جغرافیا و پایداری محیط، شمارهٔ ۱۰، بهار ۱۳۹۳
صص. ۱۲-۱

شبیه‌سازی روابط بارش – رواناب حوضهٔ آبریز کشکان در استان لرستان با روش SCS

حسن ذوالفقاری* - دانشیار اقلیم‌شناسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه
ناصر طهماسبی‌پور - استادیار آبخیزداری، دانشگاه لرستان، خرّم‌آباد
نسیبه بهاروندی - کارشناس ارشد اقلیم‌شناسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

وصول: ۱۳۹۲/۰۵/۲۸ **پذیرش:** ۱۳۹۲/۱۰/۰۳

چکیده

شبیه‌سازی بارش - رواناب در حوضه‌های آبریز، امکان برآورد دبی اوج و تحلیل روابط بین بارش و رواناب را به خوبی فراهم می‌آورد. به همین منظور، در این پژوهش روابط بارش – رواناب حوضهٔ آبریز کشکان در استان لرستان با به کارگیری روش SCS که از طرف سازمان حفاظت خاک آمریکا ارائه شده است و مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS شبیه‌سازی شده است. حوضهٔ آبریز کشکان پس از تقسیم به هفت زیرحوضه، مورد مطالعه قرار گرفت. داده‌های بارندگی و دبی روزانه برای هفت ایستگاه باران‌سنجی و هیدرومتری کاکا رضا، چولهول، افرینه، پلدختر، مادیانرود، سراب سیّد علی و چم انجیر در بازهٔ زمانی ۴۰ ساله از ۱۳۴۷ تا ۱۳۸۷ انتخاب و با لحاظ نمودن اطّلاعات پوشش گیاهی، خاک، کاربری اراضی و... بر اساس روش SCS مورد بررسی قرار گرفتند. تحلیل روابط بارش - رواناب محاسباتی توسّط مدل HEC-HMS به روش SCS و تحلیل روابط بارش - رواناب مشاهداتی توسّط روش رگرسیون انجام گرفت. نتایج بررسی نشان داد که مدل HEC-HMS روابط بارش - رواناب محاسباتی و روابط بارش - رواناب مشاهداتی را با دقّتی حدود ۹۴٪ برآورد می‌کند که نشان‌دهندهٔ توانایی بالای این مدل و روش SCS در تحلیل روابط بارش - رواناب حوضهٔ آبریز کشکان است. در مرحلهٔ واسنجی مدل نیز دبی حداکثر ۶۷۹۵ فوت بر مترمکعب و ارتفاع رواناب ۶/۵۷ اینچ برآوردسازی گردیده است که در مقایسه با مقادیر مشاهداتی (دبی حداکثر ۵۷۷۷ فوت مکعب بر ثانیه و ارتفاع رواناب ۶/۹۱ اینچ) بیش از ۸۰٪ مشابهت نشان می‌دهد. خطای شبیه‌سازی پارامترها، یکسان نبوده ولی حداکثر ۳۵٪ برآورد شده است. عملکرد مدل در مورد دو زیرحوضهٔ خرم‌آباد و کشکان پایینی تطابق بیشتری نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: بارش – رواناب، روش SCS، مدل HEC-HMS، حوضهٔ آبریز کشکان، استان لرستان.

*. نویسنده مسئول: ۰۹۱۸۱۳۲۳۹۵۴
E-mail: h.zolfaghari2002@yahoo.com

مقدّمه

از آنجا که مسئلهٔ پیش‌بینی و برآورد رواناب حاصل از بارش‌های جوّی و درک رقومی فرآیندهای مختلف تولید آن، به عنوان یکی از مباحث اساسی و بنیادی در دانش هیدرولوژی و هیدروکلیماتولوژی به شمار می‌رود، لذا دستیابی به میزان کمّی و کیفی آن همراه با یک نگرش سیستمی به موضوع، حائز اهمّیّت فراوانی است. پایه و مبنای مطالعات طرح‌های عمرانی در زمینه‌های مختلف توسعه و بهره‌برداری از منابع آب و سازه‌های آبی و یا سایر عرصه‌های محیطی در حوضه‌های آبریز را نتایج این نوع مطالعات تشکیل می‌دهند. در این رابطه، مدل‌های متعدّدی توسّط محققین سازمان‌های مطالعاتی - تحقیقاتی در کشورهای مختلف جهان ارائه شده و مورد استفاده نیز قرار گرفته است. در حال حاضر استفاده از مدل‌های (بارش - رواناب)[1] در این زمینه کاربرد وسیعی یافته است و روش استدلالی[2] به تدریج جای خود را به مدل‌هایی که در آن نه‌تنها دبی حداکثر اوج، بلکه رژیم جریان سطحی نیز در هر نقطه از محدودهٔ مطالعاتی مورد محاسبه قرار می‌گیرد، داده است (نشاط و صدقی، ۱۳۸۵). بهره‌برداری و استفادهٔ مطلوب از منابع و مدیریت بهینهٔ آن، مستلزم شناخت بهتر مدل هیدرولوژیکی است. بارش و به دنبال آن تشکیل رواناب از فازهای مهمّ چرخهٔ هیدرولوژیکی محسوب می‌شوند و اساس کار مدل هیدرولوژیکی بررسی رابطهٔ بین بارش و رواناب است (کمالی و موسوی، ۱۳۸۹).

مدل‌ها به دلیل متّکی بودن به داده‌های بارندگی که خود حاصل الگوهای توزیع مکانی و زمانی ریزش‌های جوّی است نسبت به سایر روش‌های پیش‌بینی جریان رودخانه‌ای از دقّت بسیار بالاتری برخوردار هستند. لذا با استفاده از آنها می‌توان داده‌هایی مشابه با مؤلّفه‌های ایستگاه‌های آب‌سنجی به صورت جریان‌های متوسّط روزانه، ماهیانه و سالیانه یا حداکثر رواناب لحظه‌ای و شکل دقیق هیدروگراف رواناب را محاسبه کرد. کیفیّت و کمیّت آماربرداری در ایستگاه‌های باران‌سنجی تحت تأثیر تغییرات شدید وقایع هیدرولوژیکی قرار نمی‌گیرد. از این رو، داده‌های بیشتر و مطمئن‌تری در دسترس است (سوری‌نژاد، ۱۳۸۰).

