

توسعه مدل هیبرید بر اساس خصوصیات ژئومورفولوژی حوضه جهت استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای (مطالعه موردی: حوضه‌های آذربایجان شرقی)

نسیم فاضل مدرس^۱، احمد فاخری فرد^۲، یعقوب دین‌پژوه^۳ و جمیله فرج‌زاده^۴

^۱ دانشجوی دکتری دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز، ^۲ دانشیار دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز، ^۳ استادیار دانشکده

کشاورزی دانشگاه تبریز، ^۴ کارشناس ارشد سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی

(تاریخ دریافت: ۸۹/۱۱/۱۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۱/۹/۱۱)

چکیده

ارتباط بین پارامترهای هیدروگراف‌های واحد مصنوعی و خصوصیات ژئومورفولوژی حوضه امکان گسترش استفاده از این مدل‌ها در حوضه‌های فاقد آمار را نیز فراهم می‌کند. در مدل هیبرید ژئومورفولوژی ارائه شده در این بررسی، ضرایب ذخیره k_1 و k_2 بر اساس خصوصیات ژئومورفولوژی شش حوضه در آذربایجان شرقی مدل بندی شده‌اند. با استفاده از مدل هیبرید ژئومورفولوژی بدست آمده می‌توان رواناب را در حوضه‌های فاقد آمار تخمین زد. مدل استخراج شده با استفاده از اطلاعات ۲۹ رویداد بارش-رواناب در شش حوضه از استان آذربایجان شرقی بدست آمده است، پارامترهای k_1 و k_2 ، در این حوضه‌ها بعد از بهینه شدن بر اساس رویدادهای مشاهداتی، با استفاده از روابط رگرسیونی به خصوصیات ژئومورفولوژی حوضه ربط داده شده‌اند. صحت سنجی معادلات بر روی شش رویداد بارش رواناب همزمان در یکی از حوضه‌های استان بنام حوضه قرمزیکل نشان داد که مدل ارائه شده در این تحقیق قابلیت پیش‌بینی رواناب حوضه‌های استان را با دقت مطلوبی دارد.

واژه‌های کلیدی: هیدروگراف واحد مصنوعی، مدل هیبرید، خصوصیات ژئومورفولوژی، ضرایب ذخیره مخزن

مقدمه

فرایند بارش-رواناب یک پدیده‌ای پیچیده است که عوامل زیادی در آن نقش دارند، استفاده از روش‌های مناسب برای مدل‌سازی بارش-رواناب می‌تواند بر این پیچیدگی فائق آید. هیدروگراف‌های واحد که اولین بار با استفاده از اصل انطباق توسط Sherman (1932) ارائه شد یکی از رایج‌ترین و ساده‌ترین روش‌ها می‌باشد. هیدروگراف‌های واحد معمولاً با استفاده از داده‌های مشاهداتی بارش و رواناب با استفاده از روش‌های مستقیم (ماتریس معکوس، کمترین مربعات خطا و ...) به دست می‌آیند. برای حوضه‌های فاقد آمار و یا حوضه‌هایی که آمار ناقص دارند هیدروگراف‌های واحد مصنوعی (Snyder, 1938; Clark, 1945; SCS, 1957) ارائه شده‌اند و نیازی به داده‌های مشاهداتی ندارند. امروزه نیاز به محاسبه رواناب در حوضه‌های فاقد آمار زمینه مطالعات فراوانی را فراهم کرده است. در روش‌های Snyder و SCS، ویژگی‌های مهم هیدروگراف مانند دبی اوج، زمان رسیدن به اوج، زمان تأخیر و زمان پایه هیدروگراف بر اساس روابط تجربی محاسبه می‌شوند و یک منحنی بین این نقاط برازش داده می‌شود که علاوه بر اعمال

نظرات شخصی، کنترل همزمان سطح زیر منحنی نیز باید صورت گیرد (Bhunya et al., 2005). در این روش‌ها فرض می‌شود هر حوضه هیدروگراف واحد منحصر به فردی دارد که با مدت زمان بارش ناشی از آن مشخص می‌شود. برای استفاده از آن در مورد بارش‌هایی با تداوم‌های متفاوت لازم است هیدروگراف واحد موجود به هیدروگراف واحد بارش مورد نظر تبدیل شود. هیدروگراف واحد لحظه‌ای روشی است که برای از بین بردن محدودیت هیدروگراف‌های واحد ارائه شده است. هیدروگراف واحد لحظه‌ای، رواناب بارشی واحد با طول مدت بینهایت کوچک است. برای محاسبه تحلیلی هیدروگراف واحد از تابع توزیع احتمال گامای دو پارامتری به شکل‌های مختلف بسته به نوع اطلاعات موجود استفاده می‌شود. Bhunya et al. (2007) با مطالعه‌ای که بر روی توابع توزیع احتمال مختلف انجام دادند به این نتیجه رسیدند که توابع ویبول و بتا قابلیت بهتری در پیش‌بینی‌های هیدرولوژیکی نسبت به تابع گاما دارند. تئوری سیستم‌های خطی روشی رایج برای شبیه‌سازی فرایند بارش - رواناب در حوضه‌ها و محاسبه هیدروگراف واحد آنها می‌باشد. Nash (1957) مدل جدیدی برای محاسبه هیدروگراف واحد لحظه‌ای بر اساس مخازن خطی آبشاری ارائه داد. در مدل نش رفتار حوضه در برابر بارش مانند رفتار مخازن خطی که بصورت سری به هم متصل هستند و خروجی یک

