



Development of a New Method for Estimation of SCS Curve Number Based on Saturation Excess Concept

A. Azizian¹ and A. Shokoohi²

Abstract

In recent years, many empirical methods and mathematical models have been developed to estimate runoff, among which the SCS curve number is the most important and widely used method. In this method a parameter called Curve Number (CN) is used for transforming rainfall to runoff. Currently, different techniques such as RS and GIS in combination with filed surveying are used to estimate this parameter. These methods due to the huge amount of required data, field investigation, and computation burden are costly and time consuming. In this research based on the saturation excess concept, which is used in the structure of a semi distributed model called TOPMODEL, a new efficient method with a minimum data requirement was developed to estimate the SCS curve number. The proposed method depends on three parameters: soil porosity, average distance to the catchment water table, and the parameter that controls the effective depth of the saturated soil. The Kasilian catchment in northern Iran is used to investigate the proposed method. In this study, using lansat7 ETM⁺ images and performing some modification on the images the landuse map was obtained. Finally, by combining this map and the watershed soil and slope maps and also the results of an extensive filed survey, the SCS curve number map was developed for the entire watershed. Also, TOPMODEL was calibrated in the Kasilian catchment for the estimation of proposed method parameters. Results indicate that the watershed's average curve number based on RS/GIS and the proposed methods are about 59.6 and 62.8, respectively. Furthermore, the results showed that the minimum and maximum differences between the Curve Number obtained from RS and GIS techniques and from the proposed method for the whole range of the used parameters are about 0.3% and 12% respectively.

Keywords: SCS, GIS and RS technique, Saturation excess concept, Semi distributed model: TOPMODEL.

Received: December 28, 2013

Accepted: July 8, 2014

توسعه روشی نوین برای تخمین شماره منحنی حوضه با استفاده از مفهوم مازاد اشباع (مطالعه موردی: حوضه آبریز کسلیان)

اصغر عزیزیان^۱ و علیرضا شکوهی^{۲*}

چکیده

در سال‌های اخیر روش‌های تجربی و مدل‌های ریاضی متعددی جهت تخمین رواناب توسعه داده شده است که از مهم‌ترین و پرکاربردترین این روش‌ها می‌توان به روش شماره منحنی SCS اشاره نمود. یکی از ویژه‌گی‌های بارز این روش استفاده از پارامتری به نام شماره منحنی (CN) برای تبدیل بارش به رواناب می‌باشد. در حال حاضر از ابزارهایی همچون GIS، RS و تلفیق نتایج آنها با نقشه‌های خاکشناسی و بازدیدهای میدانی جهت محاسبه این پارامتر استفاده می‌شود. این روش‌ها به علت نیاز به اطلاعات و عملیات محاسباتی و میدانی متعدد، زمان و هزینه زیادی را برای برآورد قابل اعتماد رواناب تحمیل می‌نمایند. در این تحقیق با استفاده از مفهوم مازاد اشباع به کار رفته در ساختار مدل نیمه توزیعی TOPMODEL، روشی ارائه شده است که به کمک آن می‌توان مقدار شماره منحنی حوضه را با سرعت زیاد، هزینه کم و دقت قابل قبول بدست آورد. رابطه پیشنهادی در این روش به سه پارامتر تخلخل خاک، متوسط فاصله از سطح زمین تا تراز سطح ایستابی حوضه و پارامتر کنترل‌کننده عمق مؤثر خاک اشباع وابسته می‌باشد. حوضه آبریز کسلیان که به عنوان یکی از حوضه‌های معرف کشور می‌باشد برای ارزیابی نتایج حاصل از رابطه پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده ETM⁺ ماهواره لندست ۷ در تاریخ ۲۰۱۰ استفاده گردید و با انتقال تصاویر به محیط نرم افزار Geomatica و انجام برخی تصحیحات موردنیاز، نقشه کاربری اراضی حاصل و با تلفیق آن با نقشه‌های خاکشناسی، شیب و بازدیدهای میدانی نقشه شماره منحنی حوضه حاصل گردید. همچنین برای تخمین پارامترهای رابطه پیشنهادی از داده‌های جریان ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری ولیک‌بن و نیز واسنجی مدل نیمه توزیعی TOPMODEL استفاده بعمل آمد. نتایج نشان داد که متوسط وزنی شماره منحنی حوضه بدست آمده از روش‌های متداول و رابطه پیشنهادی به ترتیب در حدود ۵۹/۶ و ۶۲/۸ می‌باشد. همچنین نتایج حاکی از آن است که حداقل و حداکثر اختلاف بین متوسط وزنی شماره منحنی بدست آمده از رابطه پیشنهادی و روش‌های مبتنی بر GIS و RS بترتیب در حدود ۰/۳ و ۱۲ درصد می‌باشد.

کلمات کلیدی: شماره منحنی، SCS، تکنیک GIS و RS، مفهوم مازاد اشباع، مدل نیمه توزیعی TOPMODEL.

تاریخ دریافت مقاله: ۷ دی ۱۳۹۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۷ تیر ۱۳۹۳

1- PhD. Student in Hydraulic Structures, Tehran University, Tehran, Iran
2- Associate Professor, Water Engineering Dept., Faculty of Engineering and Technology, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. Email: shokoohi@eng.ikiu.ac.ir

*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
*- نویسنده مسئول

مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که مقدار عددی ۰/۰۵ برای محاسبه رواناب مناسب‌تر است. (Mishra and Singh, 1999) این استدلال که روش شماره منحنی بر اساس روش ماکوس پایه‌گذاری شده است، سه روش شماره منحنی جدول SCS، روش ماکوس و روش اصلاح شده شماره منحنی را با یکدیگر مقایسه نموده و نتیجه گرفتند که روش اصلاح شده شماره منحنی برای محاسبه رواناب نسبت به دو روش دیگر مناسب‌تر است. مطالعات متعددی جهت برآورد مقادیر شماره منحنی در سطح حوضه صورت گرفته است که عمده آنها از طریق تحلیل تصاویر ماهواره‌ای و تلفیق آنها با نقشه‌های خاکشناسی، زمین‌شناسی، گروه‌های هیدرولوژیک و بازدیدهای صحرایی می‌باشد. یعقوب زاده (۱۳۸۷) شماره منحنی حوضه آبریز منصورآباد بیرجند را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat ETM+ و IRS مربوط به سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۰۶ تهیه نمود. وی با تلفیق نقشه گروه‌های هیدرولوژیک خاک، نقشه‌های شیب، زمین‌شناسی، کاربری اراضی و بافت خاک و نیز به کمک جدول SCS، شماره منحنی حوضه را برای سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۰۶ تهیه نمود. در نهایت برای ارزیابی شماره منحنی به دست آمده، دبی حداکثر سیلابی با مدل HEC-HMS تعیین و با نتایج اندازه‌گیری شده در خروجی حوضه مقایسه گردید. نتایج نشان‌دهنده دقت ۸۰ درصدی شماره منحنی بدست آمده از طریق تکنیک GIS و RS می‌باشد. (Inci Tekeli et al., 2006) اعداد شماره منحنی را برای حوضه آبریز Guvence در هندوستان با استفاده از ابزارهای GIS و RS استخراج نمودند. آنها جهت تعیین کاربری اراضی از تصاویر ماهواره‌ای Landsat TM و برای تعیین تراکم پوشش گیاهی نیز از شاخص NDVI استفاده نمودند. این محققین با تلفیق موارد فوق به‌مراه نقشه‌های خاکشناسی و زمین‌شناسی، شماره منحنی حوضه را استخراج نمودند. نتایج حاکی از تطابق قابل قبول بین داده‌های بدست آمده از این روش و مقادیر بدست آمده از داده‌های مشاهداتی داشت. اکبریور و همکاران (۱۳۸۵)، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat ETM+ و نرم‌افزار ERDAS اقدام به تهیه نقشه کاربری اراضی حوضه آبریز کامه نمودند. این محققین با تلفیق نقشه‌های خاک، شیب، تشکیلات زمین‌شناسی، گروه‌های هیدرولوژیک خاک و بازدیدهای صحرایی، نقشه شماره منحنی SCS را در محیط ArcView استخراج نمودند.

