

ارزیابی و بهینه‌سازی مدل REGEM برای برآورد توزیع فرسایش آب‌کندی در سه حوضه‌ی آبخیز از استان اردبیل

حسین شهاب‌آرخازلو*: استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده‌ی کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.

شکراه اصغری: دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده‌ی کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.

تاریخچه مقاله (تاریخ دریافت: ۹۷/۱۱/۱۸)

تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۲/۲۵

چکیده

تعیین خطر فرسایش آب‌کندی، نیازمند برآورد شدت این خطر و تعیین توزیع خطر فرسایش در سطح حوضه‌ی آبخیز است. در این پژوهش سه حوضه‌ی آبخیز در مناطق اُرتاداغ، ملااحمد و سرچم استان اردبیل انتخاب شد. با استفاده از روابط دو مدل REGEM^۱ و REGEM سازگار شده با شرایط منطقه (AREGEM^۲)، سه خروجی مدل شامل عامل تنش برشی (τ_c)، فرسایش خاک (K_d) و حجم آب‌کندها (V) در آب‌کندهای منتخب محاسبه شد. سپس با استفاده از درونیابی IDW، توزیع این سه عامل در سطح حوضه‌ها صورت گرفت. در نهایت با استفاده از دو شاخص نسبت تراکم (Dr) و مجموع کیفیت (Qs)، طبقات شدت فرسایش به دست آمده از دو مدل ارزیابی و با یکدیگر مقایسه شد. نتایج نشان داد بین مقادیر فرسایش برآورد شده با مدل AREGEM و طبقات حساس به فرسایش آب‌کندی، انطباق بیشتری وجود دارد. بنابراین، مدل AREGEM کیفیت پهنه‌بندی بیشتری دارد و توانایی این مدل در تعیین طبقات حساس به فرسایش آب‌کندی بیشتر است. همچنین در بین سه منطقه‌ی مورد مطالعه، مدل AREGEM در منطقه‌ی اُرتاداغ بیشترین کارایی را در تعیین توزیع فرسایش آب‌کندی دارد. از بین سه خروجی به دست آمده از مدل نیز استفاده از حجم آب‌کندها در تعیین دقیق‌تر توزیع فرسایش آب‌کندی، کارایی بیشتری دارد.

کلمات کلیدی: اصلاح مدل، سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی (GIS)، ارزیابی خطر.

۱- مقدمه

شدیدترین نوع فرسایش آبی که به تخریب گسترده‌ی خاک و تولید حجم زیاد رسوب منجر می‌شود، فرسایش آب‌کندی است (Poesena et al, 2003 & Valentin et al, 2005). پر شدن مخازن سدها در اثر تولید حجم زیاد رسوب، از بین رفتن زمین‌های کشاورزی، کاهش حاصلخیزی خاک، ایجاد و گسترش بدلندها و هدر رفت آب در اثر کاهش ظرفیت نگه‌داری آب خاک، مواردی از اثرات مخرب این نوع فرسایش در محیط زیست است (Dlapa et al, 2012). به آب‌کندهایی که عمق آنها در قسمت سر آب‌کند کمتر از ۸۰ سانتی‌متر است، آب‌کندهای کوچک گفته می‌شود (Valentin et

* نویسنده مسئول h.shahab@uma.ac.ir

¹ Revised Ephemeral Gully Erosion Model

² Adapted REGEM

al, 2005). این نوع آبکندها به علت فعال بودن و تغییرات سریع ابعادشان در اثر سیلاب‌های فصلی، تلفات خاک و آب زیادی را در حوضه‌های آبخیز حساس به فرسایش ایجاد می‌کند (Chaplot, 2013). یکی از مهم‌ترین اقدامات لازم برای مقابله با فرسایش آبکندی، پیش‌بینی و طبقه‌بندی میزان خطر تشکیل آبکند در نقاط مختلف حوضه‌های آبخیز دارای این نوع فرسایش و ارائه‌ی نقشه‌ی برآورد شدت فرسایش آبکندی است (Qilin et al, 2011).

برآورد میزان فرسایش خاک و تهیه‌ی نقشه‌ی توزیع شدت فرسایش آبکندی، نیازمند استفاده از مدل مناسب است. مدل‌سازی فرسایش آبکندی معمولاً به صورت پیش‌بینی محل تشکیل آبکندها، رشد طولی، حجم رسوب تولیدی در اثر فرسایش آبکندی و امکان تشکیل آبکند انجام می‌شود (Jafarai Gorzin and Kavian, 2009 & Tekwa et al, 2015).

مدل‌های چندانی برای برآورد این نوع فرسایش وجود ندارد و اینک مدل EGEM³ و REGEM تنها مدل قابل اتکا برای برآورد فرسایش آبکندی به‌ویژه آبکندهای موقت است (Capra et al, 2005 & Tekwa et al, 2015). گوردون و همکاران (Gordon et al, 2006) نشان دادند که مدل REGEM، فرسایش خاک را در مراحل اولیه‌ی تشکیل آبکند به خوبی پیش‌بینی می‌کند. همچنین بیان شده‌است که بین عرض برآورد شده‌ی آبکند توسط REGEM و سطح مقطع آبکندهای موقت، همبستگی معنی‌داری وجود ندارد و طول آبکندها در تخمین حجم خاک فرسایش یافته توسط این مدل، تأثیر زیادی دارد (Capra et al, 2005). Nachtergaele و همکاران (Nachtergaele et al, 2001a) نیز بین مقدار فرسایش خاک از آبکندهای موقت – که توسط مدل EGEM پیش‌بینی شده بود – با مقدار اندازه‌گیری شده‌ی آن، همبستگی بسیار خوبی مشاهده کردند، ولی این همبستگی بین سطح مقطع اندازه‌گیری و برآورد شده‌ی آبکندها توسط مدل معنی‌دار نبود. بررسی کارایی مدل EGEM در استان آذربایجان شرقی نشان داد که بین مقدار فرسایش خاک و سطح مقطع اندازه‌گیری شده و برآورد شده‌ی آبکندها توسط مدل، همبستگی قوی و خوبی وجود دارد. همچنین همبستگی بین عرض اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده‌ی آبکند توسط مدل نیز معنی‌دار بود (Rezaei Moghaddam and Behbodi, 2011).

مدل REGEM، از دو جزء هیدرولوژیک و فرسایش تشکیل شده‌است که در جزء هیدرولوژیک از شماره‌ی منحنی، سطح زهکشی آبکند، طول جریان حوضه، شیب میانگین حوضه، میزان بارش ۲۴ ساعته و توزیع زمانی بارش استفاده می‌شود تا میزان اوج تخلیه‌ی رواناب و حجم آبدوی را برآورد کند. در جزء فرسایش، از معادلات رگرسیونی برای برآورد عرض اولیه و نهایی آبکند استفاده می‌شود. در این معادلات عواملی مانند تخلیه‌ی اوج (حاصل از قسمت اول)، ضریب زبری مانینگ، تنش برشی بحرانی خاک، شیب جریان متمرکز، عرض معادل و عرض نهایی مشاهده‌ی شده آبکند به عنوان متغیرهای مستقل – که بر عرض آبکند مؤثرند – در نظر گرفته می‌شود و بین این عوامل و عرض آبکند نیز رابطه‌ی رگرسیونی تجربی برقرار می‌شود (Woodward, 1999 & Alonso et al, 2002).

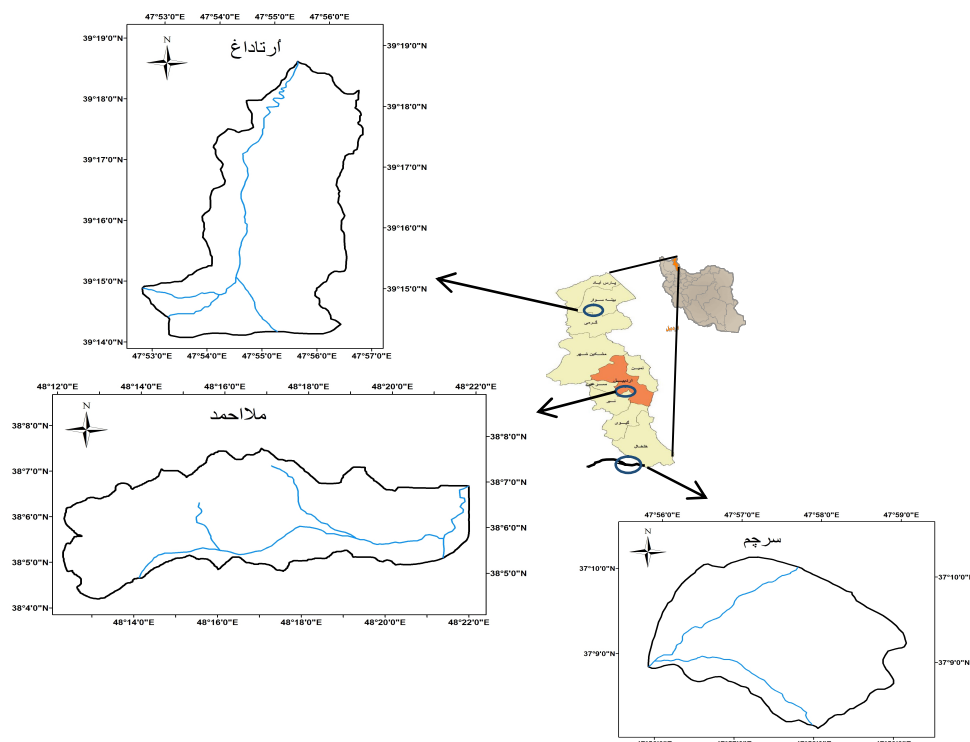
فرسایش آبکندی و اثرات مخرب آن در نقاط مختلف دنیا، سطح ایران و به ویژه استان اردبیل و مناطق مجاور آن گزارش شده‌است (Moghimy and Salammi, 2011 & Soufi and Esaei, 2010 & Bayatti, & Poesena et al, 2003). فرسایش آبکندی در سه منطقه‌ی اُرتاداغ، ملاحمد و سرچم – که به ترتیب در شمال، مرکز و جنوب استان

