



## Quantifying Critical Area and Investigating its Relationship with the Physio-Climatic Characteristics of the Second and Third Order River Basins in Iran

K. Ehsani<sup>1</sup> and M. Danesh-Yazdi<sup>2\*</sup>

### Abstract

If the channel network map of a region is not suitable for modeling water and solute transport processes, the underlying river network should be extracted by the relating algorithms given the critical area as the input. The goal of this study was to (1) extract the critical area in the second and third order river basins in Iran, and (2) investigate the relationship between the critical area and physio-climatic characteristics of the basins with the aim of determining the most dominant factors controlling the critical area. To this end, the closest critical area to reality was determined by minimizing the difference between the drainage density of the extracted river networks using the D8 method and the one known as the base map of the river networks. Results indicate that the spatial resolution of the digital elevation model between 30 m to 200 m does not impose significant impact on the magnitude of the estimated critical area. In addition, direct relationship holds between the critical area and the soil permeability and erosion rate, while the correlation is negative between the critical area and the vegetation density. Critical area is smaller and larger in the temperate and warmer climates, respectively. Furthermore, increase in the average slope and the average annual precipitation height decreases the critical area. Nevertheless, the correlation between the critical area and the studied physio-climatic quantities is insignificant, highlighting the need to determine the critical area of a given river basin using approaches other than physical-mathematical relationships.

**Keywords:** Critical Area, Drainage Density, Physio-Climatic Characteristics, River Basin, River Network Extraction.

Received: November 25, 2019

Accepted: June 24, 2020

## استخراج مساحت بحرانی و بررسی ارتباط آن با خصوصیات فیزیکی و اقلیمی حوضه‌های آبریز درجه دوم و سوم ایران

کیارش احسانی<sup>۱</sup> و محمد دانش یزدی<sup>۲\*</sup>

### چکیده

چنانچه نقشه‌ی شبکه‌ی رودخانه‌ی یک منطقه به طور مناسب برای مدل‌سازی فرایندهای انتقال آب یا املاح در اختیار نباشد، این شبکه را می‌باید با استفاده از الگوریتم‌های استخراج شبکه‌ی رودخانه و با تعیین مساحت بحرانی به عنوان پارامتر کلیدی ورودی استخراج کرد. هدف این پژوهش، (۱) استخراج مساحت بحرانی در حوضه‌های آبریز درجه دوم و سوم ایران و (۲) بررسی ارتباط بین آن با ویژگی‌های فیزیکی-اقلیمی حاکم بر حوضه‌ها با هدف تعیین مهمترین عوامل کنترل‌کننده‌ی مساحت بحرانی بوده است. به این منظور، نزدیکترین مساحت بحرانی به واقعیت در هر یک حوضه‌های آبریز درجه دوم و سوم ایران با مقایسه‌ی چگالی زهکشی شبکه‌ی رودخانه‌ی استخراج شده به کمک روش D8 و چگالی زهکشی آخرین نسخه‌ی شبکه‌ی رودخانه‌های کشور به عنوان نقشه‌ی مبنا تعیین گردید. طبق نتایج، قدرت تفکیک مکانی مدل رقمی ارتفاعی از ۳۰ متر تا ۳۰۰ متر تأثیر قابل ملاحظه‌ای در تخمین مقدار مساحت بحرانی ندارد. همچنین، مساحت بحرانی با میزان نفوذپذیری، رابطه‌ای مستقیم و با تراکم پوشش گیاهی، رابطه‌ای معکوس دارد. مقدار مساحت بحرانی در اقلیم‌های معتدل، بزرگتر و در نواحی گرم‌تر، کوچکتر است. همچنین، افزایش مقدار شیب متوسط حوضه و ارتفاع متوسط بارش سالانه، باعث کاهش مقدار مساحت بحرانی می‌شود. با این وجود، همبستگی بین مساحت بحرانی با تمام کمیت‌های فیزیکی و اقلیمی بررسی شده غیرمعتاد است که این مشاهده حاکی از لزوم استخراج مساحت بحرانی حاکم بر یک حوضه‌ی آبریز از روش‌هایی به غیر از روابط فیزیکی-ریاضی می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** استخراج شبکه رودخانه، چگالی زهکشی، حوضه آبریز، خصوصیات فیزیکی و اقلیمی، مساحت بحرانی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۹/۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۴/۴

1- B.Sc. Graduate of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Sharif University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Sharif University, Tehran, Iran. Email: danesh@sharf.edu

\*- Corresponding Author

۱- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.

\*- نویسنده مسئول  
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پائیز ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

## ۱- مقدمه

الگوریتم پیشنهادی توسط Kirkby (1976) بر مبنای بررسی مدل‌های تصادفی استخراج شبکه‌ی رودخانه است که در آن‌ها تشکیل شبکه‌های رودخانه با توپولوژی‌های مختلف دارای احتمال مساوی است. اصلی‌ترین چالش این روش‌ها، وجود سرشاخه‌های متعدد در شبکه‌های رودخانه‌ی استخراج شده است که منطبق بر واقعیت نمی‌باشند. برای رفع این محدودیت، می‌باید معیارهایی به منظور تعیین سرشاخه‌های واقعی تعیین شوند که بر اساس قیود مربوط به مساحت زیرحوضه‌های زهکشی شونده توسط هر رودخانه، حداکثر عرض سرشاخه‌ها و وجود حداقل مساحت زهکشی در بالادست سرشاخه‌ها استوار باشند. مهمترین قید در این میان، وجود حداقل مساحت زهکشی لازم برای تشکیل سرشاخه‌ی یک رودخانه است که به آن مساحت بحرانی یا مساحت آستانه گفته می‌شود. از آنجا که انجام عملیات میدانی دقیق‌ترین و مطمئن‌ترین روش برای تعیین مساحت بحرانی در یک منطقه است، محدودیت‌های مرتبط با این عملیات اهمیت به‌کارگیری روش‌های نوآورانه و در عین حال خودکار را برای استخراج شبکه رودخانه نمایان می‌سازد (Lashermes et al., 2007; Passalacqua et al., 2010).

با ظهور مدل‌های رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی بسیار بالا (مانند داده‌های LiDAR)، روش‌های پیشرفته‌ای مانند تبدیل موجک امکان استخراج شبکه رودخانه با دقت بالا را فراهم کرده‌اند (Passalacqua et al., 2010). با این حال، این روش‌ها با دو چالش عمده مواجه هستند. اول اینکه هزینه‌ی محاسباتی این روش‌ها بسیار بالا بوده و در عمل، امکان استخراج شبکه‌ی رودخانه برای حتی حوضه‌های آبریز در مقیاس کوچک نیز امکان‌پذیر نمی‌باشد. همچنین، برای عملیات صحت‌سنجی محل شروع سرشاخه‌ها، نیاز به داده‌های میدانی است که این داده‌های عمدتاً در دسترس نمی‌باشند. بنابراین، سایر روش‌های استخراج شبکه‌ی رودخانه که متکی به در نظر گرفتن یک مقدار ثابت مساحت بحرانی برای تشکیل سرشاخه‌های شبکه‌ی رودخانه هستند، کم‌کم بیشترین کاربرد را دارند (McMaster, 2002; O'Callaghan and Mark, 1984; Tarboton et al., 1991). از رایج‌ترین این روش‌ها، الگوریتم تعیین مسیر حرکت آب با نام D8 است که جهت حرکت آب در هر نقطه از نقشه‌ی رقومی ارتفاعی را به صورتی تعیین می‌کند که آب به چپتی با ارتفاعی پایین‌تر از نقطه‌ی موجود که دارای شیب بیشتری است، حرکت کند (Garbrecht and Martz, 1997). سپس به منظور تعیین محل شروع سرشاخه‌ها، مساحت بحرانی را به صورت پارامتر ورودی دریافت می‌کند که چنانچه به درستی انتخاب نشود، منجر به اضافه یا کم برآورد شدن تعداد سرشاخه‌های شبکه‌ی رودخانه می‌شود. نتیجه‌ی

شبکه‌ی رودخانه در یک منطقه به طور سنتی با رقومی کردن تصاویر حاصل از سنسور از دور و بعضاً به کمک داده‌های میدانی استخراج می‌شود که تا به اکنون دقیق‌ترین روش تعیین حل تشکیل و مسیر رودخانه‌ها می‌باشد. با این حال، کیفیت شبکه‌ی رودخانه‌ی استخراج شده تا حد زیادی به قدرت تفکیک مکانی تصویر و همچنین دقت عملیات رقومی‌سازی بستگی دارد. وجود عواملی مانند تراکم بالای درختان و گل‌آلود بودن آب، چالشی جدی برای رقومی‌سازی رودخانه با استفاده از عکس‌های هوایی یا ماهواره‌ای است. همچنین، عدم امکان دسترسی به مناطق صعب‌العبور و تعدد سرشاخه‌ها، ممکن است انجام عملیات میدانی و گسترده را غیرعملی سازد. بنابراین، چنانچه شبکه‌ی رودخانه در یک حوضه‌ی آبریز از کیفیت کافی برخوردار نباشد، این شبکه می‌باید به کمک مدل‌های رقومی ارتفاعی و با استفاده از الگوریتم‌های تعیین شبکه رودخانه استخراج شود. علاوه بر این، روش‌های آزمودن وجود ویژگی، خود تشابهی در یک شبکه‌ی رودخانه (که شرط لازم برای استفاده از روابط هیدرولیکی-هندسی در حوضه‌های آبریز است) (Zanardo et al., 2013; Danesh-Yazdi et al., 2017) انجام برخی مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی برای مطالعه‌ی چگونگی انتقال آب، املاح و رسوب در حوضه‌های آبریز (Czuba et al., 2015) و تحلیل شبکه‌ی رودخانه به کمک تئوری گراف (Tejedor et al., 2015a, 2015b) متکی بر فرض وجود الگویی دودویی در ساختار توپولوژیکی شبکه‌ی رودخانه است. بنابراین، اگر در یک شبکه‌ی رودخانه‌ی رقومی شده، حلقه‌های بسته‌ی جریان وجود داشته باشند، به جای حذف این حلقه‌ها به طور دستی که بسیار زمان‌بر است می‌توان از الگوریتم‌های استخراج شبکه‌ی رودخانه استفاده نمود.