بررسی‌های به عمل آمده و تحقیقات مذکور حاکی از آن است که در حال حاضر جهت برآورد مقادیر شماره منحنی حوضه احتیاج به حجم وسیعی از داده‌های خاکشناسی، بازدیدهای میدانی وسیع، تصاویر ماهواره‌ای و تحلیل‌های مختلف می‌باشد. علاوه بر موارد فوق دقت و مقیاس تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های موجود و نیز امکان دسترسی به اطلاعات مختلف می‌تواند مقادیر بدست آمده از تکنیک GIS و

در اکثر کشورهای جهان حتی در کشورهای پیشرفته به علت فقدان امکانات لازم، تهیه آمار مربوط به رواناب ناشی از بارش در حوضه‌های آبخیز یکی از مشکلات اساسی کارشناسان و محققین می‌باشد. بر این اساس مدل‌سازی بارش-رواناب از زمان‌های گذشته تاکنون همواره مورد توجه هیدرولوژیست‌ها بوده است. بدین لحاظ در طول چند دهه گذشته تلاش‌های زیادی جهت ابداع روش‌های تجربی و مدل‌های ریاضی مناسب برای برآورد رواناب حاصل از بارندگیها خصوصاً در حوضه‌های آبخیز فاقد ایستگاه هیدرومتری صورت گرفته است. یکی از این روش‌ها که کاربرد آن در دنیا عمومیت پیدا کرده است، روش شماره منحنی (SCS Curve-Number) است که توسط محققین و کارشناسان سازمان حفاظت خاک ایالات متحده آمریکا (SCS) ابداع گردیده است. روش شماره منحنی SCS نسبت به دیگر روش‌های برآورد رواناب از چندین مزیت قابل توجه برخوردار می‌باشد. این روش، روش مفهومی ساده برای تخمین مقدار رواناب مستقیم ناشی از رگبار بوده و در توسعه آن از داده‌های تجربی بسیار زیادی استفاده بعمل آمده است. این روش تنها وابسته به یک پارامتر به نام شماره منحنی (CN) می‌باشد. پارامتر CN نیز خود تابعی از خصوصیات اصلی تولید رواناب مانند گروه‌های هیدرولوژیک خاک، کاربری اراضی حوضه (کشاورزی، جنگلی و شهری)، وضعیت هیدرولوژیکی و وضعیت رطوبت پیشین خاک می‌باشد (SCS, 1986). روش شماره منحنی SCS، روشی آسان و قابل درک بوده و ورودی‌های آن طوری در نظر گرفته شده که بتوان از آن در کشور آمریکا و همچنین در دیگر کشورها استفاده نمود (Mishra and Singh, 2003). در مطالعات هیدرولوژی شماره منحنی جهت تعیین مقدار بارش نفوذ یافته در خاک و نیز مقدار بارشی که به رواناب سطحی تبدیل می‌شود، کاربرد دارد (Zhan and Huang, 2004). در حال حاضر بسیاری از مدل‌های حوضه‌ای مانند AGNPS (Yang et al., 1987) EPIC، SWAT (Williams, 1995) (Arnold et al., 1996) و مدل WMS از روش شماره منحنی SCS جهت محاسبه میزان رواناب حوضه در مقیاس روزانه استفاده می‌نمایند. در مورد روش شماره منحنی، تحقیقات گسترده‌ای صورت گرفته است. (Betson and Blaes, 1981) با استفاده از ۵۸۵ سیلاب مشاهداتی از ۳۶ حوضه آبخیز نشان دادند که ارتفاع رواناب حاصل از بارش در مقابل تغییرات شماره منحنی بسیار حساس می‌باشد. آنها همچنین با مطالعه ۱۵ ویژگی فیزیکی حوضه به این نتیجه رسیدند که کاربری اراضی و ویژگی‌های فیزیکی خاک مهمترین عوامل در تعیین شماره منحنی هستند. (Woodward et al., 2003) فرض اولیه روش شماره منحنی، یعنی نسبت جذب اولیه (Ia/S) که مقدار ثابت ۰/۲ می‌باشد را

واقع گردد. از دیگر مزایای این روش می‌توان به برآورد رستری شماره منحنی نیز اشاره نمود. در روش‌های حاضر شماره منحنی حوضه برای یک محدوده خاص تنها یک عدد ارائه می‌دهد. به عبارتی بهتر روش‌های حاضر تنها تخمین‌های کلی از این پارامتر برای هر زیرحوضه ارائه می‌دهند. با ترکیب روش SCS-CN و توزیع مکانی شاخص توپوگرافی می‌توان علاوه بر ارزیابی مناطق اشباع، به برآورد مقادیر CN در سراسر حوضه پرداخت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- استخراج نقشه شماره منحنی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (روش متداول)

همانطور که در بخش مقدمه نیز عنوان گردید، برای تهیه نقشه شماره منحنی احتیاج به داده‌هایی همچون نقشه کاربری اراضی حوضه، نقشه گروه‌های هیدرولوژیک، نقشه خاکشناسی و بازدهای میدانی می‌باشد. برای تهیه نقشه کاربری اراضی روش‌های مختلفی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به برداشت صحرایی، استفاده از واحدهای فیزیوگرافی، تفسیر بصری عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای و همچنین پردازش و آنالیز تصاویر رقومی هوایی و ماهواره‌ای اشاره نمود. این روش‌ها مرتباً در حال توسعه و بهبود بوده و به خصوص با توجه به پیشرفت‌های روزافزون علوم و فن‌آوری فضای و ماهواره‌ای، محققین به دنبال راه‌حل‌هایی برای رفع نواقص موجود و در نتیجه افزایش دقت و صحت نقشه کاربری اراضی استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای می‌باشند. در این تحقیق و با توجه به داده‌های ماهواره‌ای موجود و قابل دستیابی در کشور از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده ETM+ ماهواره لندست ۷ در تاریخ ۲۰۱۰ استفاده گردید و با انتقال تصاویر به محیط نرم افزار Geomatica و انجام برخی تصحیحات موردنیاز (تصحیحات هندسی، رادیومتری و اتمسفری) و نیز انجام عملیات تصحیح و پردازش بر روی تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از ۳۱ نقطه کنترل زمینی، کاربری اراضی حوضه حاصل گردید (جدول ۱). در مرحله بعد با تهیه نقشه خاک حوضه آبریز کسلیان در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ و تلفیق آن با لایه‌های شیب، رده‌بندی خاک و کاربری اراضی بدست آمده در مرحله قبل، نقشه گروه‌های هیدرولوژیک خاک در سه گروه A، B و C بدست آمد. در جدول ۲، درصد و مساحت گروه‌های هیدرولوژیک خاک حوضه آبریز کسلیان ارائه شده است. در نهایت نقشه شماره منحنی حوضه با تلفیق نقشه کاربری اراضی حوضه و نقشه گروه‌های هیدرولوژیک خاک و نیز بازدهای میدانی حاصل گردید (شکل ۱).

محاسبات صورت گرفته حاکی از آن است که متوسط شماره منحنی حوضه به روش مذکور حدود ۵۹/۶ می‌باشد.

RS را با عدم قطعیت معنی‌داری روبرو نماید. محققین نشان داده‌اند که روش شماره منحنی SCS را به نوعی می‌توان با مفهوم مازاد اشباع^۱ که اساس مدل نیمه توزیعی^۳ TOPMODEL می‌باشد، مرتبط دانست (Hjelmfelt, 1980; Steenhuis et al., 1995; Steve et al., 2004). در این ارتباط (Steenhuis et al., 1995) توانستند با استفاده از روش شماره منحنی SCS الگوی تشکیل مناطق اشباع^۲ را پیش‌بینی نماید. بر اساس نظر این محققین در مناطقی که مکانیزم مازاد اشباع حاکم می‌باشد، می‌توان از روش شماره منحنی SCS جهت تخمین نگهداشت آب در حوضه استفاده نمود. (Schneiderman et al., 2007) نیز با بکارگیری شاخص توپوگرافی رطوبتی (Soil Topographic Index) به کار رفته در ساختار TOPMODEL و تلفیق آن با رابطه SCS جهت تولید رواناب توانستند توزیع مکانی مناطق مستعد تولید رواناب را شناسایی نمایند. طبق نظر این محققین استفاده از شاخص مذکور برای مکان‌یابی مناطق مستعد تولید رواناب بسیار کارآتر و واقعی‌تر از روشی است که در معادلات SCS به کار می‌رود (استفاده از نقشه کاربری اراضی و نقشه خاک). همچنین (Garen and Moore, 2005) اظهار می‌دارند که مشکل اصلی تمامی مدل‌هایی که از روش SCS برای تخمین رواناب استفاده می‌کنند، توجه بیشتر از حد به مقوله کاربری اراضی و عدم توجه قابل قبول به تاثیر شیب زمین و ارتباط آن با میزان تولید رواناب می‌باشد. (Easton et al., 2008) نیز با ترکیب شاخص توپوگرافی رطوبتی و مدل SWAT به شبیه‌سازی انتقال آلودگی در رودخانه، میزان رواناب تولیدی بخش‌های مختلف حوضه و میزان جریان ورودی به آب زیرزمینی پرداختند. نتایج نشان داد که ترکیب توامان رابطه SCS به کار رفته در مدل SWAT (برای شبیه‌سازی رواناب) و شاخص توپوگرافی رطوبتی نتایج به واقع نزدیک‌تری را نسبت به مدل SWAT در بر دارد.