³ Ephemeral Gully Erosion Model

اردبیل قرار دارند - به صورت گسترده مشاهده می‌شود (Shahab et al, 2016)؛ بنابراین، اجرای پژوهش‌های بیشتر در این حوزه‌های آبخیز و تهیه نقشه‌ی برآورد فرسایش آب‌کندی به منظور مدیریت مناسب حفاظت خاک این مناطق، امری ضروری است. هر چند مدل REGEM برای تعیین فرسایش آب‌کندهای موقت ایجاد شده‌است، با توجه به اینکه آب‌کندهای کوچک نیز ابعاد نزدیک به آب‌کندهای موقت دارد و ابعاد آن از اجزای اصلی پیش‌بینی مدل REGEM است، در این پژوهش فرض می‌شود می‌توان از این مدل در پیش‌بینی فرسایش حاصل از آب‌کندهای کوچک نیز استفاده کرد. همچنین با توجه به اینکه جزء فرسایشی مدل REGEM براساس برقراری روابط رگرسیونی بین ابعاد آب‌کندهای مشاهده شده و ورودی‌های مدل برآورد می‌شود، این بخش متناسب با داده‌های منطقه اصلاح می‌شود تا بتوان به مدل REGEM سازگار شده (AREGEM) دست یافت که با منطقه متناسب باشد (Tekwa et al, 2015). بر این اساس با استفاده از مدل REGEM و AREGEM، سه عامل تنش برشی مدل (τ_c)، فرسایش خاک مدل (k_d) و در نهایت برآورد حجم فرسایش آب‌کندی در سه حوضه‌ی آبخیز از مناطق اُرتاداغ، ملاحمد و سرچم برآورد شد. این سه عامل به عنوان شاخصی از شدت فرسایش آب‌کندی در نظر گرفته شد و توزیع آنها در سطح حوضه‌های آبخیز به دست آمد. سپس سطح منطقه از نظر مقدار این عوامل، به چهار طبقه تقسیم شد. به منظور مقایسه‌ی دو مدل از نظر کارایی برآورد فرسایش آب‌کندی، از دو روش نسبت تراکم (Dr) و شاخص کیفیت (Qs) استفاده شد و طبقات شدت فرسایش به دست آمده از دو مدل، توسط این دو شاخص بررسی شد (Yalcin, 2008).

۲- منطقه مورد مطالعه

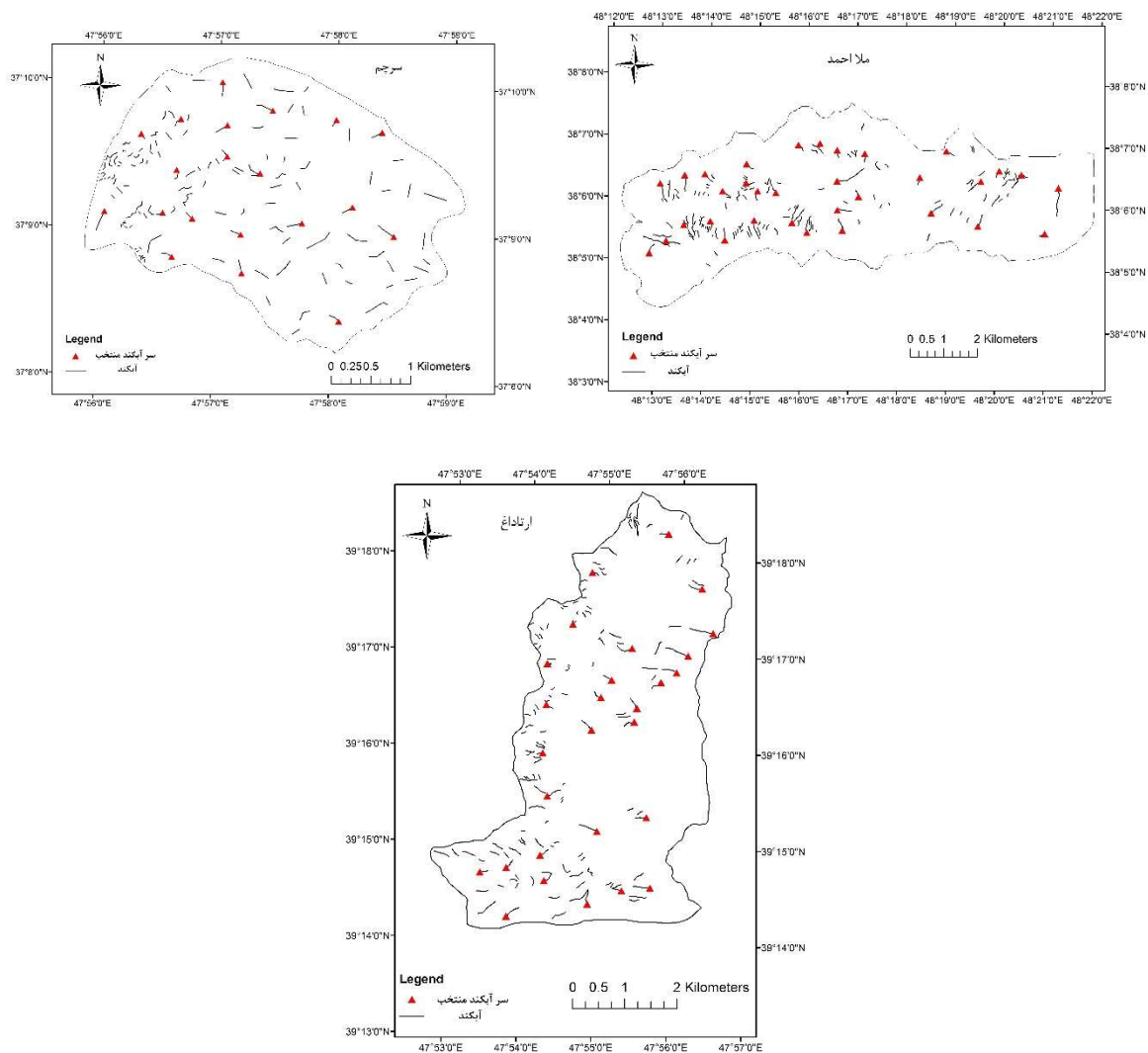
در این پژوهش، سه حوزه‌ی آبخیز در استان اردبیل - که فرسایش آب‌کندی در سطح آنها قابل مشاهده بود - انتخاب شد. با انتخاب سه منطقه و اصلاح مدل REGEM بر اساس اطلاعات آنها، تعمیم‌پذیری مدل به سایر نقاط استان با اطمینان بیشتری قابل اجراست. در شمال استان اردبیل، حوزه‌ی آبخیزی به مساحت ۲۷۲۷ هکتار در منطقه‌ی اُرتاداغ در محدوده‌ی جغرافیایی $39^{\circ} 18' 42''$ تا $39^{\circ} 14' 06''$ عرض شمالی و $47^{\circ} 52' 47''$ تا $47^{\circ} 56' 41''$ طول شرقی انتخاب شد. حوزه‌ی آبخیز دوم به مساحت ۵۰۳۸ هکتار، در مرکز استان و منطقه‌ی ملا احمد در محدوده‌ی جغرافیایی $38^{\circ} 04' 57''$ تا $38^{\circ} 07' 37''$ عرض شمالی و $48^{\circ} 12' 14''$ تا $48^{\circ} 21' 52''$ طول شرقی انتخاب شد. حوزه‌ی آبخیز سوم به مساحت ۱۱۰۸ هکتار نیز در جنوب استان و منطقه‌ی سرچم در محدوده‌ی جغرافیایی $37^{\circ} 08' 11''$ تا $37^{\circ} 10' 10''$ عرض شمالی و $47^{\circ} 59' 06''$ تا $47^{\circ} 55' 54''$ طول شرقی انتخاب شد. منطقه‌ی اُرتاداغ، ملاحمد و سرچم براساس اطلاعات هواشناسی دوره‌ی آماری ۳۰ ساله (۱۳۶۵-۱۳۹۶)، به ترتیب دارای میانگین بارش ۲۷۱، ۳۰۳ و ۳۸۴ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه، ۱۵/۱، ۹ و ۸ درجه‌ی سانتیگراد است. همچنین هر سه منطقه با طبقه‌بندی اقلیمی دوما رتن توسعه‌یافته، دارای اقلیم سرد نیمه خشک است. موقعیت حوزه‌های آبخیز مطالعه شده در سطح استان اردبیل و کشور، در شکل ۱ نشان داده شده‌است. مرز حوضه‌های آبخیز با استفاده از مدل رقومی ارتفاع، در نرم‌افزار Global mapper14 و آبراهه‌های اصلی در سطح حوضه، با استفاده از تصاویر Google earths تعیین شد.



شکل ۱: موقعیت حوزه‌های آبخیز مطالعه شده در سطح کشور و استان اردبیل

۳- مواد و روش‌ها

با بررسی تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث، لندست ۸ (۲۰۱۳)، عکس‌های هوایی و بازپیدهای صحرایی، توزیع آبکندها در حوزه‌های مورد نظر تعیین شد. سپس ۲۸ آبکند در اُرتاداغ، ۳۳ آبکند در ملا احمد و ۲۰ آبکند در سرچم - که عمق آنها در قسمت بالا کمتر از ۵۰ سانتی‌متر بود و توزیع نسبتاً یکنواختی در سطح حوزه‌ی آبخیز داشت - انتخاب شد (در مجموع ۸۱ آبکند). علت انتخاب آبکندهای با توزیع یکنواخت در سطح حوزه‌های آبخیز این بود که توزیع داده‌ها برای درونیابی IDW مناسب باشد. نقشه‌ی توزیع فرسایش آبکندی به همراه آبکندهای منتخب در سطح سه حوزه، در شکل ۲ نشان داده شده‌است. در این نقشه‌ها مسیر آبکندها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 و Google earths (2013) و بازدید و کنترل میدانی محل آبکندها انجام شد.



شکل ۲: توزیع آبکندهای منتخب در سطح سه منطقه‌ی مورد مطالعه.

ورودی‌های موردنیاز مدل REGEM، برای برآورد ابعاد آبکند و میزان فرسایش آبکندی در جدول شماره‌ی ۱ ارائه شده‌است.