محاسبهٔ حجم رواناب حاصل از بارندگی با استفاده از شمارهٔ منحنی CN یک روش شناخته‌شدهٔ بین‌المللی است. این روش، در سال ۱۹۵۴ توسّط سازمان حفاظت خاک (SCS) پیشنهاد گردید. نتایج کار بر روی آن نشان داد که مدل قادر است بر روی هر نوع حوضهٔ آبریز شهری، طبیعی، مختلط (ترکیبی از شهر و طبیعی) مورد استفاده قرار گیرد. این روش همچنین در حوضه‌هایی که دارای آمار بارندگی و دبی نیز هستند قابلیّت استفاده دارد. هدف این پژوهش در منطقهٔ مطالعاتی از چند دیدگاه مدّنظر بوده است.

۱. شبیه‌سازی بارش – رواناب برای حوضهٔ آبریز کشکان از طریق داده‌های بارندگی و خصوصیات فیزیوگرافی و دیگر عوامل طبیعی مؤثّر در آن.

۲. واسنجی[3] و صحّت‌سنجی مدل

۳. برآورد حداکثر دبی‌های متوسّط رودخانه به روش SCS

نشاط و صدقی (۱۳۸۵)، جهانگیر و همکاران (۱۳۸۷)، چیداز و همکاران (۱۳۸۷) و عباسی و همکاران (۱۳۸۹) هرکدام روش SCS را برای برآورد سیلاب حاصل از بارش در حوضه‌های مختلف کشور با کمک نرم‌افزار HEC-HMS به کار برده و نتایج رضایت‌بخشی به دست آورده‌اند. همچنین ینر[4] و همکاران (۲۰۰۶)، یوسف[5] و

1- Runoff - Rainfall Models
2- Rational Method
3- Model Calibration
4- Yener
5- Yusuf

همکاران (۲۰۰۷) و راجیش[1] و همکاران (۲۰۰۹) نیز نتایج کاربرد مدل HEC-HMS را در پیش‌بینی سیلاب ناشی از بارش قابل قبول دانسته‌اند. ناصری[2] و همکاران (۲۰۱۱) فرایند بارش و رواناب را با استفاده از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS برای حوضهٔ سدّ شیخ بهایی شبیه‌سازی کرده‌اند، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مناطق نزدیک به نقطهٔ خروجی حوضه، بالاترین نقش را در ایجاد سیل بازی می‌کنند. آرخی[3] (۲۰۱۲) رواناب حوضهٔ آبریز کن ایران را به وسیلهٔ مدل HEC-HMS شبیه‌سازی و روش اوّلیّه و ثابت را به عنوان روش مناسب برای شبیه‌سازی رواناب سطحی انتخاب کردند. کبیری[4] و همکاران (۲۰۱۳) روش‌های SCS و گرین و آمپت را در شبیه‌سازی رواناب – سیل سطحی برای حوضهٔ کلانک در مالزی مقایسه و تفاوت معنی‌داری میان روش SCS و گرین و آمپت مشاهده نکرده‌اند.

در این تحقیق، میانگین روزانهٔ ۴۰ سال داده‌های بارش و رواناب در هفت ایستگاه از زیرحوضه‌های حوضهٔ آبریز کشکان مورد استفاده قرار گرفته است؛ به عبارت دیگر، در این پژوهش، رواناب حاصل از بارش در طول یک سال کامل بررسی شده است. این در حالی است که در اکثر تحقیقات قبلی در این حوضه، عمدتاً سیلاب‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

