

**Effect of Using Different Methods for  
Calculating Topographic Factor on Sediment  
Yield Based on RUSLE Model  
(Case Study: Barajin Catchment, Qazvin)**

A. Azizian<sup>1\*</sup> and S. Koochi<sup>2</sup>

**Abstract**

One of the most widely used methods for estimation of erosion over the catchment and the sediment yield is the revised universal soil loss equation (RUSLE). Previous research showed the importance of the topographic factor (LS), which includes slope steepness and slope length factors, in applying this equation. Over the past decades, different methods have been developed for the calculation of topographic factor and hence, choosing the best one is a confusing and challenging issue. Moreover, by increased use of geographic information system (GIS) application in hydrological modeling, mathematical calculations on grid-based datasets can easily be done in GIS environ. Due to depending on grid-based datasets, RUSLE model is influenced by several factors which among them, the effect of DEM resolution and the method of LS estimation are the most important ones. This research addresses the effects of all important factors on sediment yield load at the outlet of the Barajin catchment by coupling the RUSLE model and GIS environ. Also, in order to evaluate the efficiency of this model, mean annual sediment delivery load is calculated by analyzing discharge-sediment curve and observed data at Barajin hydrometric station between 1987 and 2015. Findings showed that using different methods for estimation of LS factor without considering their limitations leads to a significant relative error (RE) in the calculation of sediment delivery load. Furthermore, it is shown that McCool et al (1989) and Moore-Burch (1986a,b) equations are the best methods for calculation of LS factor, due to an RE of lower than 10% in estimating the sediment yield. Also, investigating the effect of DEM resolution indicated that the relative error in DEM resolution results in 1.5% to 58% RE in sediment load estimation.

**Keywords:** RUSLE, Digital Elevation Model (DEMs), DEM Resolution, Slope and Slope Length.

Received: April 23, 2018  
Accepted: August 9, 2018

**بررسی اثر روش‌های مختلف برآورد فاکتور  
توپوگرافی بر تخمین میزان رسوب خروجی از حوضه  
به روش RUSLE  
(مطالعه موردی: حوضه آبریز باراجین، قزوین)**

اصغر عزیزیان<sup>۱\*</sup> و سکینه کوهی<sup>۲</sup>

**چکیده**

یکی از مهم‌ترین روش‌های محاسبه فرسایش در سطح حوضه و رسوب خروجی از آن استفاده از مدل RUSLE می‌باشد. بررسی تحقیقات گذشته در زمینه کارایی این مدل حاکی از اهمیت بسیار بالای فاکتور توپوگرافی که خود متشکل از دو عامل شیب و طول شیب می‌باشد، دارد. تاکنون روابط متعددی برای محاسبه این فاکتور توسعه داده شده است که انتخاب مناسب‌ترین رابطه برای تخمین آن موجب ایجاد سردرگمی برای محققین می‌گردد. پژوهش حاضر با هدف بررسی روش‌های مختلف برآورد فاکتور توپوگرافی و نیز اثر توان تفکیک مدل‌های رقمی ارتفاعی (DEMs) بر مقدار رسوب محاسبه شده توسط مدل RUSLE در حوضه آبریز باراجین به انجام رسیده است. لازم به ذکر است که برای ارزیابی مدل مذکور در تخمین رسوب خروجی از حوضه، از منحنی سنج رسوب بدست آمده از داده‌های رسوب مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری باراجین استفاده شده است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که استفاده از روابط مختلف برای برآورد فاکتور توپوگرافی، خطایی در حدود ۲ تا بیش از ۴۰ درصد در مقدار رسوب خروجی از حوضه ایجاد می‌نماید. روابط ارائه شده توسط Moore and Burch (1986a,b) و McCool et al. (1989) با دارا بودن خطای نسبی کمتر از ۱۰ درصد بهترین روابط برای محاسبه فاکتور توپوگرافی در حوضه‌های پرشیب می‌باشند. ارزیابی اثر توان تفکیک مدل رقمی ارتفاعی نیز حاکی از تأثیر قابل توجه آن بر مقدار رسوب خروجی از حوضه می‌باشد. بطوریکه طبق محاسبات صورت گرفته متوسط خطای ناشی از اثر توان تفکیک DEM به ترتیب خطایی در حدود ۱/۵ تا ۵۸ درصد در مقدار رسوب خروجی از حوضه ایجاد می‌نماید.

**کلمات کلیدی:** فرسایش خاک، مدل‌های رقمی ارتفاعی (DEMs)، توان تفکیک DEM، شیب و طول شیب.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۲/۳  
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۵/۱۸

1- Assistant Professor, Water engineering Dept., Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. Email: azizian@eng.ikiu.ac.ir

2- M.Sc. in Water Resources Engineering, Water engineering Dept., Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

\*- Corresponding Author

۱- عضو هیئت علمی گروه مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین.

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

فرسایش یک فرآیند طبیعی است که گسترش و میزان آن توسط عوامل مختلف محیطی همچون اقلیم، خاک، توپوگرافی و پوشش گیاهی کنترل می‌گردد (Wischmeier and Smith., 1978; Renard et al., 1997; Mutua et al., 2006; Butt et al., 2010). علاوه بر این، فعالیت‌های انسانی مانند ساخت و سازها و تغییر کاربری اراضی نیز موجب افزایش و تسریع میزان فرسایش خاک می‌گردند. فرسایش سریع خاک دارای اثرات نامطلوب اقتصادی و زیست محیطی بسیار زیادی می‌باشد (Saha, 2003). طی این فرآیند ذرات خاک از بستر زمین جدا می‌شوند. این امر در سراسر جهان موجب از بین رفتن خاک زراعی حاصل‌خیز و سرشار از مواد مغذی برای پرورش گیاهان، افزایش رواناب در مناطق با سنگ بستر کم‌عمق، کاهش آب در دسترس گیاهان، آلودگی منابع آب، کاهش نفوذپذیری خاک، وقوع سیلاب‌های مخرب و غیره می‌گردد (Ganasri and Ramesh, 2016). در اثر فرآیند فرسایش در مدت زمان کوتاهی حجم بسیار زیادی خاک مرغوب و مفید از بین می‌رود و این در حالی است که برای تولید خاک به زمان بسیار طولانی (چندین صد سال) نیاز می‌باشد. بنابراین، مدیریت فرسایش در حوضه‌های آبریز از اهمیت بالایی برخوردار بوده و می‌تواند خسارات ناشی از آن را به حداقل مقدار خود برساند. پیش‌بینی میزان صحیح فرسایش خاک، همواره یکی از متداول‌ترین روش‌ها در مدیریت منابع طبیعی برای کنترل بهره‌وری خاک در داخل حوضه و تخمین میزان رسوب خروجی از آن می‌باشد (Morgan and Nearing, 2011; Prasannakumar et al., 2011). بخش قابل توجهی از ذرات فرسایش یافته از سطح حوضه در مناطق با شیب کم، گودال‌های طبیعی و نیز مناطقی که دارای پوشش گیاهی قابل توجه هستند (پایین‌دست کوهپایه‌ها و دامنه‌های کوه) انباشته شده و توانایی خروج از انتهای حوضه را دارا نمی‌باشند. رسوبات مذکور علاوه بر افزایش جریان موجود در کانال‌ها و آبراه‌ها سبب آلودگی آب و به خطر افتادن زندگی آبزیان موجود در آن نیز می‌گردند. بنابراین آگاهی از میزان فرسایش تولیدی و نیز رسوب خروجی از حوضه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد.