با استفاده از نقشه‌ی توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰، در نرم‌افزار ArcGIS10.2 مدل رقومی ارتفاع (DEM^۴) با دقت ۵ متر (پیکسل سائز مساوی ۵ متر) و نقشه‌ی شیب برای محدوده‌های مورد بررسی تهیه شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار Global Mapper 14، مساحت و شیب حوضه‌ی زهکشی هر آبکند تعیین شد. همچنین بر اساس اطلاعات هواشناسی هر حوضه، بارش ۲۴ ساعته و بارش ۲۵ سال و تیپ بارش غالب حوضه‌ها تعیین شد. طول هر آبکند با متر نواری اندازه‌گیری و در چهار نقطه از طول هر آبکند شامل سر آبکند و فواصل ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد طول از سر آبکند،

^۴ Digital Elevation Model

عمق و عرض متوسط آن تعیین شد. سپس از هر نقطه‌ی خاک نمونه‌برداری شد. طول و شیب آبراهه‌ی زهکشی هر آبکند نیز به صورت میدانی تعیین شد. درصد پوشش گیاهی، سنگریزه و خاک لخت در حوضه‌ی زهکشی هر آبکند با قرار دادن ۱۰ پلات یک مترمربعی تصادفی در امتداد یک یا دو ترانسکت، اندازه‌گیری و نمونه‌برداری خاک نیز انجام شد.

جدول ۱: ورودی‌های موردنیاز مدل‌های استفاده شده

ویژگی موردنیاز	نماد	واحد	روش اندازه‌گیری
میانگین بارش	R_e	mm	داده‌های هواشناسی
شماره منحنی	CN	-	بررسی صحرایی پوشش سطح، کاربری زمین و تعیین آزمایشگاهی گروه هیدرولوژیکی خاک
نوع بارش	ST	-	داده‌های هواشناسی
حداکثر دبی سیلاب	Q_p	$m^3 Sec^{-1}$	داده‌های هیدروگراف حداکثر بارش ۲۴ ساعته در دوره بازگشت ۲۵ ساله
حجم رواناب	V_r	m^3	داده‌های هواشناسی حداکثر بارش ۲۴ ساعته در دوره بازگشت ۲۵ ساله
شرایط سطح خاک	SC_x	-	بازدید صحرایی (بدون شخم، تازه شخم خورده، پوشش گیاهی دائمی در سطح خاک)
عامل تنش برشی مدل	τ_c	Nm^{-2}	تعیین مقاومت برشی خاک و استفاده از رابطه رگرسیونی مدل
ضریب فرسایش‌پذیری مدل	K_d	$Cm^3 N^{-1} Sec^{-1}$	تعیین مقاومت برشی خاک و استفاده از رابطه رگرسیونی مدل
شیب حوضه زهکشی آبکندها	S	%	با استفاده از مدل رقومی ارتفاع DEM
شیب آبراهه آبکند	S_g	mm^{-1}	عملیات صحرایی
ضریب زبری مانینگ	n	-	عملیات صحرایی و تعیین نوع پوشش درون آبراهه و حوضه آبکندها
عمق شخم	d_t	m	عملیات صحرایی
مساحت حوضه زه‌کشی آبکند	A_d	ha	با استفاده از مدل رقومی ارتفاع DEM
درصد شن، سیلت و رس	-	%	هیدرومتری با قرائت ۴ زمانه
خاکدانه‌های درشت و کوچک	-	%	الک تر
جرم مخصوص ظاهری	BD	$Mg m^{-3}$	نمونه‌برداری با سیلندر

مقاومت برشی نزدیک اشباع خاک در هر نقطه از طول و ۱۰ نقطه از حوضه‌ی زهکشی آبکندها، با استفاده از ابزار پره برشی (مدل گیلسون TO175) به صورت صحرایی تعیین شد (Hafezi Moghaddas, 2011). با استفاده از نمونه‌های خاک برداشته شده، جرم مخصوص ظاهری به روش استوانه‌ی دست نخورده، جرم مخصوص حقیقی به روش پیکنومتر، بافت خاک به روش قرائت ۴ زمانه و کربن آلی به روش والکلی - بلک (Page et al, 1982)، شاخص فرسایش‌پذیری خاک (Wischmeier and Smith, 1978) و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها نیز به روش الک تر (Kemper and Rosenau, 1986) تعیین شد. همچنین سرعت نهایی نفوذ آب و گروه هیدرولوژیک خاک در سه نقطه از حوضه‌ی زهکشی در هر یک از آبکندهای مورد نظر، به روش تک استوانه تعیین شد (Reynolds et al, 2002). شماره منحنی (CN) حوضه‌ی هر آبکند که بیانگر شدت تولید رواناب در حوضه است، با استفاده از میانگین درصد پوشش سطح و گروه هیدرولوژیک خاک حوضه‌ی زهکشی آبکندها تعیین شد (Rafahi, 2006). با داشتن نسبت تولید رواناب حوضه‌ی هر آبکند بر اساس CN، مقدار بارش در هر واقعه‌ی بارشی و مساحت حوضه‌ی زهکشی هر آبکند، دبی پیک و حجم

رواناب ورودی به سر آبکندها در هر واقعه‌ی بارش محاسبه شد (Alonso et al, 2002). همچنین با بازدید صحرایی و استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ (۲۰۱۳)، نوع پوشش گیاهی و کاربری حوضه‌ی زهکشی و کانال هر آبکند تعیین و با استفاده از آن، ضریب زبری مانینگ حوضه‌ها نیز مشخص شد (Rafahi, 2006). به این ترتیب، تمام عوامل ورودی مدل REGEM برای برآورد ابعاد آبکندها به دست آمد و با استفاده از روابط موجود، هر یک از اجزای مدل محاسبه شد. در جدول شماره ۲، روابط مربوط به محاسبه‌ی جزء هیدرولوژیکی، جزء فرسایشی و برآورد ابعاد آبکندها با استفاده از دو مدل REGEM و AREGEM برای مناطق مورد مطالعه ارائه شده‌است. این روابط با استفاده از برقراری رگرسیون بین مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی صحرایی و عوامل مؤثر بر هر جزء مدل به دست آمد. سپس در نهایت با ترکیب و اصلاح روابط، به بهترین رابطه برای برآورد خروجی‌های مدل دست یافتیم (Tekwa et al, 2015). به منظور کالیبره کردن خروجی‌های مدل با داده‌های صحرایی، بهترین روابط رگرسیونی بین ورودی و خروجی‌های مدل که دارای بیشترین R^2 و کمترین RMSE بودند، انتخاب شد (Shahab et al, 2016).

جدول ۲: اجزای مدل REGEM و AREGEM

اجزای مدل	عوامل مدل	روابط مدل REGEM	روابط مدل AREGEM	اجزای مدل
جزء هیدرولوژیکی	زمان پایه هیدروگراف	$t_b = \frac{2V_b}{Q_p}$	-	t_b زمان پایه هیدروگراف واحد
	حجم کل رواناب ورودی آبکند	$V_b = \int_{t=0}^{t=t_b} Q dt$	-	Q_p دبی حداکثر ورودی به آبکند
	دبی حداکثر ورودی به آبکند	$Q = \left(\frac{t}{t_p}\right) Q_p$	-	Q دبی میانگین رواناب ورودی
				Q_p' دبی در لحظه‌ی t
جزء فرسایشی	عامل تنش برشی مدل	$\tau_c = 0.259 \times 10^{(0.022SS)} = 0.311 \times 10^{(0.0182SS)}$	$\tau_c = 0.259 \times 10^{(0.022SS)}$	SS مقاومت برشی نزدیک اشباع با واحد $Kgcm^{-2}$
	عامل فرسایش خاک مدل	$k_d = 0.1\tau_c^{-0.5}$	$k_d = 0.1\tau_c^{-0.5} + 0.2$	
	عمق متوسط آبکند	$D_e = \frac{Kk_d \cdot \rho_s}{\rho \cdot d_s}$	$D_e = \frac{Kk_d \cdot 0.9\rho_s}{\rho \cdot d_s}$	ρ جرم مخصوص ظاهری خاک بر حسب gcm^{-3} ، d_s قطر میانگین ذرات خاک (شن، سیلت و رس) با واحد mm و K عامل فرسایش پذیری معادله‌ی جهانی
	عرض متوسط آبکند	$W = 2.51Q^{0.412}$	$W = 1.89Q^{0.6}$	L_{max} حداکثر طول آبکند
خروجی‌های مدل	حداکثر طول آبکند	$L_{max} = 80.3A_d^{0.6}$	$L_{max} = 64.5A_d^{0.8}$	فرسایش خاک، A_d مساحت حوضه‌ی زهکشی آبکند

با داشتن اطلاعات بارش و نسبت تولید رواناب حوضه‌ی هر آبکند بر اساس CN و با استفاده از روابط ارائه شده در جدول شماره ۲، جزء هیدرولوژیکی مدل محاسبه شد. همچنین بر اساس روابط رگرسیونی موجود بین ابعاد آبکند و