*پست الکترونیک مکاتبه کننده: fazel.nasim@gmail.com

مدل نش می‌تواند تغییرات ذخیره در حوضه را بر اثر کاهش شیب در جهت جریان شبیه‌سازی کند. این مدل درحوضه‌های بزرگ با هیدروگراف‌های پهن عملکرد بهتری دارد. زیرا روند جریان در این حوضه‌ها با دو مخزن مدل هیبرید بهتر توجیه می‌شود. تابع پاسخ مدل نش توزیع گامای دو پارامتری است که دارای چولگی به سمت چپ است و نمی‌تواند هیدروگراف‌هایی با چولگی‌های خفیف و هیدروگراف‌هایی به شکل نرمال را با دقت مناسب محاسبه کند در صورتیکه این هیدروگراف‌ها توسط مدل هیبرید بهتر شبیه‌سازی می‌شوند. Ahmadin (1387) کارایی مدل هیبرید را در حوضه ليقوان بررسی کرد و مقایسه هیدروگراف‌های حاصل از مدل هیبرید با هیدروگراف‌های مدل نش، نشان داد مدل هیبرید توانایی بهتری در برآورد رواناب دارد. Ghasemi (1389) نیز با کاربرد مدل هیبرید بر روی رویدادهای بارش- رواناب حوضه کلستان در شیراز ثابت کردند مدل هیبرید دو واحدی بهتر از مدل نش عمل می‌کند. خصوصیات ژئومورفولوژیکی حوضه براحتی با استفاده از GIS و ابزارهای مربوط به آن قابل استخراج‌اند و در صورت تغییر شرایط حوضه نیز قابل استفاده می‌باشند زیرا با گسترش استفاده از عکس‌های ماهواره‌ای و سنجش از دور این پارامترها قابل به روز رسانی می‌باشند. ولی در مورد آمار ثبت شده بارش- رواناب در حوضه‌ها این شرایط برقرار نمی‌باشد و با تغییر شرایط حوضه، این آمار دیگر قابل استفاده نمی‌باشند. هدف از این مطالعه استخراج پارامترهای مدل هیبرید بر اساس خصوصیات ژئومورفولوژیکی حوضه، جهت گسترش استفاده از آن در حوضه‌های فاقد آمار و یا حوضه‌هایی که آمار ناقص دارند، و مقایسه نتایج مدل حاصل با نتایج مدل نش، می‌باشد.

مواد و روش‌ها

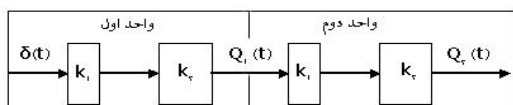
منطقه مورد مطالعه

حوضه‌های مورد مطالعه در این پژوهش در شمال غربی ایران و در استان آذربایجان شرقی واقع شده‌اند. این استان بین عرض‌جغرافیایی 36° – 45° N تا 39° – 26° N و طول جغرافیایی 45° – 5° E تا 48° – 22° E قرار گرفته است. هفت حوضه‌ها حوضه‌های استان برای مطالعه انتخاب شدند که شش حوضه آن به منظور واسنجی و یک حوضه به منظور صحت سنجی مدل در نظر گرفته شد. مساحت حوضه‌های انتخاب شده بین ۲۶ تا ۲۶۵ کیلومترمربع بوده و ارتفاع متوسط حوضه‌ها بین ۲۰۰۰ تا ۲۷۰۰ متر بالاتر از سطح دریا می‌باشد، شیب متوسط حوضه‌ها بین ۲۲ تا ۳۵ درصد است. جدول (۱) مشخصات حوضه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. از اطلاعات هیدرولوژیکی و