انجام مطالعات میدانی برای پیش‌بینی و ارزیابی فرسایش علاوه بر هزینه بالا و وقت‌گیر بودن، به اطلاعات مشاهداتی درازمدت زیادی نیز نیاز دارد (Saha, 2003). همچنین استفاده از آمار ایستگاه‌های هیدرومتری و روش‌های آماری برای برآورد میزان رسوب به دلیل نبود این آمار برای همه رودخانه‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد (Shokoochi and Beheshti, 2014). امروزه مدل‌های تجربی زیادی

از جمله <sup>۱</sup>USLE، <sup>۲</sup>MUSLE، <sup>۳</sup>PSIAC، <sup>۴</sup>MPSIAC، <sup>۵</sup>EPM، <sup>۶</sup>RUSLE و غیره برای برآورد میزان فرسایش و نیز رسوب خروجی از حوضه ارائه شده‌اند. این مدل‌ها از لحاظ پیچیدگی، داده‌های مورد نیاز، فرآیند محاسبه میزان فرسایش و رسوب با یکدیگر متفاوت می‌باشند. از میان مدل‌های مذکور، مدل RUSLE از جمله مدل‌هایی است که بیشترین کاربرد و محبوبیت را در بین محققین و مهندسين برای محاسبه فرسایش، دارا می‌باشد و همین مساله موجب افزایش کاربرد آن به ویژه در کشورهای در حال توسعه که استفاده از مدل‌های پیچیده به علت کمبود اطلاعات با محدودیت روبرو هستند، شده است (Uddin et al., 2016). استفاده از فن‌آوری‌های سنجش از دور و تلفیق آن با محیط GIS علاوه بر افزایش سرعت و دقت کار به دلیل در نظر گرفتن تغییرات مکانی پارامترهای مورد نیاز، کمک به‌سزایی در محاسبه صحیح مقدار فرسایش و رسوب به روش RUSLE خواهد نمود. تاکنون مطالعات زیادی در زمینه محاسبه میزان فرسایش و رسوب به روش RUSLE و در بستر GIS صورت پذیرفته است.

(Ganasri and Ramesh (2016) به تخمین میزان فرسایش و تعیین مناطق مستعد فرسایش در حوضه نترآواتی<sup>۷</sup> با استفاده از داده‌های مبتنی بر سنجش از دور و بکارگیری مدل RUSLE پرداختند. نتایج نشان داد که مقادیر حاصل از مدل RUSLE از مطابقت خوبی با میزان فرسایش اندازه‌گیری شده در سطح حوضه برخوردار می‌باشد. همچنین، این روش به خوبی توانسته است مناطق مستعد فرسایش در حوضه را شناسایی نماید. (Rezaei et al. (2014) به ارزیابی کمی فرسایش خاک با استفاده از مدل RUSLE و شناسایی مؤثرترین عامل آن در حوضه آبخیز گابریک پرداختند. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که سیستم اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور قابلیت بالایی در ایجاد فاکتورهای مدل RUSLE دارا هستند و همچنین بررسی روابط رگرسیونی بین فاکتورهای این مدل و مقدار فرسایش سالانه خاک در حوضه نشان داد که فاکتور توپوگرافی (LS) با بالاترین ضریب تبیین، دارای بیشترین اهمیت در برآورد مقدار فرسایش می‌باشد. (Tang et al. (2014) با ارزیابی میزان فرسایش در حوضه یانگو<sup>۸</sup> در کشور چین با استفاده از مدل RUSLE، داده‌های مبتنی بر سنجش از دور و بستر GIS نشان دادند که با یکپارچه‌سازی این موارد، می‌توان توزیع مکانی میزان پتانسیل فرسایش خاک و مقدار واقعی آن را به خوبی ارزیابی نمود و همچنین از آن می‌توان برای برنامه‌ریزی در جهت اقدامات حفاظت خاک در سطح حوضه استفاده نمود. (Zhang et al. (2017) به ارزیابی عملکرد دو الگوریتم روندیابی جریان MFD<sup>۹</sup> و SFD<sup>۱۰</sup> بر مؤلفه طول شیب و فاکتور توپوگرافی (فاکتور LS) در مدل RUSLE پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مقدار هر دو فاکتور با استفاده از الگوریتم MFD به علت لحاظ نمودن مسیرهای

مؤلفه‌های ژئومورفولوژیکی یک حوضه برخوردار می‌باشد، ارزیابی اثر توان تفکیک DEM بر مقدار رسوب محاسباتی توسط مدل RUSLE از دیگر اهداف این پژوهش می‌باشد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- حوضه مورد مطالعه

حوضه مورد مطالعه در این پژوهش حوضه آبریز باراجین واقع در شمال-شرق استان قزوین می‌باشد که در محدوده جغرافیایی  $36^{\circ} 17' 45''$  تا  $36^{\circ} 28' 30''$  شمالی و  $50^{\circ} 1' 50''$  تا  $50^{\circ} 10' 15''$  شرقی واقع شده است. مساحت این حوضه در حدود ۱۰۹/۹۴ کیلومتر مربع بوده و محدوده تغییرات ارتفاعی آن بین ۱۳۳۵ تا ۲۶۴۴ متر از سطح دریا می‌باشد. رودخانه اصلی این حوضه که وظیفه زهکشی مناطق واقع در بالادست را بر عهده دارد به نام رودخانه باراجین می‌باشد که از سه سرشاخه با نام‌های زشک، نیزوج و نیاق تشکیل شده است. در شکل ۱ نمایی از موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز مورد مطالعه نشان داده شده است.

### ۲-۲- محاسبه فرسایش با مدل RUSLE

این مدل جزء روش‌های پرکاربرد محاسبه میزان فرسایش در بسیاری از حوضه‌های آبریز در سراسر جهان می‌باشد. مدل RUSLE از همان عوامل موجود در مدل جهانی USLE که توسط Wischmeier and Smith (1978) ارائه شده است، استفاده می‌نماید و به عبارت بهتر نسخه اصلاح شده مدل جهانی فرسایش خاک می‌باشد. مدل RUSLE وابسته به نوع استفاده از اراضی بوده و در اراضی کشاورزی و منابع طبیعی قابل استفاده می‌باشد. همچنین این مدل توانایی محاسبه میزان فرسایش برای هر رخداد بارندگی را نیز دارد. برای محاسبه میزان فرسایش در این مدل از رابطه ۱ می‌توان استفاده نمود (Wischmeier and Smith, 1978; Renard et al., 1997):

$$A=R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

در رابطه فوق، A: میزان خاک فرسایش یافته ( $\text{ton ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ), R: قدرت فرساینده باران ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ), K: عامل فرسایش پذیری خاک ( $\text{t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}$ ), LS: عامل توپوگرافی (شامل L: طول جریان و S: تندی و درجه شیب مسیر جریان), C: عامل پوشش گیاهی و مربوط به مدیریت زراعی, P: عامل عملیات حفاظت خاک و مدیریت اراضی می‌باشد. برای استفاده از این مدل به اطلاعاتی به شرح جدول ۱ نیاز می‌باشد. در ادامه به نحوه تخمین مقادیر هر کدام از پارامترهای ورودی رابطه ۱ پرداخته شده است.

مختلف برای انتقال جریان، نتایج به مراتب قابل قبول تری را نسبت به الگوریتم SFD بدست می‌دهد. در مطالعه‌ای دیگر نیز Fernandez et al. (2003) به محاسبه مقدار فرسایش و تغییرات مکانی آن در سطح حوضه آیداهو<sup>۱۱</sup> با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل RUSLE پرداختند و در نهایت با استفاده از مدل SEDD مقدار رسوب خروجی از حوضه را محاسبه نمودند. نتایج بدست آمده به خوبی نشان داد که رویکرد یکپارچه‌سازی مذکور امکان می‌دهد تا برآورد فرسایش و رسوب خاک در سطح حوضه و نیز شناسایی مناطق اصلی رسوبگذاری نسبتاً آسان، سریع و مقرون به صرفه باشد.

بررسی مطالعات انجام شده بیانگر آن است که استفاده از داده‌های مبتنی بر سنجش از دور و تلفیق آنها در بستر GIS، از نقش بسیار زیادی در افزایش دقت مدل‌های ریاضی به ویژه برآورد میزان فرسایش و رسوب در حوضه‌ها برخوردار می‌باشد. همچنین با توجه به نتایج حاصل از تحقیقات مختلف، فاکتور توپوگرافی از اهمیت بالایی در ساختار مدل RUSLE برخوردار می‌باشد (Renard et al., 1997; Butt et al., 2010; Uddin et al., 2016; Thomas et al., 2018).