ویژگی‌های خاک، عوامل جزء فرسایشی مدل شامل تنش برشی و فرسایش خاک در هر گام زمانی با استفاده از روابط مربوط در جدول شماره ۲ محاسبه شد (Nachtergaele et al, 2001a) و در نهایت با ترکیب دو جزء مدل و با استفاده از روابط خروجی‌های آن، ابعاد آبکندها در جدول شماره ۲ برآورد شد (Tekwa et al, 2015). حداکثر طول، عمق متوسط و میانگین عرض آبکندها به عنوان خروجی مدل REGEM، با استفاده از مجموعه ویژگی‌های تعیین شده به دست آمد و با استفاده از آنها حجم آبکندها برآورد شد. همچنین بر اساس همین روش و برقراری رگرسیون بین مقادیر واقعی مشاهده شده‌ی طول، عمق متوسط و میانگین عرض آبکندها در سه منطقه‌ی مورد مطالعه و ویژگی‌های اندازه‌گیری شده‌ی خاک و حوضه‌ی زهکشی آبکندهای مورد مطالعه (Nachtergaele et al, 2002)، روابط مربوط به برآورد جزء فرسایش و ابعاد آبکندها اصلاح و به عنوان روابط مدل AREGEM در جدول ۲ ارائه شد. برای انتخاب بهترین روابط رگرسیونی، از دو شاخص آماری R^2 و RMSE استفاده شد و در نهایت با استفاده از روابط دو مدل REGEM و AREGEM، عامل تنش برشی (τ_c)، فرسایش خاک (K_d) و حجم آبکندها (V) به عنوان خروجی‌های مدل، برای آبکندهای مورد نظر در سه حوضه‌ی آبخیز برآورد شد. سپس توزیع این سه خروجی مدل در سطح حوضه‌های آبخیز با استفاده از درون‌یابی IDW در نرم‌افزار ArcGIS10.2 صورت گرفت و سطح منطقه، به چهار سطح شدت فرسایش تقسیم شد. در این پژوهش، هدف بررسی کارایی مدل‌ها در تعیین توزیع حجم آبکندها بود؛ از این رو، از اندازه‌گیری صحرایی حجم آبکند برای مدل‌سازی و از برآورد حجم از روی مدل به منظور تعیین توزیع حجم آبکند استفاده شد. بنابراین در هر منطقه برای هر کدام از خروجی‌های مدل، دو نقشه‌ی پهنه‌بندی شدت فرسایش آبکندی براساس مدل REGEM و AREGEM ارائه شد. توضیح این امر لازم است که فرسایش آبکندی معمولاً در آبکندهای کوچک فعال می‌باشد و آبکندهای بزرگ به صورت آبراهه‌های نسبتاً تثبیت شده‌است (Valentin et al, 2005)؛ بنابراین، برآوردهای به دست آمده توسط مدل‌های مورد بررسی که برای آبکندهای کوچک هستند، می‌تواند به عنوان شاخص مناسبی از فرسایش آبکندی حوضه‌های مورد نظر باشد. در نهایت برای مقایسه‌ی دو مدل از نظر تشخیص بهتر پهنه‌های فرسایش آبکندی در دو نقشه‌ی پهنه‌بندی به دست آمده، دو شاخص نسبت تراکمی (Dr) و مجموع کیفیت (Qs) - که به صورت روابط ۱ و ۲ تعریف می‌شوند - تعیین و با یکدیگر مقایسه شد (Yalcin, 2008):

$$Dr = \frac{(L_i / A_i)}{(\sum_{i=1}^{i=n} L_i / \sum_{i=1}^{i=n} A_i)}$$

رابطه‌ی ۱

در این رابطه، Dr نسبت تراکمی طبقه فرسایشی A_i ، طول آبکندها در طبقه A_i ، مساحت طبقه A_i و n تعداد طبقات است. هر چه Dr یک طبقه فرسایشی بیشتر باشد، بیانگر تراکم آبکند بیشتر در آن طبقه نسبت به تراکم متوسط منطقه است؛ بنابراین، هر چه پهنه‌بندی دقیق‌تر باشد با افزایش خطر فرسایش آبکندی در پهنه‌های تفکیک شده (از پهنه‌ی کم تا خیلی زیاد)، مقدار Dr افزایش می‌یابد (Motevalli and Esmaili, 2013).

$$Q_s = \sum_{i=1}^{i=n} ((Dr_i - 1)^2 \times S_i)$$

رابطه‌ی ۲

در این رابطه، Q_s شاخص مجموع کیفیت طبقه‌بندی، Dr_i نسبت تراکم طبقه i ام و S_i نسبت مساحت طبقه i به مساحت کل منطقه است. هر چه مقدار Q_s بیشتر باشد، دقت پهنه‌بندی بیشتری را نشان می‌دهد و اختلاف کمتر از ۰/۱ در این شاخص بین دو نقشه، دقت تقریباً مشابهی را نشان می‌دهد (Yalcin, 2008).

۴- نتایج و بحث

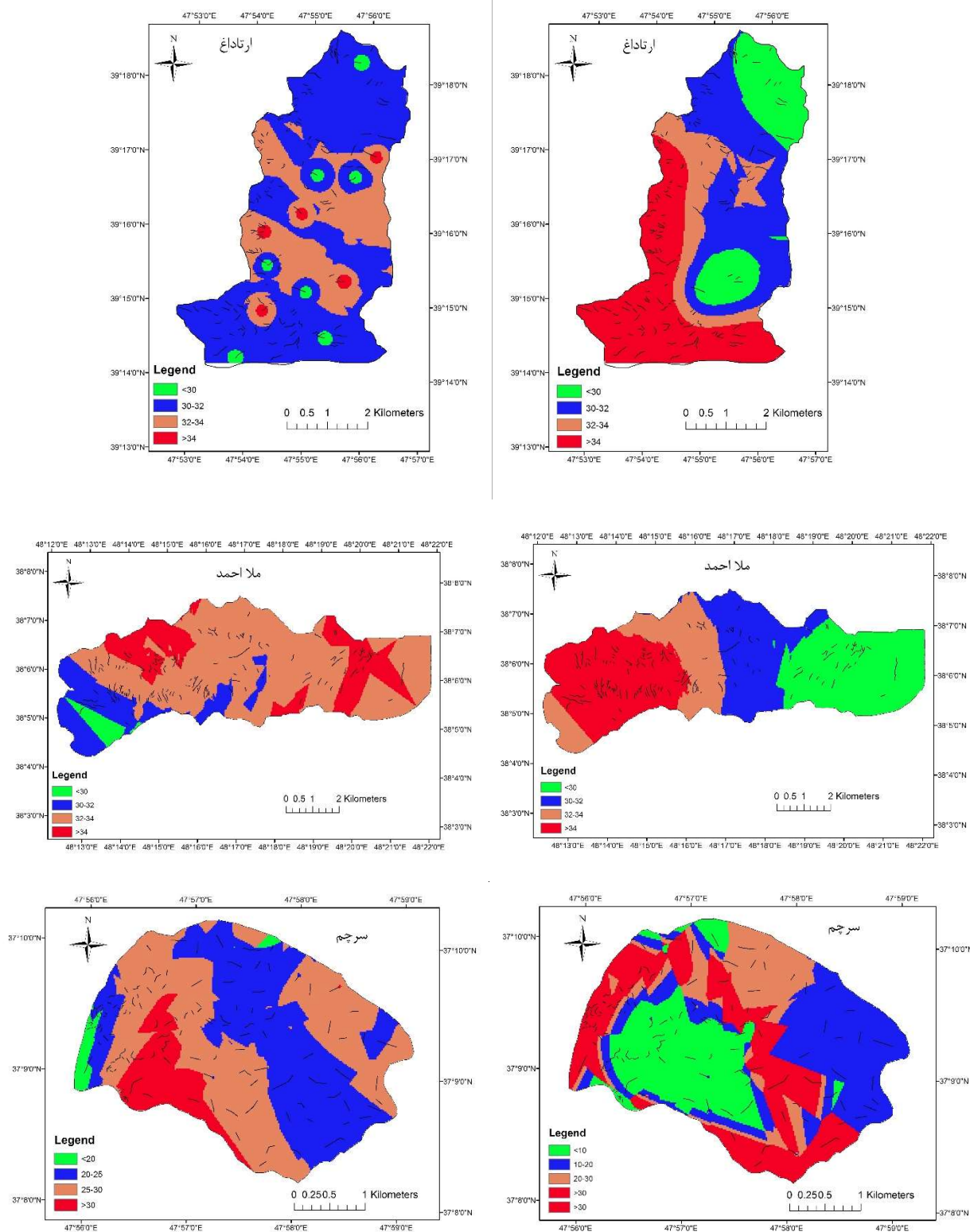
با تعیین آبکندهای موجود در سطح سه حوزه‌ی آبخیز مورد بررسی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و بازدید صحرایی (شکل ۲)، میانگین تراکم آبکندها در منطقه‌ی اُرتاداغ $0/84 \text{ Km/Km}^2$ ، در ملااحمد $0/74 \text{ Km/Km}^2$ و در سرچم $1/4 \text{ Km/Km}^2$ به دست آمد.

در جدول ۳، مقادیر میانگین و دامنه تغییرات خروجی‌های به دست آمده از دو مدل AREGEM و REGEM برای آبکندهای منتخب ارائه شده‌است. همان گونه که مشاهده می‌شود به طور کلی مقدار خروجی‌های به دست آمده از دو مدل در هر سه منطقه‌ی مورد مطالعه، اختلاف قابل توجهی با یکدیگر ندارد. با این وجود، توزیع برآوردهای به دست آمده توسط این دو مدل در سطح مناطق متفاوت است؛ بنابراین، با مقایسه‌ی نقشه‌ی توزیع خروجی‌های آن می‌توان به مدل مناسب‌تری برای برآورد فرسایش آبکندهی دست یافت (Daggupati et al, 2014).

جدول ۳: میانگین و دامنه‌ی تغییرات خروجی‌های به دست آمده از مدل‌های مورد مطالعه.