تاکنون روش‌های زیادی برای تعیین محل شروع سرشاخه‌ها، استخراج شبکه رودخانه و صحت‌سنجی دقت آن‌ها توسعه داده شده است (Costa-Cabral and Burges, 1994; Giannoni et al., 2005; Hancock and Evans, 2006; Liu et al., 2014; Montgomery and Dietrich, 1988; Montgomery and Foufoula-Georgiou, 1993; Orlandini et al., 2011; Tarboton, 1997; Tarboton et al., 1991). در این زمینه، محققانی چون O'Callaghan and Mark (1984) را می‌توان از پیشگامان استخراج شبکه‌ی رودخانه بر مبنای مدل‌های رقومی ارتفاعی دانست. الگوریتم ارائه شده توسط آن‌ها ضمن بر طرف نمودن هر گونه خطا در داده‌ی ثبت شده در مدل رقومی ارتفاعی، به ارزیابی تمامی چالاب‌ها و مسیرهای موجود و نهایتاً استخراج آن دسته از مسیرهای زهکشی می‌پردازد که با اطلاعات خطوط هم‌ارتفاع هماهنگی دارند. همچنین،

سرشاخه‌ی رودخانه در تمامی زیرحوضه‌های درجه دوم و سوم ایران است. طبق بررسی‌های صورت گرفته، اطلاعاتی از نزدیکترین مساحت بحرانی مربوط به انواع شبکه‌ی رودخانه در سطح کشور وجود ندارد و بنابراین نوآوری این پژوهش در استخراج این اطلاعات برای اولین بار می‌باشد. همچنین، بررسی ارتباط بین مساحت بحرانی و ویژگی‌های اقلیمی و فیزیکی حاکم بر حوضه‌های آبریز درجه دوم و سوم ایران (شامل نوع کاربری اراضی، نوع اقلیم، شیب سرزمین، میانگین بارش سالانه، جنس خاک و شدت فرسایش خاک) از دیگر اهداف این پژوهش بوده است. درک صحیح و در عین حال جامع از این ارتباط، امکان اولویت‌بندی میزان تأثیرگذاری هر یک از متغیرهای متغیرهای اقلیمی و فیزیکی حوضه بر مساحت بحرانی و همچنین توسعه‌ی روابط صریح بین این متغیرها را تسهیل خواهد کرد که امید است مورد توجه و استفاده‌ی محققین قرار گیرد.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- داده‌های تحقیق

مدل رقومی ارتفاعی کل ایران با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر از ماهواره‌ی ASTER و از طریق درگاه تارنمای USGS استخراج گردیده است. مدل رقومی ارتفاعی ذکر شده به صورت قطعه تصویرهای تفکیک شده ارائه می‌شود که هر کدام، یک درجه از طول و یک درجه از عرض جغرافیایی را پوشش می‌دهد. موقعیت مکانی ایران، گستره‌ای معادل عرض جغرافیایی ۴۴ تا ۶۴ درجه‌ی شرقی و طول جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه‌ی شمالی را شامل می‌شود که دربرگیرنده‌ی ۴۵ عدد از این قطعات است. پس از دریافت تمام قطعات، آن‌ها را با یکدیگر ترکیب کرده تا نقشه‌ی رقومی ارتفاعی برای کل کشور در قالب یک فایل واحد به دست آید. برای فراخوانی هر یک از زیرحوضه‌های درجه دوم و سوم، می‌باید نظامی یکپارچه برای کدگذاری زیرحوضه‌ها وجود داشته باشد. به این منظور، استاندارد تدوین شده توسط وزارت نیرو برای کدگذاری شماره‌ی زیرحوضه‌های درجه‌ی دوم و سوم مورد استفاده قرار گرفته است (Ministry of Energy, 2011). مرجع نقشه‌ی مبنای رودخانه‌های کشور، آخرین نسخه‌ی نقشه‌ی تهیه شده توسط شرکت مدیریت منابع آب است (شکل ۱ پیوست). نقشه‌ی مبنای فرسایش خاک، طبق دسته‌بندی ظرفیت زمین برای فرسایش خاک در هشت گروه است که بر اساس تعیین حدود کشاورزی و انتخاب نوع گیاه می‌باشد (Klingebiel and Montgomery, 1961). این نقشه‌ها می‌توانند بر اساس نقشه‌های ارائه شده در پایگاه داده‌ی خاک‌های جهان واقع در درگاه خاک سازمان جهانی خواروبار و کشاورزی سازمان ملل تهیه شوند (Helms, 1992).

برآورد اشتباه، استخراج شبکه‌ی رودخانه با یک ساختار توپولوژیکی است که با واقعیت تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارد و می‌تواند تأثیر به‌سزایی بر مدل‌سازی فرایندهای واقع در شبکه‌ی رودخانه (مانند شدت رسوب‌گذاری، انتقال آلودگی و زمان ماند آب و املاح) داشته باشد (Allan and Castillo, 2007; Bingner et al., 1997; Clarke et al., 2008; Day, 1983).

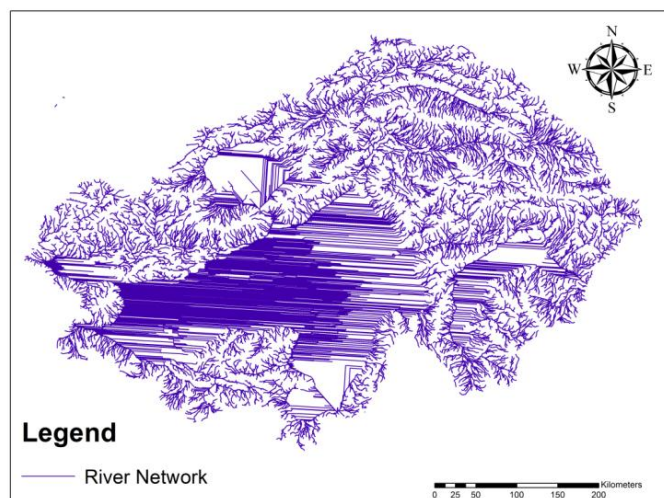
تاکنون رابطه‌ی عمومی حاکم بر مساحت بحرانی در حوضه‌های آبریز بر حسب ویژگی‌های فیزیکی و اقلیمی حاکم بر یک حوضه ارائه نشده است. با این حال، پاره‌ای مطالعات پایه به بررسی این ارتباط به طور کیفی پرداخته‌اند. محل شروع سرشاخه‌ها معمولاً در نواحی کانالیزه نشده‌ی دامنه و در صورت تجاوز فرسایش خاک از یک حد آستانه دیده می‌شود (Dietrich et al., 1993; Montgomery and Dietrich, 1988). زمان رسیدن به این حد آستانه به عواملی مانند لغزش زمین، ایجاد شکاف از میان سطوح دارای پوشش گیاهی به واسطه‌ی جریان سطحی، فرسایش نشستی و غیره بستگی دارد. همچنین طبق داده‌های میدانی، محل شروع سرشاخه‌ها در یک منطقه به توپوگرافی آن منطقه، به ویژه مساحت زهکشی و شیب محل بستگی دارد. نتایج این مطالعات حاکی از آن است که فرایندهای مختلف مؤثر بر تشکیل یک رودخانه منجر به روابط مختلفی بین مساحت و شیب می‌شوند (McNamara et al., 2006). از دیگر عوامل مؤثر بر نحوه‌ی تشکیل سرشاخه‌ها می‌توان به انواع فرایندهای انتقال رسوب، مقدار رواناب و همچنین میزان آب نفوذ کرده به داخل زمین اشاره کرد که می‌تواند بر چگونگی کانالیزه شدن جریان، تشکیل رودخانه و چگالی زهکشی تأثیرگذار باشند (Rodríguez-Iturbe and Rinaldo, 2001). عوامل دیگری چون رطوبت خاک و توزیع تغییرات مکانی ارتفاع در یک حوضه نیز به صورت مستقیم بر چگالی زهکشی شبکه‌ی رودخانه اثرگذار هستند (Ijjász-Vásquez et al., 1992; Tucker and Bras, 1998). مطالعات میدانی، ارتباط بین مساحت زهکشی با شیب محلی بستر رودخانه و انرژی کل جریان را نیز تبیین کرده‌اند (Montgomery and Dietrich, 1988). علاوه بر این، تحقیقات متعددی در زمینه‌ی ارتباط بین چگالی زهکشی و خصوصیات اقلیمی یک حوضه (مانند ارتفاع بارش) انجام شده است. پوشش گیاهی نیز به علت افزایش دادن نفوذپذیری آب و مقاومت سطح، به عنوان عامل محدودکننده‌ی چگالی زهکشی شناخته شده است (Tucker and Bras, 1998).

با توجه به اهمیت اطلاع از مقدار مساحت بحرانی در یک حوضه‌ی آبریز و همچنین چالش‌های کمی‌سازی آن که در بالا تشریح گردید، هدف اصلی این پژوهش تخمین مساحت بحرانی برای تشکیل

و در نتیجه توقف استخراج شبکه‌ی رودخانه به کمک الگوریتم D8 می‌شود. بنابراین، در ابتدا به کمک الگوریتم‌های از قبل توسعه داده شده برای شناسایی هر گونه چالاب یا قله در مدل رقومی ارتفاعی، این عوارض تعدیل می‌گردند. سپس به منظور تعیین جهت حرکت جریان از یک سلول به سلول دیگر، شیب بین سلول مورد نظر و هشت سلول مجاور خود محاسبه می‌شود و بر این اساس، آب به طرف سلولی که دارای بیشترین مقدار شیب بین هشت سلول دیگر باشد، جریان خواهد یافت. پس از محاسبه‌ی نقشه‌ی تجمعی جریان، استخراج شبکه رودخانه با تعیین یک مقدار مشخص برای مساحت بحرانی انجام می‌پذیرد. تمامی این عملیات در نرم‌افزار ArcMap انجام پذیرفته است.

### ۲-۳- حذف نواحی غیر معمول در شبکه‌ی رودخانه

در برخی از مناطق مانند نواحی کویر مرکزی و دشت‌های مسطح، تغییرات مدل رقومی ارتفاعی بسیار کم است. این شرایط باعث ایجاد رودخانه‌های طویل و موازی با یکدیگر در شبکه‌ی رودخانه‌ی استخراج شده با روش D8 می‌شود. نمونه‌ای از شبکه‌ی رودخانه‌ی تشکیل شده در زیرحوضه‌ی کویر مرکزی در شکل ۱ نشان داده شده است. برای جلوگیری از اثرگذاری این اختلال در محاسبه‌ی مقدار مساحت بحرانی، بخش‌هایی از شبکه‌ی رودخانه‌ی مینا و شبکه‌ی رودخانه‌ی استخراج شده که داخل محدوده‌های غیرمعمول قرار داشتند، از نقشه‌ها حذف گردیدند. شکل ۲، نقشه‌ی گستردگی مکانی این نواحی را در کشور نشان می‌دهد.



**Fig. 1- Extracted river network for the Central Desert subbasin with the D8 method. Very small slope in some areas resulted in the generation of channels that contrast the tree structure of a river network.**

شکل ۱- شبکه‌ی رودخانه‌ی استخراج شده در زیرحوضه‌ی کویر مرکزی با استفاده از الگوریتم D8. شیب بسیار کم زمین در برخی نواحی موجب تشکیل رودخانه‌هایی مغایر با ساختار درختی یک شبکه‌ی رودخانه شده است.