به همین علت برای رسیدن به مقادیر صحیح و قابل قبول فرسایش در سطح حوضه و نیز رسوب خروجی از آن بایستی توجه ویژه‌ای به این فاکتور صورت گیرد. در همین راستا، روابط متعددی توسط محققین مختلف برای محاسبه این فاکتور ارائه شده است که هر کدام نسبت به یکدیگر نتایج کاملاً متفاوتی را بدست می‌دهند و همین مسأله عموماً باعث سردرگمی بسیاری از محققین و مهندسیین در انتخاب روش مناسب می‌گردد. بنابراین انتخاب روش مناسب برای محاسبه فاکتور توپوگرافی در مدل RUSLE یکی از چالش‌های اساسی برای محققان می‌باشد. از طرفی دیگر، برای محاسبه این فاکتور در محیط GIS، بایستی از مدل‌های رقمی ارتفاعی (DEMs) استفاده نمود که همین مسأله موجب می‌شود که فاکتور توپوگرافی به شدت تحت تأثیر توان تفکیک DEM قرار گیرد. به جرأت می‌توان بیان نمود که تاکنون پاسخ روشنی به این موارد مذکور داده نشده است و با توجه به مطالعات صورت گرفته در این زمینه مشخص می‌گردد که محققین عمدتاً از روش RUSLE برای اولویت‌بندی حوضه از منظر فرسایش‌پذیری استفاده نموده‌اند و تاکنون توجه چندانی به ارزیابی عملکرد این مدل در برآورد رسوب واقعی خروجی از حوضه و نیز اثر توان تفکیک DEM بر عملکرد آن نشده است. لذا با توجه به توضیحات فوق، هدف اصلی پژوهش حاضر ارزیابی روابط مختلف محاسبه فاکتور توپوگرافی و تعیین مناسب‌ترین آنها در تخمین مقدار رسوب خروجی از حوضه آبریز باراجین می‌باشد. همچنین با توجه به آنکه توان تفکیک (ابعاد سلولی) یک DEM تعیین‌کننده کیفیت آن بوده و از تأثیر به‌سزایی بر

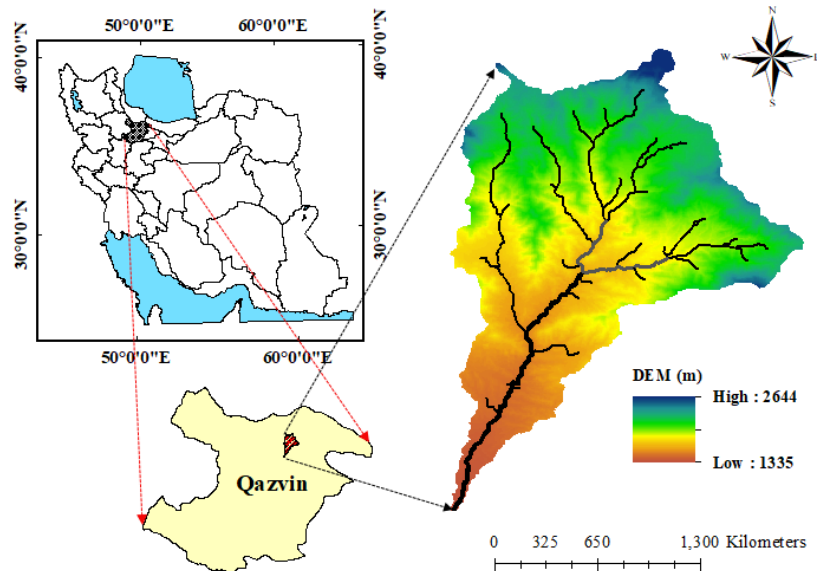


Fig. 1- The geographic location of the study area  
 شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبریز مورد مطالعه

Ordinary- Kriging نقشه قدرت فرسایندهگی باران در بستر GIS ایجاد گردید که تغییرات مکانی آن در شکل ۲ نشان داده شده است.

Table 2- The Rain gauges used in this study  
 جدول ۲- ایستگاه‌های باران‌سنجی مورد استفاده در این تحقیق

Row	Station name	X	Y	Height (m)
1	Qazvin	50.03	36.15	1279
2	Kohin	49.38	36.22	1539
3	Razmian	50.12	36.32	994
4	MoalemKelaye	50.29	36.27	1629
5	Abyek	50.30	36.01	1234
6	Bidestan	50.12	36.23	1296
7	Takestan	49.42	36.03	1283

### ۲-۲-۲- فاکتور پوشش گیاهی (C)

این عامل بیانگر تأثیر پوشش گیاهی بر روی میزان هدر رفت خاک منطقه مورد مطالعه می‌باشد و تحت تأثیر نوع گیاه، تعداد بوته در واحد سطح، مقدار پوشش تاج گیاه و غیره می‌باشد و بطور کلی به مدیریت زراعی بکار گرفته شده مربوط است (Zhang et al., 2017). برای محاسبه آن می‌توان از شاخص‌های گیاهی مبتنی بر داده‌های سنجش از دور استفاده نمود. برای محاسبه فاکتور پوشش گیاهی در تحقیق حاضر از رابطه ارائه شده توسط Van der Knijff et al. (1999) که مبتنی بر شاخص گیاهی  $NDVI^{12}$  (Kogan, 1993) می‌باشد، استفاده بعمل آمده است:

Table 1- Required data for the RUSLE model  
 جدول ۱- داده‌های مورد نیاز مدل RUSLE

Row	Data
1	Monthly and annual rainfall (for calculating the rainfall erosivity)
2	DEM (for calculating the topographic factor)
3	Land cover map (for calculating the vegetation factor)
4	Soil map (for calculating the soil erosivity factor)

### ۲-۲-۱- فاکتور فرسایندهگی بارش (R)

همانگونه که مشخص است، تغییر شدت بارش بر جدا شدن ذرات از بستر خاک اثرات مختلف دارد و در نتیجه میزان فرسایش متفاوتی را خواهند داشت. تأثیر شدت بارش بر میزان فرسایش به کمک این فاکتور، در معادله RUSLE در نظر گرفته شده است. با توجه به کمبود آمار و اطلاعات مربوط به شدت بارش ساعتی، مقدار این فاکتور بر مبنای اطلاعات حاصل از ایستگاه‌های هواشناسی شامل بارش ماهانه و سالانه (Ferro et al., 1991; Renard and Freimund, 1994) و به کمک رابطه ۲ که توسط Wischmeier and Smith (1978) ارائه شده است، محاسبه می‌گردد:

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{1.5 \log_{10}(P_i^2/P) - 0.08188} \quad (2)$$

در رابطه فوق،  $P_i$ : متوسط مقدار بارش ماهانه (mm) و  $P$ : متوسط مقدار بارش سالانه (mm) و فاکتور  $R$ : در واحد  $MJ \text{ ha/mm/hr/yr}$  می‌باشد. در این تحقیق از آمار و اطلاعات ماهانه بارشی مربوط به ۷ ایستگاه باران‌سنجی واقع در محدوده مطالعاتی که مشخصات آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است، استفاده و به کمک روش درون‌یابی

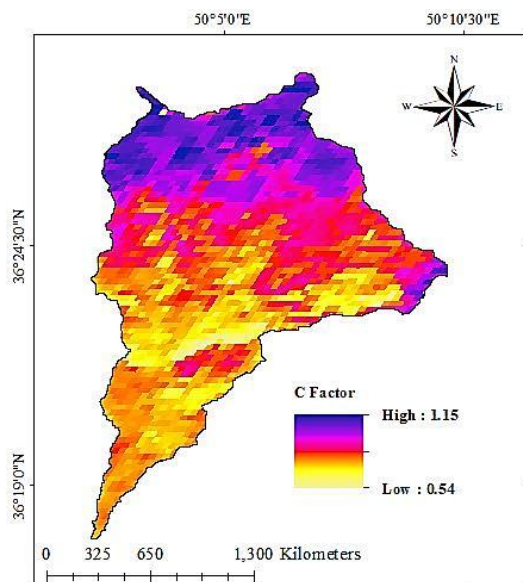


Fig. 3- Spatial distribution of C factor in the study area

شکل ۳- توزیع مکانی فاکتور C در سطح حوضه مطالعاتی

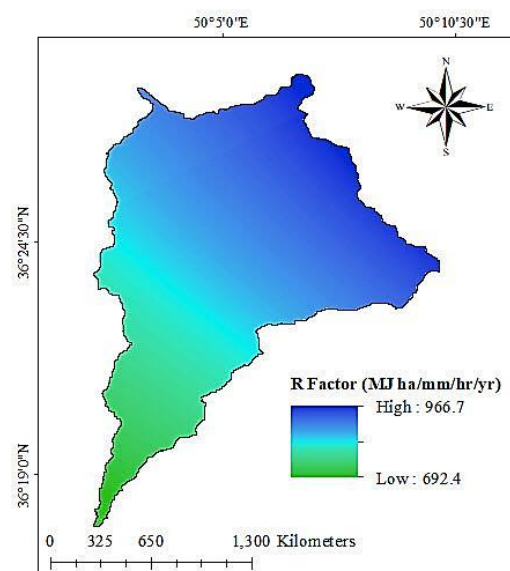


Fig. 2- Spatial variation of R factor in the study area

شکل ۲- توزیع مکانی فاکتور R در سطح حوضه مطالعاتی

$$k = 7.594 \left( 0.0034 + 0.0405 \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\log(D_g) + 1.659}{0.7101} \right)^2 \right] \right) \quad (5)$$