نوع مدل	خروجی بدست آمده	اُرتاداغ Ordadagh		ملااحمد Mulla Ahmad		سرچم Sarcham	
		میانگین Mean	دامنه تغییرات Range	میانگین Mean	دامنه تغییرات Range	میانگین Mean	دامنه تغییرات Range
مدل REGEM	عامل تنش برشی مدل τ_c Shear stress factor	۳۱/۵	۳۶/۲ - ۲۸/۶	۳۲/۲	۳۵/۲۹ - ۳/۱	۲۴/۸	۳۲/۱۸ - ۵/۶
	عامل فرسایش خاک مدل K_d Soil erosion factor	۶۲/۱	۷۴/۵۴ - ۶/۲	۶۳/۳	۷۵/۵۵ - ۳/۵	۶۹/۱	۷۸/۵۲ - ۶/۱
	برآورد حجم آبکند (m^3) Gully volume estimated	۱۵/۶	۲۳/۷ - ۵/۵	۱۷/۲	۲۶/۸ - ۶/۱	۱۶/۳	۲۵/۸ - ۵/۳
مدل AREGEM	عامل تنش برشی مدل τ_c Shear stress factor	۳۲/۱	۳۵/۲۷ - ۵/۲	۳۳/۳	۳۶/۲۷ - ۱/۱	۲۰/۶	۳۳/۷ - ۱/۵
	عامل فرسایش خاک مدل K_d Soil erosion factor	۶۲/۱	۷۴/۵۲ - ۲/۱	۶۴/۲	۷۶/۵۶ - ۲/۳	۷۰/۱	۷۹/۵۳ - ۱/۵
	برآورد حجم آبکند (m^3) Gully volume	۱۶/۱	۲۴/۷ - ۱/۸	۱۷/۸	۲۵/۷ - ۸/۸	۱۶/۸	۲۶/۸ - ۱/۴

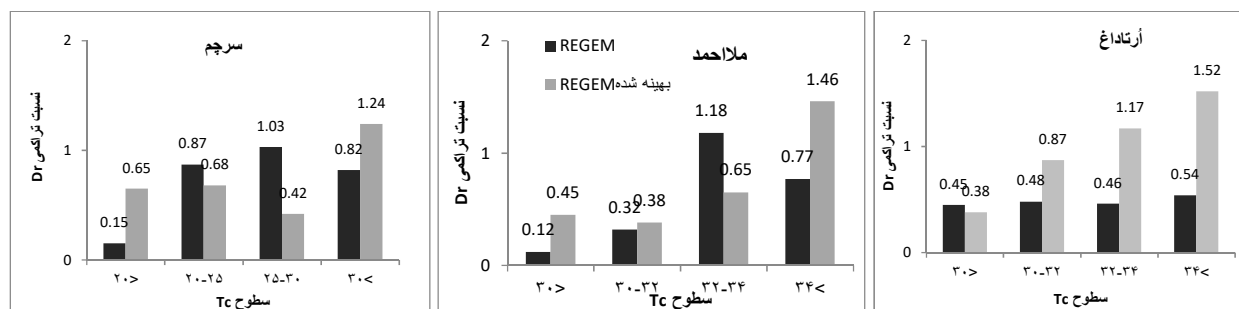
estimated



شکل ۳: عامل T_c . شکل چپ مدل REGEM و راست AREGEM.

در شکل ۳، توزیع عامل تنش برشی (τ_c) در سطح سه منطقه با استفاده از دو مدل REGEM و AREGEM ارائه شده است. عامل تنش برشی مدل، شدت حساسیت خاک به کنده شدن و فرسایش آبکنندی را نشان می‌دهد و بین مقدار این عامل و فرسایش آبکنندی ارتباط مستقیمی وجود دارد؛ بنابراین، انتظار می‌رود در نقاطی که مقدار آن بالا باشد، تراکم آبکندها نیز افزایش نشان دهد (Alonso et al, 2002).

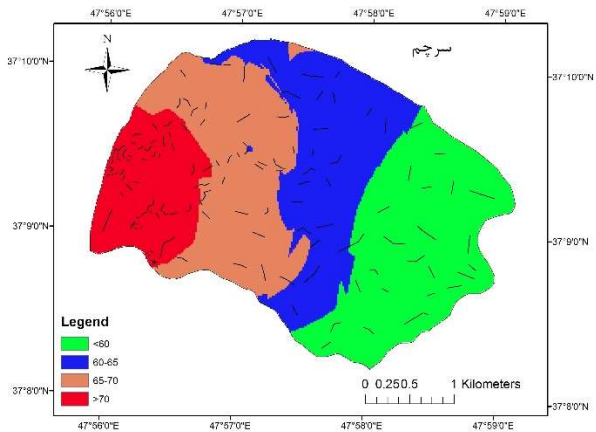
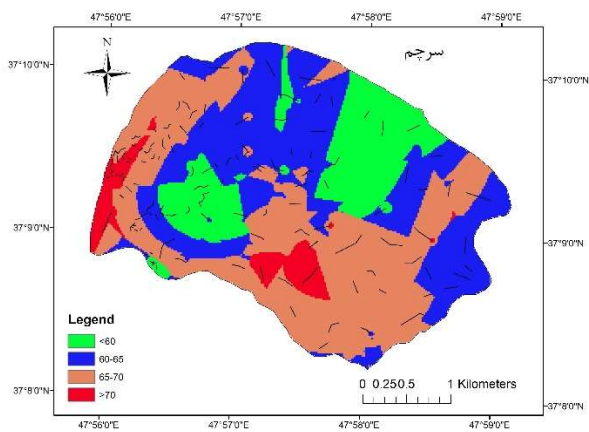
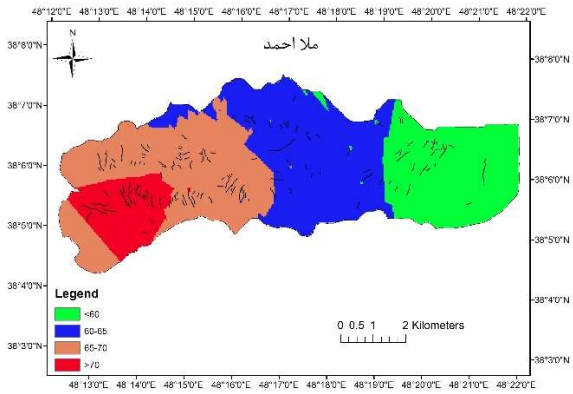
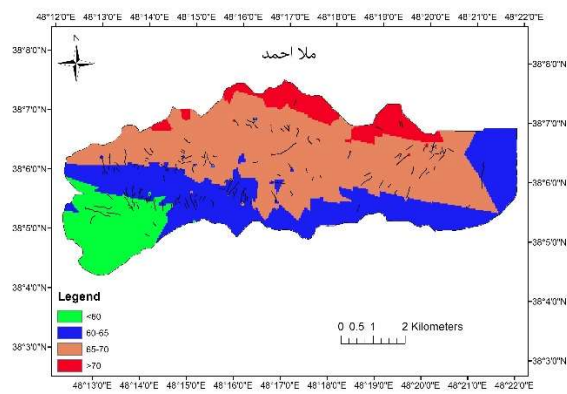
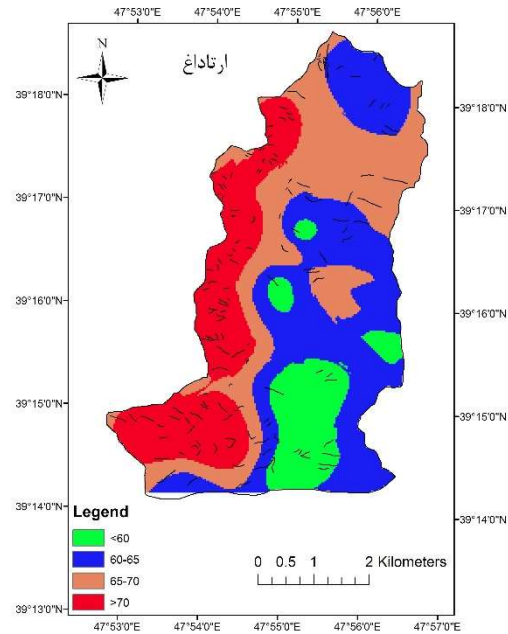
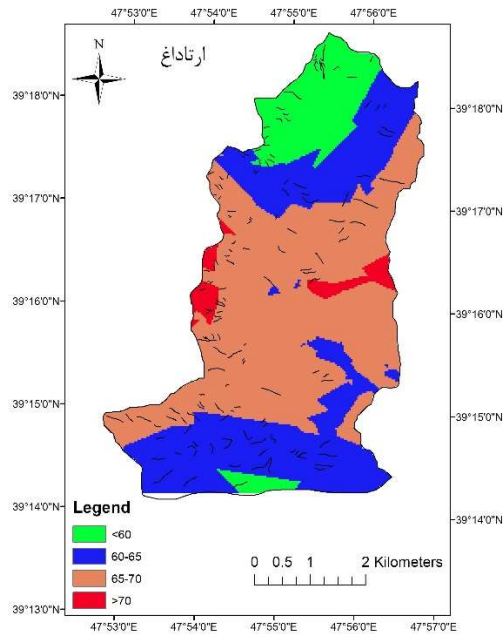
با بررسی ظاهری نقشه‌های شکل ۳ مشاهده می‌شود که در منطقه‌ی اُرتاداغ با استفاده از مدل REGEM، مقادیر بیشتری از عامل τ_c در قسمت‌های مرکزی حوضه تعیین شد؛ در حالی که تراکم بیشتر آبکندها در قسمت غربی و جنوبی حوضه است و با برآورد مدل AREGEM انطباق بیشتری دارد. در منطقه‌ی ملاحمد نیز میزان فرسایش آبکنندی در غرب حوضه بیشتر است و مدل AREGEM، عامل τ_c بیشتری را در این قسمت برآورد کرده است؛ بنابراین، در این منطقه نیز کارایی مدل اصلاح شده بالاتر به نظر می‌رسد. در منطقه‌ی سرچم، توزیع آبکندها در سطح حوضه تقریباً یکنواخت است و برآورد عامل τ_c در این منطقه با هر دو مدل مورد بررسی انطباق قابل قبولی با وضعیت فرسایش منطقه دارد. به منظور مقایسه‌ی دقیق‌تر نقشه‌ی خروجی‌های دو مدل، از شاخص نیمه کمی نسبت تراکمی (Dr) استفاده شد (Yalcin, 2008). در شکل ۴، شاخص Dr طبقات شدت عامل τ_c برای سه منطقه ارائه شده است. مشاهده می‌شود که در منطقه‌ی اُرتاداغ و ملاحمد در مدل AREGEM نیز با افزایش τ_c ، Dr به طور مرتب افزایش می‌یابد؛ در حالی که در مدل REGEM روند منظمی وجود ندارد. این امر نشان می‌دهد با استفاده از مدل AREGEM، مقادیر بیشتر τ_c در نقاط با تراکم بیشتر آبکند برآورد شده است؛ بنابراین، مدل AREGEM در تشخیص توزیع فرسایش آبکنندی کارایی بیشتری داشت. در منطقه‌ی سرچم، روند تغییرات τ_c با Dr در هر دو مدل منظم نیست و می‌توان گفت که دو مدل در تعیین توزیع فرسایش آبکنندی بر اساس عامل τ_c ، کارایی مشابهی داشتند. Gordon و همکاران (Gordon et al, 2006) نیز از مدل REGEM برای برآورد فرسایش آبکنندی به عنوان جزئی از مدل AnnAGNPS استفاده کردند. این امر به منظور برآورد کل فرسایش حوضه‌های آبخیز کشاورزی صورت گرفت. آنها مشاهده کردند که برای برآورد دقیق‌تر فرسایش آبکنندی، به اصلاح و اعتبارسنجی بیشتر این مدل نیازمندند. Tekwa و همکاران (Tekwa et al, 2015) نیز با به کار بردن EGEM نشان دادند که برای برآورد دقیق‌تر فرسایش آبکنندی با این مدل، لازم است روابط جزء فرسایش خاک آن اصلاح شود. به طور کلی مشاهده می‌شود که بین برآورد به دست آمده با دو مدل، تفاوت نسبتاً زیادی وجود دارد و علت این امر، استفاده از روابط اصلاح شده در مدل AREGEM است که نسبت به روابط مدل REGEM دقت بالاتری دارد.