با توجه به توضیحات مذکور، توسعه روشی که با کمترین اطلاعات و داده‌ها نتایج قابل قبولی را ارائه دهد امری ضروری می‌باشد. لذا هدف اصلی این تحقیق، پیدا کردن روشی مناسب جهت تخمین CN در حوضه‌های آبریز می‌باشد. شاخص توپوگرافی^۴ موجود در TOPMODEL بیانگر میزان (پتانسیل) ذخیره در سطح حوضه می‌باشد (Mendicino and Sloe, 1997). این شاخص مبین توزیع مکانی رطوبت خاک و سطوح اشباع در سطح حوضه می‌باشد و به راحتی و از روی نقشه‌های رقومی ارتفاعی (DEMs) قابل استخراج می‌باشد. همانطور که عنوان شد نحوه استخراج مقادیر شماره منحنی از روی تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌های کاربری اراضی، نقشه‌های خاکشناسی و ... فرآیندی بس دشوار و طاقت‌فرساست. لذا روشی که تنها از نقشه توپوگرافی جهت تخمین مقادیر شماره منحنی استفاده می‌کند، می‌تواند مورد توجه بسیاری از کارشناسان و محققین

۲-۲- تئوری روش پیشنهادی

همانطور که عنوان گردید، روش پیشنهادی جهت استخراج شماره منحنی حوضه، ترکیبی از مفهوم مازاد اشباع TOPMODEL و مازاد نفوذ SCS می‌باشد. در ادامه به بررسی مفاهیم مذکور پرداخته خواهد شد.

۲-۲-۱- روش شماره منحنی SCS

روش شماره منحنی (CN) روشی ساده و مناسب برای برآورد رواناب می‌باشد. این روش باران مازاد را به عنوان تابعی از بارش تجمعی، پوشش خاک، کاربری اراضی و رطوبت پیشین و با استفاده از معادله زیر تخمین می‌زند:

$$Q = \frac{(P-I_a)^2}{P-I_a+S} \quad (1)$$

در رابطه فوق، Q : میزان رواناب تجمعی (میلیمتر) تا زمان t ؛ P : عمق بارش تجمعی تا زمان t (میلیمتر)، I_a : مقدار جذب اولیه (میلیمتر)، S : حداکثر پتانسیل نگهداشت آب در سطح حوضه که معیاری از توانایی حوضه آبریز در جمع کردن و حفظ بارش می‌باشد (میلیمتر). تا زمانی که بارش تجمعی فراتر از جذب اولیه نباشد، بارش مازاد و از این رو جریان سطحی صفر خواهد بود. بر این اساس می‌توان روش شماره منحنی را از دسته روشهای هورتونی برای محاسبه رواناب دانست. سازمان حفاظت خاک آمریکا یک رابطه تجربی را بین تلفات اولیه و ظرفیت نگهداشت آب در خاک ارائه نموده که به صورت زیر می‌باشد:

$$I_a = 0.2 S \quad (2)$$

حداکثر ظرفیت نگهداشت آب در خاک (S) و خصوصیات حوضه از طریق یک واسطه میانی به نام شماره منحنی (CN) به هم مرتبط می‌شوند. این ارتباط به صورت معادله زیر می‌باشد:

$$S = \begin{cases} \frac{1000-10 CN}{CN} & in \\ \frac{25400-254 CN}{CN} & mm \end{cases} \quad (3)$$

در رابطه فوق، CN شماره منحنی می‌باشد که از مقدار ۱۰۰ برای سطوح آزاد آب تا ۳۰ برای خاکهایی که سرعت نفوذپذیر بالایی دارند، تغییر می‌کند. با داشتن مقادیر بارندگی و شماره منحنی حوضه می‌توان از روی معادلات فوق ارتفاع بارش مازاد (رواناب) را به دست آورد.

۲-۲-۲- تئوری مازاد ظرفیت اشباع و TOPMODEL

TOPMODEL، یک مدل نیمه توزیعی است که تغییرات توپوگرافی منطقه و سطوح مشارکت کننده در رواناب نقش اصلی را در آن ایفا می‌کنند. اطلاعات توپوگرافی مورد استفاده در این مدل در قالب شاخصی به نام شاخص توپوگرافی معرفی می‌گردد. این شاخص

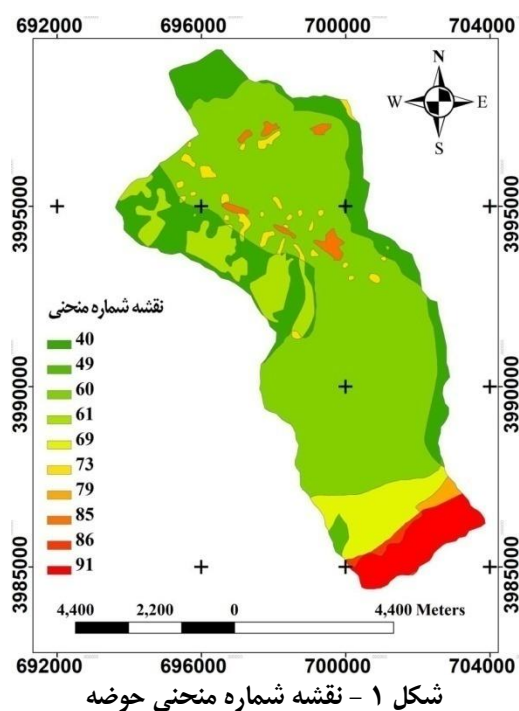
جدول ۱- درصد و مساحت کاربری اراضی حوضه آبریز

کسیلیان

نوع کاربری	مساحت (km ²)	درصد (%)
اراضی بایر	۴/۱۴	۶/۱
اراضی زراعی دیم	۵/۶۰	۸/۲
اراضی جنگلی	۵۲/۵۰	۷۷/۲
اراضی مرتعی	۴/۹۵	۷/۳
اراضی مسکونی (روستائی)	۰/۸۳	۱/۲

جدول ۲- درصد و مساحت گروه‌های هیدرولوژیک خاک

گروه‌های هیدرولوژیک خاک	مساحت (km ²)	درصد (%)
A	۱۶/۷	۲۴/۶
B	۴۷/۰	۶۹/۱
C	۴/۳	۶/۳



همانطور که مشاهده می‌شود و قبلاً نیز عنوان گردید، برای تهیه نقشه شماره منحنی با استفاده از این روش به داده‌های زیاد و نیز انجام عملیات محاسباتی متعددی نیاز می‌باشد. علاوه بر موارد فوق دقت و مقیاس تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های موجود و نیز امکان دسترسی به اطلاعات مختلف می‌تواند از دیگر مشکلات پیش‌روی محققین و کارشناسان جهت استفاده از این روش می‌باشد. با توجه به موارد مذکور، در این تحقیق با استفاده از مفهوم مازاد رطوبت روشی توسعه داده شده تا به کمک آن بتوان شماره منحنی حوضه را بدون داشتن اطلاعات متعدد و نیز عملیات محاسباتی اندک محاسبه نمود. در ادامه جزئیات مربوط به این روش ارائه شده است.

z: عمق پروفیل خاک (در راستای پائین دست)، K_0 : ضریب هدایت هیدرولیکی در سطح زمین (متر بر ساعت) که برای کل حوضه مقداری ثابت در نظر گرفته می شود و f : فاکتور کاهش ضریب هدایت هیدرولیکی در برابر عمق که این پارامتر نیز برای کل حوضه مقداری ثابت در نظر گرفته می شود (متر/متر). یکی از فرض های اساسی TOPMODEL این است که تراز سطح ایستابی با سطح زمین موازی می باشد. بنابراین جریان زیرسطحی را در موقعیت x (شکل ۲) می توان از قانون دارسی و به صورت زیر بدست آورد (Sivapalan et al., 1987):

$$q_x = T_x(z_x) \cdot \tan\beta_x \quad (۶)$$

در رابطه فوق $\tan\beta_x$: شیب سطح زمین در نقطه x ، $T_x(z_x)$: قابلیت انتقال در نقطه x و در فاصله z_x از سطح سفره آب زیرزمینی و q_x : دبی در واحد عرض می باشد. مقدار z_x نشان دهنده فاصله از سطح زمین تا تراز سطح ایستابی در موقعیت x می باشد. مقدار $T_x(z_x)$ با انتگرال گیری از رابطه ۵ در راستای عمق (راستای قائم) بدست می آید (Sivapalan et al., 1987):

$$T_x(z_x) = \int_{z_x}^Z K_s(x) \cdot dz = \frac{K_0}{f} (\exp(-fz) - \exp(fz)) = \frac{1}{f} (K_s(z_x) - K_s(Z)) \quad (۷)$$