نقشه‌ی کاربری اراضی برای سال ۱۳۹۵ از تارنمای سازمان فضایی ایران اخذ شده است. طبق اطلاعات این نقشه، کاربری اراضی به سه دسته‌ی کلی شامل مناطق دارای پوشش گیاهی (شامل مراتع، زمین‌های زراعی و باغات، جنگل‌ها و بوته‌زارها)، مناطق کویری (شامل نواحی بدون پوشش گیاهی، اراضی شور و کفه‌های نمکی، سازندهای و کفه‌های رسی) و مناطق کوهستانی با رخنمون‌های سنگی طبقه‌بندی شده است. به منظور تعیین نوع اقلیم از روش طبقه‌بندی کوپن استفاده شده است. در این روش، اقلیم‌های مختلف بر اساس میزان بارش، درجه دما و تغییرات دما در طول سال به پنج گروه اصلی شامل اقلیم استوایی و گرمسیری (گروه A)، خشک (گروه B)، معتدل (گروه C)، قاره‌ای (گروه D) و قطبی (گروه E) و ۳۰ زیرگروه فرعی طبقه‌بندی می‌شوند. نقشه‌ی تقسیم‌بندی اقلیمی کشور، از زمین-مرجع‌سازی نقشه‌های موجود به دست آمده‌اند. در نهایت، طبقه‌بندی نوع خاک بر مبنای نقشه‌ی خاک‌های ایران تهیه شده توسط سازمان جهانی خواروبار و کشاورزی سازمان ملل صورت گرفته است که در این پژوهش روی هفت کلاس غالب Entisol, Aridisol, Salt Field و Rocky Land, Bad Land, Mollisol, Inceptisol تمرکز شده است.

### ۲-۲- استخراج شبکه رودخانه

پیش از انجام هر گونه عملیات محاسباتی بر نقشه‌های رقومی ارتفاعی، تصحیحاتی برای حصول اطمینان از عدم وجود هرگونه چالاب یا قله در مسیر شبکه‌ی رودخانه می‌باید انجام پذیرد؛ چراکه وجود محدوده‌های چالابی در مدل رقومی ارتفاعی سبب مسدود شدن جریان

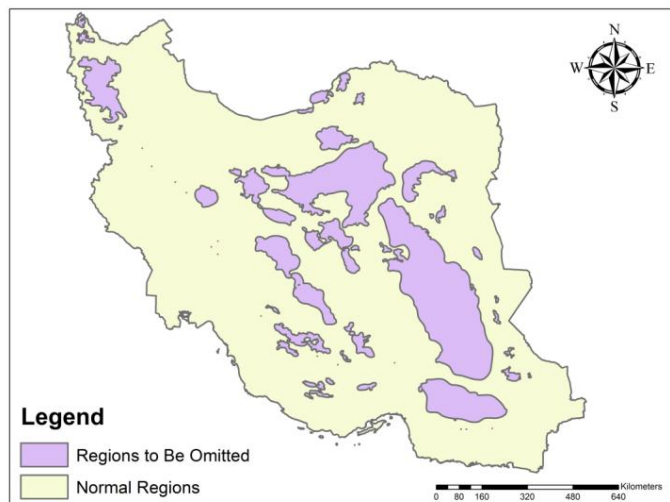


Fig. 2- Spatial distribution map of regions with non-hierarchical channel networks. These regions are recognized by the long parallel rivers.

شکل ۲- نقشه‌ی گسترده‌ی مکانی نواحی غیر معمول در شبکه رودخانه. این نواحی با رودخانه‌های طویل و موازی با یکدیگر شناخته می‌شوند.

نشان می‌دهد. بر این اساس، به منظور تعیین مساحت بحرانی مربوط به هر زیرحوضه که منجر به استخراج نزدیک‌ترین شبکه‌ی رودخانه به شبکه‌ی رودخانه‌ی مینا در آن زیرحوضه شود، ابتدا رابطه‌ی توانی بین چگالی زهکشی و مساحت بحرانی در هر زیرحوضه محاسبه شده و سپس با جایگذاری چگالی زهکشی معادل شبکه‌ی رودخانه‌ی مینا در رابطه‌ی (۲)، نزدیکترین مساحت بحرانی به واقعیت تعیین می‌شود.

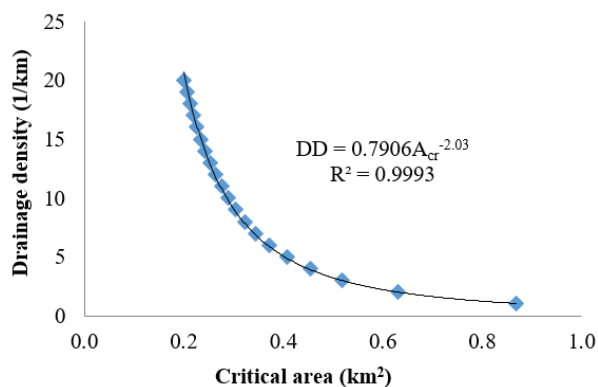


Fig. 3- The power-law relationship between drainage density and critical area for the Aras subbasin. This power-law form holds for any river basins.

شکل ۳- رابطه توانی بین چگالی زهکشی و مساحت بالادست برای زیرحوضه‌ی آبریز ارس. شکل توانی این ارتباط برای تمام حوضه‌های آبریز برقرار است.

#### ۴-۲- تعیین مساحت بحرانی در یک شبکه رودخانه

در این پژوهش، نقشه‌ی شبکه‌ی رودخانه در سطح کل کشور برای ۲۰ مقدار متفاوت مساحت بحرانی بین ۱ تا ۲۰ کیلومترمربع استخراج شده است. معیار سنجش میزان تفاوت نقشه‌های استخراج شده و نقشه‌ی مینا، مقایسه‌ی چگالی زهکشی شبکه‌های استخراج شده با چگالی زهکشی شبکه‌ی رودخانه‌ی مینا است. چگالی زهکشی یک شبکه‌ی رودخانه برابر با طول کل شبکه‌ی رودخانه تقسیم بر مساحت زهکشی آن است که به صورت رابطه‌ی (۱) نوشته می‌شود:

$$DD = \frac{L}{A} \quad (1)$$

در این رابطه،  $DD [L/L^2]$  برابر با چگالی زهکشی،  $L [L]$  برابر با طول کل شبکه‌ی رودخانه و  $A [L^2]$  برابر با مساحت زهکشی شده توسط شبکه‌ی رودخانه است. بنابراین، چگالی زهکشی معیاری برای سنجش میزان انشقاق یک حوضه توسط شبکه‌ی رودخانه‌ی حاکم بر آن است.

طبق مطالعات پیشین (Danesh-Yazdi et al., 2017)، رابطه‌ی حاکم بین چگالی زهکشی و مساحت بحرانی در هر حوضه به صورت تابع توانی است که مطابق با رابطه‌ی (۲) نوشته می‌شود:

$$DD = \alpha A_{cr}^{\beta} \quad (2)$$

در این رابطه،  $A_{cr}$  برابر با مساحت بحرانی،  $\alpha$  برابر با ضریب و  $\beta$  برابر با توان رابطه‌ی (۲) است. شکل ۳، نمونه‌ای از رابطه‌ی توانی بین چگالی زهکشی و مساحت بحرانی را برای زیرحوضه‌ی آبریز ارس

## ۲-۵- تعیین خصوصیات فیزیکی و اقلیمی غالب در یک زیرحوضه

صورت تصادفی انتخاب شدند) با روش D8 و مدل‌های رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی بین ۳۰ متر تا ۳۰۰ متر برای ۲۰ مقدار متفاوت مساحت بحرانی استخراج گردیدند. سپس نزدیک‌ترین مساحت بحرانی هر شبکه‌ی رودخانه به مقدار مشابه بر اساس شبکه‌ی رودخانه‌ی مبنا طبق روش بخش ۲-۴ تعیین شد. در نهایت، کمترین قدرت تفکیک مکانی‌ای که منجر به اختلاف کمتر از ۱۰ درصد بین مساحت بحرانی محاسب شده از رابطه‌ی (۲) با مساحت بحرانی شبکه‌ی رودخانه‌ی استخراج شده با مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر شده است، به عنوان مبنا برای استخراج شبکه‌ی رودخانه در تمام زیرحوضه‌های کشور قرار گرفت.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- تأثیر قدرت تفکیک مکانی مدل رقومی ارتفاعی بر مساحت بحرانی

نتایج حاصل از تحلیل شبکه‌ی رودخانه‌های استخراج شده از مدل‌های رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی بین ۳۰ متر تا ۳۰۰ متر حاکی از کاهش خطا در چگالی زهکشی با کاهش قدرت تفکیک مکانی بود. همچنین، مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی ۲۰۰ متر به عنوان مناسب‌ترین مدل برای اهداف این پژوهش بر اساس شروط بیان شده در بخش ۲-۶ شناسایی گردید. جدول ۱ مقایسه‌ی بین مقدار مساحت بحرانی به دست آمده با استفاده از مدل‌های رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی ۲۰۰ متر و ۳۰ متر را در شش زیرحوضه می‌دهد که به طور میانگین حاکی از تفاوت پنج درصدی بین نتایج است. این مقدار تفاوت در مقیاس مساحت‌های بحرانی به دست آمده، در حدود رقم دوم و اول اعشار است. بنابراین، تغییرات قدرت تفکیک مکانی از ۳۰ متر تا ۲۰۰ متر ضمن کاهش چشمگیر هزینه‌ی محاسباتی، تأثیر قابل ملاحظه‌ای را بر مساحت بحرانی نشان نداد. با توجه به این نتایج، سایر تحلیل‌های مورد نظر این پژوهش بر مبنای پردازش مدل رقومی ارتفاعی ۲۰۰ متر انجام گرفته‌اند و در ادامه گزارش می‌شوند.

### ۳-۲- توزیع مکانی مساحت بحرانی در زیرحوضه‌های درجه دوم و سوم ایران

شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب توزیع مکانی مساحت بحرانی در زیرحوضه‌های درجه دوم و سوم ایران را نشان می‌دهند. اعداد نشان داده شده در هر شکل مربوط به کد متعلق به زیرحوضه‌ها می‌باشند. مناطق غربی و مرکزی کشور به ترتیب به دلیل وجود شیب زیاد و شیب کم، دارای کمترین و بیشترین مقادیر مساحت بحرانی هستند.

در این جا مقصود از خصوصیت غالب یک زیرحوضه، خاصیتی است که بیشترین مساحت را در زیرحوضه در بر گرفته است. به منظور تعیین خصوصیات غالب فیزیکی و اقلیمی در هر حوضه‌ی آبریز، ابتدا مساحت تحت پوشش هر گروه داده‌ی طبقه‌بندی شده از نقشه‌های کاربری اراضی، نوع اقلیم، میزان بارندگی، شیب، نوع خاک و شدت فرسایش‌پذیری خاک برای هر زیرحوضه به صورت مجزا محاسبه شده است. سپس گروه‌هایی که در هر زیرحوضه بیشترین مساحت را پوشش داده‌اند، به عنوان ویژگی‌های غالب زیرحوضه انتخاب شده‌اند. برای یافتن رابطه‌ی میان خصوصیات فیزیکی و اقلیمی زیرحوضه و مساحت بحرانی، نقشه‌ی پراکنندگی مساحت بحرانی در کنار نوع کاربری اراضی، شیب محل، نوع اقلیم، میزان بارندگی و نوع خاک به کمک نمودارهای جعبه‌ای و پراکنده به تفکیک زیرحوضه‌های درجه دوم و سوم مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به اینکه داده‌های اقلیمی و فیزیکی گردآوری شده کل سطح کشور را پوشش می‌دهند، پراکنندگی آنها قابل توجه بوده و بنابراین علت استفاده از نمودارهای جعبه‌ای جهت تحلیل آنها، ارائه‌ی آماره‌های مختلفی مانند میانه، بیشینه، کمینه، چارک اول و چارک سوم به صورت خلاصه و در قالب یک شکل می‌باشد. همچنین، علی‌رغم اینکه این اطلاعات می‌توانند به صوت جدول نیز ارائه گردند، نمودارهای جعبه‌ای امکان مقایسه‌ی سریعتر و آسانتر داده‌های متعلق به گروه‌های طبقه‌بندی شده در هر ویژگی اقلیمی یا فیزیکی حوضه را فراهم می‌آورند. تمام محاسبات این بخش در نرم‌افزار MATLAB انجام شده است.

