

گام سوم. محاسبه وزن معیارها. مزیت مدل ویکور این است که ارزیابی همه معیارها به بررسی کارشناسی نیاز ندارد بلکه می توان از داده های خام نیز استفاده نمود. در این پژوهش با استفاده از روش AHP وزن هر یک از معیارها محاسبه گردید (روابط ۲ و ۳).

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (2)$$

$$w'_j = \frac{\lambda_j \cdot w_j}{\sum_{j=1}^n \lambda_j \cdot w_j} \quad (3)$$

گام چهارم. محاسبه ماتریس نرمالیزه وزین از طریق ضرب ماتریس نرمال در وزن هر یک از معیارها (رابطه ۴).

$$V = RIJ * W_{n * n} \quad (4)$$

گام پنجم. تعیین بهترین مقدار  $X_j^*$  و بدترین مقدار  $X_j^-$  کلیه توابع معیار  $(j=1,2,\dots,n)$ : اگر  $\lambda$  امین امینار، معیار سود باشد و بیشترین مقدار آن با توجه به هدف مفیدتر باشد، در این صورت  $X_j^+ = \max X_{ij}$  و  $X_j^- = \min X_{ij}$  می باشند. گام ششم. محاسبه مقادیر  $S_i$  (شاخص مطلوبیت) و  $R_i$  (شاخص نارضایتی)، با استفاده از روابط ۵ و ۶

$$S_i = L_{1,i} = \frac{\sum_{j=1}^n w_j (X_j^* - X_{ij})}{(X_j^* - X_j^-)} \quad (5)$$

$$R_i = L_{\infty,i} = \max[\sum_{j=1}^n w_j (X_j^* - X_{ij}) / (X_j^* - X_j^-)] \quad (6)$$

که در آن:  $X_j^*$ : بزرگترین عدد ماتریس نرمال وزنی برای هر ستون،  $X_{ij}$ : عدد گزینه مورد نظر برای هر معیار در ماتریس نرمال وزنی،  $X_j^-$ : کوچکترین عدد ماتریس نرمال وزنی برای هر ستون،  $w_j$ : وزن  $\lambda$  امین معیار امنیت که بیانگر اهمیت نسبی معیارها می باشد. گام هفتم. محاسبه شاخص ویکور ( $Q$ ) و رتبه بندی نهایی گزینه ها با استفاده از رابطه ۷.

$$Q_i = V \times \frac{(S_i - S^*)}{(S^- - S^*)} + (1 - V) \times \frac{(R_i - R^*)}{(R^- - R^*)} (V)$$

که در آن:  $V =$  عدد ثابت  $0/5$ ;  $S_i$ : مجموع مقدار  $S$  برای هر گزینه،  $S^*$ : کوچک‌ترین عدد شاخص  $S$  برای هر گزینه،  $S^-$ : بزرگ‌ترین عدد شاخص  $S$  برای هر گزینه،  $R^-$ : بزرگ‌ترین عدد شاخص  $R$  برای هر گزینه،  $R^*$ : کوچک‌ترین عدد شاخص  $R$  برای هر گزینه،  $R_i$ : مقدار  $R$  برای هر گزینه. گام هشتم. انتخاب گزینه مناسب‌تر (A) که بهترین رتبه را با حداقل  $Q$  دارد (El-Santawy, 2012).

## ۲-۴- روش فاکتور ترکیب (CF)

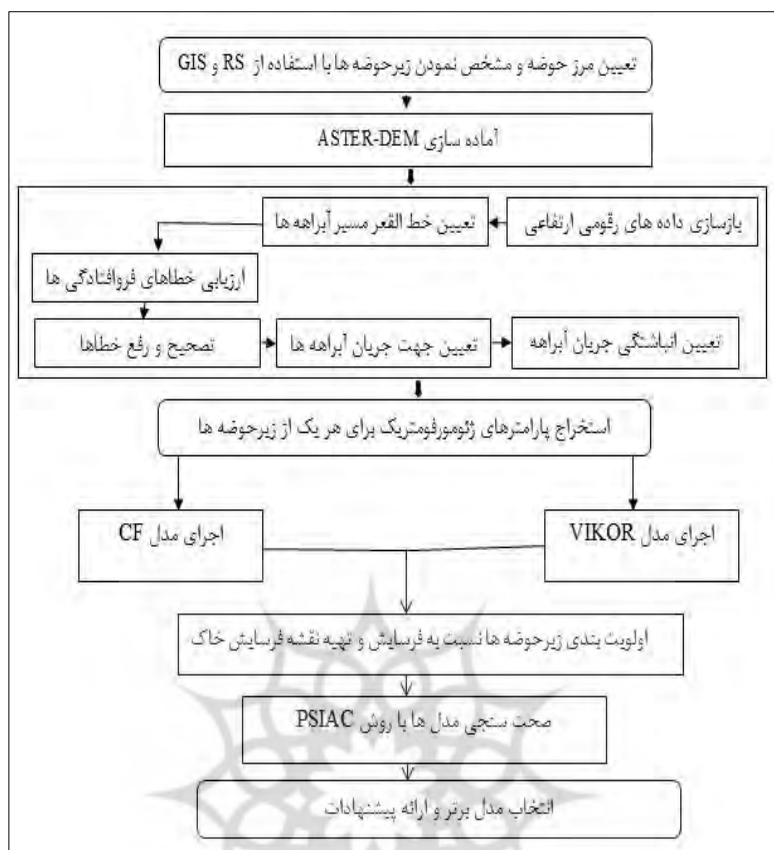
این مدل بر اساس اصول روش‌های داده‌محور می‌باشد (Todorovski & Džeroski, 2006) و فهم کیفی از یک پدیده را با استفاده از دانش علمی تبدیل به تخمین‌های کمی می‌کند. در این مدل تعداد رتبه‌ها بر اساس تعداد زیرحوضه‌ها تعیین می‌گردد؛ به طور مثال در این پژوهش که ۱۱ زیرحوضه داریم رتبه‌ها از ۱ تا ۱۱ برای زیرحوضه‌ها متغیر است و برای هر یک از پارامترهای مورفومتری، زیرحوضه‌هایی که حساسیت بالایی نسبت به فرسایش دارند امتیاز ۱ را دریافت می‌کنند و بالعکس. میانگین امتیازات تمامی پارامترهای ژئومورفومتریک برای هر یک از زیرحوضه‌ها بیانگر امتیاز ترکیبی و تأثیر ترکیبی تمامی پارامترهای ژئومورفومتریک در حساسیت فرسایش هر یک از زیرحوضه‌ها می‌باشد. نحوه محاسبه آن از طریق رابطه ۸ است:

$$C_p = \frac{1}{n \sum_{i=1}^n R} \quad (8)$$

که در آن  $R$  امتیاز یک زیرحوضه با توجه به هر یک از پارامترهای ژئومورفومتریک و  $n$  تعداد پارامترها می‌باشد.