در رابطه فوق Z مبین انتهای لایه اشباع می باشد. به طور کلی فرض بر این است که ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در اعماق پایین تر، نسبت به مقدار این ضریب در عمق z_x (شکل ۳) قابل اغماض می باشد (Beven and Kirkby, 1979). با جایگزینی رابطه فوق در رابطه دارسی خواهیم داشت:

$$q_x = \frac{K_0}{f} \tan\beta_x \cdot \exp(-fz_x) = T_0 \cdot \tan\beta_x \cdot \exp(-fz_x) \quad (۸)$$

در رابطه فوق $T_0 = \frac{K_0}{f}$ ، ضریب انتقال خاک اشباع می باشد. همچنین فرض بر این است که مقادیر K_0 و f در سراسر حوضه مقداری ثابت هستند. در شکل ۲ نیز نمائی از ترم های به کار رفته در معادله پیوستگی و معادله دارسی و نیز نحوه حرکت آب در محیط های متخلخل نشان داده شده است. شکل مذکور نشان دهنده نحوه ورود بارش به یک سطح و خروج آن از انتها به صورت جریان زیرسطحی است. در شکل ۳ نیز نمائی از نحوه شکل گیری رواناب در TOPMODEL نشان داده شده است. در حالت ماندگار و با توجه به معادله پیوستگی، رابطه زیر برقرار می باشد (Sivapalan et al., 1987):

$$a_x \cdot R = T_0 \cdot \tan\beta_x \cdot \exp(-f \cdot z_x) \quad (۹)$$

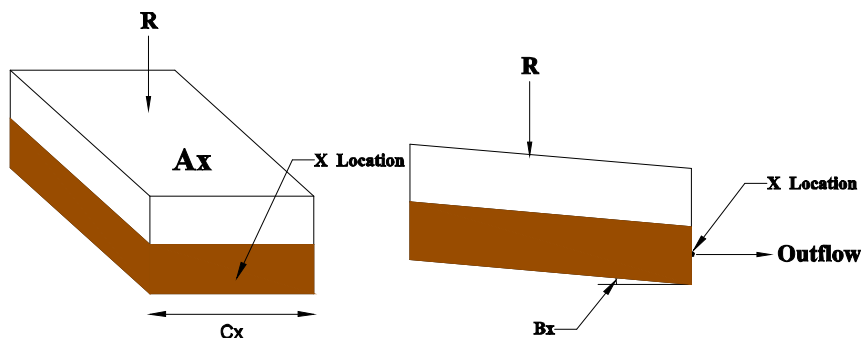
a_x : مساحت زهکشی بالادست موقعیت x در واحد عرض (A_x/C_x) و R : میزان تخلیه به آب زیرزمینی (متر بر ساعت) که توزیع آن در کل حوضه یکنواخت فرض می شود. با حل رابطه فوق بر حسب z_x خواهیم داشت (Beven and Kirkby, 1979):

مبین تمایل تجمع جریان و حرکت آن در راستای شیب پایین دست به وسیله نیروی ثقل می باشد و به صورت رابطه ۴ تعریف می گردد:

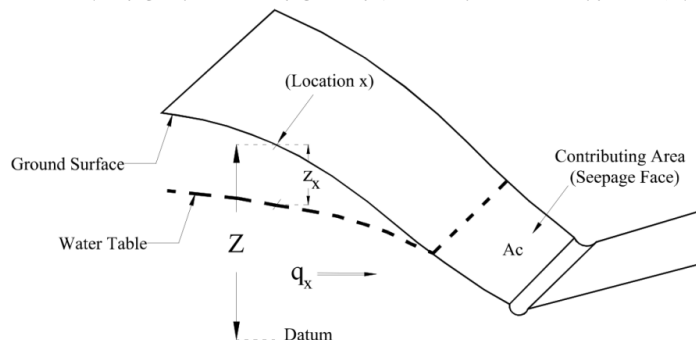
$$\lambda = Ln(a/\tan\beta) \quad (۴)$$

در رابطه فوق λ : شاخص توپوگرافیکی، Ln : لگاریتم طبیعی، a : مساحت زهکشی محدوده بالادست^۵ هر سلول در واحد عرض و $\tan\beta$: شیب موضعی سطح زمین می باشد (Beven and Kirkby, 1979). فرضیات اساسی این مدل عبارتند از: الف) آب زیرزمینی در سراسر حوضه آبریز در حالت شبه ماندگار و به صورت یکنواخت تغذیه می شود. ب) گرادیان هیدرولیکی موضعی تقریباً معادل با شیب عمومی سطح زمین ($\tan\beta$) می باشد. ج) رابطه نمائی نزولی جهت محاسبه هدایت هیدرولیکی (ظرفیت انتقال) در برابر عمق حاکم است و د) سلول های دارای شاخص توپوگرافی یکسان، از نظر هیدرولوژیکی مشابه اند (Beven, 1997; Ducharme, 2009). مطالعات گذشته در رابطه با مدل سازی فرآیند بارش- رواناب، اغلب از نظریه هورتون تبعیت می کردند. در مقابل این نظریه، نظریه ای دیگر ارائه شده است که با عنوان تئوری مازاد اشباع اثر جریان های زیرسطحی و جریان های مازاد بر میزان اشباع خاک را در تولید رواناب در نظر می گیرد (Beven and Kirkby, 1979). بر اساس تئوری نفوذ هورتن، رواناب سطحی حتی در صورتی که لایه خاک اشباع نگردد نیز تولید خواهد شد. اما بر اساس تئوری مازاد اشباع، جریان سطحی تنها در صورتی رخ می دهد که کل لایه خاک اشباع گردد و سپس مازاد ظرفیت اشباع به رواناب تبدیل می گردد. علاوه بر حالت مذکور، رواناب سطحی در اثر برگشت جریان زیرسطحی به سطح زمین در مناطق اشباع نیز ایجاد خواهد گردید. جریان زیرسطحی نیز معمولاً در شرایطی رخ می دهد که لایه های بالائی خاک از قدرت انتقال هیدرولیکی بالائی برخوردار بوده و نیز دارای شیب طولی زیادی در جهت حرکت جریان باشند. در TOPMODEL از روش دوم (تئوری مازاد اشباع) جهت تولید رواناب در سطح حوضه استفاده می گردد. الگوی شکل گیری مناطق اشباع در این مدل وابستگی بسیار زیادی به شاخص توپوگرافی دارد. مقادیر بالای شاخص توپوگرافی نشان از تمایل بالای ایجاد حالت اشباع دارد در حالیکه مقادیر کوچکتر این شاخص نشان دهنده پتانسیل کم توسعه مناطق اشباع می باشد. با توجه به رابطه شماره ۴ می توان گفت که مقادیر بالای این شاخص در مناطقی رخ می دهد که مساحت زهکشی بالادست زیاد و شیب موضعی ملایم باشد (مقادیر زیاد a مقادیر کم $\tan\beta$). در TOPMODEL ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع خاک از یک رابطه نمائی در برابر عمق پیروی می نماید (Beven et al., 1984). این رابطه به شرح زیر می باشد:

$$K_s(z) = K_0 \cdot \exp(-f \cdot z) \quad (۵)$$



شکل ۲- نمایی از ترم‌های مورد استفاده در معادله پیوستگی و معادله داریسی و حرکت آب در محیط متخلخل



شکل ۳- نمایی از شکل‌گیری رواناب در TOPMODEL (Sivapalan et al., 1987)

یکی دیگر از قراردادهای این مدل تعریف پارامتر مقیاس^۶ به شکل زیر است که در آن n_{drain} مبین تخلخل خاک می‌باشد (Beven and Kirkby, 1979):

$$m = \frac{n_{drain}}{f} \quad (17)$$

با ترکیب تمامی روابط مذکور، رابطه زیر جهت محاسبه فاصله تا تراز سطح ایستابی در موقعیت x حاصل می‌گردد (Beven and Kirkby, 1979):

$$z_x = \bar{z} + \frac{m}{n_{drain}} \left(\bar{\lambda} - \ln \left(\frac{a_x}{\tan \beta_x} \right) \right) \quad (18)$$