### ۲-۶- استفاده از مدل رقومی ارتفاعی با تفکیک مکانی متفاوت برای استخراج شبکه‌ی رودخانه

به هنگام استخراج شبکه‌ی رودخانه به روش D8 با استفاده از مدل رقومی ارتفاع ۳۰ متر، در برخی از زیرحوضه‌ها بسته به ویژگی‌های خاص توپوگرافی حاکم، ممکن است رودخانه‌هایی به شکل ماریچ‌های متوالی تشکیل شوند که طول بسیار بیشتری در مقایسه با معادل آنها در واقعیت داشته باشند. از طرفی، هزینه‌ی محاسباتی پردازش مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متر برای استخراج شبکه‌ی رودخانه به ازای ۲۰ مقدار متفاوت مساحت بحرانی برای هر زیرحوضه‌ی آبریز درجه دو و سه بسیار بالا است. بنابراین، به منظور کاهش حجم هزینه محاسباتی و در عین حال حفظ دقت نتایج تا حد مطلوب، استفاده از مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی کمتر مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور، ابتدا شبکه‌ی رودخانه‌ی شش زیرحوضه‌ی درجه‌ی سوم (که به



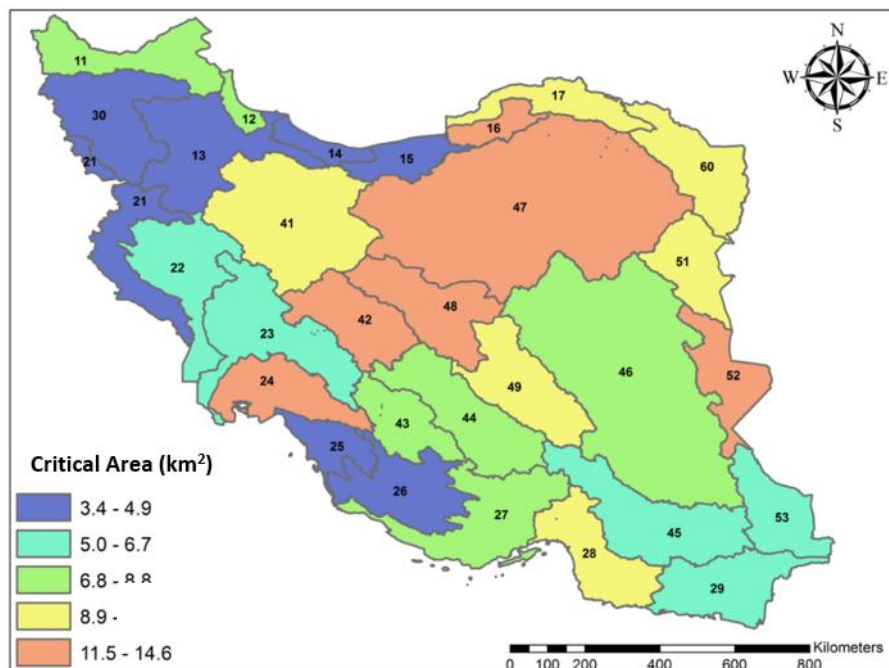
کویر مرکزی کشور واقع هستند. مساحت بحرانی بسیار زیاد در این نواحی به دلیل هموار بودن توپوگرافی و مساحت بحرانی بسیار کم مربوط به نواحی شامل شبکه‌ی رودخانه نامعمول است. در اینجا تأکید می‌گردد که مساحت بحرانی مربوط به این نواحی در تحلیل‌های آماری وارد نشده‌اند و در شکل‌های ۴ و ۵ صرفاً به منظور تبیین موقعیت مکانی آنها و همچنین حفظ یکپارچگی نقشه‌ی توزیع مکانی نشان داده شده‌اند. در نهایت، مناطقی که در این نقشه‌ها به صورت «عدم وجود داده» مشخص شده‌اند، شامل زیرحوضه‌هایی هستند که در آنها یا شبکه‌ی رودخانه‌ای وجود ندارد و یا مساحت بحرانی آنها مقادیر بسیار بالایی به دست آورده شده‌اند که مجدداً نشان‌دهنده‌ی عدم تشکیل شبکه‌ی رودخانه در آنها است.

نکته‌ی قابل توجه دیگر آن است که علی‌رغم نزدیکی میانگین مساحت بحرانی در کل کشور بین زیرحوضه‌های آبریز درجه دوم و سوم، دامنه‌ی مقادیر به دست آمده برای مساحت بحرانی در آنها بسیار متفاوت است. در واقع، مقدار مساحت بحرانی وابسته به مقیاس زیرحوضه است، به گونه‌ای که در زیرحوضه‌های آبریز درجه سوم مقادیر حدی کمتر و بیشتری در مساحت بحرانی نسبت به مقادیر مشابه در زیرحوضه‌های آبریز درجه دوم دیده می‌شوند.

**Table 1- Comparison between the computed critical area from 30m and 200 m resolution DEM in six randomly selected subbasins. The Difference between the computed critical area from the two models in the six subbasins is approximately 5%**  
جدول ۱- مقایسه‌ی بین مساحت بحرانی به دست آمده با استفاده از مدل‌های رقومی ارتفاع ۳۰ متر و ۲۰۰ متر در شش حوضه‌ی آبریز منتخب به طور تصادفی. تفاوت بین مقدار مساحت بحرانی به دست آمده با استفاده از این دو مدل در شش زیرحوضه به طور میانگین تقریباً پنج درصد است.

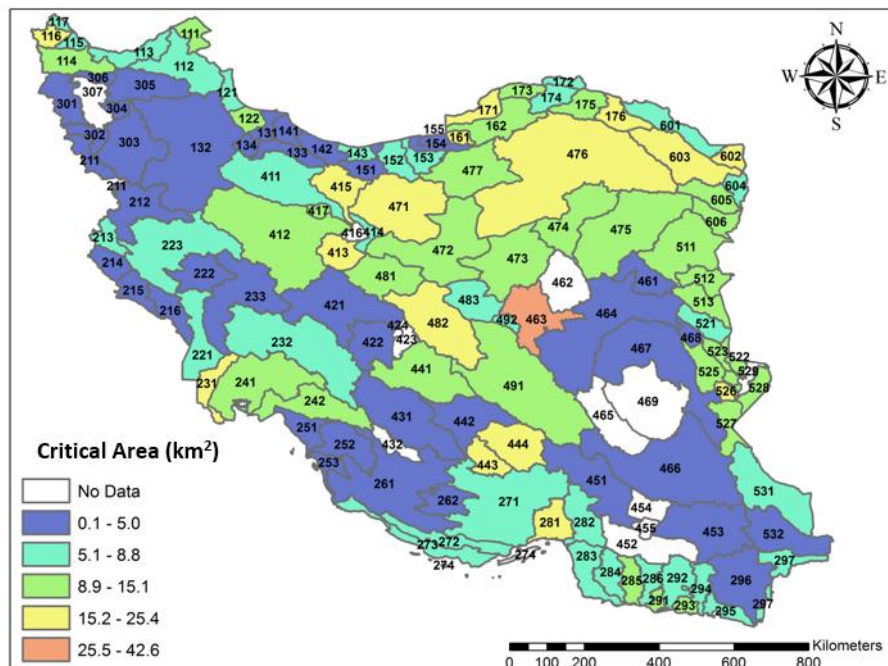
Subbasin	Percent difference in critical area
Ghezel Ozan	6.8
Ramsar-Chaloos	6.3
Kashkan	6.5
Halilrood	3.8
Deghtondi	2.0
Kashflood	6.0

این مشاهده به ویژه در اکثر نواحی مربوط به رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس دیده می‌شود که به علت وجود شیب بسیار زیاد، مساحت بحرانی کمی را به خود اختصاص داده‌اند. از طرفی دیگر، بسیاری از مقادیر مساحت بحرانی غیر معمول (بسیار کم و بسیار زیاد)، در مناطق



**Fig. 4- Spatial distribution of critical area in the second-order subbasins in Iran**

شکل ۴- توزیع مکانی مساحت بحرانی در زیرحوضه‌های درجه دوم ایران



**Fig. 5- Spatial distribution of critical area in the third-order subbasins in Iran**  
**شکل ۵- توزیع مکانی مساحت بحرانی در زیرحوضه‌های درجه سوم ایران**

شرقی کشور اکثراً کویری، نواحی شمالی و غربی کشور تحت انواع مختلف پوشش گیاهی و رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس به همراه برخی نواحی جنوب کشور غالباً حاوی رخنمون‌های سنگی هستند. شکل ۶ نمودار جعبه‌ای مساحت بحرانی بر حسب گروه کاربری اراضی را برای زیرحوضه‌های درجه سوم نشان می‌دهد. طبق این شکل، مقدار میان‌ه‌ی مساحت بحرانی با تغییر کاربری اراضی از نواحی کوهستانی به نواحی تحت پوشش گیاهی و سپس مناطق کویری افزایش می‌یابد. در مناطق کوهستانی به دلیل تغییرات زیاد ارتفاع و وجود شیب زیاد، فرسایش خاک نیز بیشتر بوده و از این رو سرشاخه‌های بیشتری بدون نیاز به مساحت زهکشی قابل ملاحظه در بالادست خود، امکان تشکیل شدن داشته‌اند. در نواحی کویری، بر خلاف نواحی کوهستانی، با توجه به نوع خاک (نفوذپذیری بالا و درصد رطوبت کم) و شیب کم زمین، مساحت‌های بحرانی بسیار بالاتری به دست آمده‌اند. وجود کانال‌های آبیاری مصنوعی در مناطق تحت کشاورزی، تراکم بالای سرشاخه‌ها را در نقشه‌ی شبکه‌ی رودخانه‌ی مینا به وجود آورده‌اند که باعث کاهش مقدار مساحت بحرانی در این مناطق می‌شود. همچنین، بزرگترین دامنه‌ی تغییرات مساحت بحرانی به ترتیب متعلق به نواحی کویری، اراضی دارای پوشش گیاهی و مناطق کوهستانی می‌باشد. با توجه به کم بودن مقدار شیب زمین و تغییرات آن در نواحی کویری، عوامل دیگری مانند جنس خاک و ناهمواری‌های موضعی زمین تأثیر به مراتب بیشتری نسبت به توپوگرافی بر چگونگی تشکیل سرشاخه‌ها و

علت این مشاهده، وجود ناهمگونی‌های کوچک و یا بزرگ مقیاس در ساختار توپولوژیکی شبکه‌های رودخانه است که تأثیر آنها با کوچک شدن مقیاس زیرحوضه محسوس‌تر می‌گردد.