مخزن ورودی مخزن بعدی است، در نظر گرفته می‌شود که تابع پاسخ آن تابع گامای دو پارامتری با پارامترهای، n (تعداد مخازن) و k (ضریب ذخیره مخزن) می‌باشند. Bhunya et al. (2005) مدل جدیدی برای استخراج هیدروگراف واحد مصنوعی ارائه دادند که، در این مدل مخزن خطی نش به دو مخزن ناهمسان با ضرایب متفاوت که به صورت سری به هم متصل‌اند، تقسیم می‌شود. این مدل نواقص مدل نش را در ارتباط با اعشاری بودن مقدار n و نداشتن بازوی بالا رونده در $n=1$ از بین برده است. Singh et al. (2007) با افزودن کانال خطی بین دو مخزن مدل هیبرید عامل انتقال را نیز در آن بررسی کردند. Rodríguez-Iturbe and Valdes (1979) نشان دادند همبستگی خوبی بین پاسخ هیدرولوژیکی حوضه و خصوصیات ژئومورفولوژیکی آن برقرار است. ایشان دریافتند می‌توان هیدروگراف واحد لحظه‌ای را بر اساس نسبت‌های هورتن و یک عامل دینامیک (مانند سرعت جریان) تعریف کرد. Lopez et al. (2005) با استفاده از تئوری مخازن، هیدروگراف واحد لحظه‌ای مخازن را ارائه دادند، در این مدل زیر حوضه‌ها در یک حوضه به عنوان مخزن عمل می‌کنند. بررسی منابع نشان می‌دهد دو دیدگاه عمده در ایجاد ارتباط بین خصوصیات ژئومورفولوژی حوضه و پارامترهای هیدروگراف وجود دارد، در نگرش اول پارامترهای هیدروگراف واحد لحظه‌ای تابعی از خصوصیات ژئومورفولوژی و روابط ارائه شده توسط Rodríguez-Iturbe and Valdes، در نظر گرفته می‌شوند و با انتگرال گرفتن از آن در بازه زمانی صفر تا T هیدروگراف واحد T ساخته حاصل می‌شود. در روش دیگر پارامترهای هیدروگراف واحد مصنوعی بر اساس خصوصیات ژئومورفولوژی حوضه بیان می‌شوند. Rosso (1984) پارامترهای مدل نش را بر اساس دبی اوج و زمان رسیدن به اوج در هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژی محاسبه کرد. Li et al. (2008) پارامتر k در مدل نش را به شیب حوضه ربط دادند و مقدار ضریب ذخیره برای هر زیر حوضه را با استفاده از معادلات لاپلاس محاسبه کردند. مطالعات بسیاری با استفاده از دیدگاه اول برای ارتباط دادن پارامترهای هیدروگراف‌های واحد لحظه‌ای نش و کلارک به خصوصیات ژئومورفولوژی حوضه انجام شده است (Bhaskar et al., 1997; Kumar et al. 2002; Sahoo et al. 2006; Behera et al.; 2008). استفاده از دیدگاه دوم یعنی ایجاد ارتباط بین پارامترهای هیدروگراف واحد مصنوعی و خصوصیات ژئومورفولوژی بوسیله روابط رگرسیونی نیز مورد توجه قرار گرفته و نتایج قابل قبولی به دست داده است (Tung, 1997; Straub et al. 2000, Jena and Tiwari, 2006; Wilkerson and Mervade, 2010).

مدل هیبرید با دو مخزن و ضرایب ذخیره متفاوت بهتر از

در حوضه‌های بزرگ با شیب کم انتظار می‌رود IUH به یک توزیع متقارن میل کند. مدل هیبرید بررسی شده در این مطالعه هیبرید دو واحدی است. یک واحد هیبرید از دو مخزن که به صورت سری به هم متصل‌اند و دارای ثابت ذخیره k_1 و k_2 هستند، تشکیل می‌گردد. ورودی (مانند بارش) وارد مخزن اول از واحد اول شده و بعد از عبور از مخزن دوم آن تا انتهای واحد هیبرید اول پیش می‌رود تا در خروجی واحد اول بصورت هیدروگراف از آن خارج شود. این هیدروگراف، خروجی واحد اول هیبرید یا همان پاسخ سیستم به ورودی (بارش) را تشکیل می‌دهد. خروجی واحد اول به عنوان ورودی متغیر برای واحد هیبرید دوم که دارای ویژگی‌های واحد اول با ضرایب ذخیره k_1 و k_2 که به ترتیب ضریب ذخیره مخزن اول و ضریب ذخیره مخزن دوم می‌باشند، محسوب می‌شود. همان طور که شکل (۲) نشان می‌دهد، $\delta(t)$ ورودی لحظه‌ای بارش به مخزن اول می‌باشد که خروجی $Q_1(t)$ را در انتهای واحد اول تشکیل می‌دهد. با در نظر داشتن اینکه خروجی از مخزن اول ورودی متغیر مخزن بعدی است بیلان جرم در هر مخزن برای یک زمان بی‌نهایت کوچک به شکل رابطه ۱ نوشته می‌شود (Bhunya et al., 2005).