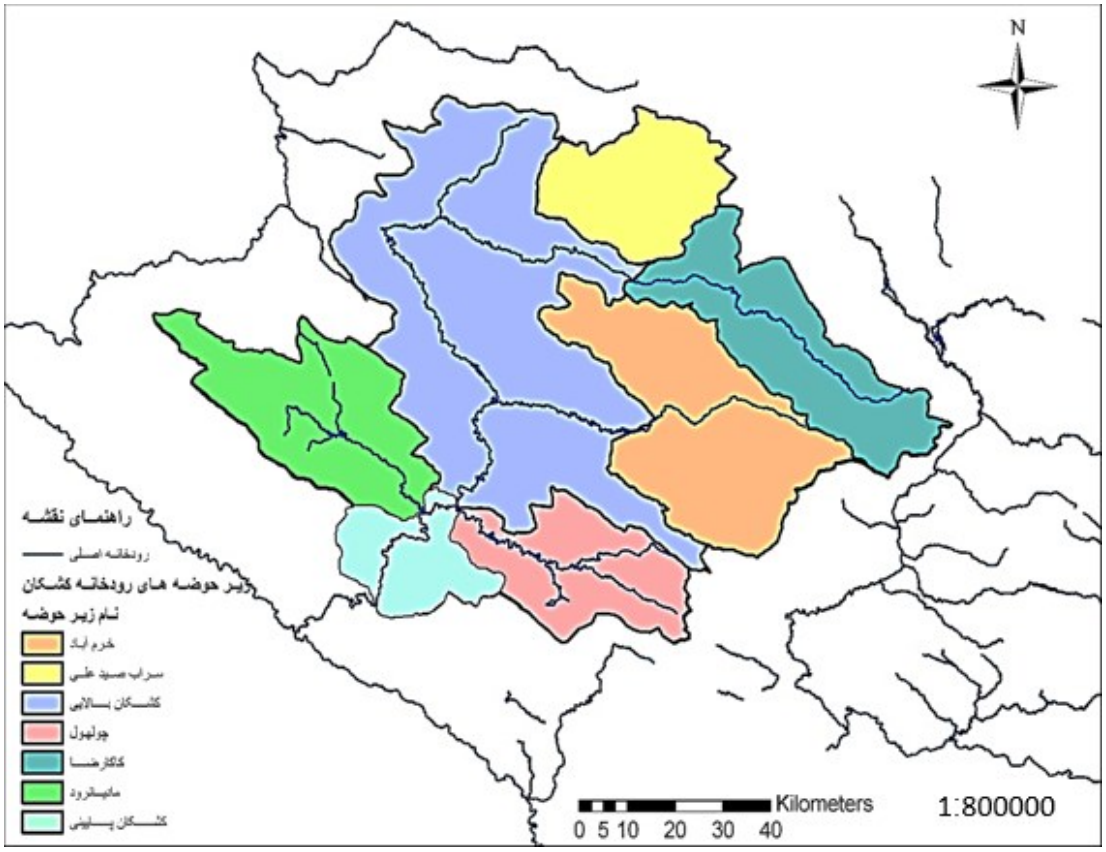
مواد و روش‌ها

حوضهٔ آبریز کشکان با مساحت ۹۲۸۷/۳۹ کیلومترمربع در ناحیهٔ جنوب غربی ایران واقع شده و گسترهٔ جغرافیایی آن بین مختصّات ۴۷ و′۱۱ تا°۴۹ طول شرقی و°۳۳ و′۵ تا°۳۴ و′۱۳ عرض شمالی قرار دارد. این حوضه به لحاظ تقسیمات سیاسی تماماً در داخل استان لرستان قرار گرفته است (شکل ۱). از سمت شمال و شمال غرب به شهرستان‌های نهاوند، نورآباد دلفان و حوضهٔ آبریز رودخانه‌های گاماسیاب، بادآور و از غرب و جنوب غربی به رودخانهٔ سیمره و بالاخره از شمال شرقی و شرق به شهرستان‌های بروجرد، دورود و حوضهٔ آبریز سرشاخه‌های رودخانه‌های مشرف به رودخانهٔ کرخه محدود می‌گردد (وزارت نیرو، ۱۳۸۵).

شکل ۱. نقشهٔ حوضهٔ آبریز کشکان و زیرحوضه‌های آن

1- Rajesh
2- Nasri
3- Arekhi
4- Kabiri

آمار و اطّلاعات استفاده‌شده در این تحقیق شامل داده‌های بارندگی و دبی روزانه برای هفت ایستگاه باران‌سنجی و آب‌سنجی در بازهٔ زمانی ۴۰ ساله از سال ۱۳۴۷ تا ۱۳۸۷ برای ایستگاه‌های کاکارضا، چولهول، افرینه، پلدختر، مادیانرود، سراب سیّد علی و چم انجیر است (شکل ۲).



شکل ۲. زیرحوضه‌های رودخانهٔ کشکان

آمار مشروحه فوق از طریق اداره کل آب منطقه‌ای و سازمان هواشناسی استان لرستان تهیه شده است. همچنین نقشه‌های رقومی‌شده (شیب، رودخانه‌های اصلی و فرعی، ایستگاه‌های آب‌سنجی و باران‌سنجی و منحنی میزان‌های ۱۰۰ متری) برای کسب خصوصیات فیزیکی حوضهٔ آبریز کشکان از سازمان آب منطقه‌ای دریافت گردیده است. شمارهٔ منحنی (CN)، زمان تأخیر (TL)، تلفات اوّلیّه، دبی پایه و نفوذپذیری و دیگر پارامترهای مورد نیاز برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی حوضهٔ آبریز کشکان بر اساس روش‌های مرسوم، برآورد شده‌اند.

در این پژوهش، مدل HEC-HMS (نسخهٔ ۲,۱,۲) که امکان تخمین رواناب ناشی از بارش را به کاربر می‌دهد و روش شمارهٔ منحنی سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) برای محاسبهٔ تلفات و تولید بارش مازاد و تبدیل بارش مازاد به رواناب به کار برده شده است و همچنین روش دبی ثابت ماهانه برای شبیه‌سازی دبی پایه به کار برده شده است.

*** روش سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS)**

جهت شبیه‌سازی مقدار تلفات نفوذ، روش‌های متفاوتی در HEC-HMS وجود دارد که شامل روش اوّلیّه و ثابت، شمارهٔ منحنی SCS، شمارهٔ شبکهٔ منحنی SCS، گرین و امپت[1]، و مدل ثابت و تفاضل تک‌لایه‌ای هستند (عصاره و

1- Green & Ampd

همکاران، ۱۳۸۶).

مدل مشهور شمارهٔ منحنی SCS میزان بارش مازاد را به عنوان تابعی از بارش تجمّعی، پوشش گیاهی، کاربری اراضی و رطوبت قبلی خاک حوضه با استفاده از رابطهٔ ۱ بیان می‌کند.

رابطهٔ ۱
$$Pe = \frac{(P - Ia)^2}{P - Ia + S}$$

در رابطهٔ مذکور داریم: Ia: جذب اوّلیّه (تلفات اوّلیّه) و S: حداکثر گیرش بالقوّه.

تا زمانی که بارندگی تجمّعی مازاد بر جذب اوّلیّه غلبه نکند و بارش مازاد ایجاد نشود روانابی تولید نمی‌شود. از تجزیه و تحلیل نتایج چندین حوضهٔ آبریز آزمایشی کوچک، SCS رابطهٔ تجربی بین Ia و S را به صورت رابطهٔ ۲ بیان می‌کند. (موسوی ندوشنی و داننده‌مهر، ۱۳۸۴).

رابطهٔ ۲
$$Ia = 0.2S$$

افزایش مازاد در بازهٔ زمانی، به منزلهٔ اختلاف بین مازاد تجمّعی در ابتدا و انتهای بازه محاسبه می‌شود. حداکثر گیرش و خصوصیات حوضهٔ آبریز به یک پارامتر میانه به نام شمارهٔ منحنی (CN) بستگی پیدا می‌کند.

رابطهٔ ۳
$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{برحسب میلی‌متر}$$

پس از تعیین مقدار CN، مقدار S مشخّص‌شده و با در نظر گرفتن بارندگی ارتفاع رواناب محاسبه می‌شود (رابطهٔ ۳). مقدار CN بین ۱۰۰-۰ متغیّر است. (مهدوی، ۱۳۸۱: ۱۴۸).

در این صورت، حداکثر دبی سیل با رابطهٔ ۴ محاسبه خواهد شد:

رابطهٔ ۴
$$Pe = \frac{0.208 \times A \times Q_d}{T_P}$$

که در آن: Qp: دبی اوج (مترمکعب در ثانیه) Pe: ارتفاع رواناب (سانتی‌متر)، A: مساحت حوضه (هکتار) و T_P: زمان رسیدن دبی به مرحلهٔ اوج برحسب ساعت است (علیزاده، ۱۳۸۲: ۷۳۶).

*** تعیین گروه‌های هیدرولوژیکی خاک**

خصوصیات خاک روی تحوّل و پیدایش رواناب اثر داشته و باید در محاسبات مربوط به آن در نظر گرفته شوند. خصوصیات خاک می‌تواند با یک عامل هیدرولوژیکی بیان گردد؛ که آن حداقل سرعت نفوذپذیری در حالت مرطوب‌بودن طولانی‌مدّت خاک است (مهدوی، ۱۳۸۱: ۱۴۸).