در رابطه فوق، K: میزان حساسیت خاک در برابر جدا شدن ذرات،  $D_g$ : میانگین هندسی قطر ذرات تشکیل دهنده خاک (mm) می باشد و از رابطه ۶ به دست می آید:

$$D_g = \sum f_i \times D_i \quad (6)$$

که در آن  $f_i$ : درصد فراوانی هر ذره (شن، ماسه و رس) و  $D_i$ : قطر هندسی هر ذره (mm) می باشد. با توجه به عدم دسترسی به نقشه خاک حوضه باراجین در این پژوهش از نقشه خاک ارائه شده توسط فائو (در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰) استفاده بعمل آمد که با توجه به توزیع یکنواخت بافت خاک در سطح حوضه (بیش از ۹۴ درصد مساحت حوضه از بافت Sandy Clay تشکیل شده است)، مقدار فاکتور مربوط به فرسایش پذیری خاک در حدود ۰/۰۶۶ برآورد گردید. هرچند لازم به ذکر است که تحقیقات صورت گرفته در این زمینه حاکی از تأثیر کم این فاکتور در مقدار نهایی دارد (Lane et al., 1992; Uddin et al., 2016) و لذا عدم لحاظ نمودن تغییرات مکانی آن نمی تواند تأثیر چندانی بر عملکرد کلی مدل در برداشته باشد.

#### ۲-۲-۴- فاکتور توپوگرافی (LS)

از آنجایی که طول و تندی شیب بر روی میزان رواناب خروجی از حوضه تأثیرگذار است، بنابراین عامل مهمی در تعیین مقدار فرسایش و خاک از دست رفته در سطح حوضه نیز می باشد. این فاکتور بیان کننده

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (3)$$

$$C = \exp \left[ -\alpha \frac{NDVI}{(\beta - NDVI)} \right] \quad (4)$$

در روابط فوق، NIR: باند مادون قرمز نزدیک (در تصاویر MODIS باند ۲)، RED: باند قرمز (در تصاویر MODIS باند ۱)،  $\alpha$  و  $\beta$  پارامترهای بدون بعد هستند که Van der Knijff et al. (1999) مقادیر آن ها را به ترتیب ۱ و ۲ تخمین زده اند. نقشه تغییرات مکانی فاکتور C در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به اینکه هدف از تهیه این تصاویر محاسبه شاخص NDVI می باشد، از تصاویر مربوط به ماه April سال ۲۰۱۶ استفاده گردید که تا حد امکان از کمترین مقدار پوشش ابر برخوردار می باشند. لازم بذکر است برای دسترسی به تصاویر MODIS می توان به لینک زیر مراجعه نمود:

<http://earthexplorer.usgs.gov>

#### ۲-۲-۳- فاکتور فرسایش پذیری خاک (K)

این فاکتور میزان حساسیت خاک را در برابر جدا شدن و انتقال ذرات بیان می کند که این حساسیت به بافت خاک، پایداری خاکدانه ها، خصوصیات شیمیایی و بیولوژیکی آن بستگی دارد (Zhang et al., 2017). برای محاسبه این فاکتور به نقشه خاک محدوده مطالعاتی نیاز می باشد و با استفاده از رابطه ۵ که توسط Renard et al. (1997) و Liu et al. (2001) ارائه شده است، مقدار آن قابل برآورد می باشد:

مطالعه صورت نگرفته است، در این پژوهش مقدار این پارامتر ۱ در نظر گرفته شد.

### ۲-۳- تخمین مقدار رسوب خروجی از حوضه با استفاده از نسبت تحویل رسوب

در حوضه‌های آبریز بزرگ، جمع‌آوری داده‌ها و احداث ایستگاه‌های رسوب‌سنجی با مشکلات زیادی همراه است. بنابراین استفاده از مدل‌هایی همچون RUSLE (که اساساً روش‌هایی برای برآورد مقدار فرسایش می‌باشند و نه مقدار رسوب) و تلفیق آن با مفهومی به نام نسبت تحویل رسوب (SDR)، مناسب‌ترین روش برای محاسبه مقدار رسوب خروجی از یک حوضه می‌باشد. نسبت تحویل رسوب SDR برابر است با نسبت مقدار رسوب خروجی از حوضه به فرسایش تولید شده در آن که به صورت رابطه ۷ تعریف می‌گردد. ارزیابی تحقیقات مختلف حاکی از آن است که مقدار SDR بین صفر تا ۱ متغیر می‌باشد و هرچه مساحت حوضه آبریز افزایش می‌یابد مقدار نسبت تحویل رسوب نیز کاهش می‌یابد (Maidment, 1991; Edwards, 1993; Fernandez et al., 2003).

تأثیر وضعیت توپوگرافی حوضه بر روی میزان فرسایش تولید شده در سطح آن می‌باشد. در واقع این فاکتور میزان خاک از دست رفته را در شیبی با شدت ۹ درصد و طول ۲۲/۶ متر بیان می‌دارد (Renard et al., 1997; Ganasri and Ramesh, 2016). محاسبه این فاکتور روابط مختلفی توسط محققین ارائه شده که بر اساس مؤلفه‌های ژئومورفولوژیکی مانند: شیب، شبکه انباشت جریان (سطوح مشارکت کننده واقع در بالادست یک سلول) و مسیر حرکت جریان سطح حوضه عمل می‌نمایند. در پژوهش حاضر فاکتور توپوگرافی براساس روابطی که در جدول ۳ ارائه گردیده، محاسبه شده است.

### ۲-۲-۵- فاکتور عملیات حفاظت خاک و مدیریت اراضی (P)

این عامل تأثیر اقدامات حفاظتی صورت گرفته در سطح حوضه را بر مقدار فرسایش تولید شده در آن نشان می‌دهد (Thomas et al., 2018). بطور کلی منظور از اقدامات حفاظتی، کشت روی خطوط تراز، کشت نواری، ترانس‌بندی، تناوب زراعی، کود دادن و غیره می‌باشد. با توجه به اینکه عملیات حفاظتی خاصی در حوضه مورد

Table 3- Different equations for calculating RUSLE's topographic factor

جدول ۳- روابط مختلف محاسبه فاکتور توپوگرافی در مدل RUSLE

number	Flow Length factor	Slope factor	Reference
1		$0.065+4.56\sin\theta+65.41(\sin\theta)^2$	$P < 21\%$
		$6.432+(\sin\theta)^{0.79}\times\cos\theta$	$P \geq 21\%$
2	$\left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^{0.4}$	$10.8\sin\theta+0.03$	$P < 9\%$
		$16.8\sin\theta-0.5$	$9\% \leq P < 17.6\%$
		$21.9\sin\theta-0.96$	$P \geq 17.6\%$
3		$(0.065+0.045P+0.0065P^2)$	Wischmeier and Smith (1978)
4		$\left(\frac{\sin\theta}{0.0896}\right)^{1.3}$	Moore and Burch (1986a,b)
5		$LS=0.009P^2+0.0798P$	$P \leq 30\%$
		$LS=0.2558P+3.248$	$P > 30\%$
6		$LS=1.4\left(\frac{A_s}{22.13}\right)^{0.4}\left(\frac{\sin\theta}{0.0896}\right)^{1.3}$	Moore et al. (1991)
7		$LS=(m+1)\left(\frac{2A_s+D^2}{2 \times D \cdot (22.13)}\right)^m \cdot S$	Desmet and Govers (1996)
8		$LS=\left(\frac{CA^{0.5}}{22.13}\right)^{0.5}\left(65.14\sin^2\beta_{CA}+4.56\sin\beta_{CA}+0.065\right)$	Böhner and Selige (2006)

P: شیب سلول (درصد)،  $\theta$ : شیب سلول (درجه)،  $\lambda$ : طول مسیر جریان،  $A_s$ : سطوح مشارکت کننده بالادست (لایه رستری شبکه انباشت جریان) در واحد  $m^2$ : D: ابعاد سلولی لایه رستری (m)، X: ضریب تصحیح طول جریان عبوری از یک سلول لایه رستری، m: شاخص مسیر جریان که با توجه به شیب مسیر مقدار آن بین ۰/۲ تا ۰/۵ متغیر می‌باشد، S: تند و درجه شیب مسیر جریان، CA: مساحت بالادست یک سلول ( $m^2$ ) و  $\beta_{CA}$ : متوسط شیب حوضه بالادست هر سلول.