شکل ۲- ترتیب قرار گیری مخازن در دو واحد هیبرید
(Bhunya et al., ۲۰۰۵).

$$\delta(t) = k_1 \frac{dQ(t)}{dt} + Q(t) \quad (1)$$

که $Q(t)$ خروجی متغیر از مخزن اول و $\delta(t)$ ورودی لحظه‌ای به مخزن اول است. با استفاده از تبدیل لاپلاس حل معادله دیفرانسیل (۱) به صورت زیر است (Bhunya et al., ۲۰۰۵):

$$Q(s) = \frac{1}{(1 + k_1 s)} \quad (2)$$

که در آن s ضریب تبدیل لاپلاس و $Q(s)$ تبدیل لاپلاس $Q(t)$ می‌باشد. با توجه به اینکه خروجی یا معادله (۲) ورودی مخزن دوم با ضریب ذخیره k_2 را به دست می‌دهد و بیلان جرم را می‌توان را برای مخزن دوم به شرح زیر نوشت (Bhunya et al., ۲۰۰۵):

$$k_2 \frac{dQ_1(t)}{dt} + Q_1(t) = Q(t) \quad (3)$$

در این معادله $Q_1(t)$ خروجی از واحد هیبرید اول و $Q(t)$ ورودی متغیر به مخزن دوم که همان خروجی متغیر از مخزن

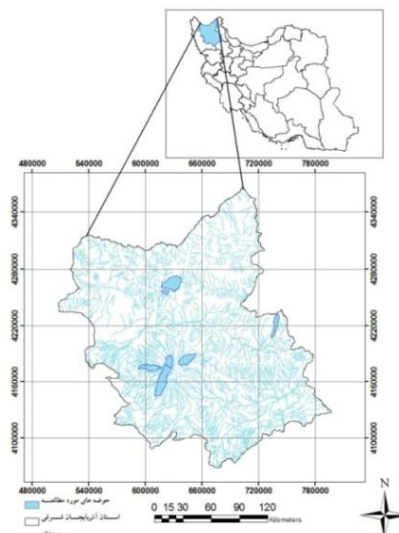
ژئومورفولوژی شش حوضه برای استخراج روابط رگرسیونی و از اطلاعات حوضه قرمزگل جهت ارزیابی و صحت‌سنجی روابط استخراج شده استفاده شده است. شکل (۱) موقعیت حوضه‌های مورد مطالعه را در استان آذربایجان شرقی نشان می‌دهد.

مدل هیبرید

Bhunya et al. (2005) برای از بین بردن محدودیت‌های مدل نش با استفاده از مفهوم مخازن خطی مدل هیبرید را ارائه دادند، در این مدل وی و همکارانش مخزن خطی نش را به دو مخزن خطی با ضرایب ذخیره متفاوت تقسیم کردند مدل حاصل از نظر فیزیکی قادر است پاسخ هیدرولوژیک حوضه‌های بزرگ را که به دلیل تغییرات ارتفاعی و کاهش شیب در جهت جریان، ذخیره در آنها بیشتر است بهتر توجیه کند. این دو مخزن خطی که بصورت سری بهم متصل شده‌اند یک واحد هیبرید را تشکیل می‌دهند. برای توصیف یک IUH بصورت کامل وجود حداقل دو واحد هیبرید توصیه شده است در صورتیکه می‌توان برای حوضه‌های خیلی بزرگتر تعداد واحدهای هیبرید را افزایش داد.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری

نام ایستگاه	منطقه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع متوسط
لیقوان	تبریز	۴۶-۲۶	۳۷-۵۰	۲۷۴۹
قرمزگل	آذرشهر	۴۶-۰۶	۳۷-۴۳	۲۳۳۱
ورودی‌سد	مراغه	۴۶-۱۶	۳۷-۲۹	۲۵۸۱
علویان	بستان آباد	۴۶-۴۴	۳۷-۵۰	۲۳۱۸
دیزناب	سراب	۴۷-۳۹	۳۷-۳۲	۲۶۷۰
سه‌زاب	اهر	۴۶-۳۴	۳۸-۳۱	۲۰۹۱
کاسین	تبریز	۴۶-۲۱	۳۸-۲۷	۲۲۷۹



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه‌های مورد مطالعه در ایران

می آید (Bhunya et al., ۲۰۰۵):

$$Q_2(t) = \int_0^t I(\tau) \cdot h(t-\tau) \cdot d\tau \quad (9)$$

که در آن: $I(\tau)$ ، ورودی متغیر به واحد دوم و یا خروجی متغیر از واحد اول که از معادله (۶) به دست می آید $h(t-\tau)$ تابع پاسخ ضربه‌ای واحد برای متغیر t تابع پاسخ ضربه‌ای واحد (شکل ۱) که برابر است با $Q_1(t-\tau)$ ، اگر ضرایب ذخیره در دو واحد یکسان باشند. تبدیل لاپلاس انتگرال پیچشی معادله (۹) برابر است با (Bhunya et al., ۲۰۰۵):

$$Q_2(s) = I(s) \cdot Q_1(s) \quad (10)$$

$$Q_2(s) = \frac{1}{[(1+k_1s)(1+k_2s)]} \left[\frac{1}{(1+k_1s)(1+k_2s)} \right]$$