در رابطه بالا، \bar{z} مقدار متوسط مکانی پارامتر z_x (متوسط فاصله تا تراز سطح ایستابی حوضه) در سطح حوضه می‌باشد. رابطه ۱۸ بیانگر این مطلب می‌باشد که فاصله تا تراز سطح ایستابی در هر موقعیتی، وابسته به متوسط فاصله تا تراز سطح ایستابی حوضه آبریز و تفاضل پارامتر $\bar{\lambda}$ (متوسط شاخص توپوگرافی) و λ_x (مقدار شاخص توپوگرافی در موقعیت x) می‌باشد. بخش‌هایی از حوضه که در آنها $\ln \left(\frac{a}{\tan \beta} \right)$ بالا می‌باشد، برای اشباع شدن و تولید رواناب از احتمال زیادی برخوردار می‌باشند. این بخش‌ها از لحاظ توپوگرافیکی همگرا بوده و دارای شیب ملایم و قابلیت انتقال^۷ پائینی می‌باشند. این بخش‌ها محدوده بزرگی از حوضه بالادست خود را زهکشی نموده و لذا از ظرفیت و توانائی محدودی در هدایت جریان در راستای پایین‌دست برخوردار می‌باشند (Beven and Kirkby, 1979). نکته دیگری که از معادله ۱۸ قابل برداشت می‌باشد آن است که در هر سلول محاسباتی هرچه

$$z_x = -\frac{1}{f} \ln \left(\frac{a_x R}{T_o \tan \beta_x} \right) = -\frac{1}{f} \ln \left(\frac{a_x}{\tan \beta_x} \times \frac{R}{T} \right) = \quad (10)$$

$$-\frac{1}{f} \ln \left(\frac{a_x}{\tan \beta_x} \right) - \frac{1}{f} \ln \left(\frac{R}{T} \right)$$

با انتگرال‌گیری از رابطه ۱۰ در کل حوضه، مقدار متوسط فاصله تا تراز سطح ایستابی در کل حوضه به شرح زیر خواهد بود (Beven and Kirkby, 1979):

$$\bar{z} = \frac{1}{A} \int z_x \cdot dA = \frac{1}{f \cdot A} \int \left(-\ln \left(\frac{a_x}{T_o \tan \beta_x} \right) - \ln R \right) \cdot dA \quad (11)$$

$$\bar{z} = \frac{-1}{f \cdot A} \int \left(\ln \left(\frac{a_x}{\tan \beta_x} \right) \times \left(\frac{1}{T_o} \right) + \ln R \right) \cdot dA = \frac{-1}{f \cdot A} \int \left(\ln \left(\frac{a_x}{\tan \beta_x} \right) - \ln T_o + \ln R \right) \cdot dA \quad (12)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{A} \int \ln \left(\frac{a_x}{\tan \beta_x} \right) \cdot dA \quad (13)$$

$$\bar{z} = \frac{-1}{f} \left(\bar{\lambda} + \ln \left(\frac{R}{T_o} \right) \right) \quad (14)$$

در رابطه فوق $\bar{\lambda}$: متوسط شاخص توپوگرافی (بدون بعد) در سطح حوضه می‌باشد. با کم کردن رابطه ۱۴ از رابطه ۱۰ خواهیم داشت (Beven and Kirkby, 1979):

$$z_x - \bar{z} = -\frac{1}{f} \ln \left(\frac{a_x}{\tan \beta_x} \right) - \frac{1}{f} \ln \left(\frac{R}{T_o} \right) + \frac{1}{f} \bar{\lambda} + \frac{1}{f} \ln \left(\frac{R}{T_o} \right) \quad (15)$$

$$z_x = \bar{z} + \frac{1}{f} \left(\bar{\lambda} - \ln \left(\frac{a_x}{\tan \beta_x} \right) \right) \quad (16)$$

مربوطه از ظرفیت نگهداشت بالائی برخوردار بوده و هر چه مقدار z_x کمتر باشد حاکی از پایین بودن پتانسیل نگهداشت آب در خاک می-باشد. با در نظر گرفتن رابطه میان S و z_x معادله زیر جهت محاسبه مقدار نگهداشت آب (S) در هر سلول بدست می آید:

$$S = z_x = \bar{z} + \frac{m}{n_{\text{drain}}} \left(\bar{\lambda} - \ln \left(\frac{a_x}{\tan \beta_x} \right) \right) \quad (19)$$

با توجه به رابطه فوق، معادله نهایی برای محاسبه CN نیز به صورت زیر حاصل می گردد:

$$CN = \frac{25.4}{\bar{z} + \frac{m}{n_{\text{drain}}} \left(\bar{\lambda} - \ln \left(\frac{a}{\tan \beta} \right) \right) + 0.254} \quad (20)$$

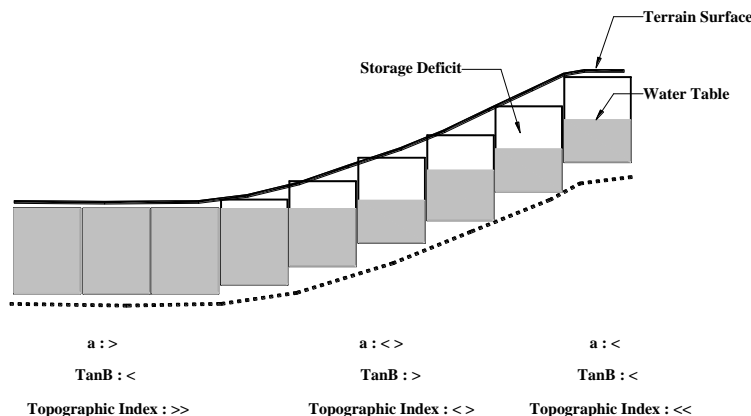
در روابط ۱۹ و ۲۰ برای بدست آوردن مقدار نگهداشت آب در خاک و نیز مقدار شماره منحنی احتیاج به ۳ پارامتر m ، \bar{z} و n_{drain} می باشد. ترمهای $\bar{\lambda}$ و $\ln \left(\frac{a_x}{\tan \beta_x} \right)$ را نیز می توان به راحتی از روی نقشه های توپوگرافی و مدل های رقومی ارتفاعی بدست آورد. مقادیر مندرج در جدول ۳ که توسط محققین مختلف پیشنهاد شده است می تواند راهنمای خوبی برای تعیین پارامتر m باشد. به این مقوله در بخش بعد بیشتر پرداخته می شود.

تحقیقات حاکی از آن است که مقدار n_{drain} در بیشتر خاک ها در محدوده ۰/۴۰ تا ۰/۵۲ متغیر می باشد (Cosby et al., 1993;

مقدار فاصله تا تراز سطح ایستابی کمتر باشد، تمایل آن سلول به اشباع و تولید رواناب افزایش و پتانسیل نگهداشت آب در خاک کاهش می یابد. در شکل ۴ نمائی شماتیک از تغییرات تراز سطح ایستابی و کمبود میزان اشباع با تغییر شیب سلول ($\tan \beta$) و مساحت زهکشی بالادست (a) آن نشان داده شده است. در این شکل بخوبی تأثیر همزمان کاهش شیب ($\tan \beta$)، افزایش مساحت زهکشی بالادست (a) و کاهش فاصله سطح آب زیرزمینی تا سطح زمین (Z_x) در اشباع سلولها نشان داده شده است.

۲-۲-۳- ترکیب روش شماره منحنی SCS با مفاهیم مازاد اشباع TOPMODEL

برای بدست آوردن عدد شماره منحنی، ابتدا بایستی رابطه مورد نیاز جهت تخمین پتانسیل نگهداشت آب خاک (S) را به دست آورد. همانطور که در شکل های ۳ و ۴ نشان داده شده است، مقدار z_x نشان دهنده فاصله تا تراز سطح ایستابی در هر سلول می باشد. مقدار z_x علاوه بر نشان دادن فاصله تا تراز سطح ایستابی در هر سلول، مبین ظرفیت باقیمانده آن سلول جهت رسیدن به حالت اشباع می-باشد. به عبارت بهتر z_x نشان دهنده کمبود اشباع و پتانسیل نگهداشت آب در خاک می باشد. هر چه مقدار z_x بیشتر باشد سلول



شکل ۴- نحوه تغییرات a و $\tan \beta$ و شاخص توپوگرافی در راستای شیب زمین (Gumindoga, 2010)

جدول ۳- مقادیر پیشنهاد شده برای پارامتر m توسط محققین مختلف

مرجع	مقدار m (متر)	متوسط شاخص توپوگرافی (بدون بعد)	ابعاد سلول DEM (متر)	مساحت (کیلومتر مربع)	حوزه مورد مطالعه
Ambroise et al., 1996	۰/۰۴۱	۵/۹۴	۵	۰/۳۴	رینگلباخ، فرانسه
Gallart et al., 1994	۰/۰۱۱	۶/۲	۱۵	۰/۳۶	کال پاریسا، اسپانیا
Pinol et al., 1997	۰/۱	*	*	۰/۳۸۵	کاتالونیا، اسپانیا
Wolock and McCabe, 1995	۰/۰۶	۶/۶-۸/۴	۳۰-۹۰	۳/۹	رودخانه اسلیپر، آمریکا
Beven and Wood, 1983	۰/۰۳	۶/۶	*	۱۰۵	داویدسون، آمریکا
Beven and Wood, 1983	۰/۰۱	۷/۶	*	۴۵۶	نورث فورک، آمریکا
Bruneau et al., 1995	۰/۰۲۷	*	۳۰-۱۰۰	۱۲	کوت دان، فرانسه
Mencicino and Sole, 1997	۰/۰۰۷	۷/۰۳	۳۰	*	توربو کریک، ایتالیا
Holko and Lepisto, 1997	۰/۰۲۱	*	*	۲۳/۱	جالوکی، اسلواکی

پارامتر m است که مقدار صریح و مشخصی ندارد. در نتیجه با یک آنالیز حساسیت ساده می‌توان اثر پارامتر m را بر روی شماره منحنی و ظرفیت نگهداشت آب در خاک برآورد نمود. برای انجام این کار با استفاده از رابطه ۲۰ مقدار شماره منحنی در سراسر حوضه و برای هر سلول محاسبه گردید و سپس با میانگین‌گیری وزنی، شماره منحنی متوسط حوضه برآورد گردید.