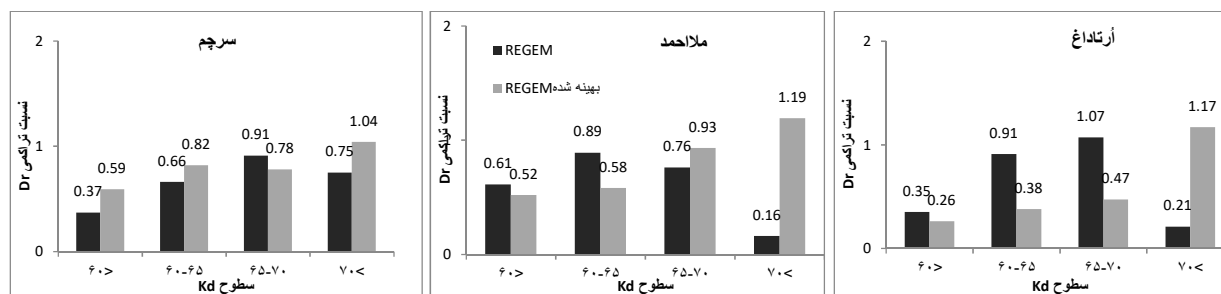
شکل ۴: شاخص نسبت تراکم (Dr) عامل τ_c .

در شکل ۵، توزیع عامل فرسایش خاک (k_d) در سطح سه منطقه برای دو مدل REGEM و AREGEM ارائه شده است. در شکل ۶ نیز شاخص نسبت تراکم (Dr) طبقات عامل k_d برای سه منطقه ارائه شده است. در این مورد نیز افزایش مقدار k_d به معنی افزایش حساسیت به فرسایش آبکنندگی است و انتظار می‌رود تراکم آبکند بیشتر باشد (Alonso et al, 2002).

به صورت بصری مشاهده می‌شود که در منطقه‌ی آرتاداغ با استفاده از مدل REGEM مقادیر زیاد عامل k_d در قسمت‌های محدودی از حوضه تعیین شد، ولی مدل AREGEM با تراکم بیشتر آبکنندها در قسمت غربی و جنوبی حوضه انطباق بیشتری دارد. در منطقه‌ی ملاحمد و سرچم نیز مدل اصلاح شده‌ی AREGEM با تراکم واقعی آبکنندها در سطح منطقه انطباق بهتری دارد. بررسی شاخص نسبت تراکم (شکل ۶) برای هر سه منطقه‌ی مورد مطالعه نیز نشان می‌دهد که روند افزایشی Dr با افزایش طبقات شاخص k_d در مدل AREGEM بیش از مدل REGEM است که کارایی بیشتر مدل اصلاح شده را نشان می‌دهد. بنابراین مشاهده می‌شود وقتی روابط رگرسیونی دو خروجی اصلی - که جزء فرسایش خاک مدل است (τ_c و k_d) - متناسب با شرایط منطقه‌ی مطالعه اصلاح شد، پیش‌بینی توزیع فرسایش آبکنندگی در سطح منطقه دقیق‌تر می‌شود. Daggupati و همکاران (Daggupati et al, 2014) نیز بر ضرورت اصلاح روابط رگرسیونی مدل‌ها برای برآورد دقیق‌تر فرسایش آبکنندگی در محیط GIS اشاره کردند.

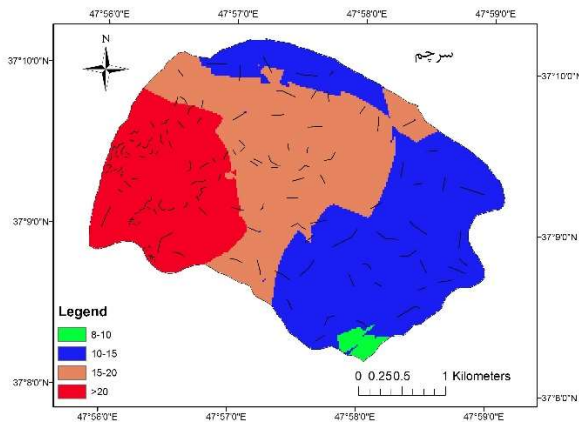
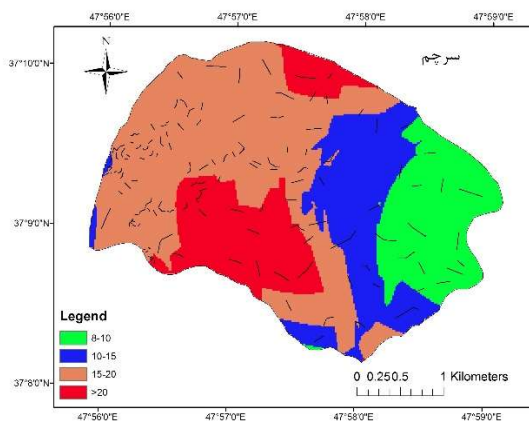
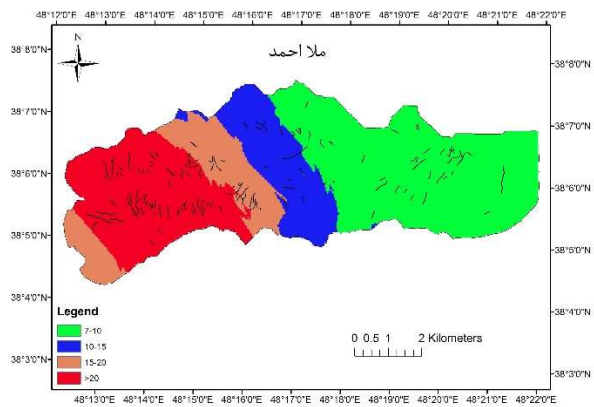
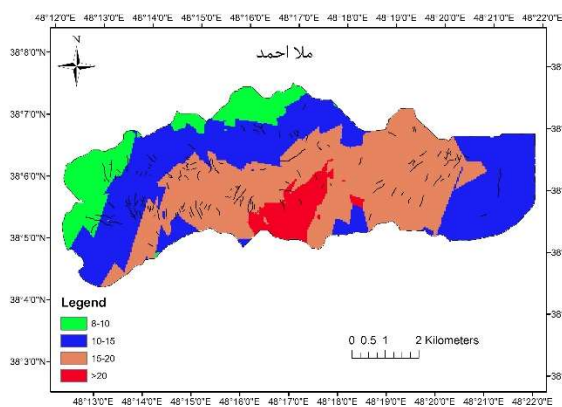
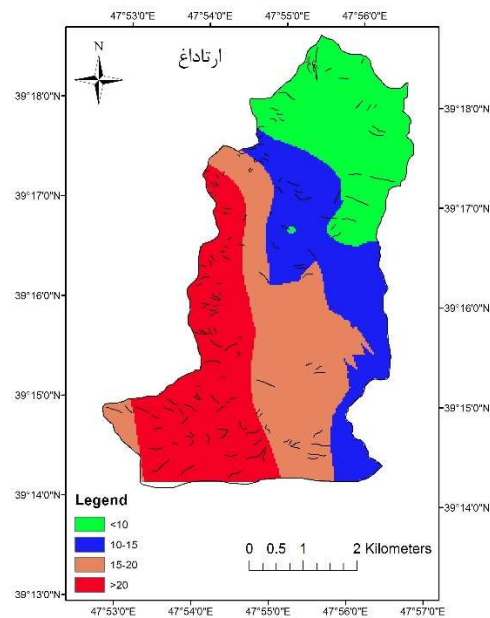
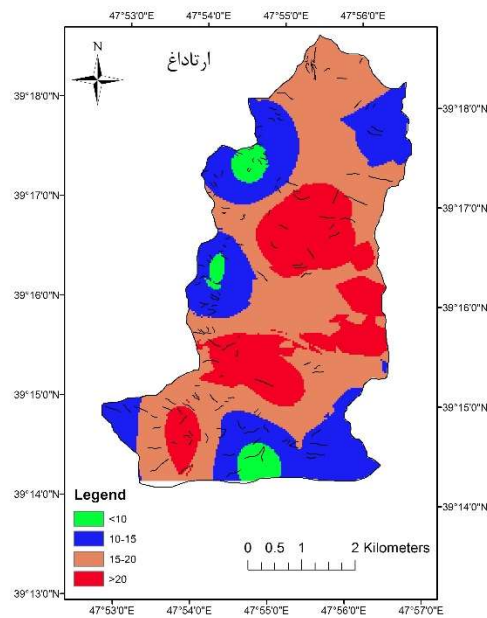


شکل ۵: عامل K_d . شکل چپ مدل REGEM و راست AREGEM.

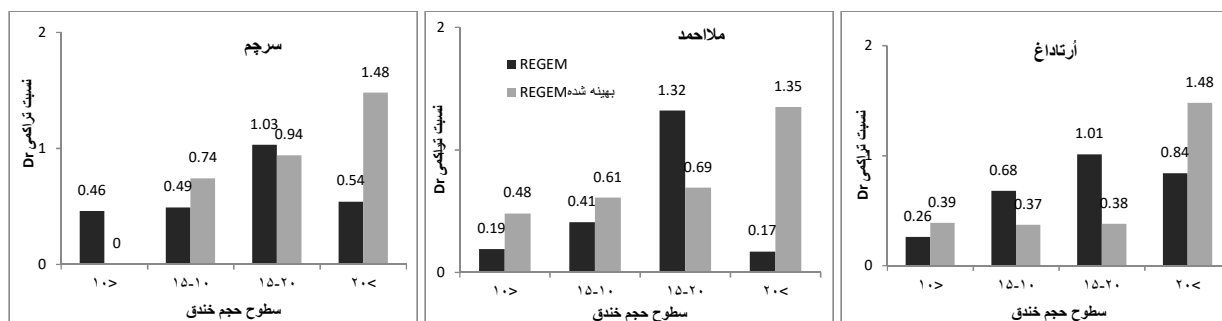


شکل ۶: شاخص نسبت تراکم (Dr) عامل Kd.