گروه‌های اصلی خاک تعیین‌شده توسّط SCS (سازمان حفاظت خاک آمریکا) عبارتند از:

گروه‌های (A): خاک‌های با شدّت نفوذپذیری بالا

گروه‌های (B): خاک‌های با شدّت نفوذپذیری متوسّط

گروه‌های (C): خاک‌های با شدّت نفوذپذیری کم

گروه‌های (D): خاک‌های با نفوذپذیری خیلی‌کم (مهدوی، ۱۳۸۱:۱۴۹).

*** تعیین وضیعّت بهره‌وری از زمین**

در این مورد، عوامل متعدّدی که شامل نوع استفاده از زمین، عملیات اصلاحی انجام‌شده و وضعیّت هیدرولوژیکی

در نظر گرفته می‌شوند. از نظر نوع استفاده از زمین، حالت‌های زیر را می‌توان بیان کرد: آیش، زراعت خطّی، زراعت غلات، کشت بقولات به طور فشرده یا با تناوب، کشت علوفه، مرتع یا چراگاه، چمن‌زار، جنگل، مزرعه، جادّه‌های خاکی، جادّه‌های شوسه' تناوب کشت خطّی مستقیم، کشت روی خطوط تراز، کشت روی سکو یا تراس (مهدوی، ۱۳۸۱: ۱۵۰).

*** تعیین وضیعّت رطوبت پیشین خاک**

در روش شمارهٔ منحنی تغییرات S در رابطه با وضعیّت رطوبت پیشین خاک (A.M.C) بررسی شده به سه حالت مختلف در نظر گرفته شده است.

در حالت اوّل، مقدار S حداکثر بوده و خاک رطوبت کمی را دارا می‌باشد و توان تولید رواناب آن ضعیف است.

در حالت دوّم خاک رطوبت متوسّطی دارد.

در حالت سوّم خاک تقریباً اشباع بوده و S کمترین مقدار خود را دارد و توان تولید رواناب زیاد است (مهدوی، ۱۳۸۱: ۱۵۶).

*** برآورد زمان تأخیر (TL)**

محاسبهٔ زمان تأخیر با روش سازمان حفاظت خاک آمریکا SCS از رابطهٔ ۵ جهت شرایط رطوبتی در سه دورهٔ خشک و مرطوب و متوسّط استفاده شده است.

$$Tl = \frac{L^{0.8}(S+1)^{0.7}}{1900\, y^{0.5}}$$ رابطهٔ ۵

در این رابطه، Tl: زمان تأخیر حوضه برحسب ساعت و L = طول بزرگترین آبراهه برحسب فوت و y: شیب وزنی حوضهٔ آبخیز برحسب درصد می‌باشد و S: تلفات بالقوّهٔ حوضه به اینچ است که از روی شمارهٔ منحنی CN پس از تبدیل آحاد به سیستم متریک با استفاده از رابطهٔ ۳ به دست آمده است (علیزاده، ۱۳۸۲: ۵۸۰).

*** محاسبهٔ دبی پایه، شمارهٔ منحنی (CN) و Ia**

یکی از پارامترهای مهم برای شبیه‌سازی بارش – رواناب به وسیلهٔ مدل (HEC-HMS)، دبی پایهٔ هر ایستگاه است. در پژوهش حاضر، برای برآورد دبی پایه، خطّی افقی از نقطهٔ شروع هیدروگراف به موازات محور زمان برای هر زیرحوضه رسم شده است (موسوی ندوشنی و داننده‌مهر، ۱۳۸۴). شمارهٔ منحنی (CN) این حوضه به تفکیک واحدهای هیدرولوژیکی و با استفاده از نقشه‌های کاربری اراضی، پوشش گیاهی، گروه‌های هیدرولوژیکی خاک‌ها و سایر عوامل فیزیکی برای شرایط رطوبتی در سه مرحلهٔ خشک، متوسّط و مرطوب محاسبه گردیده است (سوری‌نژاد، ۱۳۸۰).

با استفاده از شمارهٔ منحنی (CN) در شرایط رطوبتی مختلف و رابطهٔ ۲، ضریب نگهداشت اوّلیّه واحدهای هیدرولوژیکی این حوضه به عنوان یکی از پارامترهای اساسی جهت مدل‌سازی محاسبه شده، لذا تلفات نفوذ نیز با روش (SCS) انجام گرفته است. در این پژوهش، برای بررسی رابطهٔ بین بارش و رواناب از روش آمار استنباطی نیز استفاده شده است. بر این اساس، با روش رگرسیون و نمودار پراکندگی و همبستگی، رابطهٔ بین بارش و رواناب به دست آمده است.

نتایج و بحث

جهت شبیه‌سازی نیاز به جداسازی زیرحوضه‌ها و واردکردن داده‌ها و اطّلاعات آنها در بخش‌های مشخّص است از این نظر تهیّهٔ اطّلاعات و داده‌های موردنیاز مدل HEC-HMS بر پایهٔ تقسیم‌بندی حوضه‌ها به واحدهای کوچکتر بر اساس نحوهٔ اتّصال شبکه‌های زهکشی موجود استوار است. بر همین اساس، این حوضه با توجّه به آب‌سنجی موجود به ۷ زیرحوضهٔ فرعی تقسیم‌بندی شده و تحلیل داده‌های فیزیوگرافی نیز بر مبنای این زیرحوضه‌ها محاسبه و ارزیابی گردیده است. در جدول ۱، برخی خصوصیات فیزیوگرافی واحدهای هیدرولوژیکی حوضه مشخّص شده است.