## ۲-۵- روش PSIAC

روش PSIAC در سال ۱۹۶۸ میلادی توسط کمیته مدیریت آب در آمریکا برای محاسبه شدت فرسایش خاک و تولید رسوب مناطق خشک و نیمه‌خشک غرب ایالات متحده آمریکا ارائه گردید و در یک حوضه آبخیز تحقیقاتی به نام والنات گالش واقع در جنوب شرقی ایالات آریزونا آمریکا آزمایش شد (Pacific Southwest Inter-Agency Committee, 1968). در این روش تأثیر نه پارامتر مهم و مؤثر زمین‌شناسی سطحی، خاک، آب و هوا، رواناب، پستی و بلندی، پوشش زمین، کاربری زمین، وضعیت فعلی فرسایش در سطح حوضه، فرسایش رودخانه‌ای و حمل رسوب بررسی می‌گردد. بسته به شدت و ضعف هر عامل عددی به آن نسبت داده می‌شود و سرانجام با در نظر گرفتن مجموع اعداد به دست آمده برای عوامل مختلف، میزان رسوبدهی حوضه برآورد می‌گردد (Pacific Southwest Inter-Agency Committee, 1968).



شکل ۳- مراحل تحقیق

### ۳- نتایج و بحث

ژئومورفومتری حوضه آبخیز توصیف کاملی از ارتباطات بین فرآیندهای مختلف سطح زمین و اجزاء مختلف سیستم زمین مانند ژئومورفولوژی، هیدرولوژی و زمین‌شناسی فراهم می‌کند (Malik et al., 2011). مشخصات سیستم‌زهکشی حوضه آبخیز تأثیر زیادی در ظرفیت نفوذ و رواناب آن دارد (Moore et al., 1991). برخی از پارامترهای ژئومورفومتریکی به طور مستقیم به عنوان شاخص‌های شدت فرسایش خاک در نظر گرفته می‌شوند و به عنوان پارامترهای ارزیابی ریسک فرسایش نامگذاری شده‌اند که شامل پارامترهای ژئومورفومتریکی خطی، شکلی و توپوگرافیک می‌باشند. آنالیز کمی حوضه آبخیز منج و ۱۱ زیرحوضه آن به منظور ارزیابی ویژگی‌ها و خصوصیات ژئومورفومتریکی شبکه‌زهکشی هر یک از زیرحوضه‌ها و بررسی حساسیت فرسایش در هر یک از زیرحوضه‌ها انجام پذیرفت (جدول ۲). در این خصوص ۲۲ پارامتر ژئومورفومتریکی که بیانگر ویژگی‌های پایه، خطی، شکلی و توپوگرافیک حوضه آبخیز می‌باشد مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس رتبه‌بندی آبراهه‌ها، حوضه آبخیز منج به عنوان یک حوضه ۵ رتبه‌ای با مساحت ۷۰/۷۱ کیلومترمربع و محیط ۱۲۳/۳۷ کیلومتر طبقه‌بندی گردید. تعداد کل

آبراهه‌های حوضه ۲۲۰۴ می‌باشد. طول کل آبراهه‌ها در رده‌های مختلف ۳۲۷/۹۳ کیلومتر می‌باشد. مقادیر طول آبراهه‌ها در حوضه از حداقل ۴/۶۲ کیلومتر برای حوضه ۶ تا حداکثر ۹۱/۶۲ کیلومتر برای حوضه ۷ متغیر است. مقادیر میانگین طول آبراهه از حداقل ۰/۱۲۱۶ برای حوضه ۶ تا حداکثر ۰/۱۸۷۷ برای زیرحوضه ۸ متغیر است. حداقل ارتفاع حوضه ۱۱۰۰ و حداکثر آن ۱۹۹۹ متر می‌باشد.