در ادامه، ارتباط بین مساحت بحرانی با ویژگی‌های فیزیکی و اقلیمی زیرحوضه‌ها ارائه و تفسیر می‌گردد. نتایج حاصل از خصوصیات غالب هر زیرحوضه در جداول ۱ و ۲ پیوست به تفکیک زیرحوضه‌های درجه دوم و سوم آورده شده‌اند. در اینجا خاطر نشان می‌گردد که در بخش‌های بعدی به دلیل توزیع پیوسته‌تر نتایج در مقیاس زیرحوضه‌های آبریز درجه سوم نسبت به درجه دوم، به ارائه و بحث نتایج برای این زیرحوضه‌ها اکتفا می‌شود. همچنین، لازم به ذکر است که زیرحوضه‌هایی که دارای مقدار مساحت بحرانی بیشتر از ۴۰ کیلومتر مربع بوده‌اند و زیرحوضه‌هایی که در آنها شبکه‌ی رودخانه تشکیل نشده است، به عنوان داده‌های پرت از این تحلیل حذف شده‌اند.

### ۳-۳- ارتباط بین مساحت بحرانی با ویژگی‌های فیزیکی حوضه

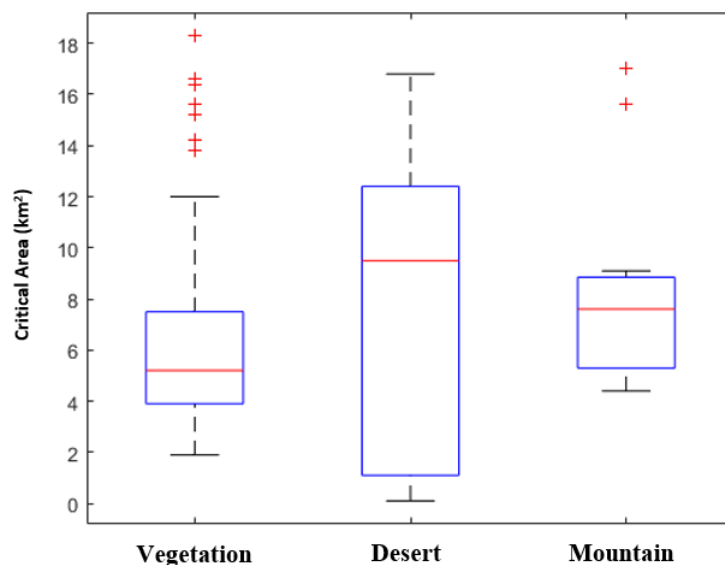
طبق آنچه انتظار می‌رود، بررسی توزیع مکانی کاربری اراضی در سطح کشور در قالب سه گروه اراضی دارای پوشش گیاهی، مناطق کوهستانی و نواحی کویری حاکی از آن است که نواحی مرکزی و



خاک از نوع Aridisol، کوهپایه‌های رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس و کوه‌های تفتان و سیلان عموماً از نوع Rocky Land و حوضه‌ی جلگه‌ی گلستان دارای خاک Mollisol (با پوشش گیاهی) هستند. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، گروه Mollisol دارای حداکثر مقدار میانه مساحت بحرانی است که با توجه به پوشش گیاهی حاکم بر آن و نفوذپذیری بالا، قابل انتظار است. پس از نواحی شامل Mollisol، مناطق از نوع خاک Aridisol، Entisol، Rocky Land و در نهایت Inceptisol به ترتیب بیشترین مقدار میانه مساحت بحرانی را نشان می‌دهند. گروه نم‌کار نیز به علت عدم وجود تعداد کافی داده‌ها، قابل تحلیل و نتیجه‌گیری نیستند. نفوذپذیری بالای خاک‌های گروه Entisol و Aridisol و نفوذپذیری کم زمین‌های Rocky Land و Inceptisol (با توجه به درصد رس پایین و نفوذ آسان آب از آن) روند افزایشی میانه مساحت بحرانی با کاهش نفوذپذیری خاک را توجیه می‌کنند. در واقع با کاهش نفوذپذیری خاک، امکان تجاوز شدت بارش از شدت نفوذپذیری خاک افزایش می‌یابد که این امر باعث افزایش احتمال تشکیل رواناب سطحی و در نتیجه تسهیل تشکیل رودخانه می‌شود که نهایتاً کاهش میانه مساحت بحرانی را موجب می‌گردد. قابل ذکر است که چارک‌های مختلف این نمودار روند مشابه با میانه را نشان می‌دهند.

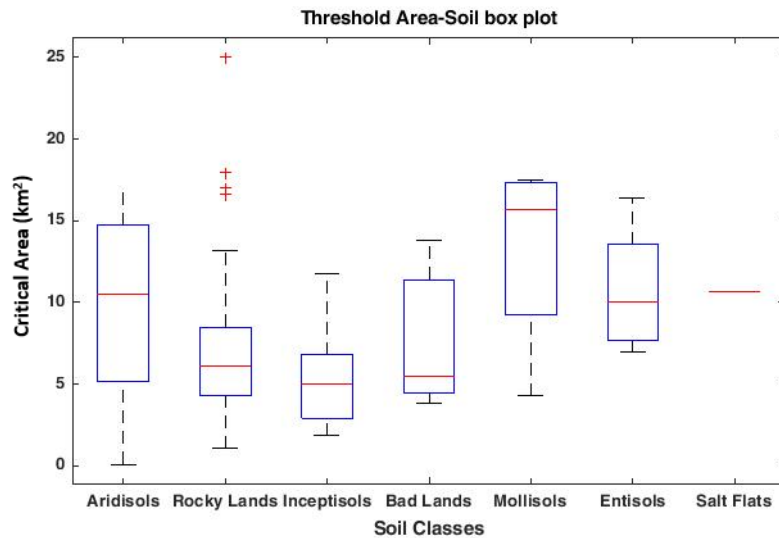
توسعه‌ی شبکه رودخانه می‌گذارند که به این دلیل، دامنه‌ی تغییرات وسیع‌تری را در مساحت بحرانی به دست می‌دهند. بر عکس، سرعت و جهت جریان‌های سطحی در مناطق کوهستانی بسیار متأثر از مقدار و جهت شیب زمین هستند. مقدار زیاد شیب در این مناطق باعث شده تا حداقل تنش برشی لازم برای فرسایش خاک به راحتی تأمین گردد و بنابراین از اثر مساحت زهکشی در نحوه‌ی تشکیل سرشاخه‌ها کاسته شود. به این دلیل، دامنه‌ی تغییرات کمتری در مساحت بحرانی این مناطق مشاهده می‌شود. در اراضی دارای پوشش گیاهی با توجه به تنوع و تراکم پوشش گیاهی در مناطق مختلف و همچنین ارتباط پیچیده و متغیر بین پایداری دامنه و عواملی مانند شدت فرسایش خاک، نوع خاک، رژیم بارش، شیب زمین، نوع پوشش گیاهی و توزیع ریشه، دامنه‌ی تغییرات مساحت بحرانی بین مقدار مشابه برای حالات حدی نواحی کویری و مناطق کوهستانی قرار می‌گیرد. به این دلایل، تعداد زیرحوضه‌های آبریزی که مساحت بحرانی آنها به لحاظ آماری در گروه داده پرت قرار می‌گیرد نسبت به مقدار مشابه در سایر گروه‌ها بیشتر مشاهده می‌شود.

نقشه‌ی توزیع مکانی نوع خاک در سطح کشور (که در اینجا نشان داده نشده است) حاکی از آن است که اکثر دشت‌های مرکزی کشور دارای



**Fig. 6- Boxplot of critical area with respect to landcover class in the third-order subbasins of Iran. The median critical area increases from the mountainous regions to the denser vegetated areas to the desert regions.**

شکل ۶- نمودار جعبه‌ای مساحت بحرانی بر حسب گروه کاربری اراضی در زیر حوضه‌های درجه سوم ایران. مقدار میانه‌ی مساحت بحرانی با تغییر کاربری اراضی از نواحی کوهستانی به نواحی تحت پوشش گیاهی و سپس مناطق کویری افزایش می‌یابد.

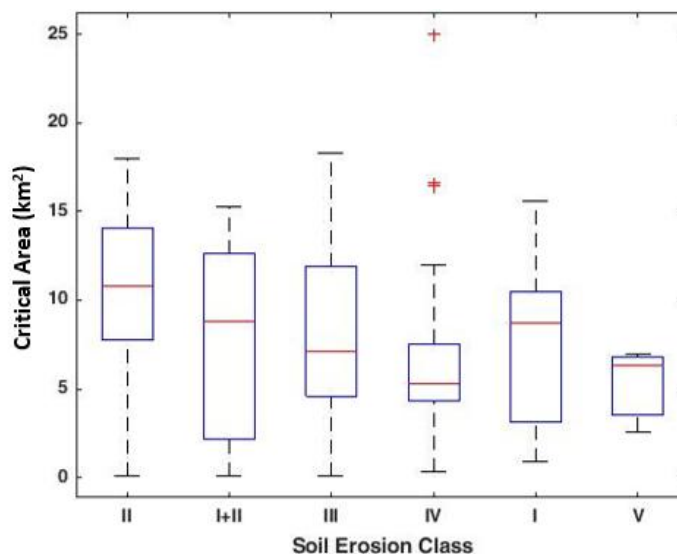


**Fig. 7- Boxplot of critical area with respect to soil type in the third-order subbasins of Iran. Critical area increases with the soil permeability.**

شکل ۷- نمودار جعبه‌ای مساحت بحرانی بر حسب نوع خاک در زیر حوضه‌های درجه سوم ایران. با افزایش نفوذ پذیری خاک، مساحت بحرانی افزایش پیدا می‌کند.

می‌توان کاهش مقدار میانه مساحت بحرانی را با افزایش شماره‌ی گروه فرسایش خاک (به استثنای گروه I) که نشان‌دهنده‌ی افزایش درجه فرسایش خاک است، مشاهده نمود. همچنین، هر چه درجه فرسایش خاک افزایش می‌یابد، دامنه‌ی تغییرات مساحت بحرانی نیز روندی کاهش‌ی از خود نشان می‌دهد که این مشاهده سازگار با نتایج شکل ۶ می‌باشد.

نتایج حاصل از تحلیل فرسایش خاک حاکی از آن است که مناطق ساحلی استان هرمزگان و حوضه‌ی دریاچه ارومیه و پس از آن‌ها، دشت‌های مرکزی کشور دارای کمترین میزان فرسایش خاک و کوهپایه‌های رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس دارای بیشترین مقدار فرسایش خاک هستند. شکل ۸ نمودار جعبه‌ای مساحت بحرانی با فرسایش خاک را در زیرحوضه‌های درجه سوم نشان می‌دهد که در آن



**Fig. 8- Boxplot of critical area with respect to soil erosion class in the third-order subbasins of Iran. Critical area decreases with the increasing soil erosion rate.**

شکل ۸- نمودار جعبه‌ای مساحت بحرانی بر حسب گروه فرسایش خاک در زیر حوضه‌های درجه سوم ایران. مساحت بحرانی با افزایش شدت فرسایش خاک کاهش می‌یابد.