در اینجا $h(s) = Q_1(s)$ ، و به دنبال آن با معکوس گرفتن از تابع لاپلاس خواهیم داشت (Bhunya et al., ۲۰۰۵):

(۱۱)

$$Q_2(t) = \frac{1}{(k_1 - k_2)^2} \left\{ \left[\exp(-t/k_1) + \exp(-t/k_2) \right] - 2 \left(\frac{k_1 k_2}{k_1 - k_2} \right) \times \left[\exp(-t/k_1) - \exp(-t/k_2) \right] \right\}$$

معادله (۱۱) تابع پاسخ خروجی در واحد دوم است که در نتیجه ورودی ضربه‌ای واحد، در واحد اول حاصل شده است. اگر از رابطه (۱۱) مشتق گرفته و مساوی صفر قرار دهیم و شرایط $Q_2(t) = Q_p$ و $t = t_p$ را در آن اعمال کنیم مقدار زمان رسیدن به اوج، به این صورت محاسبه می شود (Bhunya et al., 2005):

$$t_p = \left(\frac{k_1 + k_2}{k_2 - k_1} \right) \sqrt{k_1 k_2} \quad (12)$$

برای استخراج هیدروگراف واحد پالس از هیدروگراف واحد لحظه‌ای (رابطه ۱۱) در فاصله زمانی و انتگرال گرفته می شود.

$$Q_H(t) = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} Q_2(t) \cdot dt = \frac{1}{\Delta t(k_1 - k_2)^2} \left\{ \left[(-k_1(t + \Delta t)e^{-\frac{(t+\Delta t)}{k_1}} + k_1 t e^{-\frac{t}{k_1}} - k_1^2 (e^{-\frac{(t+\Delta t)}{k_1}} - e^{-\frac{t}{k_1}}) \right] + \left[(-k_2(t + \Delta t)e^{-\frac{(t+\Delta t)}{k_2}} + k_2 t e^{-\frac{t}{k_2}} - k_2^2 (e^{-\frac{(t+\Delta t)}{k_2}} - e^{-\frac{t}{k_2}}) \right] - \frac{2k_1 k_2}{k_1 - k_2} \left[k_1 \left(e^{-\frac{(t+\Delta t)}{k_1}} - e^{-\frac{t}{k_1}} \right) + k_2 \left(e^{-\frac{(t+\Delta t)}{k_2}} - e^{-\frac{t}{k_2}} \right) \right] \right\}$$

و به این ترتیب هیدروگراف واحد ساخته متناظر با هر بارندگی در حوضه، می تواند با معلوم بودن مقادیر t_p و استخراج شود. در مدل سازی ها می توان از یک واحد هیبرید و یا تعداد بیشتری از آنها بسته به نوع داده های موجود و اندازه حوضه استفاده کرد، ولی باید توجه کرد ممکن است یک واحد هیبرید در شبیه سازی یک شاخه صعودی با شیب کم یا یک توزیع نزدیک به توزیع نرمال با شکست روبرو شود. در این تحقیق نیز از ترکیب دو واحدی (هیبرید دو واحدی) استفاده شده است برای محاسبه

اول می باشد. تبدیل لاپلاس معادله (۳) به صورت زیر است (Bhunya et al., ۲۰۰۵):

$$L \left[k_2 \frac{dQ_1(t)}{dt} + Q_1(t) \right] = L[Q(t)] \quad (4)$$

با جاگذاری معادله (۲) در معادله (۴) و ساده کردن آن داریم (Bhunya et al., ۲۰۰۵):

$$Q_1(s) = \frac{1}{(1+k_1s)(1+k_2s)} \quad (5)$$

با تبدیل معکوس لاپلاس، پاسخ سیستم در خروجی واحد اول بصورت زیر خواهد بود (Bhunya et al., ۲۰۰۵):

$$Q_1(t) = \left(\frac{1}{k_1 - k_2} \right) \left[\exp\left(-\frac{t}{k_1}\right) - \exp\left(-\frac{t}{k_2}\right) \right] \quad (6)$$

اگر در این معادله $k_2 = 0$ و $k_1 = k$ باشد، معادله (۶) به مدل مخزن خطی منفرد نش ($n=1$) تبدیل می شود (Singh, ۱۹۸۸).