## ۲-۴- نحوه برآورد رسوب مشاهده‌ای در خروجی حوضه

در ایستگاه‌های هیدرومتری با نمونه‌برداری از آب و سنجش دبی جریان و نیز برآورد غلظت رسوب نمونه، غلظت رسوب به عنوان بار معلق و به صورت وزنی و یا حجمی تعیین می‌گردد. به عبارت دیگر میانگین غلظت رسوب در چند عمق مختلف از یک مقطع رودخانه به عنوان میانگین غلظت مواد معلق نمونه (C) به همراه دبی اندازه‌گیری شده ( $Q_w$ )، در تحلیل مواد رسوبی طبق رابطه ۹ بکار برده می‌شود و مقدار بار معلق ( $Q_s$ ) بدست می‌آید. با برازش روابط رگرسیونی بر زوج داده‌های  $Q_s$  و  $Q_w$  منحنی سنجه رسوب بدست آمده (رابطه ۱۰) و سپس مقدار رسوب خروجی از حوضه برآورد می‌گردد. منحنی‌های سنجه رسوب که به عنوان بهترین خط برازش بین دبی یا غلظت رسوب با دبی جریان و معمولاً در سیستم لگاریتمی می‌باشند، به روش‌های مختلفی تعیین می‌گردند. از مهمترین روش‌های تعیین منحنی‌های سنجه رسوب می‌توان به منحنی سنجه یک خطی، منحنی سنجه دو یا چند خطی و منحنی سنجه یک خطی بر اساس متوسط دسته‌ها اشاره نمود (Arabkhedri et al., 2003; Porhemmat and Domiri Ganji, 2005). در پژوهش حاضر از داده‌های رسوب مشاهداتی اندازه‌گیری شده در ایستگاه هیدرومتری واقع در خروجی حوضه (ایستگاه باراجین) و به روش حد وسط دسته‌ها، برای ارزیابی عملکرد مدل RUSLE، استفاده بعمل آمد:

$$Q_s = 0.0846 \times C \times Q_w \quad (9)$$

$$Q_s = a Q_w^b \quad (10)$$

در روابط فوق  $Q_s$ : بار معلق (تن در روز)،  $Q_w$ : دبی جریان (مترمکعب بر ثانیه)، C: میانگین غلظت مواد معلق (میلی‌گرم در لیتر)، a و b ضرایب معادله رگرسیون.

طبق محاسبات صورت گرفته به روش حد وسط دسته‌ها، مقدار متوسط رسوب خروجی (مجموع بار معلق و بستر) از حوضه آبریز باراجین در حدود ۱/۹۲ تن در هکتار در سال می‌باشد. در پژوهش حاضر از شاخص خطای نسبی برای ارزیابی عملکرد مدل RUSLE جهت تخمین مقدار رسوب خروجی از حوضه استفاده بعمل آمده است که جزئیات به صورت رابطه ۱۱ می‌باشد:

$$ARE = \frac{Y_{calc} - Y_{obs}}{Y_{obs}} \times 100 \quad (11)$$

در این رابطه،  $Y_{calc}$ : مقدار رسوب محاسبه شده توسط مدل RUSLE،  $Y_{obs}$ : مقدار رسوب مشاهده‌ای در نقطه خروجی حوضه به روش تحلیل منحنی سنجه رسوب و  $ARE^{14}$ : قدر مطلق خطای نسبی بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی می‌باشد.

از آنجایی که تعیین روابط بین عوامل مختلف ایجاد فرسایش، تولید رسوب و نسبت تحویل رسوب مشکل بوده و در حوضه‌های مختلف تفاوت می‌باشد، تعیین ضریب نسبت تحویل رسوب با استفاده از روابط تجربی که غالباً وابسته به مساحت حوضه می‌باشند، میسر می‌باشد. در پژوهش حاضر از رابطه ارائه شده توسط Maidment (1991) که حاصل آنالیز داده‌های جمع‌آوری شده از بخش‌های مختلف دنیا (مانند: آمریکا، هندوستان، چین و غیره) می‌باشد، استفاده شده است (رابطه ۸):

$$SDR = \frac{Y}{E} \quad (7)$$

$$SDR = 0.035A^{-0.3} \quad (8)$$

که در روابط فوق، A: مساحت حوضه ( $km^2$ )، Y: مقدار رسوب خروجی (برحسب تن) و E: مقدار فرسایش ایجاد شده (برحسب تن) در حوضه می‌باشند. در این پژوهش ابتدا حوضه مورد مطالعه به زیرحوضه‌ها و واحدهای هیدرولوژیکی (HRU) کوچکتر تقسیم و سپس ورودی‌های مدل RUSLE برای هر HRU تعیین و به تعداد HRU‌های موجود مدل اجرا و مقادیر فرسایش برای هر کدام تعیین گردید. سپس طبق رابطه ۸ و متناسب با مساحت هر زیرحوضه، نسبت تحویل رسوب آن محاسبه گردید. در نهایت با تجمیع مقادیر رسوب خروجی از هر زیرحوضه (با توجه به وضعیت شبکه جریان در حوضه مورد مطالعه) مقدار رسوب کل خروجی از حوضه باراجین بدست آمد. در شکل ۴ نمایی از وضعیت HRU‌های محاسبه شده در سطح حوضه باراجین نشان داده شده است.

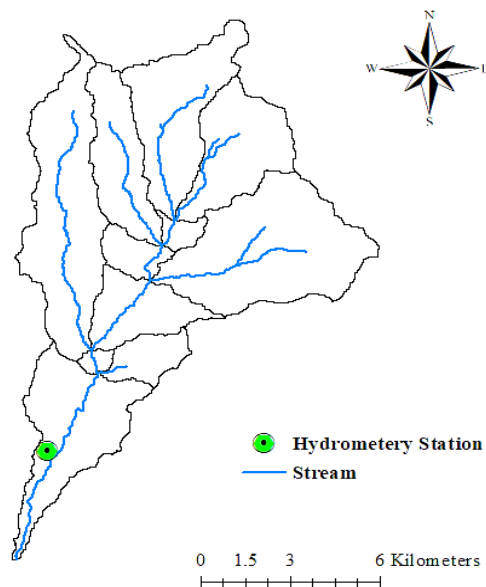


Fig. 4- Calculated HRUs in the Barajin catchment

شکل ۴- HRU‌های محاسبه شده در سطح حوضه آبریز باراجین

### ۳- نتایج

#### ۳-۱- ارزیابی روش‌های مختلف محاسبه فاکتور توپوگرافی بر مقدار رسوب خروجی از حوضه آبریز باراجین

اثر انتخاب روش مورد استفاده برای محاسبه شاخص توپوگرافی در برآورد میزان رسوب خروجی از حوضه به روش RUSLE در شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین میزان قدر مطلق خطای نسبی ناشی از هر کدام از روشها در شکل ۶ قابل رویت می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌گردد، نتایج حاصل از روابط ۶ (Moore et al., 1991)، ۷ (Desmet and Govers, 1996) و ۸ (Böhner and Selige, 2006) به دلیل استفاده از مولفه شبکه انباشت جریان<sup>۱۵</sup> نتایج چندان قابل قبولی را بدست ندادند؛ زیرا طبق مفهوم مورد استفاده در مدل RUSLE، پارامتر طول شیب مبین طول مسیر حرکت جریان در راستای شیب می‌باشد و از آنجائی که در بستر GIS محاسبات به صورت سلول به سلول انجام می‌شود، استفاده از پارامتر طول بدون توجه به مقدار شیب مسیر می‌تواند منجر به برآورد فرسایش و متعاقب آن رسوب بسیار زیادی گردد. به عبارت دیگر پارامتر As که در روابط مذکور وجود دارد مبین سطوح مشارکت‌کننده واقع در بالادست یک سلول می‌باشد که با تقسیم آن بر عرض سلول پارامتر طول شیب قابل محاسبه می‌باشد. اما از آنجایی که نقشه رستری شیب در محیط GIS سلول به سلول محاسبه می‌شود، تلفیق این دو لایه که یکی به صورت طولی و دیگری به صورت سلولی می‌باشد، کاملاً اشتباه بوده و به همین علت استفاده از چنین روابطی در ساختار مدل RUSLE به هیچ‌وجه توصیه نمی‌شود. طبق محاسبات بعمل آمده در این پژوهش (شکل ۵)، خطای نسبی ناشی از کاربرد روابط ۶ تا ۸ در برآورد مقدار رسوب خروجی از حوضه آبریز باراجین بیش از ۴۰۰ درصد می‌باشد و به همین علت از ارائه آنها در شکل ۶ خودداری بعمل آمد. بر خلاف