جدول ۱. مشخّصات فیزیوگرافی واحدهای هیدرولوژیکی حوضهٔ آبریز کشکان

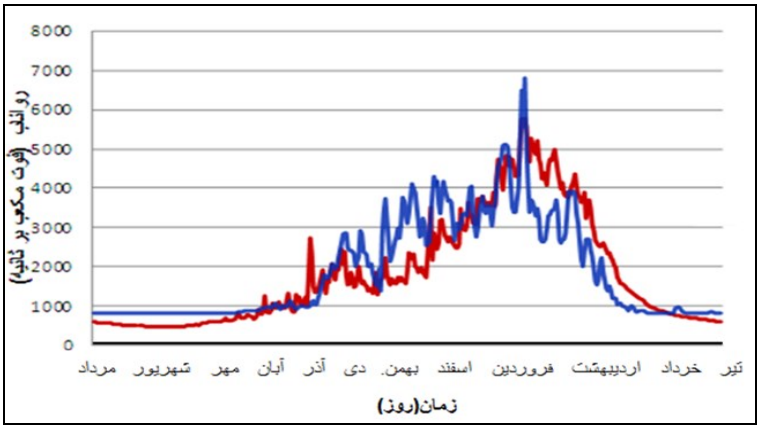
واحدهای هیدرولوژیکی / مشخّصات	زیرحوضهٔ کاکارضا	زیرحوضهٔ کشکان بالایی	زیرحوضهٔ چولهول	زیرحوضهٔ مادیانرود	زیرحوضهٔ خرم‌آباد	زیرحوضهٔ کشکان پایینی	زیرحوضهٔ سراب صید علی	کلّ حوضهٔ کشکان
عرض جغرافیایی	۳۳°-۲۳′ ۳۳°-۵۲′	۳۳°-۱۳′ ۳۴°-۲′	۳۳°-۵′ ۳۳°-۲۱′	۳۳°-۱۸′ ۳۳°-۴۰′	۳۳°-۱۶′ ۳۳°-۴۴′	۳۳°-۵′ ۳۳°-۲۲′	۳۳°-۴۵′ ۳۴°-۱/۵′	۳۳°-۵′ ۳۴°-۲′
طول جغرافیایی	۴۸°-۱۶′ ۴۸°-۵۲′	۴۷°-۴۴′ ۴۸°-۳۶′	۴۷°-۵۲′ ۴۸°-۲۴′	۴۷°-۱۲′ ۴۷°-۵۱′	۴۸°-۴′ ۴۸°-۴۷′	۴۷°-۴۱′ ۴۸°-۰۰′	۴۸°-۳′ ۴۸°-۳۱′	۴۷°-۱۲′ ۴۸°-۵۹′
مساحت (کیلومترمربع)	۱۱۲۶/۹۳	۳۳۰۳/۰۳	۸۵۴/۸	۱۱۱۹	۱۵۹۲	۵۰۰/۸	۷۸۲	۹۲۸۷/۳۹
زمان تمرکز (ساعت)	۹/۰۷	۲۳/۵۹	۶/۵۵	۹/۶۸	۶/۳۶	۴/۶	۴/۱۸	۲۹
محیط (کیلومتر)	۲۱۳/۵	۴۳۰/۱	۱۵۶/۶	۱۹۲/۳	۲۳۱/۵	۱۱۲	۱۳۰/۷	۶۰۷/۶
طول حوضه (کیلومتر)	۷۸/۹۶	۹۵/۶۴	۵۴/۳۷	۶۹/۷۷	۴۳	۲۵/۹۹	۳۳/۴۲	۱۱۷/۶
طول آبراهه اصلی (km)	۸۲/۱۱	۲۰۶/۱	۷۲/۵۹	۷۹/۵۲	۶۳/۲۷	۴۳	۴۸/۳	۲۹۷/۶۴

شبیه‌سازی بارندگی – رواناب حوضهٔ آبریز کشکان با مدل HEC-HMS

پارامترهای مورد نیاز مدل به صورت مستقیم و غیرمستقیم در آن مورد استفاده قرار گرفته است. پارامترهای مستقیم شامل وسعت زیرحوضه‌ها برحسب مایل مربع، دبی پایه به مترمکعب، زمان تأخیر به ساعت و همچنین دبی پایهٔ زیرحوضه‌ها برحسب فوت مکعب بر ثانیه است که در فایل‌های ورودی مدل ذخیره‌سازی شده است.

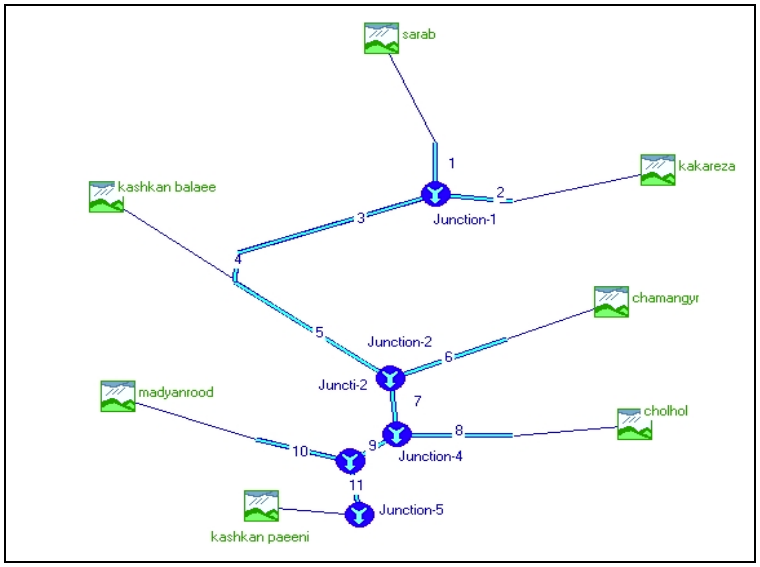
پارامترهای غیرمستقیم که جهت محاسبهٔ ضرایب اوّلیّهٔ مدل‌سازی به کار برده شده بر اساس خصوصیات فیزیکی حوضهٔ آبخیز به دست می‌آید و نقش بسیار مهمّی در محاسبهٔ رواناب حاصل از بارندگی در این مدل ایفا می‌کند. این پارامترها شامل طول آبراهه‌های اصلی (Lc)، شیب وزنی حوضه‌ها، قابلیّت نفوذپذیری و شمارهٔ منحنی (CN)، اختلاف ارتفاع نواحی مرتفع حوضه با نواحی پست آن (H) هستند. از مهم‌ترین ضرایب مورد نیاز مدل HEC-HMS زمان تأخیر (TL)، ضریب نگهداشت اوّلیّه (Ia) و شمارهٔ منحنی (CN) حوضه را می‌توان برشمرد. پس از ورود همهٔ پارامترها به مدل، با اجرای پروژه، شبیه‌سازی صورت گرفته و نتایج آن به صورت نمودارهای مشاهداتی و محاسباتی قابل مشاهده و بررسی است.

رواناب محاسبه‌شدهٔ حوضهٔ کشکان توسّط مدل در شرایط رطوبتی خشک (CNI) یعنی شرایطی که خاک در فصل غیر رشد کمتر از ۱۳ میلی‌متر و در فصل رشد کمتر از ۳۶ میلی‌متر رطوبت دارد تطابق بیشتری با رواناب مشاهداتی نشان می‌دهد (شکل ۳).