در شکل ۷، طبقات حجم فرسایش آبکندی برآورد شده با دو مدل REGEM و AREGEM در سطح سه منطقه ارائه شده است. در شکل ۸ نیز شاخص نسبت تراکم (Dr) طبقات فرسایش برای سه منطقه ارائه شده است. به صورت ظاهری مشاهده می‌شود که در هر سه منطقه، طبقات حجم فرسایش برآورد شده با مدل AREGEM با تراکم آبکندها در سطح حوضه‌ها انطباق بهتری دارد؛ این در حالی است که برآوردهای مدل پایه REGEM در هر سه منطقه، توزیع آبکندها را به خوبی پیش‌بینی نکرده است. بررسی شاخص نسبت تراکم (شکل ۸) نیز نشان می‌دهد که در هر سه منطقه، مدل AREGEM روند افزایشی Dr با افزایش طبقات، شدت فرسایش پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد؛ در حالی که مدل REGEM تنها در منطقه سرچم، روند افزایش نسبی داشت. بنابراین، مدل AREGEM برای برآورد میزان فرسایش در هر سه منطقه کارایی دارد، ولی مدل REGEM تنها در منطقه سرچم کارایی نسبی دارد. Nachtergaele و همکاران (Nachtergaele et al, 2001b) نیز با استفاده از مدل REGEM، رابطه‌ی خوبی را بین حجم اندازه‌گیری شده و برآورد شده‌ی آبکند مشاهده کردند ($r^2 = 0.88$)؛ در حالی که رابطه‌ی بین سطح مقطع اندازه‌گیری شده و برآورد شده‌ی آبکند ضعیف بود ($r^2 = 0.27$). Tekwa و همکاران (Tekwa et al, 2015) نیز برای برآورد ابعاد آبکند نزدیک به مقدار اندازه‌گیری شده، مدل EGEM را اصلاح و روابط Adapted EGEM را به کار بردند.



شکل ۷: برآورد حجم فرسایش آب‌بندی. شکل چپ مدل REGEM و راست AREGEM.



شکل ۸: شاخص نسبت تراکم (Dr) عامل برآورد حجم فرسایش آب‌کندی.

ذکر این امر لازم است که مقایسه‌ی بصری نقشه‌های خروجی، دو مدل روشی کیفی است و استفاده از شاخص Dr نیز روشی نیمه کمی است و صرفاً وجود روند صعودی در این شاخص به تنهایی نمی‌تواند بیانگر مطلوبیت مدل باشد. همچنین هر دو این روش‌ها به تشخیص فردی بستگی دارد؛ از این رو، مقایسه‌ی دقت مدل‌ها در تعیین پراکندگی خروجی‌های به دست آمده تنها با این دو روش می‌تواند مبهم و متناسب با تشخیص افراد تغییر کند (Qilin et al, 2011). بنابراین به منظور تشخیص دقیق‌تر، از شاخص کمی مجموع کیفیت (Qs) استفاده شد که بیشتر بودن این شاخص به معنی انطباق بیشتر طبقات فرسایشی با شرایط واقعی است (Yalcin, 2008). در جدول ۴، شاخص Qs نقشه‌های به دست آمده برای سه خروجی مورد نظر مدل‌ها ارائه و با یکدیگر مقایسه شد.

جدول ۴: شاخص مجموع کیفیت Qs طبقات فرسایش آب‌کندی خروجی‌های مدل‌ها

شاخص مجموع کیفیت (Qs)				
خروجی مدل	مدل	اُرتاداغ	ملااحمد	سرچم
τ_c	AREGEM	۱/۶۲	۱/۱۵	۱/۰۱
	REGEM	۰/۳۳	۰/۶۲	۰/۸۴
K_d	AREGEM	۱/۵۷	۱/۴۱	۱/۰۵
	REGEM	۰/۶۸	۰/۷۵	۰/۷۲
برآورد حجم آب‌کند	AREGEM	۲/۱۵	۱/۷۱	۱/۲۱
	REGEM	۰/۸۸	۰/۷۷	۰/۶۶

به طور کلی مشاهده می‌شود که در هر سه منطقه‌ی Qs، مدل AREGEM برای هر سه خروجی بیش از مدل REGEM است؛ بنابراین، مدل اصلاح شده در تعیین توزیع فرسایش آب‌کندی مناطق مورد مطالعه از کارایی بیشتری برخوردار است که این نتایج با نتایج بررسی بصری و شاخص Dr نیز انطباق دارد. Taguas و همکاران (Taguas et al, 2012) با مقایسه‌ی کارایی مدل REGEM در دو شرایط مرتعی و اراضی شخم خورده نشان داد که این مدل در شرایط مرتعی، ۴۶٪ رسوب تولیدی حاصل را از فرسایش آب‌کندی تشخیص داد؛ در حالی که در شرایط شخم خورده، این مقدار ۱۹٪ بود. بنابراین، این مدل کارایی لازم را برای پیش‌بینی شدت فرسایش آب‌کندی در شرایط شخم خورده نداشت و نیازمند اصلاح بود. Nachtergaele و همکاران (Nachtergaele et al, 2001b) بیان کردند که طول آب‌کند، پارامتر کلیدی در

پیش‌بینی حجم آب‌کند به شمار می‌رود و برقراری روابط دقیق برای برآورد حجم آب‌کند، به اصلاح مدل با توجه به شرایط منطقه نیاز دارد.

با مقایسه‌ی بین سه منطقه مشاهده می‌شود که شاخص Qs هر سه خروجی، در منطقه‌ی اُرتاداغ بیش از دو منطقه‌ی دیگر است؛ بنابراین، مدل AREGEM در تعیین توزیع عوامل فرسایش آب‌کندی در این منطقه، کارایی بیشتری دارد. این در حالی است که در منطقه‌ی سرچم، کمترین Qs برای هر سه خروجی حاصل شد. اختلاف Qs بین دو مدل نیز در این منطقه کمتر از دو منطقه‌ی دیگر است. این امر نشان می‌دهد هر چند کارایی مدل AREGEM در منطقه‌ی سرچم نیز مانند دو منطقه‌ی دیگر بیشتر است، ولی اختلاف دقت دو مدل در تعیین توزیع فرسایش آب‌کندی کمتر می‌باشد. Gordon و همکاران (Gordon et al, 2006) نیز با کاربرد مدل REGEM در مناطق زراعی بیان کردند که این مدل می‌تواند فرسایش حاصل از آب‌کندهای موقت را پیش‌بینی و جریان رسوب بین آب‌کندها و تولید رسوب در جای آنها را در ۵ کلاس اندازه ذرات خاک برآورد کند. در حالی که Nachtergaele و همکاران (Nachtergaele et al, 2001b) نشان دادند که مدل REGEM توانایی لازم را برای پیش‌بینی شدت فرسایش آب‌کندی در منطقه‌ی مدیترانه‌ای ندارد و نیازمند اصلاح است.

مقایسه‌ی سه خروجی مدل‌ها نیز نشان می‌دهد که Qs برآورد حجم آب‌کند بیش از دو عامل دیگر است؛ بنابراین، برآورد این خروجی با استفاده از مدل‌های مورد نظر از دقت بیشتری در تعیین توزیع شدت فرسایش آب‌کندی برخوردار است. Daggupati و همکاران (Daggupati et al, 2014)، مدلی فرآیندی را در محیط GIS براساس جریان سطحی، زبری سطح، تنش برشی بحرانی خاک و مساحت حوضه‌ی زهکشی آب‌کندها ایجاد کردند. در این مدل نیز همانند مدل REGEM، از دو جزء هیدرولوژیک و فرسایش خاک استفاده شد. مقایسه‌ی این مدل با مدل‌های موجود نشان داد که خطای برآورد حجم فرسایش مدل تولید شده، کمتر از ۴۰ درصد بود و نسبت به مدل‌های موجود توانایی بهتری داشت. در عین حال بیان شده که استفاده از این مدل، نیازمند آزمایش‌های بیشتر در شرایط مختلف است (Daggupati et al, 2014). بنابراین نتایج این مطالعه نشان می‌دهد برآورد حجم آب‌کند بهترین خروجی مدل است که می‌توان از آن به منظور تعیین توزیع فرسایش آب‌کندی در سطح منطقه و شناسایی نقاط دارای شدت بیشتر فرسایش استفاده کرد.

۵- نتیجه‌گیری

به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از مدل پایه REGEM برای برآورد توزیع شدت فرسایش آب‌کندی کافی نیست و نیاز است این مدل با توجه به شرایط منطقه‌ی مورد مطالعه اصلاح و به کار برده شود. همچنین مشاهده شد از بین سه خروجی به دست آمده از مدل شامل تنش برشی جریان (τ_c)، شاخص فرسایش خاک مدل (K_d) و برآورد حجم آب‌کندها، استفاده از حجم آب‌کندها در تعیین دقیق‌تر توزیع فرسایش آب‌کندی کارایی بیشتری دارد. همچنین مشاهده شد که مدل اصلاح شده‌ی AREGEM بیشترین کارایی را برای تعیین توزیع فرسایش آب‌کندی در منطقه‌ی اُرتاداغ داشت و پس از آن به ترتیب در ملااحمد و سرچم کارایی مناسب را نشان داد.