جدول ۲- استخراج پارامترهای ژئومورفومتریک زیرحوضه‌ها

	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
(A)	۴/۷۶	۱۱	۲	۲/۱۲	۲۰/۴۸	۱/۳۷	۱۳/۹۸	۲/۹	۱/۶۱	۸/۲۷	۲/۲۳	
(P)	۱۱/۰۱	۱۵/۹۹	۸/۱۵	۶/۱۹	۲۱/۱۴	۴/۹۱	۲۰/۶۶	۸/۲۱	۵/۸۶	۱۴/۶	۶/۶۵	
(U)	۳	۴	۳	۳	۵	۳	۵	۴	۳	۴	۳	
(Nu)	۱۲۱	۳۵۳	۶۸	۴۷	۶۶۳	۳۸	۴۶۲	۷۱	۶۶	۲۴۵	۷۴	
(Lb)	۳/۲	۵/۱۶	۱/۹۶	۲/۰۲	۷/۳۴	۱/۵۸	۵/۹۱	۲/۴۲	۱/۷۳	۴/۳۹	۲/۰۹	
(Lu)	۲۱/۸۵	۵۶/۸	۹/۸۷	۸/۸۲	۹۱/۶۲	۴/۶۲	۶۷/۳۱	۱۱/۵۵	۸/۲۲	۳۳/۹۴	۱۳/۳۳	
(Bh)	۰/۴۶۲	۰/۶۳	۰/۳۳۶	۰/۸۳۷	۰/۶۶	۰/۱۸۵	۰/۴۸۰	۰/۲۱۰	۰/۴۷	۰/۸۲۵	۰/۹۱۵	
(Lsm)	۰/۱۸	۰/۱۶	۰/۱۴۵	۰/۱۸۷	۰/۱۳۸	۰/۱۲۱	۰/۱۴۵	۰/۱۶۲	۰/۱۲۴	۰/۱۳۸	۰/۱۸	
(Rbm)	۴/۲۱	۵/۵۵	۴	۴/۶	۶/۰۵	۹	۱۰	۶/۵۲	۳/۷	۵/۹۱	۵/۸۵	
(Dd)	۴/۵۹	۵/۱۶	۴/۹۴	۴/۱۷	۴/۴۷	۳/۳۹	۴/۸۲	۳/۹۸	۵/۱۲	۴/۱	۵/۹۷	
(Fu)	۲۵/۴۵	۳۲/۰۹	۳۴/۰۴	۲۲/۱۹	۳۲/۳۸	۲۷/۸۴	۳۳/۰۵	۲۴/۴۸	۴۱/۱۰	۲۹/۶۱	۳۳/۱۳	
(T)	۱۰/۹۹	۲۲/۰۷	۸/۳۴	۷/۵۹	۳۱/۳۷	۷/۷۴	۲۲/۳۶	۸/۶۴	۱۱/۲۷	۱۶/۷۸	۱۱/۱۳	
(Lo)	۲/۲۹	۲/۵۸	۲/۴۶	۲/۰۸	۲/۲۳	۱/۶۹	۲/۴۰	۱/۹۹	۲/۵۵	۲/۰۵	۲/۹۸	
(If)	۱۱۶/۹	۱۶۵/۷	۱۶۷/۱	۹۲/۴	۱۴۴/۸	۹۴/۲	۱۵۹/۱	۹۷/۴	۲۱۰/۲	۱۲۱/۴	۱۹۷/۷	
(C)	۰/۲۲	۰/۱۹	۰/۲۰	۰/۲۴	۰/۲۲	۰/۳۰	۰/۲۱	۰/۲۵	۰/۲۰	۰/۲۴	۰/۱۷	
(Rf)	۰/۴۶۳	۰/۴۱۳	۰/۵۲۱	۰/۵۱۷	۰/۳۸۰	۰/۵۴۹	۰/۴۰۰	۰/۴۹۵	۰/۵۳۷	۰/۴۲۹	۰/۵۱۳	
(Bs)	۲/۱۵	۲/۴۱	۱/۹۱	۱/۹۳	۲/۶۳	۱/۸۲	۲/۴۹	۲/۰۱	۱/۸۶	۲/۳۲	۱/۹۴	
(Re)	۰/۷۷	۰/۷۳	۰/۸۲	۰/۸۱	۰/۷۰	۰/۸۴	۰/۷۱	۰/۷۹	۰/۸۳	۰/۷۴	۰/۸۱	
(Ce)	۱/۴۱	۱/۳۵	۱/۶۲	۱/۱۹	۱/۳۱	۱/۱۸	۱/۵۵	۱/۳۵	۱/۲۹	۱/۴۲	۱/۲۵	
(Re)	۰/۴۹	۰/۵۴	۰/۳۸	۰/۰۹	۰/۵۸	۰/۷۱	۰/۴۱	۰/۵۴	۰/۵۹	۰/۴۹	۰/۶۳	
(Rn)	۲/۱۲	۳/۲۵	۱/۶۵	۳/۰۷	۲/۹۵	۰/۶۲	۲/۳۱	۰/۸۳	۲/۴۴	۳/۳۸	۵/۴۵	
(Rh)	۰/۱۴	۰/۱۲	۰/۱۷	۰/۳۶	۰/۰۹	۰/۱۲	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۲۸	۰/۱۹	۰/۴۴	
(S)	۳۶/۱۲	۲۶/۱۳	۲۱/۳۴	۳۲/۲۱	۱۴/۲۱	۲۳/۷۶	۲۴/۱۳	۲۲/۷۶	۱۹/۶۵	۲۳/۶۵	۲۶/۲۱	

## ۳-۱- اولویت‌بندی فرسایش‌پذیری زیرحوضه‌ها با روش فاکتور ترکیب

آنالیز ژئومورفومتریکی حوضه‌های زهکشی به‌منظور اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها در مقیاس‌های مختلف با موفقیت اجرا شده است (Patel et al., 2012; Abdul Rahaman et al., 2015; Farhan & Anaba, 2016). به‌منظور اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها، پارامترهای ژئومورفومتریکی ریسک فرسایش مرتبط با خصوصیات ژئومورفومتریکی خطی، شکلی و توپوگرافیک حوضه آبخیز مورد استفاده قرار گرفت (Patel et al., 2013). پارامترهای خطی مورد استفاده شامل تراکم زهکشی (Dd)، فراوانی آبراهه (Fu)، میانگین نسبت انشعاب (Rbm)، بافت زهکشی (T)، ثابت نگهداشت آبراهه (C)، طول جریان خشکی (Lo) و عدد نفوذ (If) می‌باشد. پارامترهای شکلی شامل نسبت کشیدگی (Re)، نسبت گردی (Rc)، فاکتور فرم (Rf)، فاکتور شکل (Bs) و نسبت فشردگی (Cc) می‌باشد. پارامترهای توپوگرافیک شامل ناهمواری کلی (Bi)، شیب (S)، عدد ناهمواری (Rn) و نسبت ناهمواری (Rh) است. پارامترهای خطی و توپوگرافیک رابطه مستقیمی با فرسایش‌پذیری دارند (نوکا و همکاران، ۲۰۰۵: ۲۷)، در مقابل پارامتر شکل رابطه معکوس با فرسایش‌پذیری دارند؛ به‌گونه‌ای که هر چه مقدار این پارامترها کمتر باشد، حساسیت‌پذیری نسبت به فرسایش بیشتر است (Patel et al., 2013). برای مثال در پارامتر تراکم‌زهکشی که یک پارامتر خطی است، زیرحوضه‌ای که بالاترین تراکم زهکشی را دارد رتبه یک را دریافت می‌کند و در مقابل زیرحوضه‌ای که کمترین تراکم زهکشی را دارد آخرین رتبه را دریافت می‌کند. مقادیر فاکتور ترکیب برای هر یک از زیرحوضه‌ها از طریق جمع تمامی رتبه‌های پارامترهای خطی، شکلی و توپوگرافیک و سپس تقسیم آن بر تعداد پارامترها حاصل می‌گردد. زیرحوضه‌ای که کمترین مقدار فاکتور ترکیب را کسب نماید، از لحاظ اولویت‌بندی در رتبه نخست قرار گرفته و دارای بیشترین فرسایش‌پذیری می‌باشد (Patel et al., 2013). در نهایت تمامی زیرحوضه‌ها به ۴ گروه از نظر حساسیت به فرسایش با توجه به مقدار فاکتور ترکیب طبقه‌بندی می‌گردند (Nooka et al., 2005). حساسیت خیلی زیاد (۵/۹ - ۵)، حساسیت زیاد (۶/۹ - ۶)، حساسیت متوسط (۷/۹ - ۷) و حساسیت کم (۸/۹ - ۸). نتایج حاصل از اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها با روش فاکتور ترکیب در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج حاصل از اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها با استفاده از روش فاکتور ترکیب نشان داد که زیرحوضه‌های ۱، ۲ و ۸ به ترتیب با کسب کمترین مقدار (۸/۱)، (۵/۲۵ و ۵/۴۳) در رتبه‌های اول تا سوم قرار گرفته و حساسیت بیشتری نسبت به فرسایش از خود نشان داده‌اند و در مقابل زیرحوضه‌های ۹، ۶ و ۳ به ترتیب با کسب بیشترین مقدار (۷/۱۸، ۷/۰۶ و ۶/۸۷) در رتبه‌های آخر قرار گرفته‌اند و حساسیت کمتری را نسبت به فرسایش از خود نشان داده‌اند. زیرحوضه‌های ۱۰، ۵، ۷، ۱۱ و ۴ در رتبه‌های چهارم تا هشتم قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از طبقه‌بندی زیرحوضه‌ها از لحاظ فرسایش‌پذیری نشان داد که کل منطقه در ۳ کلاس حساسیت خیلی زیاد، زیاد و متوسط قرار گرفته است (شکل ۴، الف). طبق نتایج حاصل از