شکل ۳. هیدروگراف‌های مشاهده‌ای (قرمزرنگ) و شبیه‌سازی شده (آبی‌رنگ) حوضهٔ آبریز کشکان

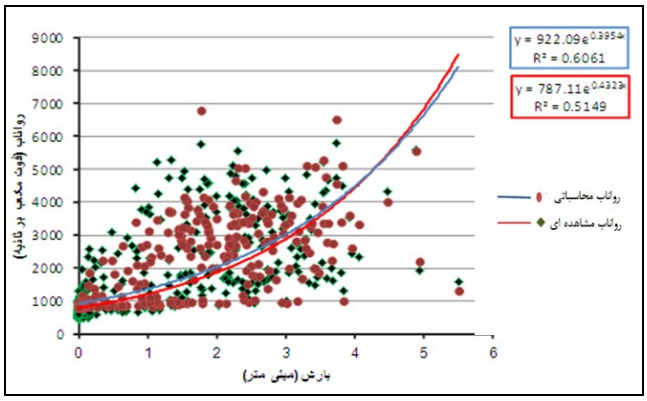
همان‌طور که شکل ۳ نشان می‌دهد تشکیل رواناب واقعی در مواقعی از سال با روند محاسباتی حاصل از روش SCS تفاوت دارد. در طرّاحی مدل HEC-HMS پوشش گیاهی، نفوذپذیری و رطوبت قبلی خاک در قالب شمارهٔ منحنی CN وارد مدل می‌شود، ولی پارامترهای اقلیمی مانند نوع بارش و ذوب برف و همچنین برخی از خصوصیات فیزیکی حوضهٔ آبخیز و رودخانهٔ آن مانند شکل حوضه، نسبت انشعاب آبراهه‌ها و... که در تولید رواناب مؤثّرند، مورد توجّه قرار نگرفته‌اند. برای مثال بارش برف در اوایل دی تا پایان اسفند، علاوه بر اینکه به طور کامل به صورت رواناب جاری نمی‌شود فرصت نفوذ آب را افزایش می‌دهد. در اواخر فروردین تا پایان تیرماه علاوه بر بارش، ذوب برف را نیز خواهیم داشت و با توجّه به اینکه مدل HEC-HMS نوع بارش و ذوب برف را در نظر نمی‌گیرد، این موضوع می‌تواند مهم‌ترین دلیل برای فاصله گرفتن هیدروگراف مشاهداتی نسبت به هیدروگراف محاسباتی در این دو بازهٔ زمانی باشد. ترکیب‌بندی مدل هیدرولوژیکی بارش – رواناب حوضهٔ آبریز رودخانهٔ کشکان که با مدل HEC-HMS ترسیم‌شده موقعیّت زیرحوضه‌ها و رودخانه‌های فرعی رودخانهٔ کشکان را نشان می‌دهد (شکل ۴).



شکل ۴. ترکیب‌بندی مدل هیدرولوژیکی بارش - رواناب حوضهٔ آبریز رودخانهٔ کشکان

پس از شبیه‌سازی، داده‌های رواناب محاسباتی و مشاهداتی به محیط نرم‌افزار SPSS منتقل شده و همبستگی بین آنها و داده‌های بارش به روش‌های مختلف رگرسیون سنجیده شد و مشخّص گردید که ارتباط بارش و رواناب در این حوضه به صورت نمایی است. رگرسیون نمایی، همبستگی بین داده‌های شبیه‌سازی‌شدهٔ بارش و رواناب را

۰/۷۷ و همبستگی بین داده‌های مشاهده‌ای بارش و رواناب را ۰/۷۱ نشان می‌دهد. بر این اساس، ۷۷٪ رواناب محاسباتی و ۷۱٪ رواناب مشاهداتی به بارش بستگی دارد (شکل ۴).



شکل ۴. رگرسیون نمایی و نمودار پراکندگی رواناب نسبت به بارش در حوضهٔ آبریز کشکان (ایستگاه کشکان - پلدختر)

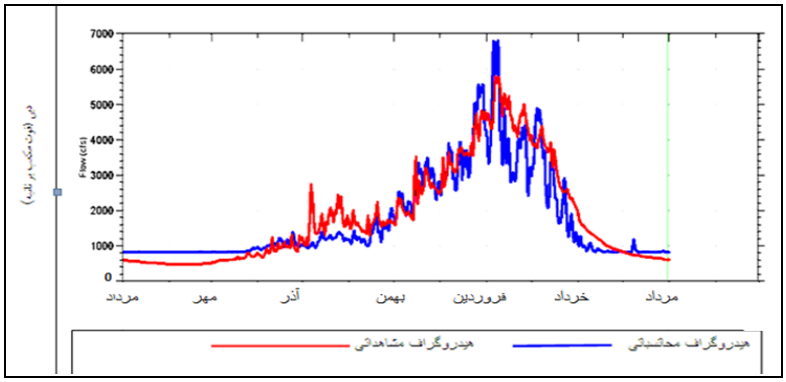
واسنجی (کالیبراسیون) پارامترهای هیدرولوژیکی حوضه توسّط مدل (HEC-HMS)

در این مرحله، مدل بر اساس داده‌های بارندگی و هیدروگراف مشاهده‌ای، پارامترهای رفتار هیدرولوژیکی زیرحوضه‌ها را به شیوه‌ای شبیه‌سازی می‌کند که هیدروگراف محاسبه‌ای توسّط مدل، شبیه هیدروگراف مشاهده‌ای در محلّ مورد مطالعه شود.

با توجّه به جدول ۲ و شکل ۵، در مرحلهٔ واسنجی، درصد تطابق حداکثر دبی رواناب محاسباتی و ارتفاع آن نسبت به داده‌های طبیعی در خروجی حوضه (ایستگاه پلدختر - کشکان) به ترتیب ۸۲/۴ (درصد خطا ۱۷/۶) و ۹۵/۳ (درصد خطا ۴/۸۷) برآورد شده است. میانگین خطای حداکثر دبی رواناب برآوردشده توسّط مدل برای کلّ زیرحوضه‌ها قدر مطلق ۱۸/۱۳ ± درصد و خطای ارتفاع رواناب برابر با قدر مطلق ۱۱/۳۷ ± است که نشان‌دهندهٔ بیش از ۸۰٪ صحّت مدل در برآورد حداکثر دبی و ارتفاع رواناب حوضهٔ آبریز کشکان است.