بازای k_1 و k_2 معین، معادله (۶)، می تواند زمان رسیدن به اوج و مقدار دبی اوج را که اساس توصیف یک IUH هستند، بدست دهد. بنابراین، می توان استنباط کرد که معادله (۶) اصلاح شده معادله نش می باشد. زمان رسیدن دبی به مقدار اوج در این مدل از رابطه زیر به دست می آید (Bhunya et al., ۲۰۰۵):

$$t_p = \left(\frac{k_1 k_2}{k_2 - k_1} \right) \ln(k_2 / k_1) \quad (7)$$

در معادلات (۶) و (۷) برای جلوگیری از منفی شدن مقادیر t_p و Q_p ، باید شرط $k_2 > k_1$ برقرار باشد. که با توجه به ویژگی های روندیابی قابل توجه است: گردش جریان به سمت پایین دست منجر به کاهش بزرگی جریان اوج و سرعت موج می شود. بنابراین در یک فاصله مکانی معلوم $k_2 > k_1$ است (Mishra and Singh, 1999).

با جاگذاری زمان اوج در معادله (۶) می توان میزان دبی اوج را به شرح زیر بدست آورد (Bhunya et al., 2005):

$$Q(t_p) = \left(\frac{1}{k_1 - k_2} \right) \left\{ \exp \left[-k_2 \frac{\ln k_1 / k_2}{k_1 - k_2} \right] - \exp \left[-k_1 \frac{\ln k_1 / k_2}{k_1 - k_2} \right] \right\} \quad (8)$$

برای تعمیم این مدل، دو واحد هیبرید که به صورت سری به هم وصل شده اند و دارای ویژگی های ذخیره یکسان معادله k_1 و k_2 مطابق شکل (۱) می باشند در نظر گرفته شد، در این قسمت نیز خروجی از واحد اول، ورودی متغیر واحد دوم را تشکیل می دهد. $Q_2(t)$ خروجی از واحد دوم است که با استفاده از انتگرال پیچشی تابع پاسخ ضربه ای واحد به شرح زیر به دست

$$n = 5.53\beta^{1.75} + 1.04 \quad 0.01 < \beta < 0.35 \quad \text{COD} \approx 1 \quad (16)$$

$$n = 6.29\beta^{1.998} + 1.157 \quad \beta \geq 0.35 \quad \text{COD} \approx 1 \quad (17)$$

که K ضریب ذخیره مخزن در مدل نش، n تعداد مخازن و t_p زمان رسیدن به دبی اوج و q مقدار جریان در واحد زمان در واحد بارش موثر است ($\frac{mm}{h/mm}$). در این روابط β پارامتر بی-بعدی است که با استفاده از رابطه $\beta = q \cdot t_p$ محاسبه می‌شود.

استخراج خصوصیات ژئومورفولوژی حوضه‌ها

برای استخراج پارامترهای ژئومورفولوژی حوضه از نقشه‌های توپوگرافی منطقه با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ استفاده شد. نقشه‌های توپوگرافی به نقشه‌های DEM تبدیل شدند و سپس مشخصات فیزیوگرافیکی حوضه‌ها (مساحت، شیب و محیط مربوط به هئوضو- تعداد آبراهه‌ها و شیب و طول و مساحت مربوط به هر زیر حوضه) با کاربرد نرم‌افزارهای $ArcView$ و $HEC-GeoHms$ استخراج شدند. جداول (۲) و (۳) عمده پارامترهای دخیل در فرایند بارش - رواناب و مقادیر اندازه‌گیری شده برای حوضه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهند. برای استخراج روابط شبکه آبراهه‌ها نسبت‌های هورتن به کار رفته است.

پارامترهای مدل هیبرید از برنامه بهینه‌سازی با روش جستجوی مستقیم استفاده شد. برای این کار هیدروگراف‌های رواناب مستقیم مشاهداتی با هیدروگراف‌های رواناب مستقیم مدل هیبرید مقایسه شدند و مقادیر k_1 و k_2 با روش سعی و خطا به-گونه‌ای تعدیل شد که تابع هدف که معیار $STDER$ انتخاب شده بود به کمترین مقدار خود برسد.

مدل نش

Nash ۱۹۵۷ مدل مخازن خطی آبشاری را برای استخراج هیدروگراف واحد لحظه‌ای ارائه داد. تابع پاسخ در مدل نش به صورت زیر است.

$$q = \frac{1}{KT(n)} e^{-t/K} (t/K)^{n-1} \quad (14)$$

که در آن و پارامترهای مدل نش بوده و با توجه به هیتوگراف بارش جریان‌ساز و هیدروگراف ناشی از همان بارش قابل محاسبه است. عمق رواناب در واحد زمان و در واحد بارش جریان‌ساز است. با استفاده از رابطه (۱۴) می‌توان با داشتن و پارامترهای هیدروگراف واحد مصنوعی را برای حوضه تولید کرد. برای استخراج پارامترهای مدل نش از روابط ارائه شده توسط Bhunya et al. (2003) به شرح زیر استفاده شده است.

$$K = \frac{t_p}{n-1} \quad (15)$$

جدول ۲- پارامترهای ژئومورفولوژی مورد استفاده در این مطالعه

نام پارامتر	واحد	علامت اختصاری
مساحت حوضه	km^2	A
محیط حوضه	Km	P
طول طولانی‌ترین آبراهه حوضه	km	L_F
تراکم شبکه زهکشی	km/km^2	D
شیب متوسط حوضه	deg	S
نسبت انشعاب آبراهه‌ها	-	R_B
نسبت طول آبراهه‌ها	-	R_L