روش فاکتور ترکیب حوضه منج دارای حساسیت بالایی نسبت به فرسایش می‌باشد و تقریباً بیشتر مناطق حوضه مستعد فرسایش می‌باشد (شکل ۴).

جدول ۳- اولویت‌بندی فرسایش‌پذیری زیرحوضه‌ها با روش فاکتور ترکیب

زیرحوضه پارامتر	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
Dd	۱	۹	۳	۱۰	۵	۱۱	۷	۸	۴	۲	۶
Fu	۳	۷	۱	۱۰	۴	۸	۵	۱۱	۲	۶	۹
Rbm	۶	۵	۱۱	۳	۱	۲	۴	۸	۱۰	۷	۹
T	۶	۴	۵	۸	۲	۱۰	۱	۱۱	۹	۳	۷
C	۱۱	۳	۹	۲	۷	۱	۵	۴	۸	۱۰	۶
Lo	۳	۸	۱۰	۴	۶	۱۱	۹	۱	۷	۵	۲
If	۱۰	۵	۱۱	۳	۷	۲	۶	۱	۹	۸	۴
Re	۷	۴	۱۰	۶	۲	۹	۱	۸	۱۱	۳	۵
Rc	۹	۳	۸	۵	۲	۱۱	۷	۱۰	۱	۶	۴
Rf	۷	۴	۱۰	۶	۲	۱۱	۱	۸	۹	۳	۵
Bs	۵	۸	۲	۶	۱۰	۱	۱۱	۴	۳	۹	۷
Cc	۳	۹	۴	۷	۱۰	۱	۵	۲	۱۱	۶	۸
Bh	۱	۲	۷	۱۰	۶	۱۱	۴	۳	۹	۵	۸
S	۳	۷	۱۰	۸	۵	۶	۱۱	۲	۹	۴	۱
Rn	۱	۲	۶	۹	۱۱	۱۰	۵	۴	۸	۳	۷
Rh	۱	۴	۳	۱۰	۱۱	۸	۹	۲	۵	۷	۶
Cf	۴/۸۱	۵/۲۵	۶/۸۷	۶/۶۸	۵/۶۸	۷/۰۶	۵/۶۸	۵/۴۳	۷/۱۸	۵/۴۳	۵/۸۷
رتبه	اول	دوم	نهم	هشتم	پنجم	دهم	ششم	سوم	یازدهم	چهارم	هفتم
حساسیت	خیلی زیاد	خیلی زیاد	زیاد	زیاد	خیلی زیاد	متوسط	خیلی زیاد	خیلی زیاد	متوسط	خیلی زیاد	خیلی زیاد

### ۳-۲- اولویت‌بندی فرسایش‌پذیری زیرحوضه‌ها با الگوریتم توافقی ویکور

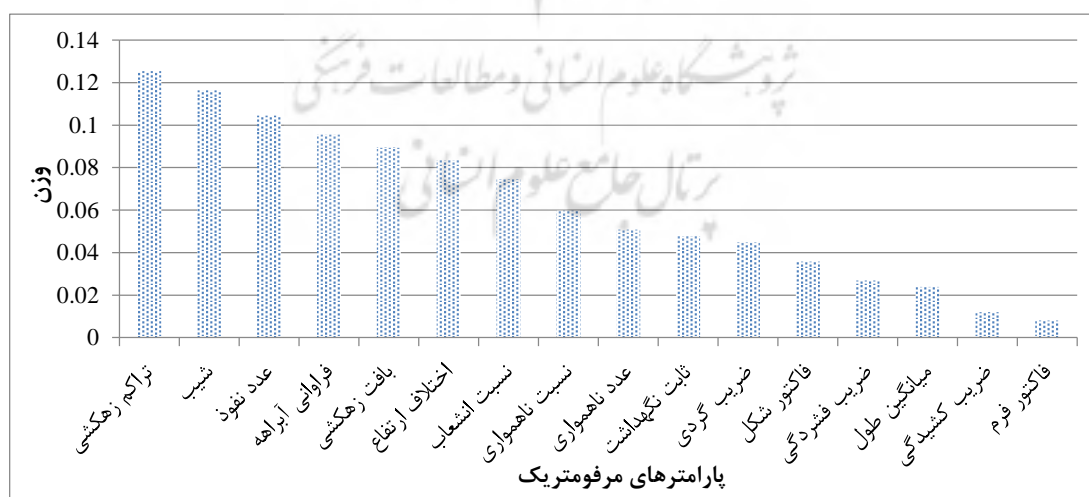
اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها با استفاده از الگوریتم توافقی ویکور شامل مراحل زیر است: ۱- تهیه ماتریس تصمیم اولیه (جدول ۲)، ۲- نرمالیزه کردن ماتریس تصمیم اولیه به منظور بی‌بعد کردن پارامترها طبق رابطه ۱، ۳- تعیین وزن پارامترها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی<sup>۱</sup> طبق رابطه ۲ و ۳ (شکل ۴)، ۴- تهیه ماتریس بی‌بعد وزین طبق