جدول ۲. نتایج واسنجی مدل بارش - رواناب حوضهٔ آبریز کشکان در ایستگاه کشکان - پلدختر (خروجی حوضه)

	ارتفاع رواناب (اینچ)	اوج رواناب (فوت مکعب بر ثانیه)	زمان پیک	Time to center of mass
محاسباتی	۶/۵۷	۶۷۹۵	۹ اسفند ساعت ۱۶	۲۸ دی
مشاهداتی	۶/۹۱	۵۷۷۷	۷ اسفند ساعت ۲۴	۷ بهمن
تفاضل	-۰/۳۴	۱۰۱۸	۴۰ ساعت	
درصد تطابق	۹۵/۳	۸۲/۴		
تابع هدف	Peak-Weighted RMS Error			



شکل ۵. واسنجی مدل بارش – رواناب حوضهٔ آبریز کشکان

درصد خطای شبیه‌سازی پارامتر (CN) از (۷ تا ۳۳/۱۵-) بین زیرحوضه‌ها متغیّر است. در صد خطای مربوط به پارامتر زمان تأخیر (TL) فقط در زیرحوضهٔ کشکان بالایی مشاهده می‌شود که مقدار آن برابر با (۳۳٪) می‌باشد. خطای تلفات (Ia) در بین زیرحوضه‌های رودخانهٔ کشکان از (۳۵ تا ۱۵/۵-) متغیّر است (جدول ۳). تفاوت بین زیرحوضه‌ها در شبیه‌سازی نتیجهٔ تفاوت خصوصیات فیزیوگرافی و شکل حوضه‌ها وسعت و همچنین نوع بارش و تأثیر شرایط محیطی بر روی هیدروگراف‌ها است.

جدول ۳. نتایج واسنجی مؤلّفه‌های شبیه‌سازی مدل بارش - رواناب واحدهای هیدرولوژیکی حوضهٔ آبخیز کشکان

رودخانه	ایستگاه آب‌سنجی	پارامترهای ورودی مدل			نتایج واسنجی پارامترهای مدل‌سازی			درصد خطا		
		Ia (in)	CN	TL (ساعت)	Ia (in)	CN	TL (ساعت)	Ia (in)	CN	TL (ساعت)
هرو	کاکارضا	۱/۷۳	۵۳/۵۵	۱۲/۵۶	۱/۲	۸۶/۷	۱۲/۵۶	۳۰	۳۳/۱۵	-
دوآب الشتر	سراب صیدعلی	۱/۶۹	۵۴/۲۶	۷/۵۲	۲	۶۸/۸	۷/۵۲	۱۵/۵	۲۱	-
کشکان	افرینه	۲/۴۵	۴۴/۹۵	۳۶/۶	۲/۳۵	۴۸/۹	۲۴/۴	۴	۸	۳۳
خرم‌آباد	چم انجیر	۲/۰۸	۴۸/۹۸	۱۱/۹۳	۲/۱۵	۴۵/۵۲	۱۱/۹۳	۳/۲۵	۷	-
چولهول	افرینه	۲/۶۲	۴۳/۲۶	۱۴/۵۸	۱/۶۸	۳۶/۱	۱۴/۵۸	۳۵	۱۶/۵	-
مادیانرود	برآفتاب	۲/۹۳	۴۰/۵۷	۲۲/۸۴	۲/۴۶	۶۶/۳۵	۲۲/۸۴	۱۶	۲۵/۷۸	-
کشکان	پلدختر	۱/۸	۵۲/۶۸	۷/۸۶	۱/۸	۴۶/۱	۷/۸۶	-	۱۲/۵	-

ارزیابی توانایی مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی مدل بارندگی - رواناب حوضهٔ آبریز کشکان

برای بررسی و ارزیابی توان مدل HEC-HMS و روش SCS به کار رفته در آن ضرورت دارد، نتایج هیدروگراف‌های محاسباتی و مشاهداتی مورد تطبیق، مقایسه، ارزیابی و بررسی قرار گیرد و خطای نسبی حداکثر دبی رواناب محاسباتی و ارتفاع آن با داده‌های طبیعی مشخّص گردد. در این راستا، در مدل HEC-HMS نیز این شاخص‌ها بر اساس میانگین خطای نسبی (رابطهٔ ۶) برای ارزیابی و میزان کارایی مدل‌های هیدرولوژیکی به کار می‌رود، استفاده شده است. بر اساس این رابطه، نتایج میانگین خطای نسبی بین ارتفاع رواناب محاسبه‌ای و حداکثر دبی آنها با داده‌های طبیعی این حوضه و واحدهای هیدرولوژیکی آن توسّط مدل مذکور انجام گرفته است.

$$Z = 100\left|\frac{Q_{O(Peak)} - Q_{S(Peak)}}{Q_{O(Peak)}}\right|$$ رابطهٔ ۶

که در آن Z: میانگین خطای نسبی بین داده‌های مشاهداتی دبی و ارتفاع رواناب با مقادیر محاسباتی آنها است. $Q_{O(Peak)}$: دبی حداکثر محاسباتی و $Q_{S(Peak)}$: دبی حداکثر مشاهده‌ای است. قدر مطلق حاصل از آنها در عدد ۱۰۰ ضرب شده و اختلاف برحسب درصد به دست آمده است (عصاره و همکاران، ۱۳۸۶).

نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهند که رابطهٔ بین بارش و رواناب محاسباتی و مشاهداتی بیش از ۹۴٪ شباهت دارد و تفاوت بین رابطهٔ بارش و رواناب محاسباتی و مشاهداتی معنی‌دار نیست. می‌توان گفت مدل HEC-HMS و روش SCS می‌توانند روابط بارش و رواناب این حوضه و حوضه‌های بدون آمار را تحلیل کنند.

با توجّه به اینکه در مرحلهٔ صحّت‌سنجی روش SCS با درصد خطای کمی حداکثر دبی رواناب و ارتفاع آن را

نسبت به داده‌های طبیعی در خروجی حوضه (ایستگاه پلدختر - کشکان) و سایر زیرحوضه‌ها برآورد می‌کند، می‌توان نتیجه گرفت که این روش برای برآورد دبی اوج و ارتفاع رواناب در این حوضه و حوضه‌های بدون اطّلاعات و آمار مناسب است. نتایج حاصله، صحّت مدل را در برآورد حداکثر دبی و ارتفاع رواناب حوضهٔ آبریز کشکان بیش از ۸۰٪ نشان می‌دهد.