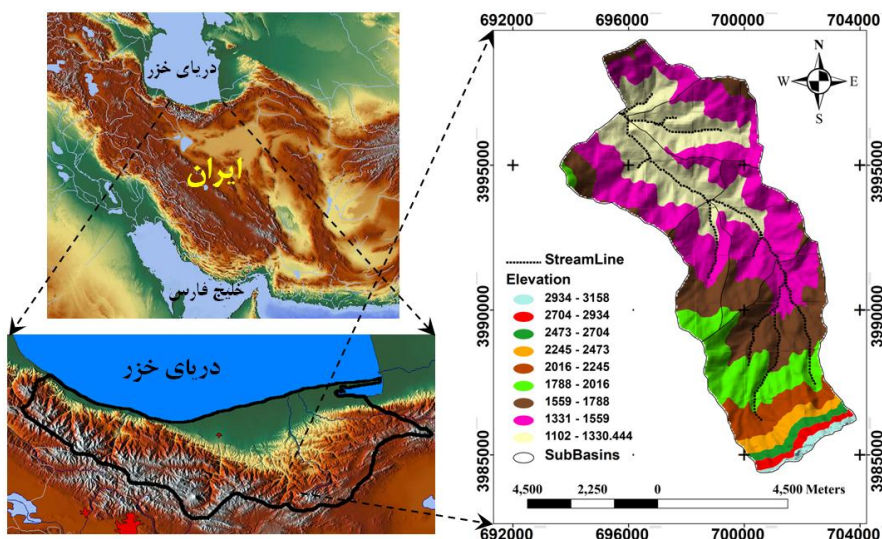
۲-۳- محدوده مطالعاتی

محدوده مورد مطالعه در این تحقیق جهت ارزیابی رابطه پیشنهادی، حوضه آبریز کسلیان (یکی از زیرحوضه‌های رودخانه تالار استان مازندران) می‌باشد. این حوضه با توجه به وضعیت طبیعی آب و هوا و پوشش گیاهی، معرف مناطق کوهستانی و جنگلی در البرز میانی می‌باشد. این حوضه در شرق راه آهن تهران- مازندران و در ۲۷ کیلومتری بخش پل سفید به مختصات $53^{\circ}11'$ تا $53^{\circ}17'$ طولی و $35^{\circ}59'$ تا $36^{\circ}07'$ عرضی واقع است. حوضه آبریز کسلیان به مساحت ۶۷ کیلومترمربع و با محیط ۳۷/۸ کیلومتر توسط رودخانه کسلیان به طول حدود ۱۷ کیلومتر زهکشی می‌شود. متوسط شیب این حوضه ۱۶/۴ درصد و محدوده تغییرات ارتفاعی آن بین ۱۱۰۰ تا ۲۶۵۰ متر می‌باشد. موقعیت حوضه آبریز این رودخانه و مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با ابعاد سلولی ۵۰ متر در شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین مشخصات فیزیوگرافی محدوده مطالعاتی در جدول ۴ ارائه شده است.

(Rawls et al., 1993) و لذا مقدار متوسط ۰/۴۶ می‌تواند به عنوان تخمینی مناسب برای آن در نظر گرفته شود. همچنین با داشتن نقشه خاکشناسی محدوده مطالعاتی می‌توان مقدار دقیق آن را تعیین نمود. مقدار پارامتر \bar{z} نیز بستگی به وضعیت توپوگرافی حوضه و تراز سطح ایستابی داشته و معمولاً از حوضه‌ای به حوضه دیگر متفاوت می‌باشد. برای بدست آوردن مقدار صحیح این پارامتر می‌توان از روش آزمون و خطا استفاده نمود. به این صورت که ابتدا مقداری را برای آن در نظر گرفته و پس از بدست آوردن مقادیر \bar{z}_r در سطح حوضه، متوسط آن را محاسبه نمود. چنانچه مقدار بدست آمده با مقدار فرض شده یکسان باشد عملیات را متوقف کرده و \bar{z} را بدست می‌آوریم. علاوه بر روش مذکور می‌توان با اجرای TOPMODEL در سطح حوضه مقدار صحیح \bar{z} را بدست آورد. در این تحقیق از روش دوم یعنی اجرای TOPMODEL برای چندین رخداد سیل و بدست آوردن مقدار متوسط پارامتر \bar{z} استفاده شده است. در این پژوهش از سیلاب‌های ثبت شده در مورخه‌های ۱۳۷۲/۱/۰۸ و ۱۳۶۶/۷/۱۷ برای واسنجی مدل و از سیلاب‌های ثبت شده در مورخه‌های ۱۳۸۴/۸/۱۸ و ۱۳۷۲/۶/۱۳ برای صحت‌سنجی مدل استفاده شده است. بررسی تحقیقات صورت گرفته در زمینه کاربردهای TOPMODEL حاکی از آن است که مقدار پارامتر m در محدوده‌ای بین ۰/۰۷ تا ۰/۱ متغیر می‌باشد (جدول ۳)، اما بنا بر توصیه (Beven, 1997) مقدار پهنه این پارامتر بایستی بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۵ در نظر گرفته شود. با توجه به توضیحات فوق می‌توان چنین استنباط نمود که در رابطه ۱۸ تنها

جدول ۴ - مشخصات فیزیوگرافی حوضه آبریز رودخانه کسلیان

نام حوضه آبریز	مساحت حوضه (کیلومتر مربع)	محیط حوضه (کیلومتر)	طول آبراهه اصلی (کیلومتر)	ضریب گراولوس	شیب متوسط رودخانه (%)	ارتفاع متوسط حوضه (متر)
کسلیان	۶۷	۳۷/۸	۱۷/۲	۱/۳	۴/۷	۱۵۶۹



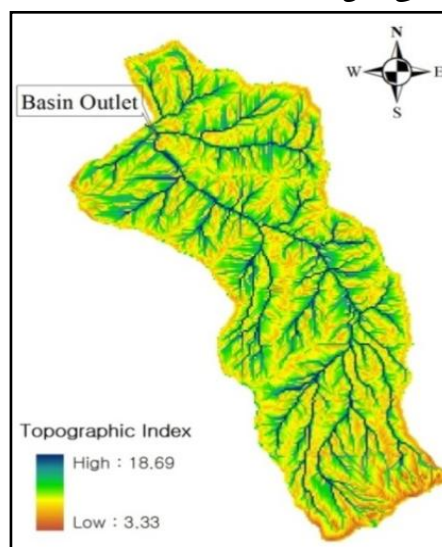
شکل ۵ - موقعیت حوضه، وضعیت شبکه آبراهه‌ها و DEM حوضه آبریز کسلیان

۳- نتایج و بحث

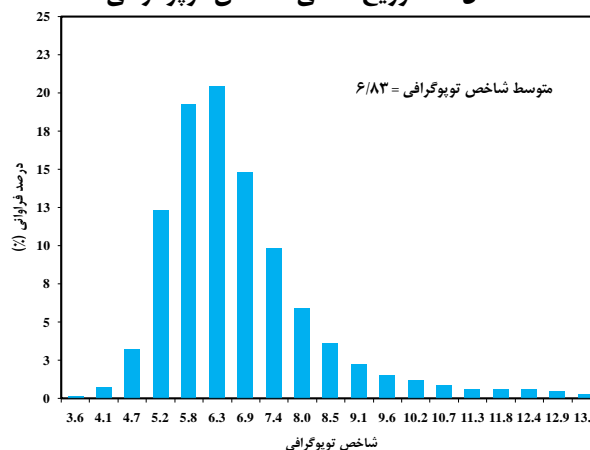
۳-۱- محاسبه پارامترهای روش پیشنهادی برای حوضه آبریز کسلیان

۳-۱-۱- شاخص توپوگرافی

در این تحقیق برای استخراج توزیع مکانی و فراوانی شاخص توپوگرافی از DEM با ابعاد سلولی ۵۰ متر و برنامه A DTM که توسط (Quinn et al., 1995) توسعه داده شده است، استفاده به عمل آمد. در شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب توزیع مکانی و فراوانی شاخص توپوگرافی حوضه مطالعاتی نشان داده شده است.