1 Analytical Hierarchy process (AHP)

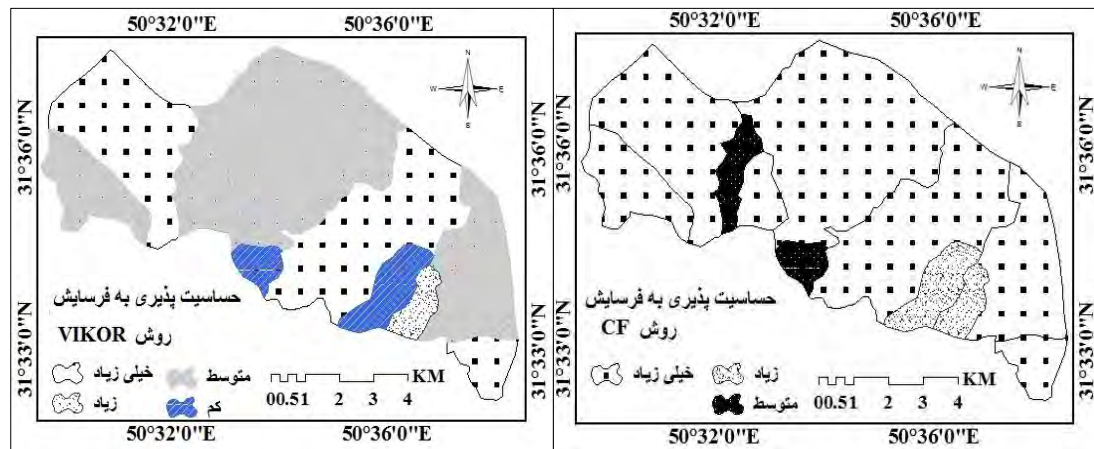
رابطه ۴، ۵- محاسبه مقادیر شاخص مطلوبیت و شاخص ناسازگاری طبق روابط ۵ و ۶ و در نهایت اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها بر اساس رابطه ۷ (جدول ۴) می‌باشد. در شکل (۵، ب) طبقه‌بندی حساسیت به فرسایش نشان داده شده است و در شکل ۶ مساحت هر یک از طبقات فرسایش‌پذیری در روش‌های VIKOR و فاکتور ترکیب نشان داده شده است.

جدول ۴- اولویت‌بندی فرسایش‌پذیری زیرحوضه‌ها با روش VIKOR

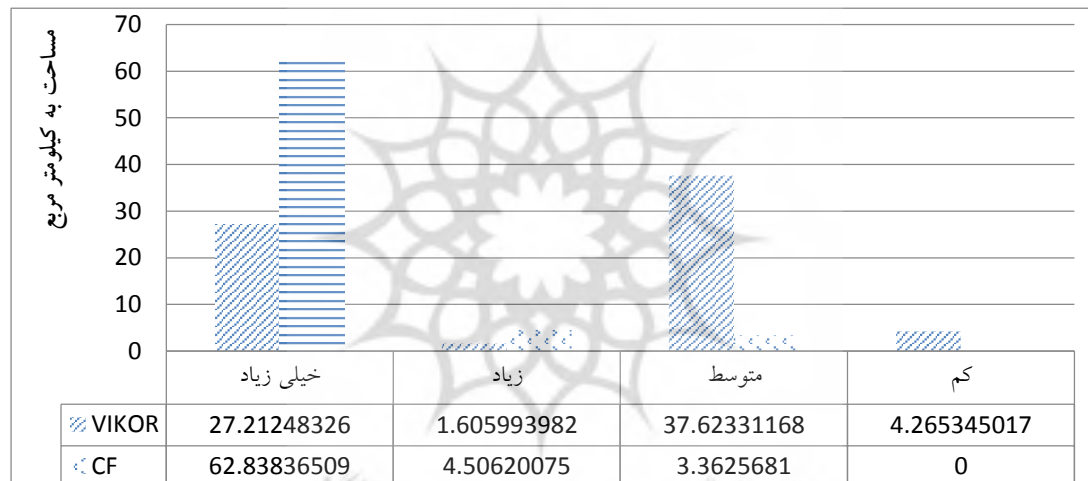
زیر حوضه	شاخص مطلوبیت (Si)	شاخص ناسازگاری (Ri)	$Q_i$	اولویت بندی	حساسیت به فرسایش	مساحت (KM2)	درصد مساحت
۱	۰/۳۴۳۵	۰/۰۷۶۲	۰/۸۵۲۴	اول	خیلی زیاد	۲/۲۳	۳/۱۵
۲	۰/۵۶۹۷	۰/۰۹۰۵	۰/۴۷۲۰	ششم	متوسط	۸/۲۷	۱۱/۷۰
۳	۰/۵۰۴۱	۰/۰۸۷۵	۰/۵۷۴۴	چهارم	زیاد	۱/۶۱	۲/۲۷
۴	۰/۷۵۱۲	۰/۱۰۰۰	۰/۱۸۱۹	دهم	کم	۲/۹	۴/۱۰
۵	۰/۴۸۹۷	۰/۰۶۳۷	۰/۷۶۲۸	سوم	خیلی زیاد	۱۳/۹۸	۱۹/۷۷
۶	۰/۷۴۷	۰/۱۲۵۳	۰/۰۰۵۲	یازدهم	کم	۱/۳۷	۱/۹۳
۷	۰/۵۷۰۵	۰/۱۱۶۴	۰/۲۸۵۸	نهم	متوسط	۲۰/۴۸	۲۸/۹۶
۸	۰/۶۰۶۴	۰/۱۰۴۴	۰/۳۲۷۴	هشتم	متوسط	۲/۱۲	۲/۹۹
۹	۰/۶۰۸۵	۰/۰۸۶۷	۰/۴۵۲۱	هفتم	متوسط	۲	۲/۸۲
۱۰	۰/۴۸۷۰	۰/۰۵۵۶	۰/۸۲۴۰	دوم	خیلی زیاد	۱۱	۱۵/۵۵
۱۱	۰/۵۹۷۲	۰/۰۸۲۷	۰/۴۹۴۳	پنجم	متوسط	۴/۷۶	۶/۷۲



شکل ۴- وزن هر یک از پارامترها با روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)