خطای شبیه‌سازی پارامترهای زیرحوضه‌ها از ۰ تا ۳۵٪ متغیّر است. با توجّه به اینکه مدل HEC-HMS توان تحلیل نوع بارش و ذوب برف و برخی از خصوصیات فیزیکی حوضهٔ آبخیز و رودخانهٔ آن مانند شکل حوضه و نسبت انشعاب آبراهه‌ها را ندارد. مدل HEC-HMS در مرحلهٔ واسنجی، برای اینکه رواناب مشاهداتی و محاسباتی کمترین اختلاف را با هم داشته باشند، پارامترهای ورودی را تغییر می‌دهد؛ بنابراین می‌توان گفت که مدل مذکور اختلافی را که مربوط به نوع بارش و ذوب برف و سایر ویژگی‌های مذکور است را با تغییر پارامترهای فیزیکی حوضه اصلاح می‌کند و این دلیل اصلی خطاهای متغیّر و نسبتاً زیاد پارامترهاست. بر این اساس مدل HEC-HMS در واسنجی پارامترها عملکرد ضعیفی نشان داده است.

منابع

جهانگیر، علیرضا؛ رائینی؛ محمود؛ احمدی، میرضیاء (۱۳۸۷) شبیه‌سازی فرایند بارش-رواناب با شبکهٔ عصبی مصنوعی (ANN) و مقایسهٔ آن با مدل HEC-HMS در حوضهٔ معرّف کارده، **مجلّهٔ آب و خاک، علوم و صنایع کشاورزی**، ۲۲ (۲)، صص. ۸۴-۷۲.

چیداز، آتنا؛ محسنی ساروی، محسن؛ وفاخواه، مهدی (۱۳۸۷) ارزیابی مدل HEC-HMS به منظور برآورد هیدروگراف سیلاب در حوضهٔ آبریز کسیلیان، **پژوهش‌های آبخیزداری**، ۸۴، صص. ۷۱-۵۹.

سوری‌نژاد، علی (۱۳۸۰) **نظیرسازی هیدروکلیماتولوژیکی مدل‌های بارش - رواناب در حوضه‌های آبریز جنوب غربی ایران (حوضه‌های آبخیز رودخانه‌های خرم‌آباد - کشکان در استان لرستان)**، رسالهٔ دکتری جغرافیای طبیعی، استاد راهنما: منوچهر فرج‌زاده اصل، دانشگاه تربیت مدرس.

عباسی، محمد؛ محسنی ساروی، محسن؛ خیرخواه، میر مسعود؛ خلیقی سیگارودی، شهرام؛ رستمی‌زاد، قباد؛ حسینی، مجید (۱۳۸۹) بررسی تأثیر فعّالیّت‌های آبخیزداری در زمان تمرکز و شمارهٔ منحنی حوضه با بهره‌گیری از مدل HEC-HMS (بررسی موردی: حوضهٔ آبخیز کن تهران)، **نشریهٔ مرتع و آبخیزداری**، ۶۳ (۳)، صص. ۳۸۵-۳۷۵.

عصاره، علی؛ توکلی‌زاده، احمدعلی؛ کیامنش، حسن (۱۳۸۶) **سیستم شبیه‌سازی هیدرولوژی (HEC-HMS)**، چاپ اوّل، انتشارات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، اهواز.

علیزاده، امین (۱۳۸۲) **اصول هیدرولوژی کاربردی**، چاپ شانزدهم، انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد.

کمالی، بهاره؛ موسوی، سیّد جمشید (۱۳۸۹) کالیبراسیون خودکار مدل مفهومی HEC-HMS رویکرد شبیه‌سازی بهینه‌سازی، **پنجمین کنگرهٔ ملّی مهندسی عمران**، دانشگاه فردوسی مشهد، صص. ۸-۱.

موسوی ندوشنی، سید سعید؛ داننده‌مهر، علی (۱۳۸۴) **سیستم مدل‌سازی هیدرولوژیکی** چاپ دوّم، انتشارات مؤسّسهٔ فرهنگی هنری دیباگران تهران، تهران.

مهدوی، محمد (۱۳۸۱) **هیدرولوژی کاربردی**، جلد دوّم، چاپ سوّم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.

نشاط، علی؛ صدقی، حسین (۱۳۸۵) برآورد میزان رواناب با استفاده از روش سازمان حفاظت خاک (SCS) و مدل HEC-HMS در حوضهٔ آبریز باغ‌ملک خوزستان، **مجلّهٔ علوم کشاورزی**، ۱۲ (۴)، صص. ۷۹۸-۷۸۷.

وزارت نیرو، شرکت سهامی آب منطقه‌ای غرب (معاونت مطالعات پایهٔ منابع آب) (۱۳۸۵)، **گزارش تلفیق مطالعات منابع آب حوضهٔ آبریز کرخه**، جلد دوّم، بررسی‌ها و مشخّصات عمومی، سازهٔ آب شفق، شرکت مهندسین مشاور.

Arekhi. S. (2012) Runoff Modeling by HEC-HMS Model (Case Study: Kan watershed, Iran), **International Journal of Agriculture and Crop Sciences**, 4 (23), pp. 1807-1811

Kabiri. R., Chan. A., Bai, R., (2013) Comparison of SCS and Green-Ampt Methods in Surface Runoff-Flooding Simulation for Klang Watershed in Malaysia, **Modern Hydrology**, 3, pp. 102-114.

Naseri, M., Soleimani Sardoo, F., Katani, M. (2011) Simulation of the Rainfall-Runoff Process Using of HEC-HMS Hydrological Model (A Case Study of Sheikh Bahaei Dam Basin) **World Academy of Science, Engineering and Technology**, 5, pp. 17-27.

Rajesh K. M., Arbind K. V., Maden K. J., (2009) Evaluation of HEC-HMS and WEPP for simulating watershed runoff using Remote Sensing and Geographical Information System (GIS), **Paddy Water Environment**, 8 (2), pp. 131-144.

Yener, M. K, Sorman, A. U., Sorman, A. A., Sensoy, A. (2006) Modeling Studies with HEC-HMS and Runoff Scenarios in Yuvacik basin,**Turkiye, International Congress on River Basin**, pp. 621-634.

Yusop, Z., Chan, C. H., Katimon, A. (2007) Runoff Characteristics and Application of HEC-HMS for Modeling Stormflow Hydrograph in Oil Palm Catchment, **Water Science &Technology**, 56 (8), pp. 41-48.