روابط مذکور، رابطه‌های ۲ و ۴ به ترتیب با دارا بودن خطای نسبی در حدود ۱/۶ و ۹/۹ درصد (کمتر از ۱۰ درصد، Moriasi et al., 2007) به عنوان مناسب‌ترین روابط برای استفاده در مدل RUSLE بشمار می‌آیند. رابطه ۳ نیز اگرچه دارای خطایی نسبی در حدود ۳۰ درصد می‌باشد، اما نسبت به روابط دیگری همچون روابط ۱ (Wischmeier and Smith, 1978) و ۵ (Edeso et al., 1995) که مقدار رسوب را با خطای بسیار زیادی برآورد کرده‌اند، دارای عملکرد به مراتب بهتری می‌باشد. بررسی ساختار این دو رابطه حاکی از وجود پارامترهایی با توان ۲ در رابطه شیب می‌باشد که همین مسأله موجب برآورد بالای فاکتور توپوگرافی و متعاقب آن افزایش فرسایش ایجاد شده در سطح حوضه می‌گردد. به عبارت دیگر هرچه شیب سلول‌های تشکیل‌دهنده یک حوضه بالا باشد، به علت پارامترهای افزایشی مذکور، مقدار فاکتور توپوگرافی نیز بسیار زیاد برآورد خواهد گردید. بررسی نقشه رستری شیب حوضه مطالعاتی حاکی از آن است که شیب این حوضه با دارا بودن محدوده تغییرات بین ۰ تا ۱۰۸ درصد و متوسط ۲۷ درصد در رده حوضه‌های پرشیب قرار داشته و لذا استفاده از دو رابطه مذکور در چنین حوضه‌هایی توصیه نمی‌گردد. همچنین لازم به ذکر است که اگرچه رابطه ۳ نیز دارای پارامترهایی با توان ۲ در رابطه شیب می‌باشد، ولی به علت وجود یک ضریب کسری در آن که خاصیت کاهش‌دهنده دارد، موجب عملکرد بهتر مدل RUSLE شده است.

#### ۳-۲- اثر توان تفکیک مدل رقومی ارتفاعی بر برآورد میزان رسوب

با توجه به نقش مهم پارامتر شیب و طول شیب (مسیر حرکت جریان) در محاسبه فاکتور توپوگرافی مورد نیاز مدل RUSLE، این سؤال اساسی مطرح می‌گردد که روند تغییرات فاکتور توپوگرافی (به

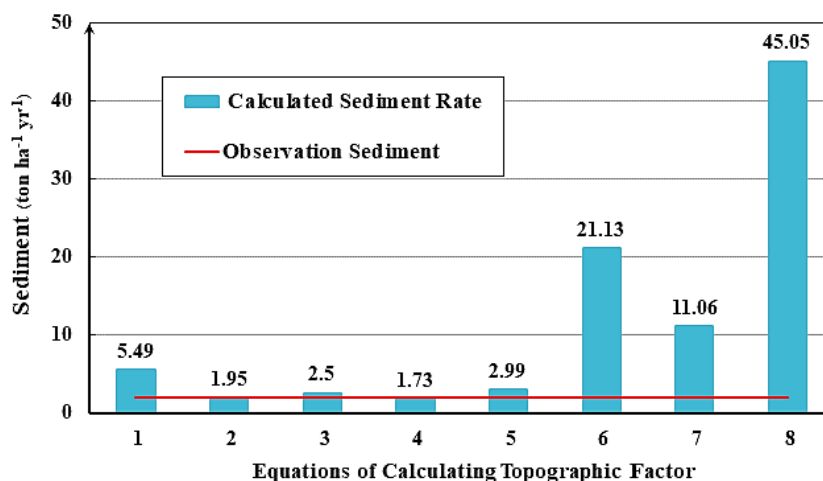


Fig. 5- The effect of different equations for calculating topographic factor on sediment yield

شکل ۵- اثر استفاده از روابط مختلف محاسبه فاکتور توپوگرافی بر مقدار رسوب خروجی از حوضه



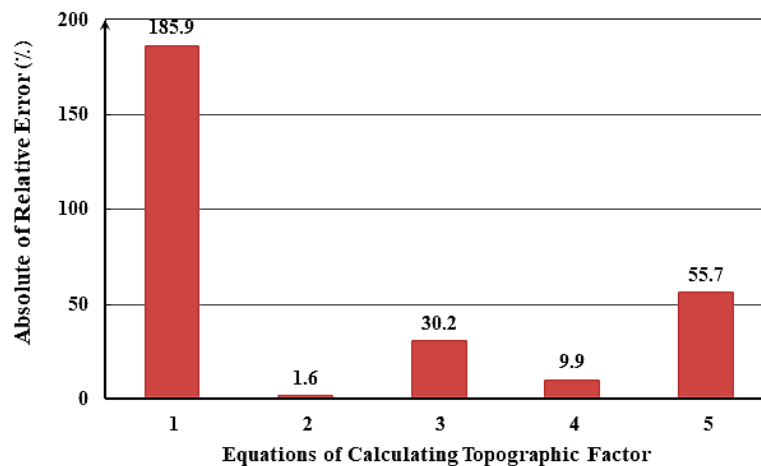


Fig. 6- The relative error in sediment yield due to use of different topographic factor's equations

شکل ۶- میزان خطای نسبی ناشی از کاربرد معادلات مختلف برآورد فاکتور توپوگرافی در برآورد مقدار رسوب خروجی از حوضه

روش‌های مختلف) نسبت به تغییر ابعاد سلول DEM چگونه می‌باشد و آیا با تغییر توان تفکیک DEM می‌توان عملکرد مدل RUSLE را تا حدود زیادی بهبود بخشید یا خیر؟ برای بررسی تأثیر توان تفکیک DEM بر روی عملکرد مدل RUSLE از DEM‌های با ابعاد سلولی ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ متری استفاده و اقدام به محاسبه فاکتور توپوگرافی به روش‌های مختلف و میزان رسوب خروجی از حوضه گردید (شکل ۷).

همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، در روابط ۱ تا ۵ با کاهش توان تفکیک DEM روند تغییرات رسوب محاسباتی تقریباً از یک روند کاهشی تبعیت می‌کند که علت اصلی کاهش شیب سلول‌ها در اثر افزایش ابعاد سلولی می‌باشد. به عنوان مثال، رابطه ۱ که در ابعاد سلولی ۳۰ متری مقدار رسوب را نسبت به مقدار مشاهده‌ای در حدود ۱۸۰ درصد بیش برآورد کرده بود، در ابعاد سلولی بالاتر از ۱۲۰ متر (با توجه به اینکه در نتیجه کاهش شیب حوضه معادله مورد استفاده با توجه به جدول ۱ تغییر یافته (معادله مربوط به شیب‌های کمتر از ۲۱ درصد))، مقدار رسوب را نسبت به مقدار مشاهداتی با اختلافی در حدود ۸/۱ درصد برآورد می‌نماید. همچنین رابطه ۲ تنها برای ابعاد سلولی کمتر از ۶۰ متر نتایج خوبی را در برداشته و با افزایش ابعاد سلولی، میزان خطای ناشی از کاربرد آن از ۲۰ درصد نیز تجاوز می‌نماید. به عبارت دیگر این رابطه برای حوضه‌های با شیب زیاد و بیش از ۲۳ درصد همانند حوضه باراجین مناسب می‌باشد، زیرا با افزایش توان تفکیک DEM با کاهش شیب سلول‌ها منجر به برآورد مقادیر به مراتب کمتری برای فاکتور توپوگرافی و متعاقب آن رسوب خروجی از حوضه می‌گردد. در رابطه ۳ نیز متوسط خطای نسبی ناشی از کاربرد