پوشش گیاهی (زیر گروه s از گروه B و گروه C) و گرم تر (زیر گروه h از گروه B و زیر گروه a از گروه C) است. در دو گروه اقلیمی Cfa و Csb به علت عدم وجود تعداد کافی داده‌ها، چنین تحلیلی غیر قابل انجام است. همچنین، چارک‌های مساحت بحرانی روندی مشابه با میانه را نشان می‌دهند. با این حال، ارتباط معناداری بین مساحت بحرانی و نوع گروه اقلیم مشاهده نمی‌شود.

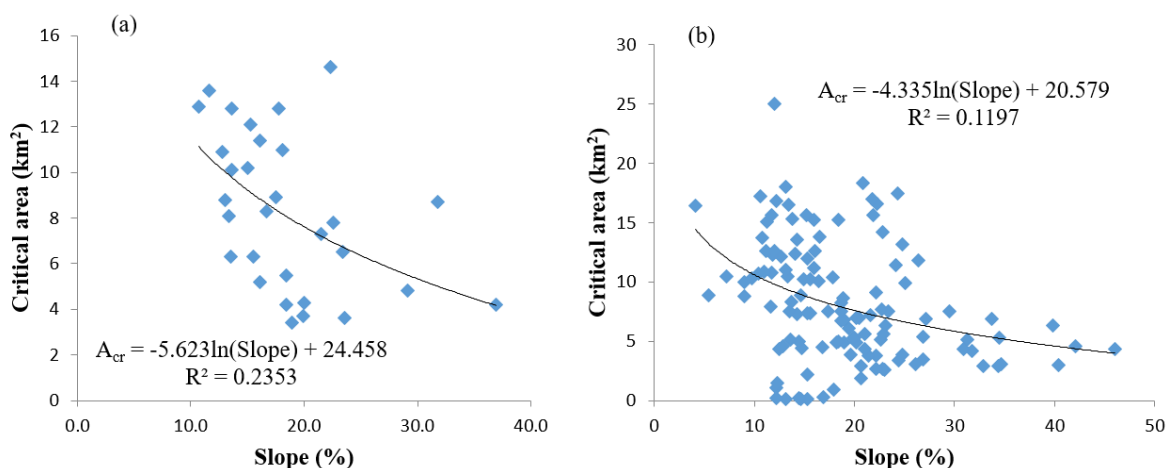
باتوجه به توزیع مکانی میانگین بارش سالانه در سطح کشور، حداکثر مقدار بارش در نواحی خارجی رشته کوه‌های البرز و زاگرس رخ می‌دهد که پس از این نواحی، مناطق شمال شرقی و شمال غربی کشور شاهد بیشترین بارش سالانه هستند و در نقطه‌ی مقابل، دشت‌های مرکزی کشور بارش سالانه ناچیزی دارند. همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، علی‌رغم عدم وجود رابطه‌ای معنادار بین میزان بارش میانگین سالانه و مقدار مساحت بحرانی در زیر حوضه‌های درجه‌ی دوم و سوم، وجود روند کاهش مساحت بحرانی با افزایش میزان بارش مشاهده می‌گردد.

اهمیت نتایج این بخش از پژوهش در شناسایی مهمترین عوامل فیزیکی مؤثر بر مساحت بحرانی و متعاقباً ساختار شبکه‌ی رودخانه در حوضه‌های آبریز است که همواره به عنوان یک سؤال مهم در هیدروژئومورفولوژی مطرح بوده است. علی‌رغم این که پاره‌ای از مطالعات پیشین به بررسی این سؤال با تمرکز بر خصوصیات هندسی شبکه‌ی رودخانه مانند چگالی زهکشی پرداخته‌اند (Leeder, 1993; Tucker and Bras, 1998).

مناطق کوهستانی مانند رشته کوه‌های البرز و زاگرس دارای بیشترین مقدار شیب و دشت‌های مرکزی کشور دارای کمترین مقدار شیب هستند. هیستوگرام شیب زیرحوضه‌های درجه‌ی دوم و سوم حاکی از وجود بیشترین فراوانی شیب متوسط بین ۱۰ تا ۲۵ درصد است. همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است، رابطه‌ی لگاریتمی غیرمعناداری بین مقدار مساحت بحرانی و مقدار شیب حوضه‌های درجه دوم و سوم حاکم است؛ اما روند کلی تغییرات مساحت بحرانی با افزایش مقدار شیب حوضه به صورت کاهشی می‌باشد.

### ۳-۴- ارتباط بین مساحت بحرانی با نوع اقلیم و میانگین بارش سالانه

طبق نقشه‌ی گسترده‌ی مکانی نوع اقلیم در زیرحوضه‌های درجه‌ی سوم، دشت‌های مرکزی و سواحل دریای عمان دارای اقلیمی خشک و کویری، مناطق دربرگیرنده‌ی رشته کوه‌های البرز و زاگرس اقلیمی خشک و استپی و کوهپایه‌های رشته کوه‌های البرز و زاگرس اقلیمی حاره‌ای دارند. زیرحوضه‌ی شرق گیلان، اقلیم Cfa (حاره‌ای بدون فصل خشک با تابستان گرم) و زیرحوضه‌ی تالش اقلیم Csb (حاره‌ای با تابستانی خشک و معتدل) را دارا هستند. نمودار جعبه‌ای نشان داده شده در شکل ۱۰، حاکی از کاهش مقدار میانگین مساحت بحرانی به ترتیب در اقلیم‌های BWh, BSk, Bsh, Csa و در زیرحوضه‌های درجه‌ی سوم است. ترتیب به دست آمده نشان‌دهنده‌ی بالا بودن مقدار میانگین مساحت بحرانی در نواحی کویری معتدل تر (زیر گروه k) و پایین بودن مقدار میانگین مساحت بحرانی در نواحی دارای



**Fig. 9- Relationship between critical area and average slope in the second-order (panel a) and third-order (panel c) subbasins of Iran. Critical area shows negative insignificant correlation with a basin average slope. شکل ۹- ارتباط بین مساحت بحرانی و متوسط شیب در زیر حوضه‌های درجه دوم (شکل سمت چپ) و درجه سوم (شکل سمت راست) ایران. مساحت بحرانی همبستگی منفی و غیرمعنادار با متوسط شیب حوضه نشان می‌دهد.**

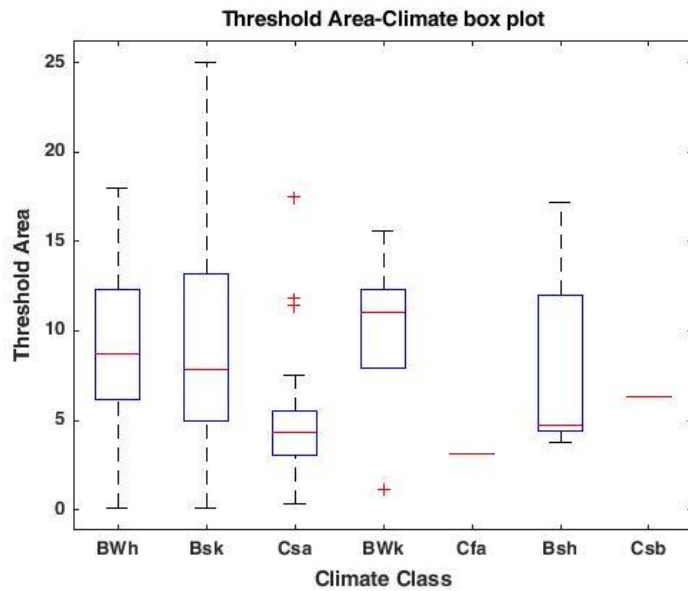


Fig. 10- Boxplot of critical area with respect to climate class in the third-order subbasins of Iran. Critical area is smaller and larger in the temperate and warmer climates, respectively.

شکل ۱۰- نمودار جعبه‌ای مساحت بحرانی بر حسب نوع اقلیم در زیر حوضه‌های درجه سوم ایران. مساحت بحرانی در اقلیم‌های معتدل بزرگتر و در نواحی گرم‌تر، کوچکتر است.

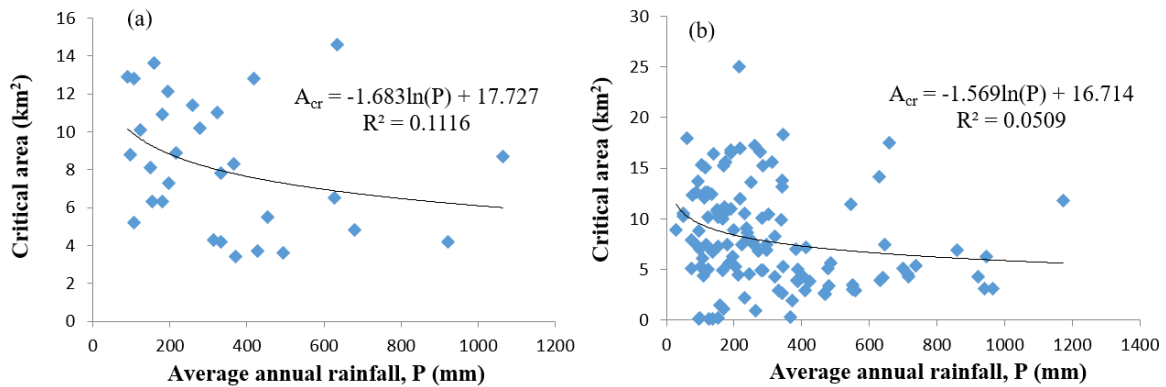


Fig. 11- Relationship between critical area and average annual rainfall in the second-order (panel a) and third-order (panel b) subbasins of Iran. Increase in the average annual precipitation height decreases the critical area.

شکل ۱۱- ارتباط بین مساحت بحرانی بر حسب میانگین بارش سالانه در زیر حوضه‌های درجه دوم (شکل سمت چپ) و درجه سوم (شکل سمت راست) ایران. با افزایش میزان متوسط بارش سالانه، مساحت بحرانی روند (غیرمعدنار) کاهشی از خود نشان می‌دهد.