شکل ۶- توزیع مکانی شاخص توپوگرافی



شکل ۷- توزیع فراوانی شاخص توپوگرافی

۳-۱-۲- پارامتر n_{drain} و z

با توجه به وضعیت خاکشناسی محدوده مطالعاتی و از آنجایی که گروه‌های هیدرولوژیکی خاک حوضه آبریز کسلیان عمدتاً A یا B می‌باشند، در این تحقیق مقدار متوسط پارامتر تخلخل خاک ۰/۴۴ در نظر گرفته شده است. همچنین در این تحقیق با واسنجی و

صحت‌سنجی TOPMODEL برای چندین رخداد سیل، مقدار متوسط پارامتر \bar{z} حاصل گردید. مطابق نتایج به دست آمده در جدول ۵، متوسط این پارامتر برای حوضه آبریز کسلیان در حدود ۰/۴۲ متر می‌باشد.

جدول ۵- نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی

TOPMODEL

رخداد	شاخص کارائی مدل (نش- ساتکلیف)	\bar{z} (متر)
۱۳۷۲/۱/۰۸	۹۰/۵	۰/۴۴
۱۳۶۶/۷/۱۷	۹۲/۲	۰/۴۵
۱۳۸۴/۸/۱۸	۸۲/۲	۰/۳۸
۱۳۷۲/۶/۱۳	۸۷/۲	۰/۴۰
متوسط مقدار پارامتر \bar{z}		۰/۴۲

۳-۱-۳- پارامتر m

برای تخمین مناسب پارامتر m و اثر آن بر متوسط وزنی شماره منحنی حوضه از روش آنالیز حساسیت در محدوده ۰/۰۱ تا ۰/۱ استفاده گردید که نتایج آن در جدول ۶ ارائه شده است. به منظور مقایسه بهتر، در این جدول مقدار عدد شماره منحنی حاصل از به‌کارگیری روشهای متداول نیز آورده شده است.

جدول ۶- تاثیر پارامتر m بر روی متوسط وزنی شماره منحنی

حوضه

مقدار پارامتر m	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۱
متوسط وزنی شماره منحنی روش ۱*	۶۴/۹	۶۴/۲	۶۲/۸	۶۱/۴	۵۹/۸	۵۲/۴
متوسط وزنی شماره منحنی روش ۲**	۵۹/۶					

* روش ۱- روش پیشنهادی در این تحقیق

** روش ۲- روش مربوط به تلفیق نقشه‌های کاربری اراضی، خاکشناسی، گروه‌های هیدرولوژیک و تفسیر تصاویر ماهواره‌ای (روش متداول)

روند تغییرات m در مقابل عدد منحنی در جدول ۶ روندی منطقی می‌باشد که خود گواه درستی معادله بدست آمده برای تخمین عدد منحنی می‌باشد. اگر به معادله ۵ توجه گردد مفهوم فیزیکی پارامتر f که مقدار پارامتر m براساس معادله ۱۷ از روی آن محاسبه می‌گردد آشکار می‌گردد. بر اساس معادله ۵ میزان هدایت هیدرولیکی با افزایش مقدار f کاهش می‌یابد که این امر به مفهوم افزایش پتانسیل مناطق اشباع و تولید رواناب بیشتر خواهد بود. از طرف دیگر مطابق معادله ۱۷ رابطه دو پارامتر m و f معکوس است که بدین لحاظ افزایش f یعنی افزایش توان بالقوه حوضه در تولید رواناب مترادف خواهد بود با کاهش مقدار m . اکنون با در نظر گرفتن رابطه نگهداشت حوضه و عدد منحنی مطابق معادله ۳ می‌توان دریافت که

شاخص توپوگرافی، مقادیر شماره منحنی حوضه با استفاده از رابطه ۲۰ محاسبه گردید که توزیع مکانی آن در شکل ۸ نشان داده شده است (برای m معادل ۰/۱ و ۰/۱). همانطور که در این شکل نشان داده شده، یکی از مزیت‌های اصلی روش پیشنهادی برآوردی رستری شماره منحنی در سطح حوضه می‌باشد و این در حالی است که بر اساس روش‌های متداول، نقشه شماره منحنی حوضه آبریز کسلیان تنها به ۱۰ بخش مختلف تقسیم می‌شود و بخش‌های عمده‌ای از حوضه دارای تنها یک عدد شماره منحنی می‌باشند (شکل ۱). به عنوان مثال در روش متداول مساحتی در حدود ۵۹ درصد از حوضه دارای شماره منحنی معادل ۶۰ می‌باشند که این امر خود یکی از ضعف‌های اصلی این روش در برآورد عدد شماره منحنی دارند. برعکس روش‌های متداول، روش پیشنهادی در این تحقیق با توجه به وضعیت توپوگرافیکی و تراز سطح ایستابی برای هر کدام از سلول‌های حوضه آبریز، عددی منحصر به فرد ارائه می‌دهد.

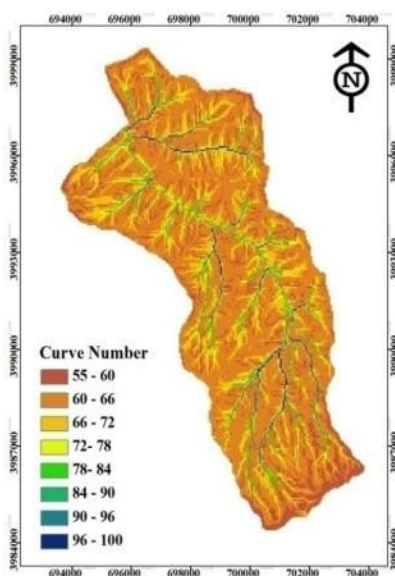
۴- نتیجه‌گیری

اهمیت برآورد سیلاب در مدیریت حوضه‌های آبریز و نیز طراحی‌های مهندسی موجب توسعه انواع مدل‌های ریاضی و روش‌های تجربی در این زمینه شده است. یکی از این روش‌ها که توسط محققین و کارشناسان سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) ابداع گردیده و کاربرد آن در دنیا عمومیت پیدا کرده است، روش شماره منحنی سازمان حفاظت خاک آمریکا می‌باشد. این روش برای تخمین مقدار رواناب مستقیم ناشی از یک رگبار بوده و تنها وابسته به یک پارامتر به نام شماره منحنی (CN) می‌باشد.

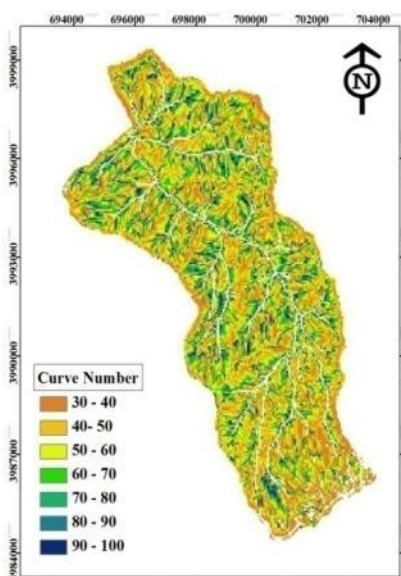
برای افزایش توان بالقوه حوضه برای تولید رواناب لازم است که مقدار عدد منحنی زیادتر بشود. با توجه به همه موارد گفته شده می‌توان این‌گونه استدلال نمود که جهت تغییرات m و عدد منحنی باید معکوس یکدیگر باشد که این مورد به خوبی در جدول ۶ آشکار است. همانطور که در جدول ۶ نشان داده شده، انتخاب مقدار ۰/۰۵ برای پارامتر m بهترین مقدار جهت تخمین مناسب شماره منحنی حوضه می‌باشد. در این حالت مقدار متوسط شماره منحنی بدست آمده اختلافی در حدود ۰/۳ درصد با متوسط شماره منحنی بدست آمده از روش متداول (روش ۲) دارد. همچنین لازم به ذکر است که بدون انجام مراحل فوق می‌توان با در نظر گرفتن مقدار متوسط ۰/۳ (حد واسط مقادیر توصیه شده توسط (Beven, 1997) برای پارامتر m مقدار شماره منحنی حوضه را بدست آورد. با در نظر گرفتن این مقدار، متوسط شماره منحنی حوضه با اختلافی در حدود ۵/۴ درصد نسبت به روش متداول برآورد خواهد گردید. همچنین لازم به ذکر است که حداکثر خطا در برآورد متوسط وزنی شماره منحنی حوضه به روش ارائه شده در این تحقیق در حدود ۱۲ درصد بوده و مربوط به مقادیر بدست آمده در صورت استفاده از m معادل ۰/۱ می‌باشد. در نتیجه می‌توان چنین استنباط نمود که حساسیت روش پیشنهادی برای تعیین عدد منحنی نسبت به m کم بوده و می‌توان از هر دو مقدار متوسط و پهنه آن برای تعیین مقدار عدد منحنی استفاده نمود. در این حالت استفاده از مقدار متوسط m از ضریب اطمینان بالاتری از منظر شبیه‌سازی سیلاب برخوردار خواهد بود.