روش‌های مختلف) نسبت به تغییر ابعاد سلول DEM چگونه می‌باشد و آیا با تغییر توان تفکیک DEM می‌توان عملکرد مدل RUSLE را تا حدود زیادی بهبود بخشید یا خیر؟ برای بررسی تأثیر توان تفکیک DEM بر روی عملکرد مدل RUSLE از DEM‌های با ابعاد سلولی ۶۰ متر برای محاسبه رسوب خروجی از حوضه در حدود ۶/۲ درصد می‌باشد و این بدین معنی است که این رابطه برای حوضه‌های با شیب کمتر از ۲۳ درصد مناسب می‌باشد. همچنین رابطه ۴ نیز با دارا بودن متوسط خطای نسبی در حدود ۱۶/۱ درصد، از وابستگی به نسبت کمتری به توان تفکیک DEM برخوردار می‌باشد. طبق محاسبات صورت گرفته، برای ابعاد سلولی کمتر از ۹۰ متر خطای نسبی برآورد رسوب کمتر از ۱۰ درصد و برای ابعاد سلولی بزرگتر از ۹۰ متر این مقدار بین ۱۵/۶ تا ۲۳/۴ درصد متغیر می‌باشد.

بر خلاف روابط مذکور، نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد روابط ۶ تا ۸ حاکی از وجود یک روند افزایشی بین توان تفکیک DEM و مقدار رسوب محاسباتی توسط مدل RUSLE می‌باشد. محاسبات صورت گرفته حاکی از آن است که متوسط خطای ناشی از کاربرد این روابط در برآورد رسوب در DEM‌های با ابعاد سلولی مختلف، همواره بزرگتر از ۴۰۰ درصد می‌باشد. همانطور که پیشتر نیز عنوان شد، علت اصلی عملکرد ضعیف این روابط در تخمین میزان رسوب خروجی از حوضه، استفاده از لایه رستری انباشت جریان به جای پارامتر طول شیب می‌باشد. در یک جمع‌بندی کلی می‌توان چنین عنوان نمود که روابط ۲، ۳ و ۴ با دارا بودن متوسط خطای نسبی به ترتیب ۱۲/۵، ۱۶/۱ و ۱۷/۶ درصد، مناسب‌ترین روابط برای محاسبه فاکتور توپوگرافی می‌باشند. همچنین این روابط از وابستگی به مراتب کمتری به توان تفکیک DEM برخوردار می‌باشند و لذا عدم توجه به این مسأله و انتخاب یک ابعاد سلولی بین ۳۰ تا ۲۰۰ متر خطای زیادی را بر خروجی مدل RUSLE تحمیل نخواهد کرد.

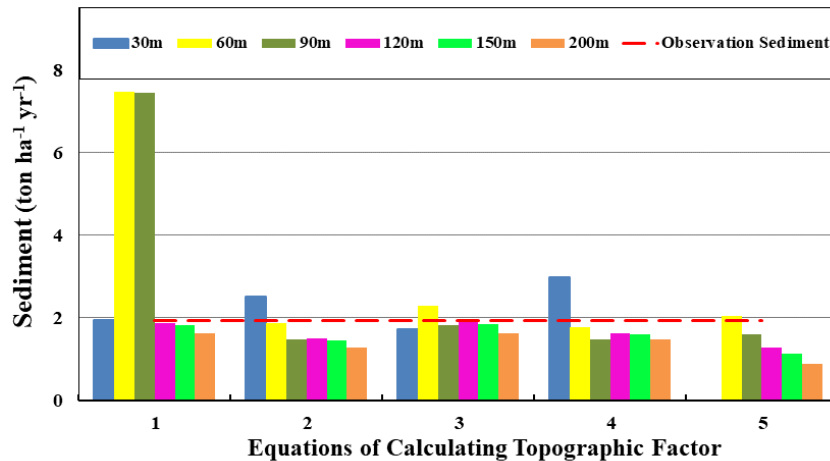


Fig. 7- The effect of DEM resolution on the amount of sediment yield from different methods of calculating topographic factor

شکل ۷- اثر توان تفکیک DEM بر مقدار رسوب بدست آمده از روش های مختلف برآورد فاکتور توپوگرافی

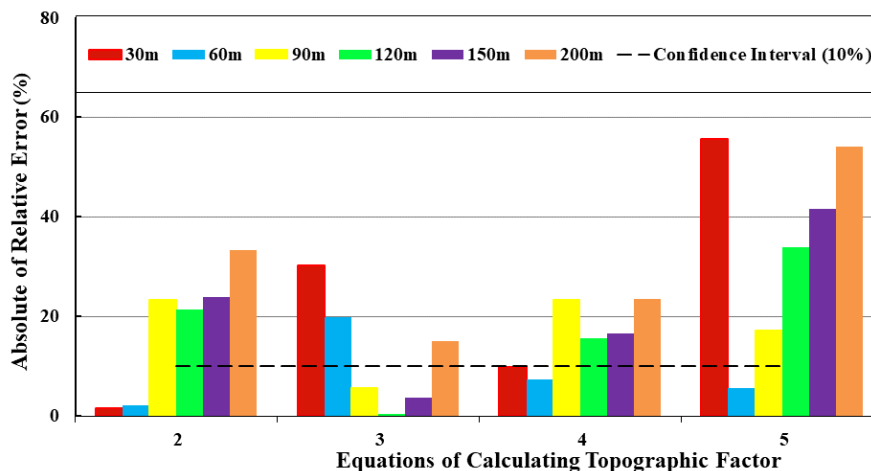


Fig. 8- The effect of DEM resolution and different methods of calculating topographic factor on the relative error rate of sediment yield

شکل ۸- اثر توان تفکیک DEM و روش های مختلف برآورد فاکتور توپوگرافی بر خطای نسبی برآورد رسوب خروجی از حوضه

توپوگرافی و همچنین اثر توان تفکیک DEM بر رسوب محاسبه شده توسط مدل RUSLE پرداخته شده است. برای ارزیابی عملکرد مدل RUSLE در حالت های مختلف نیز از مقدار رسوب مشاهداتی بدست آمده از تحلیل منحنی سنج رسوب در ایستگاه هیدرومتری باراجین (واقع در انتهای حوضه) استفاده شده است.

نتایج بدست آمده به خوبی گویای این مطلب است که در حوضه پرشیبی همچون حوضه آبریز باراجین روابط ارائه شده توسط Moore and Burch (1986a,b) و McCool et al. (1989) محاسبه فاکتور توپوگرافی، منجر به تخمین مناسب و صحیح مقدار رسوب خروجی از حوضه می گردد. همچنین روابط ارائه شده توسط

#### ۴- بحث و نتیجه گیری

در محاسبه فرسایش و رسوب به کمک مدل RUSLE، فاکتور توپوگرافی که متشکل از پارامترهای شیب و طول شیب می باشد، از اهمیت بسیار زیادی برخوردار می باشد. در حال حاضر روابط مختلفی توسط محققین برای محاسبه این فاکتور ارائه شده که هر کدام نسبت به یکدیگر نتایج کاملاً متفاوتی را بدست می دهند و عموماً باعث سردرگمی بسیاری از محققین و مهندسی می گردد. از سوی دیگر با توجه به اهمیت نقشه DEM در محاسبه فاکتور توپوگرافی، مسأله مهمی همچون اثر توان تفکیک DEM نیز مطرح می گردد. در پژوهش حاضر به ارزیابی اثر استفاده از روش های مختلف برآورد فاکتور

- 13- Normalized Difference Vegetation Index  
 14- Absolute Relative Error  
 15- Flow Accumulation