منابع

1. Alonso, C. V.; Bennett, S.; & O. R. Stein, 2002. Predicting head cut erosion and migration in concentrated flows, *Water Resources Research*, 38 (12), 39-1.
2. Bayatti, M., 2006. Gully properties and gully controlling factors, case study: between Meshkinshahr and Ahhar, *Geog. Dev. Iran. J*, 4, 115-136. (In Persian)
3. Capra, A.; Mazzara, L. M.; & B. Scoicolone, 2005. Application of the EGEM model to predict ephemeral gully erosion in Sicily, (Italy). *Catena*, 59, 133-146.
4. Chaplot, V., 2013. Impact of terrain attributes, parent material and soil types on gully erosion, *Geomorphology*, 186, 1-11.
5. Daggupati, P.; Aleksey, Y.; Sheshukov.; & R. Kyle, Douglas-Mankin, 2014. Evaluating ephemeral gullies with a process-based topographic index model, *Catena*, 113, 177-186.
6. Dlapa, P.; Chrenková, K.; Mataix-Solera, J.; & I. Šimkovic, 2012. Soil profile improvement as a byproduct of gully stabilization measures, *Catena*, 92, 155-161.
7. Gordon, L.; Bennett, S.; Bingner, R.; Theurer, F.; & C. Alonso, 2006. REGEM: The revised ephemeral gully erosion model, *8th PROCEEDINGS of the Eighth Federal Interagency Sedimentation Conference*, April 2-6, 2006, Reno, NV, USA.
8. Hafezi Moghaddas, N., 2011. Engineering Geology, *Arses press*, 488p. (in Persian)
9. Jafarai Gorzin, B., & A. Kavian., (2009). Assessment of gully erosion occurrence in Sorkh-Abad watershed using remote sensing and geographical information system. *Iran-Watershed Management Science & Engineering*. 3 (7), 55-58. (In Persian)
10. Kemper, W. D., & R. C. Rosenau., (1986). Aggregate stability and size distribution. In: Klute A (ed). *Methods of Soil Analysis. Part a: Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy. Soil Science Society of America, Madison, WI. Pp 425-442.
11. Moghimi, I., & N. Salammi., (2011). Mechanism of geomorphologic creation and development of gully in the winter quarter of Haj Mohammad in the northern slope of Khoroslu in Ardebil. *Territory*. 30, 49-61. (In Persian)
12. Motevalli, S., & R. Esmaili., (2013). Landslide hazard zoning using gamma fuzzy operator (A case study: Taleghan watershed). *Environmental Erosion Researches*. 8, 1-20.
13. Nachtergaele, J., & J. Poesen., (2002). Spatial and temporal variations in resistance of loess-derived soils to ephemeral gully erosion. *European Journal of Soil Science*. 53, 449- 463.
14. Nachtergaele, J.; Poesen, J.; Steegen, A.; Takken, I.; Beuselinck, L.; Vandekerckhove, L.; & G. Govers, 2001a. The value of a physically based model versus an empirical approach in the prediction of ephemeral gully erosion for loess-derived soils, *Geomorphology*, 40, 237-252.
15. Nachtergaele, J.; Poesen, J.; Vandekerckhove. L.; Oostwoud. D.; & M. Roxo, 2001b. Testing the ephemeral gully erosion model (EGEM) for two mediterranean environments, *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 17-30.
16. Page, A. L.; Miller, R. H.; & D. R. Keeney, 1982. *Methods of Soil Analysis, part2, chemical and microbiological properties*, American Society of Agronomy, Inc, Soil Science Society of America, Madison, WI. 510p.
17. Poesena, J.; Nachtergaelea, J.; Verstraetena, G.; & C. Valentin, 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs, *Catena*, 50, 91- 133.
18. Qilin, Y.; Jiarong, G.; Yue, W.; & Q. Bintian, 2011. Debris flow characteristics and risk degree assessment in changyuan gully, Huairou district, Beijing, *Procedia Earth and Planetary Science*, 2, 262-271.

19. Rafahi, H. Gh., 2006. Water erosion and conservation, University of Tehran press, 671p. (in Persian)
20. Reynolds, W. D.; Elrick, D. E.; & E. G. Youngs, 2002. Ring or cylinder infiltrometers (vadose zone). In: Dane, J. H. and G. C. Topp (Eds), Methods of soil analysis, Part 4. Physical methods, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin USA. pp. 818- 826.
21. Rezaei Moghaddam, M. H., & A. Behbodi., (2011). Application of EGEM in estimating the erosion of ephemeral gullies in Sarand Chay drainage basin, *Geographic Space*, 35, 135-153. (In Persian)
22. Shahab, H.; Emami, H.; Haghnia, Gh. H.; & A. Esmali, 2016. Comparing the analytic hierarchy process and fuzzy logic for zoning the risk of gully erosion in the three regions of the Ardebil province, *Journal of Environmental Erosion Research*, 6 (21), 1-16. (In Persian)
23. Soufi, M., & H. Esaei., (2010). Estimate of gully erosion volume with morphometric and soil properties in Gholestan province, *J. Water. Engin. Manage*, 2, 73-82. (In Persian)
24. Taguas, E. V.; Yuan, Y.; Bingner, R. L.; & J. A. Gómez, 2012. Modeling the contribution of ephemeral gully erosion under different soil managements: A case study in an olive orchard microcatchment using the AnnAGNPS model, *Catena*, 98, 1-16.
25. Tekwa, I. J.; Laflen, J. M.; & A. MusaKundiri, 2015. Efficiency test of adapted EGEM model in predicting ephemeral gully erosion around Mubi, Northeast Nigeria, *International Soil and Water Conservation Research*, 3, 15-27.
26. Valentin, C. J.; Poesen, J.; Yong Li, 2005. Gully erosion: Impacts, factors and control, *Catena*, 63, 132-153.
27. Wischmeier, W. H., & D. D. Smith., (1978). Predicting rainfall erosion losses—a guide to conservation planning. USDA Agricultural Handbook, Washington. D.C, 537p
28. Woodward, D. E., 1999. Method to predict cropland ephemeral gully erosion, *Catena*, 37, 393-399.
29. Yalcin, A., 2008. GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey), comparisons of results and confirmations, *Catena*. 72, 1-12.

Evaluation and optimization of REGEM model to estimate the gully erosion distribution in three watershed of Ardabil province

Hossein Shahab Arkhazloo*ⁱ: Assistant Professor, Department of soil science and engineering, faculty of agriculture and natural resources, Mohaghegh Ardabili University.

Shokrollah Asghari: Associate Professor, Department of soil science and engineering, faculty of agriculture and natural resources, Mohaghegh Ardabili University.

Article History (Received: 2018/01/28 Accepted: 2019/03/16)

Extended Abstract

Introduction: Gully erosion is the most severe type of water erosion, which causes large damage in the watersheds. To determine the risk of this type of erosion, it is necessary to estimate its severity and specify the distribution of the risk of erosion in the watershed. One of the models used to estimate the gully erosion is REGEM model, but accurate estimation of erosion requires adaptation of the model to regional conditions. In this study, from REGEM and Adapted REGEM (AREGEM) models, they were used to estimate the gully erosion severity of Ardebil province. Also, the distribution of the two models' outputs were mapped in the three watershed and compared to the chosen ones of optimal model.

Methodology: In this research, three watersheds were selected in Orta Dagh, Mollahammad and Sarcham of Ardebil province. Respectively 28, 33 and 20 small gullies were selected from three watersheds. In order to estimate the gully erosion with the AREGEM model, the equations of REGEM base model were used. For this purpose, regression relations between the measured values of the gully dimensions and the estimated values by REGEM model were established and coefficients of equations were corrected. Using the equations of REGEM and AREGEM models, three outputs of the model including shear stress (τ_c), soil erosion factor (Kd) and gully volume (V) for selecting gullies were calculated and with using of IDW interpolation method, obtained the distribution of these three factors in the three watersheds. The outputs of the models were considered as an indicator of gully erosion severity and the watersheds were divided into four levels of erosion intensity. Finally, using two indicators of density ratio (Dr) and quality sum (Qs), the erosion classes obtained from the two models were evaluated and compared.

Results: The results showed that using the REGEM model, the average volume of gullies were in the Orta Dagh region 15.6, Mollahammad 17.2 and Sarcham 16.3 cubic meters while the AREGEM model was 16.1, 17.8 and 16.8 Cubic meter respectively. For the three areas of Orta Dagh, Mollahammad and Sarcham, the average of shear stress with REGEM model was 31.5, 32.2 and 24.8, respectively, and with AREGEM model 32.1, 33.3 and 20.6 respectively. The soil erosion factor (Kd) with REGEM model was 62.1%, 63.3% and 69.1% for the three regions, with AREGEM 1/62, 64.2% and 70.1%, respectively. In general, there is not much difference between the mean values of the outputs obtained from the two models, but the distribution map of the outputs in the two models differed greatly. Visually, in all three regions, the estimated erosion volume by AREGEM model has better compliance with the gully density of watersheds, while estimates of the REGEM base model in all three regions were not a good predict of gullies distribution. Also, the comparing of shear stress and soil erosion factors maps, showed similar

results in three regions. Therefore, in order to have a more accurate comparing of the two models' outputs distribution map, the semi-quantitative index of the density ratio (Dr) and the quantitative index of quality sum (Qs) were used. Generally, in all three areas, for maps derived from the AREGEM model, with the increase in the classes of all three outputs of the model, the index of the density ratio (Dr) had an incremental trend, while for the REGEM model this trend was not regular. This indicates that as the erosion rate estimated by the AREGEM outputs increases, the density of the gully in those classes also increases, so there is a greater relation between the estimated erosion values with the AREGEM model and the sensitive classes to gully erosion. Also, the use of the Qs index showed that, the AREGEM model has a higher zoning quality and the ability of this model to determine the classes of sensitivity to gully erosion is more abundant.

Discussion & Conclusions: The use of the REGEM base model to determine the distribution of gully erosion is not accurate and this model needs to be modified and applied according to the conditions of the study area. For this purpose, the Adapted REGEM (AREGEM) model was presented and used. Also it has been observed that between three outputs obtained from the model, the use of gully volume is more effective in determining the exact distribution of gully erosion. Among the three studied regions, the AREGEM model in the Orta Dagh region has the highest efficiency for determining the distribution of gully erosion and then, respectively in the Mollahammad and Sarcham.

Keywords: Model correction, GIS, Risk assessment

ⁱ * Corresponding Author, Email: h.shahab@uma.ac.ir