شکل ۵- نقشه حساسیت به فرسایش. الف. روش فاکتور ترکیب، ب. روش ویکور



شکل ۶- مساحت هر یک از طبقات فرسایش پذیری در روش‌های ویکور و فاکتور ترکیب

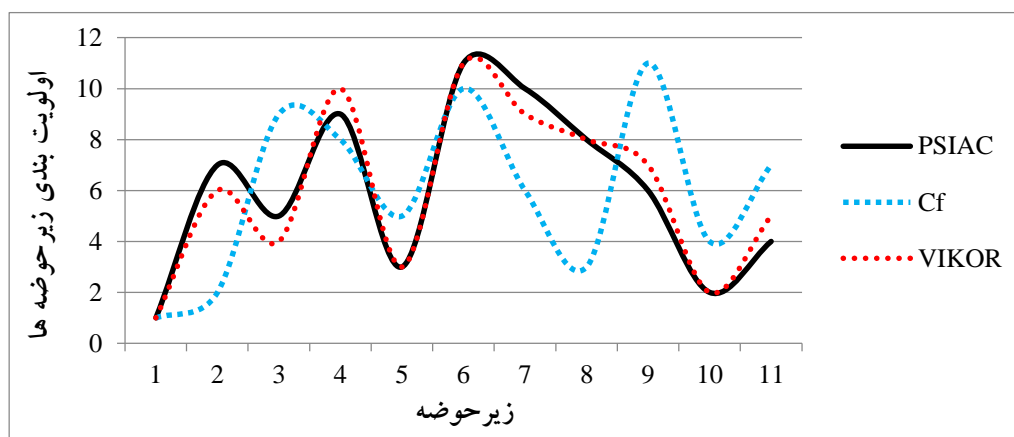
نتایج حاصل از وزندهی پارامترهای ژئومورفومتریکی مؤثر در فرسایش پذیری با استفاده از روش AHP نشان داد که پارامترهای تراکم زهکشی، شیب و عدد نفوذ به ترتیب با کسب امتیازات (۰/۱۲۵، ۰/۱۱۶ و ۰/۱۰۴) بیشترین تأثیر را در فرسایش پذیری زیرحوضه‌ها داشته‌اند که با نتایج (Patel et al., 2012; Abdul Rahaman et al., 2015) مطابقت دارد و در مقابل پارامترهای فاکتور فرم، ضریب کشیدگی و طول جریان خشکی به ترتیب با کسب کمترین امتیازات (۰/۰۰۸، ۰/۰۱۱ و ۰/۰۲۳) کمترین تأثیر را فرایش پذیری زیر حوضه‌ها داشته است که با نتایج (رحمتی و همکاران، ۱۳۹۴) مطابقت دارد. پارامترهای فراوانی آبراهه، بافت زهکشی، ناهمواری کلی، نسبت انشعاب، نسبت ناهمواری، عدد ناهمواری، ثابت نگهداشت، ضریب گردی، فاکتور شکل و ضریب فشردگی در رده‌های بعدی قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از اولویت بندی زیرحوضه‌ها از لحاظ حساسیت آنها نسبت به فرسایش با استفاده از الگوریتم



توافقی ویکور نشان داد که زیرحوضه‌های ۱، ۱۰ و ۵ به ترتیب با کسب بیشترین امتیازات (۰/۸۵۲، ۰/۸۲۴ و ۰/۷۶۲) بیشترین حساسیت را نسبت به فرسایش‌پذیری از خود نشان داده‌اند و در مقابل زیرحوضه‌های ۶، ۴ و ۷ به ترتیب با کسب کمترین امتیازات (۰/۰۰۵۲، ۰/۱۸۱۹ و ۰/۲۸۵۸) در رتبه‌های آخر قرار گرفته و مستعد فرسایش نمی‌باشند. زیرحوضه‌های ۳، ۱۱، ۲، ۹ و ۸ به ترتیب در رتبه‌های بعدی از لحاظ حساسیت به فرسایش قرار گرفته‌اند. از مهم‌ترین عواملی که باعث شده است زیرحوضه ۱ دارای بیشترین حساسیت نسبت به فرسایش باشد می‌توان به تراکم بالای آبراهه، فراوانی بالای آبراهه، دارا بودن بالاترین مقادیر ثابت نگهداشت آبراهه‌ها در میان زیرحوضه‌ها، بیشترین مقدار طول جریان خشکی در میان زیرحوضه‌ها، مقدار پایین نفوذ، بیشترین مقدار ناهمواری کلی و شیب زیاد آن اشاره نمود. امتیازات بدست آمده توسط زیرحوضه‌ها از حداقل ۰/۰۰۵ تا حداکثر ۰/۸۵۲۴ متغیر می‌باشد که به ۴ گروه کم (۰-۰/۲۵)، متوسط (۰/۲۵-۰/۵۰)، زیاد (۰/۵۰-۰/۷۵) و خیلی زیاد (۰/۷۵-۱) از لحاظ حساسیت به فرسایش تقسیم‌بندی گردیدند. طبق نتایج زیرحوضه‌های ۴ و ۶ در گروه حساسیت کم، زیرحوضه‌های ۲، ۷، ۸، ۹ و ۱۱ در گروه حساسیت متوسط، زیرحوضه ۳ در گروه حساسیت زیاد و زیرحوضه‌های ۱، ۵ و ۱۰ در گروه حساسیت خیلی زیاد نسبت به فرسایش قرار گرفتند. نتایج حاصل از اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها با الگوریتم توافقی ویکور نشان داد که زیرحوضه ۱ بیشترین حساسیت را نسبت به فرسایش دارد.

### ۳-۳- صحت‌سنجی روش‌ها

به منظور اعتبارسنجی مدل، مقادیر فرسایش ویژه برای هر زیرحوضه با روش PSIAC محاسبه گردید. نتایج حاصل از برآورد مقدار فرسایش ویژه با استفاده از روش PSIAC نشان داد که زیرحوضه‌های ۱، ۱۰ و ۵ به ترتیب با بیشترین مقدار فرسایش ویژه (۲۲/۶، ۲۱/۵۸ و ۲۰/۴۲) تن در هکتار در سال بیشترین حساسیت را نسبت به فرسایش داشته‌اند و در مقابل زیرحوضه‌های ۴، ۷ و ۶ با کمترین مقدار فرسایش ویژه (۱۴/۴۰، ۱۳/۰۵ و ۱۰/۷۵) تن در هکتار در سال حساسیت کمتری نسبت به فرسایش از خود نشان داده‌اند. زیرحوضه‌های ۱۱، ۳، ۹، ۲ و ۸ به ترتیب با مقدار فرسایش ویژه (۱۹/۸۶، ۱۸/۷۲، ۱۸/۲۵، ۱۶/۹۶ و ۱۶/۴۲) تن در هکتار در سال در رتبه‌های چهارم تا هشتم از لحاظ حساسیت به فرسایش قرار گرفته‌اند. همان گونه که در شکل ۶ نشان داده شده است روش VIKOR در مقایسه با روش فاکتور ترکیب با دقت بالاتری به اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها پرداخته است (شکل ۷).