## ۵- مراجع

- Alatorre LC, Beguería S, Lana-Renault N, et al. (2012) Soil erosion and sediment delivery in a mountain catchment under scenarios of land use change using a spatially distributed numerical model. *Hydrology and Earth System Science* 16:1321-1334
- ArabKhedri M, HakimKhani S, NikKami D (2003) Comparison of several statistical methods for estimating the suspended load of a zone with snow and rainy regimes. Ministry of Agricultural Jihad, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Final Report of Research Project (In Persian)
- Azizian A, Shokoohi AR (2014) Evaluation the effect of DEM resolution and the stream delineation threshold on the results of the precipitation-runoff geomorphological kinematic wave-based model (KW-GIUH). *Journal of Water S.A* 41(1):61-70
- Böhner J, Selige T (2006) Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalization. *Göttinger Geographische Abhandlungen* 115:13-28
- Butt MJ, Waqas A, Mahmood R, CSHRG (2010) The combined effect of vegetation and soil erosion in the water resource management. *Water Resources Management* 24:3701-3714
- Desmet PJJ, Govers G (1996) A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil Water Conserv* 51:427-433
- Edeso JM, Marauri P, Merino A (1995) Aplicaciones de los sistemas de información geográfica en los estudios geomorfológicos y medioambientales: el mapa sintético de riesgos potenciales y el mapa de erosión. *Lurralde: investigación y espacio* 18:257-291
- Edwards K (1993) Soil erosion and conservation in Australia. in: Pimentel, D (Ed), *World Soil Erosion and Conservation*, Cambridge
- Fernandez C, Wu JQ, Mccool DK, Stockle CO (2003) Estimating water erosion and sediment yield with GIS, RUSLE, and SEDD. *Journal of Soil and Water Conservation* 58:128-136
- Ferro V, Giordano G, Lovino M (1991) Isoerosivity and erosion risk map for Sicily. *Hydrological Sciences Journal* 36:549-564

Moore et al. (1991), Desmet and Govers (1996) و Böhner and Selige (2006) به علت استفاده از مؤلفه شبکه انباشت جریان، مقادیر فرسایش در سطح حوضه و نیز رسوب خروجی از آن را با خطای نسبی بیش از ۴۰۰ درصد برآورد می‌نمایند.

همچنین ارزیابی اثر توان تفکیک DEM بر عملکرد روش‌های مختلف برآورد فاکتور توپوگرافی نیز حاکی از وابستگی قابل توجه آنها به تغییر ابعاد سلولی DEM مورد استفاده می‌باشد. طبق محاسبات بعمل آمده، برآورد فاکتور توپوگرافی بر اساس روابط ارائه شده توسط Moore and Burch, Wischmeier and Smith (1978) و McCool et al. (1989) در DEM‌های با توان تفکیک مختلف با دارا بودن متوسط خطای نسبی به ترتیب ۱۲/۵، ۱۶/۱ و ۱۷/۶ درصد، مناسبترین روابط برای محاسبه فاکتور توپوگرافی می‌باشند. به عبارت بهتر در صورت استفاده از روابط مذکور و عدم توجه به مسأله توان تفکیک DEM، خطای بسیار زیادی بر مقدار رسوب محاسبه شده توسط مدل RUSLE تحمیل نخواهد گردید.

به عنوان یک جمع‌بندی نهایی می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که نوع رابطه مورد استفاده برای محاسبه فاکتور توپوگرافی که خود متشکل از دو عامل شیب و طول شیب می‌باشد، از اهمیت بسیاری زیادی برخوردار می‌باشد به طوری که عدم توجه به این مسأله می‌تواند خطای نسبی در حدود ۲ تا بیش از ۴۰۰ درصد در مقدار رسوب محاسباتی توسط مدل ایجاد نماید. همچنین عدم توجه به مسأله مقیاس و توان تفکیک DEM می‌تواند مقادیر فرسایش در سطح حوضه و نیز رسوب خروجی از آن را با عدم قطعیت بسیار بالایی روبرو نماید. لذا توصیه می‌شود در حوضه‌هایی که فاقد آمار اندازه‌گیری شده رسوب (برای ارزیابی عملکرد مدل RUSLE) می‌باشند، به نتایج بدست آمده در این پژوهش بخصوص روش محاسبه فاکتور توپوگرافی و اثر توان تفکیک DEM، توجه ویژه‌ای صورت گیرد.

## پی‌نوشت‌ها

- 1- Universal Soil Loss Equation
- 2- Modified Universal Soil Loss Equation
- 3- Pacific Southwest Inter-Agency Committee
- 4- Modified Pacific Southwest Inter-Agency Committee
- 5- Erosion Potential Method
- 6- Revised Universal Soil Loss Equation
- 7- Nethravathi
- 8- Yangou
- 9- Multiple Flow Direction (MFD)
- 10- Single Flow Direction (SFD)
- 11- Idaho
- 12- Digital Elevation Model

- hydrometer stations-Jarrahi. Third National Conference on Erosion and Sediment (In Persian)
- Renard KG, Foster GR, Weesies GA, et al. (1997) Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). In: Agriculture Handbook No. 703. USDA, Washington DC
- Renard KG, Freimund JR (1994) Using monthly precipitation data to estimate the R factor in the revised USLE. *Journal of Hydrology* 157:287-306
- Rezaei P, Faridi P, Ghorbani M, Kazemi M (2014) Estimation of soil erosion using the RUSLE model and identification of the most effective factor in watershed Gabrik-South East of Hormozgan Province. *Journal of Quantitative Geomorphological Researches* 3 (In Persian)
- Saha SK (2003) Water and wind induced soil erosion assessment and monitoring using remote sensing and GIS. *Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology* 315-330
- Shokoohi AR, Beheshti S (2014) Using a geomorphologic model based on power flow for zoning erosion and sedimentation in catchment areas. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 45:509-518 (In Persian)
- Tang Q, Xu Y, Bennett SJ, Li Y (2014) Assessment of soil erosion using RUSLE and GIS: a case study of the Yangou watershed in the Loess Plateau, China. *Environmental Earth Sciences* 73:1715-1724
- Thomas J, Joseph S, Thrivikramji KP (2018) Assessment of soil erosion in a tropical mountain river basin of the southern Western Ghats, India using RUSLE and GIS. *Geoscience Frontiers* 9:893-906
- Uddin K, Murthy MSR, Wahid SM, Matin MA (2016) Estimation of soil erosion dynamics in the koshi basin using GIS and remote sensing to assess priority areas for conservation. *PLoS ONE* 11(3):e0150494, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150494>
- Van der Knijff J, Jones RJA, Montanarella L (1999) Soil erosion risk assessment in Italy. European Soil Bureau, European Commission
- Wischmeier WH, Smith DD (1978) Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. In: Agriculture Handbook No. 537. USDA, Washington, DC.
- Zhang H, Wei J, Yang Q, et al. (2017) An improved method for calculating slope length ( $\lambda$ ) and the LS parameters of the revised universal soil loss equation for large watersheds. *Geoderma* 308:36-45
- Ganasri BP, Ramesh H (2016) Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS - A case study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers* 7:953-961
- Gandasasmita K (1987) Contribution to geo-information system operation for prediction of erosion applied to a large catchment in South Sumatra, Indonesia. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences
- Kogan F (1993) United States droughts of late 1980's as seen by NOAA polar orbiting satellites. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*
- Liu B, Nearing M, Risse L (1994) Slope gradient effects on soil loss for steep slopes. *Transactions of the ASAE* 37:1835-1840
- Liu B, Xie Y, Zhang K (2001) Soil loss prediction model. China Science and Technology Press, Beijing (in Chinese)
- Maidment DR (1991) GIS and hydrological modelling. In Proc. of First Intl. Symposium/ Workshop on GIS and Environmental Modelling (ed. by M.F. Goodchild, B.O. Parks and L.T. Steyaert), Boulder, Colorado, Sept., 1991, Oxford University Press, New York
- McCool D, Foster G, Mutchler C, Meyer L (1989) Revised slope length factor for the universal soil loss equation. *Transactions of the ASAE* 32:1571-1576
- Moore ID, Burch GJ (1986a) Physical basis of the length-slope factor in the universal soil loss equation. *Soil Science Society of America Journal* 50:1294-1298
- Moore ID, Burch GJ (1986b) Modeling erosion and deposition, Topographic effects. *Trans ASAE* 29:1624-1630
- Moore ID, Grayson RB, Landson AR (1991) Digital terrain modeling, a review of hydrological, geomorphological and biological applications. *Hydrological Processes* 5:3-30
- Morgan RPC, Nearing MA (2011) The future role of information technology in erosion modeling. *Hand Book of Erosion Modeling*
- Mutua BM, Klik A, Loiskandl W (2006) Modelling soil erosion and sediment yield at a catchment scale: the case of Masinga catchment, Kenya. *Land Degradation and Development* 17:557-570
- Porhemmat J, DomiriGanji M (2005) Analysis of the relationships of sediment production in hendigan