رودخانه) توسط Zanardo et al. (2013) در سطح ایالات متحدهی آمریکا انجام شده است. با این حال، بررسی این ارتباط با سایر ویژگی‌های فیزیکی حوضه که گستره‌ی وسیعی از داده‌های مربوطه را پوشش دهد، تاکنون مطالعه‌ای به انجام نرسیده است که نتایج این پژوهش گام مهمی در این جهت برمی‌دارد. در اینجا خاطر نشان می‌گردد که با توجه به مشاهده‌ی همبستگی غیرمعدنار بین مساحت

تاکنون مطالعات بسیار حدودی در زمینه‌ی ارتباط بین خصوصیات فیزیکی و اقلیمی حوضه و توپولوژی شبکه‌ی رودخانه انجام شده‌اند. نمونه‌ای از بررسی جامع ارتباط بین میانگین حجم بارش سالانه، میانگین فراوانی رخداد بارش (برابر با معکوس متوسط تعداد روزهای بین شروع دو بارش متوالی) و میانگین مدت بارش با پارامترهای مدل Tokunaga (به عنوان یکی از مدل‌های شبیه‌ساز ساختار شبکه‌ی

بحرانی و ویژگی‌های توپوگرافیکی و اقلیمی حوضه، استخراج روابط مشخص صریح بین این کمیت‌ها به نظر غیرممکن می‌رسد. این نتیجه، لزوم تعیین مساحت بحرانی برای هر حوضه با ویژگی‌های منحصر به فرد خود را تبیین می‌سازد که اهمیت نتایج بخش ۳-۲ را نشان می‌دهد. همچنین، با توجه به حساسیت پایین مساحت بحرانی به قدرت تفکیک مکانی مدل رقومی ارتفاعی بین ۳۰ متر تا ۲۰۰ متر (بخش ۳-۱)، مقادیر مساحت بحرانی محاسبه شده در این پژوهش (جدول ۱ و ۲ پیوست) می‌تواند با اطمینان بالا برای استخراج شبکه‌ی رودخانه‌ی حاکم بر یک حوضه‌ی آبریز برای کاربردهای مختلف مدل‌سازی هیدرولوژیکی، انتقال رسوب و آلودگی مورد استفاده قرار گیرد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پژوهش، تعیین مقدار مساحت بحرانی و مطالعه‌ی ارتباط آن با خصوصیات فیزیکی و اقلیمی غالب در زیرحوضه‌های درجه‌ی دوم و سوم ایران بوده است. برای این منظور، با استفاده از ابزارهای پردازش مدل رقومی ارتفاعی، نقشه‌ی شبکه‌ی رودخانه در سطح کل کشور برای ۲۰ مقدار متفاوت مساحت بحرانی استخراج گشته و رابطه‌ی توانی حاکم بین چگالی زهکشی و مساحت بحرانی در هر زیرحوضه تعیین شد. سپس با جایگزین کردن چگالی زهکشی

#### پیوست

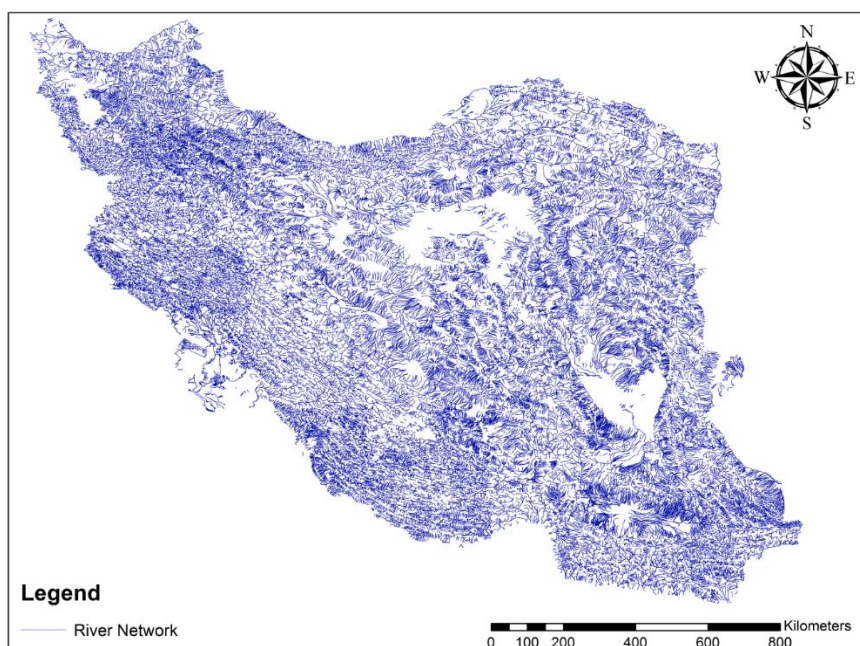


Fig. A1- Iran river network base map

شکل ۱ پیوست- آخرین نسخه‌ی نقشه‌ی مبنای شبکه رودخانه‌های ایران (۱۳۹۷)

تحقیقات منابع آب ایران، سال شانزدهم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۹

Volume 16, No. 2, Summer 2020 (IR-WRR)

**Table A1- Critical area and dominant physio-climatic charactersitics of second-order subbasins in Iran**

جدول ۱ پیوست- مساحت بحرانی و خصوصیات فیزیکی و اقلیمی غالب در زیرحوضه‌های درجه دوم ایران

Subbasin code	Critical area (km <sup>2</sup> )	Average annual rainfall (mm)	Slope (%)	Climate class	Soil erosion class	Soil type
11	7.8	331.3	22.6	Bsk	III	Rocky Land
12	8.7	1065.2	31.8	Bsk	III	Inceptisol
13	3.7	426.9	19.9	Bsk	III	Rocky Land
14	4.2	922	36.9	Csa	III	Rocky Land
15	4.8	679.4	29.1	Csa	III	Rocky Land
16	14.6	633	22.3	Bsk	III	Mollisol
17	11	323.8	18.1	Bsk	III	Aridisol
21	3.6	493.4	23.6	Csa	III	Rocky Land
22	5.5	453.4	18.4	Csa	IV	Rocky Land
23	6.5	626.8	23.4	Csa	IV	Rocky Land
24	12.8	417.1	17.8	Bsh	IV	Bad Land
25	4.2	332.7	18.4	Bsh	IV	Bad Land
26	4.3	313.4	20.0	Bsh	IV	Rocky Land
27	7.3	198	21.5	BWh	V	Aridisol
28	8.9	216.1	17.5	BWh	III	Rocky Land
29	6.3	154.3	15.5	BWh	III	Rocky Land
30	3.4	370.3	18.9	Bsk	I	Rocky Land
41	10.2	277.2	15.0	Bsk	II	Aridisol
42	12.1	195.2	15.3	Bsk	I+II	Rocky Land
43	8.3	366.3	16.7	Csa	IV	Aridisol
44	8.1	148.9	13.4	Bsk	I+II	Aridisol
45	6.3	180.4	13.5	BWh	III	Aridisol
46	8.8	97.2	13.0	BWh	II	Aridisol
47	13.6	159.7	11.6	BWh	II	Aridisol
48	12.8	106	13.6	BWh	I+II	Aridisol
49	10.1	122.1	13.6	BWh	I+II	Aridisol
51	10.9	179.6	12.8	BWk	II	Aridisol
52	12.9	90.3	10.7	BWh	II	Aridisol
53	5.2	107.1	16.1	BWh	III	Rocky Land
60	11.4	258.3	16.1	Bsk	III	Aridisol



Table A2- Critical area and dominant physio-climatic characteristics of third-order subbasins in Iran

جدول ۲ پیوست- مساحت بحرانی و خصوصیات فیزیکی و اقلیمی غالب در زیرحوضه‌های درجه سوم ایران

Subbasin code	Critical area (km <sup>2</sup> )	Average annual rainfall (mm)	Slope (%)	Climate class	Soil erosion class	Soil type
111	12	217	15.3	Bsk	IV	Rocky Land
112	7	383.1	20.5	Bsk	III	Inceptisol
113	5.3	345.7	34.5	Bsk	IV	Rocky Land
114	9.9	339.1	25.1	Bsk	I	Rocky Land
115	7.4	260.4	15.3	Bsk	IV	Rocky Land
116	16.6	276.2	22.3	Bsk	IV	Rocky Land
117	5.3	204.8	20	Csa	IV	Inceptisol
121	6.3	946.1	39.8	Csb	III	Inceptisol
122	11.8	1172.5	26.4	Csa	I	Inceptisol
131	3.1	940.4	26.1	Csa	I	Inceptisol
132	3.9	386	19.6	Bsk	III	Rocky Land
133	3	550	40.4	Csa	III	Inceptisol
134	2.9	411.1	34.4	Bsk	III	Rocky Land
141	3.1	964.6	34.7	Cfa	III	Rocky Land
142	4.3	921.7	46	Csa	III	Rocky Land
143	6.9	860.2	33.7	Csa	III	Rocky Land
151	4.6	714.2	42.1	Csa	III	Rocky Land
152	5.4	737	26.9	Csa	III	Rocky Land
153	5.1	698.9	31.3	Bsk	III	Rocky Land
154	3.9	630.8	24.8	Csa	III	Rocky Land
155	4.3	404.3	12.5	Csa	III	Mollisol
161	17.5	659.7	24.3	Csa	III	Mollisol
162	14.2	628.9	22.8	Bsk	III	Mollisol
171	17.2	259.8	10.6	Bsh	III	Mollisol
172	6.8	272.5	19	Bsk	III	Rocky Land
173	10.4	300.6	17.8	Bsk	III	Rocky Land
174	7.2	413.3	21.6	Bsk	III	Rocky Land
175	13.2	341.2	24.8	Bsk	III	Rocky Land
176	15.6	313.1	21.9	Bsk	III	Aridisol
211	2.9	557.5	32.9	Csa	III	Rocky Land
212	4.2	639	31.7	Csa	IV	Rocky Land
213	5.1	476.9	22.6	Csa	IV	Rocky Land
214	2.6	468.6	23	Csa	V	Rocky Land
215	2.7	342	22.8	Csa	IV	Rocky Land
216	4.9	284.6	18.2	Bsh	III	Rocky Land
221	7.5	295.9	13.5	Bsh	IV	Rocky Land
222	3.5	550.5	26.9	Csa	IV	Rocky Land
223	5.6	486.7	22.9	Csa	IV	Rocky Land
231	16.4	138	4.1	BWh	II	Entisol
232	7.5	645.8	29.5	Csa	IV	Rocky Land
233	4.3	716.2	30.9	Csa	IV	Rocky Land
241	13.8	341.7	16.5	BWh	III	Bad Land
242	11.4	544.3	24.1	Csa	IV	Bad Land
251	4.6	245.4	12.9	Bsh	III	Bad Land
252	3.8	422.5	22.2	Bsh	IV	Bad Land
253	4.5	211.6	16.8	Bsh	II	Bad Land
261	4.3	319.4	21	Bsh	IV	Rocky Land
262	4.9	279	20.2	BWh	IV	Rocky Land
271	7.5	224.3	23.4	BWh	IV	Aridisol
272	6.3	196	23.1	BWh	V	Bad Land
273	7	97.9	20.2	BWh	V	Entisol
274	Not delineated river network	63.8	16.8	BWh	I	Bad Land
281	17	216.9	21.8	BWh	III	Rocky Land
282	8.6	240.1	18.9	BWh	I	Rocky Land
283	6.7	136.2	18.7	BWh	IV	Rocky Land