شکل ۷- مقایسه روش های Cf و VIKOR در اولویت بندی زیرحوضه ها

#### ۴- جمع بندی

پژوهش حاضر نشان داد که مدل رقومی ASTER به همراه تکنیک GIS ابزار مناسبی به منظور آنالیزهای ژئومورفومتریک، تعیین زیرحوضه ها و استخراج پارامترهای ژئومورفومتریک آن ها می باشد که با نتایج ( Evangelin & VIKOR (Ramani Sujatha et al., 2015; Yahya & Omar, 2016) مطابقت دارد. مقایسه روش های فاکتور ترکیب و با استفاده از مدل PSIAC نشان داد که هر دو مدل در شناسایی حساس ترین زیرحوضه به فرسایش به درستی عمل نمودند ولی در اولویت بندی کل زیرحوضه ها، روش VIKOR با دقت بیشتری به اولویت بندی زیرحوضه ها پرداخته است. طبقه بندی زیرحوضه ها از لحاظ حساسیت به فرسایش در مدل فاکتور ترکیب به ۳ کلاس حساسیت خیلی زیاد، زیاد و متوسط و در مدل VIKOR به چهار کلاس حساسیت خیلی زیاد، زیاد، متوسط و کم طبقه بندی گردیدند. نتایج حاصل از روش برتر VIKOR، نشان داد که از کل حوضه آبخیز به مساحت (۷۰/۷۰۷ کیلومتر مربع)، ۲۷/۲۱ کیلومتر مربع (۳۸/۴۸ درصد) در کلاس حساسیت به فرسایش خیلی زیاد، ۱/۶۰ کیلومتر مربع (۲/۲۷ درصد) در کلاس حساسیت زیاد، ۳۷/۶۲ کیلومتر مربع (۵۳/۲۱ درصد) در کلاس حساسیت متوسط و ۴/۲۶ کیلومتر مربع (۶/۳۲ درصد) در کلاس حساسیت کم قرار گرفته اند و از کل حوضه مطالعاتی در روش CF، ۶۲/۸۳ کیلومتر مربع (۸۸/۸۷ درصد) در کلاس حساسیت خیلی زیاد، ۶/۳۷ کیلومتر مربع (۴/۵۰ درصد) در کلاس حساسیت زیاد و ۴/۷۵ کیلومتر مربع (۳/۳۶ درصد) در کلاس حساسیت متوسط قرار گرفته اند. با توجه به حساسیت بالای حوضه آبخیز منج نسبت به فرسایش، پیشنهاد می گردد اقدامات حفاظتی لازم به منظور به حداقل رساندن میزان فرسایش خاک، کاهش تولید رسوب در مخازن، تثبیت دامنه های شیب دار در مقابل زمین لغزش و کاهش پتانسیل سیل خیزی در آینده صورت گیرد. پژوهش حاضر نشان داد که استفاده از تکنیک های GIS و RS در اولویت بندی زیرحوضه ها در کنار پارامترهای ژئومورفومتریک و روش های جدید مانند VIKOR می تواند برای تصمیم گیران و برنامه ریزان منابع آب و

خاک برای اتخاذ تصمیمات مناسب جهت کنترل فرسایش خاک مناسب باشد که با نتایج (رحمتی و همکاران، ۱۳۹۴؛ فلاح و همکاران، ۱۳۹۴) مطابقت دارد. در این زمینه اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها به عنوان یک روش‌شناسی عملگرا که می‌تواند در زمینه مدیریت حوضه آبخیز، توسعه منابع طبیعی و حفاظت از منابع آب و خاک در نظر گرفته شد.

#### کتابنامه

آمانی، محمد؛ نجفی نژاد، علی؛ ۱۳۹۳. اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها با استفاده از آنالیز مورفومتری، فنون سنجش از دور و GIS، حوضه آبخیز لهندر، استان گلستان. پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز، شماره ۹، ۱۵-۱.

رحمتی، امید؛ طهماسبی پور، ناصر؛ پورقاسمی، حمیدرضا؛ ۱۳۹۴. اولویت‌بندی سیل‌خیزی زیرحوضه‌های آبخیز استان گلستان بر اساس آنالیز مورفومتریکی و همبستگی آماری. اکوهیدرولوژی، شماره ۲، ۱۵۱-۱۶۱.

فلاح، مقدسه؛ محمدی، مازیار؛ کاویان، عطاله؛ ۱۳۹۴. اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها با استفاده از آنالیز مورفومتری و تغییرات کاربری اراضی در حوضه آبخیز تالار استان مازندران. اکوهیدرولوژی، شماره ۳، ۲۶۱-۲۷۴.

- Abdel-Lattif, A., & Sherief, Y., 2012. Morphometric Analysis and Flash Floods of Wadi Sudr and Wadi Wardan, Gulf of Suez, Egypt: Using Digital Elevation Model. Arab Journal of Geosciences, 5, 181-195.
- Abdul Rahaman, S., Abdul Ajeez, S., Aruchamy, S., & Jegankumar, R., 2015. Prioritization of Sub Watersheds Based on Morphometric Characteristics Using Fuzzy Analytical Hierarchy Process and Geographical Information System—A Study of Kallar Watershed, Tamil Nadu. Aquatic Procedia, 4, 1322-1330.
- Arabameri, A.R., Pourghasemi, H.R., & Cerda, A., 2018. Erodibility prioritization of sub-watersheds using morphometric parameters analysis and its mapping: A comparison among TOPSIS, VIKOR, SAW, and CF multi-criteria decision making models. Science of the Total Environment, 613-614, 1385-1400.
- Chatterjee, S., Krishna, A.P., & Sharma, P., 2013. Geospatial assessment of soil erosion vulnerability at watershed level in some sections of the Upper Subarnarekha river basin, Jharkhand, India. Environmental Earth Sciences, 71(1), 357-74.
- Dehn, M., Grtner, H., & Dikau, R., 2001. Principles of semantic modeling of landform structures. Comput. Geosci, 27 (8), 1005- 1010.
- El-Santawy, M.F., 2012. A VIKOR Method for Solving Personnel Training Selection Problem. International Journal of Computing Science, 1 (2), 9-12.
- Evangelin Ramani, S., Selvakumar, R., Rajasimman, U.A.B., & Rajamanickam, G., 2015. Morphometric analysis of sub-watershed in parts of Western Ghats, South India using ASTER EM, Geomatics. Natural Hazards and Risk, 6, 326-341.
- Evans, I.S., 1972. General Geomorphology, Derivatives of Altitude and Descriptive Statistics, In R.J. Chorley (Ed.), Spatial Analysis in Geomorphology (pp. 17-90. London: Methuen & Co. Ltd.
- Farhan, Y., & Anaba, O., 2016. A Remote Sensing and GIS Approach for Prioritization of Wadi Shueib Mini-Watersheds (Central Jordan) Based on Morphometric and Soil Erosion Susceptibility Analysis. Journal of Geographic Information System, 8, 1-19.