۳-۲- توزیع مکانی شماره منحنی بر اساس رابطه پیشنهادی

با استفاده از مقادیر پارامترهای بدست آمده و نیز ترم‌های مربوط به



$m=0.01$



$m=0.1$

شکل ۸- توزیع مکانی شماره منحنی حوضه در m های مختلف

۵- مراجع

اکبرپور ۱، شریفی م ب (۱۳۸۵) تخمین شماره منحنی رواناب با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی. مجموعه مقالات هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، اهواز، ایران، ۲۳-۲۴ بهمن.

یعقوبزاده م (۱۳۸۷) تعیین شماره منحنی حوضه آبریز با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور (RS). پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه شهید باهنر کرمان. ۱۵۰ص.

Arnold JG, Williams JR, Srinivasan R , King KW (1996) SWAT: Soil and Water Assessment Tool. USDA-ARS, Grass-219 Land, Soil and Water Research Laboratory, Temple, TX.

Bales JR , Betson P (1981) The curve number as a hydrologic index. In Proc. of International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling, Mississippi State University: 371- 386.

Beven KJ (1997) TOPMODEL: a critique. Hydrological Processes 11: 1069-1085.

Beven KJ, Kirkby MJ, Scoeld N Tagg A (1984) Testing a physically-based flood forecasting model (TOPMODEL) for three UK catchments. *J. Hydrol* 69:119-143.

Cosby BJ, Hornberger GM, Clapp RB , Ginn TR (1984) A statistical exploration of the relationships of soil mixture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resource. Res* 20: 682-690.

Gumindoga W, Rwasoka DT , Murwira A (2011) Simulation of stream flow using TOPMODEL in the Upper Save River catchment of Zimbabwe. *Physics and chemistry of the Earth* 36: 806-813.

Hjelmfelt AT (1980) Curve number procedure as infiltration method. *Journal of Hydrology*, 106: 1107-1111.

Inci Tekeli Y, Akguül S, Dengiz O , Aküzüm T (2006) Estimation of flood discharge for small watershed using SCS curve number and geographic information system. *River Basin Flood Management Journal*: 527-538.

Mendicino G and Sole A (1997) The information content theory for the estimation of the topographic index distribution used In TOPMODEL. *Hydrological Processes* 11: 1099-1114.

Mishra KS , Singh PV(1999) Another look at SCS-CN method. *Journal of Hydrologic Engineering ASCE* 4(3): 257-264.

در حال حاضر جهت برآورد مقادیر شماره منحنی حوضه احتیاج به حجم بالایی از داده‌های خاکشناسی، بازدهی‌های میدانی وسیع، تصاویر ماهواره‌ای و تحلیل‌های مختلف می‌باشد. در نتیجه توسعه روشی که با کمترین اطلاعات و داده‌ها نتایج قابل قبولی را بدست دهد، همواره مورد توجه محققین و کارشناسان بوده است. در این تحقیق با استفاده از مفهوم مازاد اشباع به کار رفته در ساختار مدل نیمه توزیعی TOPMODEL، رابطه‌ای بدست آمد که به کمک آن می‌توان مقادیر شماره منحنی حوضه را با دقت قابل قبولی از روی نقشه‌های توپوگرافی محاسبه نمود. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که رابطه پیشنهادی برای محاسبه شماره منحنی وابسته به ۳ پارامتر تخلخل خاک، متوسط فاصله از سطح زمین تا تراز سطح ایستابی و پارامتر کنترل کننده عمق مؤثر خاک اشباع می‌باشد.

دو پارامتر نخست با توجه به وضعیت خاک حوضه آبریز کسلیان و نیز نتایج حاصل از مدل‌سازی TOPMODEL به دست آمدند. پارامتر m نیز بنا بر مطالعات محققین مختلف بین $0/01$ تا $0/1$ در نظر گرفته شد. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که مقدار متوسط وزنی شماره منحنی حوضه برای محدوده مذکور بین $64/9$ ($m = 0/01$) تا $52/4$ ($m = 0/1$) متغیر می‌باشد. همچنین در m معادل $0/05$ مقدار متوسط وزنی شماره منحنی حوضه در حدود $59/8$ می‌باشد که با مقدار بدست آمده از روش‌های متداول اختلافی در حدود $0/3$ درصد دارد. با توجه به نتایج و توضیحات مذکور می‌توان چنین بیان نمود که استفاده از مفهوم مازاد اشباع می‌تواند علاوه بر شناسایی مناطق اشباع در سطح حوضه، مقادیر شماره منحنی را نیز با دقت قابل قبولی برآورد نماید.

روش پیشنهادی در این تحقیق علاوه بر دارا بودن دقت کافی از عملیات اجرایی بسیار کمتری نسبت به روش‌های متداول برخوردار بود و شماره منحنی را به صورت رستری در سطح حوضه و برای هر سلول محاسبه می‌نماید.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Saturation Excess
- 2- Spatial Pattern of Saturated Areas
- 3- Topographically Based Model
- 4- Topographic Index
- 5- Upstream Contributing Area
- 6- Scaling Parameter
- 7- Transmissivity
- 8- Digital Terrain Model

- Woodward DE, Hawkins RH, Jiang R, Hjelmfelt AT, Mullem JA, Quan QD (2003) Runoff curve number method: Examination of the initial abstraction ratio. In: Proc. of the World Water & Environmental Resources Congress and Related Symposia.
- Young RA, Onstad CA, Bosch DD, Anderson WP (1987) AGNPS, Agricultural non-point source pollution model: A watershed analysis tool. USDA Conservation Report 35.USDA-ARS, Washington, DC.
- Zhan X, Huang M (2004) Arc CN-Runoff: an ArcGIS tool for generating curve number and runoff maps. Environmental Modeling & Software, 19(10): 875-879.
- Easton ZM, Fuka DR, Walter MT, Cowan DM, Schneiderman EM, Steenhuis TS (2008) Re-conceptualizing the soil and water assessment tool (SWAT) model to predict runoff from variable source areas. Journal of Hydrology, 348: 279–291.
- Garen DC, Moore DS (2005) Curve number hydrology in water quality modeling: uses, abuses, and future directions. J. Am. Water Resource. Assoc, 41 (2): 377–388.
- Schneiderman EM, Steenhuis TS, Thongs DJ, Easton ZM, Zion MS. (2007) Incorporating variable source area hydrology into a curve-number-based watershed model. Hydrol. Process, 21: 3420–3430.
- Ducharne A (2009) Reducing scale dependence in TOPMODEL using a dimensionless topographic index. Hydrol. Earth Syst. Sci., 13: 2399–2412.
- Quinn PF, Beven KJ, Lamb R (1995) The $\ln [a/\tan \beta]$ index: How to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework. Hydrological Processes, 9: 161-182.
- Rawls WJ, Ahuja LR, Brakensiek DL, Shirmohammadi A (1993) Infiltration and soil water movement. Handbook of Hydrology. (ed. by D. R. Maidment). McGraw-Hill Inc., New York, USA, 5.1–5.51.
- Sivapalan M, Beven K, Wood EF (1987) On hydrologic similarity, 2, a scaled model of storm runoff production. Water Resources Research, 23(12): 2266–2278.
- Soil Conservation Service (1986) Urban hydrology for small watersheds. Technical Release 55, Springfield, USDA.
- Steenhuis TS, Winchell M, Rossing J, Zollweg JA, Walter MF (1995) SCS runoff equation revisited for variable-source runoff areas. ASCE J. Irrig. Drain. Eng, 121(3): 234-238.
- Steve W, Lyon M, Todd W, Pierre GM, Tammo SS (2004) Using a topographic index to distribute variable source area runoff predicted with the SCS curve-number equation. Hydrological Processes 18 (15): 2757–2771.
- Ward RC (1984) On the response to precipitation of headwater streams in humid areas. Journal of Hydrology 74: 171–189.
- Williams JR (1995) The EPIC model. In: Singh, V.P. (Ed.), Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications: 909–1000.