Subbasin code	Critical area (km <sup>2</sup> )	Average annual rainfall (mm)	Slope (%)	Climate class	Soil erosion class	Soil type
284	7.7	254.3	22.7	BWh	IV	Rocky Land
285	9.1	236.2	22.2	BWh	III	Rocky Land
286	8.2	241.9	18.7	BWh	III	Rocky Land
291	10	166.2	9	BWh	III	Entisol
292	7.5	180.7	17.4	BWh	III	Rocky Land
293	12.6	122.4	11.2	BWh	III	Entisol
294	5.6	185.5	21	BWh	III	Rocky Land
295	7.9	74.9	11.6	BWh	III	Entisol
296	4.9	166.8	19	BWh	III	Rocky Land
297	7.5	117.2	18.7	BWh	III	Rocky Land
301	3.8	389	21.4	Bsk	I	Rocky Land
302	3.4	479.1	24.4	Csa	I	Rocky Land
303	2.7	467.9	22.2	Csa	III	Inceptisol
304	1.9	373.1	20.7	Bsk	I	Inceptisol
305	5	388.8	18.4	Bsk	IV	Inceptisol
306	2.9	330.6	20.7	Bsk	I	Inceptisol
307	Not delineated river network	48.5	4	Bsk	I	Inceptisol
411	8.3	319.2	13.7	Bsk	III	Inceptisol
412	10.1	282.6	16.4	Bsk	II	Rocky Land
413	15.2	168.6	16	BWh	I+II	Aridisol
414	8.8	95.3	9	BWh	II	Aridisol
415	18.3	345	20.8	Bsk	III	Aridisol
416	Not delineated river network	12.9	7.5	BWh	II	Aridisol
417	10.7	150	10.4	BWh	II	Salt Field
421	2.2	232.5	15.3	Bsk	I+II	Rocky Land
422	0.1	136	14.6	Bsk	I+II	Aridisol
423	Not delineated river network	88.3	7.4	Bsk	I+II	Aridisol
424	Not delineated river network	75	7.9	Bsk	I+II	Aridisol
431	0.3	366	16.9	Csa	IV	Aridisol
432	Not delineated river network	366.5	19.2	Bsh	IV	Rocky Land
441	12.6	114.1	12	Bsk	I+II	Aridisol
442	1.5	158.8	12.3	Bsk	I+II	Aridisol
443	16.5	190.7	13.4	Bsh	IV	Aridisol
444	15.6	173.6	11.7	BWk	I	Aridisol
451	0.9	264.5	17.9	BWh	I	Aridisol
452	Not delineated river network	184.2	13.4	BWh	III	Aridisol
453	0.1	125.6	15.3	BWh	III	Aridisol
454	Not delineated river network	126.3	17.9	BWh	I	Aridisol
455	Not delineated river network	18.6	13.2	BWh	I	Salt Field
461	1.1	168.5	12.2	BWk	II	Rocky Land
462	Not delineated river network	95.4	13.9	BWh	II	Aridisol
463	42.6	84.2	12.2	BWh	I	Aridisol
464	0.1	94.8	13.1	BWh	II	Aridisol
465	Not delineated river network	76.5	19.7	BWh	I	Aridisol
466	5	123.4	14.5	BWh	III	Aridisol
467	0.2	98	12.2	BWh	III	Aridisol
468	0.2	153.1	14.5	BWh	II	Aridisol
469	Not delineated river network	43.1	15.7	BWh	II	Aridisol
471	15.6	174.1	15.2	BWh	III	Aridisol

Subbasin code	Critical area (km <sup>2</sup> )	Average annual rainfall (mm)	Slope (%)	Climate class	Soil erosion class	Soil type
472	13.7	91.8	10.8	BWh	II	Aridisol
473	12.3	76.6	11.8	BWh	II	Aridisol
474	10.9	149.8	11	BWh	II	Aridisol
475	10.8	178.7	11.7	BWh	II	Aridisol
476	16.8	189.5	12.2	Bsk	II	Aridisol
477	8.9	198.3	14.6	Bsk	III	Aridisol
481	12.4	132.4	14.1	BWh	I+II	Aridisol
482	15.3	104.8	13.8	BWh	I+II	Aridisol
483	5.1	73.3	13.6	BWh	I+II	Aridisol
491	10.2	123.2	14.9	BWh	I+II	Aridisol
492	7.4	91.4	15.6	BWh	I+II	Aridisol
511	11	190.3	13.1	BWk	II	Aridisol
512	11.2	171.3	16	BWk	III	Aridisol
513	10.2	153.4	15.6	BWk	III	Rocky Land
521	7.3	152.1	14.3	BWh	III	Rocky Land
522	10.3	50	9.8	BWh	I	Aridisol
523	12.1	110.9	12.7	BWh	I	Rocky Land
524	10.5	50.2	7.2	BWh	I	Aridisol
525	15.1	115.5	11.3	BWh	II	Aridisol
526	18	61.3	13.1	BWh	II	Rocky Land
527	12.6	86.9	16.1	BWh	III	Rocky Land
528	8.9	28.8	5.4	BWh	I	Aridisol
529	Not delineated river network	33.3	6.7	BWh	I	Aridisol
531	6.1	106.2	19.4	BWh	III	Rocky Land
532	4.4	108.3	14.7	BWh	III	Rocky Land
601	6.9	294.9	27.1	Bsk	III	Rocky Land
602	25	214	12	Bsk	IV	Rocky Land
603	15.2	285.9	18.4	Bsk	III	Aridisol
604	5.3	102	19.9	Bsk	IV	Aridisol
605	13.6	250.4	14.3	Bsk	III	Aridisol
606	10.5	230.1	13.3	Bsk	II	Aridisol

Danesh-Yazdi M, Botter G, Foufoula-Georgiou E (2017) Time-variant Lagrangian transport formulation reduces aggregation bias of water and solute mean travel time in heterogeneous catchments. *Geophysical Research Letters* 44:4880–4888

Danesh-Yazdi M, Tejedor A, Foufoula-Georgiou E (2017) Self-dissimilar landscapes: Revealing the signature of geologic constraints on landscape dissection via topologic and multi-scale analysis. *Geomorphology* 295:16-27

Day DG (1983) Drainage density variability and drainage basin outputs. *Journal of Hydrology (New Zealand)* 22:3–17

Dietrich WE, Wilson CJ, Montgomery DR, McKean J (1993) Analysis of erosion thresholds, Channel networks, and landscape morphology using a digital terrain model. *The Journal of Geology* 101:259–278

Garbrecht J, Martz LW (1997) The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models. *Journal of Hydrology* 193:204–213

## ۵- مراجع

Allan JD, Castillo MM (2007) *Stream ecology: Structure and function of running waters*. Springer, Dordrecht, The Netherlands

Bingner RL, Garbrecht J, Arnold JG, Srinivasan R (1997) Effect of watershed subdivision on simulation runoff and fine sediment yield. *Transactions of the ASAE* 40(5):1329-35

Clarke A, Mac NallyR, Bond N, Lake P (2008) Macroinvertebrate diversity in headwater streams: A review. *Freshwater Biology* 53(9):1707–1721

Costa-Cabral MC, Burges SJ (1994) Digital Elevation Model Networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. *Water Resources Research* 30:1681–1692

Czuba, JA, Foufoula-Georgiou E (2015) Dynamic connectivity in a fluvial network for identifying hotspots of geomorphic change. *Water Resources Research* 51(3):1401-1421

- O'Callaghan JF, Mark DM (1984) The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 28:323–344
- Passalacqua P, Do Trung T, Foufoula-Georgiou E, Sapiro G, Dietrich WE (2010) A geometric framework for channel network extraction from lidar: Nonlinear diffusion and geodesic paths. *Journal of Geophysical Research* 115:F01002
- Rodríguez-Iturbe I, Rinaldo A (2001) *Fractal river basins: chance and self-organization*, 1. paperback ed. ed. Cambridge, Cambridge University Press
- Tarboton DG (1997) A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research* 33:309–319
- Tarboton DG, Bras RL, Rodriguez-Iturbe I (1991) On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrological Process* 5:81–100
- Tejedor A, Longjas A, Zaliapin I, Foufoula-Georgiou E (2015) Delta channel networks: 1. A graph-theoretic approach for studying connectivity and steady state transport on deltaic surfaces. *Water Resources Research* 51(6):3998–4018
- Tejedor A, Longjas A, Zaliapin I, Foufoula-Georgiou E (2015) Delta channel networks: 2. Metrics of topologic and dynamic complexity for delta comparison, physical inference, and vulnerability assessment. *Water Resources Research* 51(6):4019–4045
- Tucker GE, Bras RL (1998) Hillslope processes, drainage density, and landscape morphology. *Water Resources Research* 34:2751–2764
- Orlandini S, Tarolli P, Moretti G, Dalla Fontana G (2011) On the prediction of channel heads in a complex alpine terrain using gridded elevation data. *Water Resources Research* 47(2):1–12, <https://doi.org/10.1029/2010WR009648>
- Liu Z, Khan U, Sharma A (2014) A new method for verification of delineated channel networks. *Water Resources Research* 5(3):2–2
- Zanardo S, Zaliapin I, Foufoula-Georgiou E (2013) Are American rivers Tokunaga self-similar? New results on fluvial network topology and its climatic dependence. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 118(1):166–183
- Giannoni F, Roth G, Rudari R (2005) A procedure for drainage network identification from geomorphology and its application to the prediction of the hydrologic response. *Advances in Water Resources* 28:567–581
- Hancock GR, Evans KG (2006) Channel head location and characteristics using digital elevation models. *Earth Surf Process Landforms* 31:809–824
- Helms D (1992) Readings in the history of the Soil Conservation Service. Historical Notes (USA)
- Ijjász-Vásquez EJ, Bras RL, Moglen GE (1992) Sensitivity of a basin evolution model to the nature of runoff production and to initial conditions. *Water Resources Research* 28:2733–2741
- Kirkby MJ (1976) Tests of the random network model, and its application to basin hydrology. *Earth Surface Processes* 1:197–212
- Klingebiel AA, Montgomery PH (1961) *Land-capability classification*. Soil Conservation Service, US Department of Agriculture
- Lashermes B, Foufoula-Georgiou E, Dietrich WE (2007) Channel network extraction from high resolution topography using wavelets. *Geophys Research Letters* 34:n/a-n/a.
- Leeder M R (1993) Tectonic controls upon drainage basin development, river channel migration and alluvial architecture: Implications for hydrocarbon reservoir development and characterization, in *characterisation of Fluvial and Aeolian Hydrocarbon Reservoirs*, edited by C. North and J. Prossor, Geol. Soc. London Spec. Publ., 73:9–24
- McMaster KJ (2002) Effects of digital elevation model resolution on derived stream network positions. *Water Resources Research* 38:13-1-13–8
- McNamara JP, Ziegler AD, Wood SH, Vogler JB (2006) Channel head locations with respect to geomorphologic thresholds derived from a digital elevation model: A case study in northern Thailand. *Forest Ecology and Management* 224:147–156
- Ministry of Energy (2011) *Classification and coding of river basins and study areas in Iran*. (In Persian)
- Montgomery DR, Dietrich WE (1988) Where do channels begin?. *Nature* 336:232–234
- Montgomery DR, Foufoula-Georgiou E (1993) Channel network source representation using digital elevation models. *Water Resources Research* 29:3925–3934