- Farhan, Y., Anbar, A., Enaba, O., & Al-Shaikh, N., 2015. Quantitative Analysis of Geomorphometric Parameters of Wadi Kerak, Jordan, Using Remote Sensing and GIS. *Journal of Water Resource and Protection*, 7, 456-475.
- Gessesse, B., Bewket, W., & Bräuning, A., 2015. Model-based characterization and monitoring of runoff and soil erosion in response to land use/land cover changes in the Modjo watershed, Ethiopia. *Land Degrad. Dev*, 26, 711-724.
- Horton, R., 1945. Erosional Development of Streams and Their Drainage Basins; Hydrophysical Approach to Quantitative Morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56, 275-370.
- Huang, J.J., Tzeng, G.H., & Liu, H.H., 2009. A Revised VIKOR Model for Multiple Criteria Decision Making - The Perspective of Regret Theory. In *Cutting-Edge Research Topics on Multiple Criteria Decision Making*, 35, 761-768.
- Iqbal, M., & Sajjad, H., 2014. Watershed Prioritization using Morphometric and Land Use/Land Cover Parameters of Dudhganga Catchment Kashmir Valley India using Spatial Technology. *J Geophys Remote Sens*, 3, 1-12.
- Jang, T., Vellidis, G., Hyman, J.B., Brooks, E., Kurkalova, L.A., Boll, J., & Cho, J., 2013. Model for Prioritizing best management practice implementation: sediment load reduction. *Environ. Manage*, 51, 209-224.
- Keesstra, S., Pereira, P., Novara, A., Brevik, E. C., Azorin- Molina, C., Parras-Alcántara, L., Jordán, A., & Cerdà, A., 2016. Effects of soil management techniques on soil water erosion in apricot orchards. *Sci. Total Environ*, 551, 357-366.
- Kosmas, P., Niki, E., & Andreas, V., 2009. *Mapping Geomorphological Environments*, Springer.
- Malik, M., Bhat, M., & Kuchay, N.A., 2011. Watershed based drainage morphometric analysis of Lidder catchment in Kashmir valley using Geographical Information System. *Recent Res in Sci and Tech*, 3(4), 118-260.
- Miller, V., 1953. A Quantitative Geomorphic Study of Drainage Basin Characteristics in the Clinch Mountain Area, Virginia and Tennessee. Project NR 389-402, Technical Report 3, Columbia University, Department of Geology, ONR, New York.
- Moore, I.D., Grayson, R.B., & Ladson, A.R., 1991. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications. *Hydrol Process*, 5(1), 3-30
- Nautiyal, M.D., 1994. Morphometric analysis of drainage basin, district Dehradun, Uttar Pradesh. *Indian Soc. Remote Sensing*, 22(4), 252-262.
- Nooka Ratnam, K., Srivastava, Y.K., Venkateshwara Rao, V., Amminedu, E., & Murthy, K.S.R., 2005. Check Dam Positioning by Prioritization of Micro-Watersheds Using SYI Model and Morphometric Analysis—Remote Sensing and GIS Perspective. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 33, 25-38.
- Okumura, M., & Araujo, A.G., 2014. Long-term cultural stability in hunter-gatherers: a case study using traditional and geometric morphometric analysis of lithic stemmed bifacial points from Southern Brazil. *J Archaeol Sci*, 45, 59-71.
- Opricovic, S., & Tzeng, G.H., 2004. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156 (2), 445-455.
- Pacific Southwest Inter-Agency Committee., 1968. Report on factors affecting sediment yield in the Pacific Southwest area and selection and evaluation of measures for the reduction of erosion and sediment yield, Water Management Subcommittee, Sedimentation Task Force.
- Patel, D., Dholakia, M., Naresh, N., & Srivastava, P., 2012. Water Harvesting Structure Positioning by Using Geo-Visualization Concept and Prioritization of Mini-Watersheds

- through Morphometric Analysis in the Lower Tapi Basin. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 40, 299-312.
- Patel, D., Gajjar, C., & Srivastava, P., 2013. Prioritization of Malesari Mini-Watersheds through Morphometric Analysis: A Remote Sensing and GIS Perspective. *Environmental Earth Sciences*, 69, 2643-2656.
- Pike, R.J., Evans, I.S., & Hengl, T., 2009. *Geomorphometry: A Brief Guide*. In T. Hengl & H.I. Reuter (Eds.), *Developments in Soil Science* (pp. 1-765). Elsevier.
- Prosdocimi, M., Cerdà, A., & Tarolli, P., 2016. Soil water erosion on Mediterranean vineyards: A review. *Catena*, 141, 1-21.
- PSIAC Report., 2000. Sediment assessment and evaluation study for Lake Louise and Cottonwood Lake Hand, Hyde, Faulk, and Spink Counties South Dakota, United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service South Dakota in Cooperation with South Dakota. Department of Environment and Natural Resources and Hand County Conservation District.
- Schumm, S., 1956. Evolution of Drainage Systems and Slopes in Badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological Society of America Bulletin*, 67, 597-646.
- Shary, P., Sharaya, L., & Mitusov, A., 2002. Fundamental quantitative methods of landsurface analysis. *Geoderma*, 107, 1-32.
- Singh, O., Sarangi, A., & Sharma, M., 2008. Hypsometric Integral Estimation Methods and Its Relevance on Erosion Status of North-Western Lesser Himalayan Watersheds. *Water Resources Management*, 22, 1545-1560.
- Strahler, A., 1957. Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. *Transactions. American Geophysical Union*, 38, 913-920.
- Todorovski, L., & Džeroski, S., 2006. Integrating knowledge driven and data-driven approaches to modeling. *Ecol. Model*, 194 (1), 3-13.
- Yahya, F., & Omar, A., 2016. A Remote Sensing and GIS Approach for Prioritization of Wadi Shueib Mini-Watersheds (Central Jordan) Based on Morphometric and Soil Erosion Susceptibility Analysis. *Journal of Geographic Information System*, 8, 1-19.