جدول ۳- مشخصات ژئومورفولوژی حوضه‌ها

حوضه	A	P	L_F	D	S	R_B	R_L
لیقوان	۷۷	۵۵/۸۷	۱۶/۴۱۷	۰/۸۱۱۷	۱۷/۹	۵/۵	۳/۵
قرمزگل	۱۰۶	۸۸/۹۶	۲۸/۳۱	۰/۷۳۷۳	۱۶/۸۹	۵/۷	۵/۹
ورودی‌سد علویان	۲۵۶	۱۳۳/۴۸	۴۳/۱۰۴	۰/۷۵۳	۱۹/۴۴	۴/۸۵	۱/۷۶
دیزناب	۱۲۹	۷۱/۱	۲۳/۳۱۶	۰/۸۵۳۲	۱۲/۰۶	۳/۶۱	۱/۹۳
سهباب	۸۳	۸۴/۷	۲۵/۷۶۱	۰/۶۷۹	۱۴	۳/۴۴	۴/۴۶
کاسین	۲۱۶	۸۸/۷۹	۲۴/۳۵۵	۰/۹۲۴۵	۹/۵۳	۴/۲	۱/۷۳
کمانج	۲۶	۳۱/۳۵	۶/۸۷۵۶	۱/۱۱۵	۱۵/۲۴	۳/۰۳	۱/۳۲

رگرسیون، ارتباط برقرار شد. رگرسیون چندگانه روش مناسبی برای استخراج پارامترهای منطقه‌ای در تحلیل‌های هیدرولوژیکی می‌باشد، معادلات رگرسیونی برای محاسبه پارامترهای مدل در

استخراج روابط رگرسیونی

پس از استخراج خصوصیات ژئومورفولوژی حوضه‌ها، بین این پارامترها و ضرایب ذخیره بهینه شده با استفاده از آنالیز

k_1 و k_2 ، روابط حاصل جایگزین مقادیر k_1 و k_2 ، در مدل هیبرید، بصورت $k_2 = f_2(R_B, S, \dots)$ و $k_1 = f_1(R_B, S, \dots)$ شدند و مدل هیبرید ژئومورفولوژی GHM بدین صورت ارائه شده است.

حوضه‌های بدون آمار کاربرد زیادی دارند و روش مناسبی برای انتقال اطلاعات از حوضه‌های اندازه‌گیری شده به حوضه‌های فاقد آمار محسوب می‌شوند. پس از استخراج روابط رگرسیونی جهت محاسبه ضرایب ذخیره مخزن

جدول ۴- معادلات رگرسیونی استخراج شده

مدل	معادله	R ²
GHM	$k_2 = 4.723 - 0.818 \ln(R_B) - 0.15 + 4.334e^{-0.02R_L} - 4.012D - 0.046LF$	۰/۷۸۵
	$k_1 = 1.37 - 0.06R_B + 0.225S^{0.876} + 2.711RL^{-0.33} - 0.484D$	۰/۶۷۵

پس از استخراج روابط رگرسیونی و بدست آوردن مدل هیبرید ژئومورفولوژی، هیدروگراف واحد ۱۵ دقیقه‌ای برای پنج رویداد در حوضه قرمزیکل با استفاده از روابط ژئومورفولوژی محاسبه شده است. سپس هیدروگراف‌های رواناب مستقیم رویدادها با استفاده از رگبار متناظر، از طریق رابطه گسسته انتگرال پیچشی حاصل شده است و در نهایت برای بررسی میزان دقت و کارایی مدل هیبرید ژئومورفولوژی، هیدروگراف‌های حاصل با هیدروگراف‌های رواناب مستقیم مشاهداتی مقایسه شدند. شکل (۳) هیدروگراف‌های رواناب مستقیم حاصل از مدل GHM بدست آمده را در مقایسه با هیدروگراف‌های رواناب مستقیم مشاهداتی نشان می‌دهد. بطوریکه از شکل (۳) استنباط می‌شود مدل هیبرید دو واحدی قادر است سیلاب‌های حاصل از رویدادهای مختلف بارش را در حوضه شاهد (قرمزیکل) به طور رضایت بخشی پیش‌بینی نماید. مدل هیبرید با داشتن دومخزن که باعث تعدیل دبی اوج می شوند نتوانسته رویدادهای ۸۵/۸/۱۱ و ۸۶/۲/۲۵ را که به صورت ناگهانی اوج گرفته اند، با دقت مطلوبی پیش بینی کند.

جدول ۵- مقادیر خطای محاسبه شده در مدل هیبرید ژئومورفولوژی

رویدادها	STDER	E-NASH	F
۸۴/۲/۱۳	۰/۳	۰/۸۷	۰/۱۲
۸۶/۲/۲۵	۰/۷۷	۰/۷	۰/۲۷
۸۶/۳/۸	۰/۱۰۶	۰/۹۴	۰/۰۵
۸۵/۱/۲۳	۰/۱۵	۰/۹۶	۰/۰۳
۸۵/۸/۱۱	۰/۳۹	۰/۴	۰/۵
۸۵/۸/۷	۰/۷	۰/۶	۰/۳۹
متوسط	۰/۴	۰/۷۴	۰/۲۲

همانطوری که در جدول ۵ مشاهده می‌شود متوسط مقدار آماره F برای ۶ رویداد بارش- رواناب پیش‌بینی شده در حوضه قرمزیکل با مدل GHM برابر با ۰/۲۲ است که در مقایسه با مقدار آن در جدول آزمون F در سطح احتمال ۹۰٪،

معیارهای خطا

جهت بررسی صحت مدل‌های هیدرولوژیکی از معیارهای آماری متفاوتی که مقایسه بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی را انجام می‌دهند، استفاده می‌گردد. هر کدام از این معیارها به منظور خاص به کار می‌رود معیار نش- ساتکلیف و STDER برای مقایسه کارایی ارائه شده به کار رفتند. بازده مدل با معیار نش - ساتکلیف

$$E - NASH = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (Q_{t,obs} - Q_{t,sim})^2}{\sum_{t=1}^N (Q_{t,obs} - \bar{Q}_{t,obs})^2} \quad (18)$$

این معیار می‌تواند مقداری بین $-\infty$ تا یک اختیار کند. هر چه مقدار این معیار به عدد یک نزدیکتر باشد، نشان دهنده کارایی بیشتر مدل می‌باشد (Singh, 1988).

که در آن: $Q_{t,sim}$ و به ترتیب مقادیر محاسباتی و مشاهداتی دبی در زمان t ؛ $\bar{Q}_{t,obs}$ متوسط دبی‌های مشاهداتی برای واقعه مورپوزند و n تعداد گام‌های زمانی هیدروگراف خروجی مورد نظر می‌باشد.

خطای استاندارد STDER

$$STDER = \left(\frac{\sum_{t=1}^N (Q_{t,obs} - Q_{t,sim})^2}{n} \right)^{1/2} \quad (19)$$

$$w_t = \frac{Q_{t,obs} + \bar{Q}_{obs}}{2\bar{Q}_{obs}} \quad (20)$$

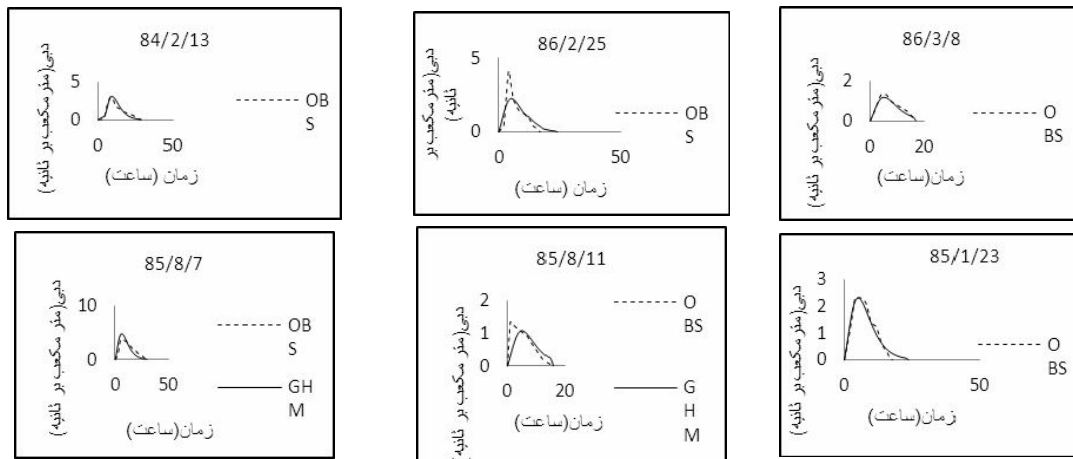
برای بررسی معنی‌داری مقدار خطای مدل، از آزمون F استفاده شده است.

نتایج

روابط رگرسیونی برای محاسبه ضرایب ذخیره بر اساس خصوصیات ژئومورفولوژی در جدول (۴) نشان داده شده است.

GHM قابلیت خوبی در پیش‌بینی سیلاب حوضه‌های استان آذربایجان شرقی داشته و قابل استفاده در حوضه فاقد آمار می‌باشد. این مدل همه هیدروگراف‌های رواناب مستقیم در این حوضه را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کرده است.

در سطح احتمال ۹۵٪، $(f_{0.05}=4/2)$ و در سطح احتمال ۹۹٪، $(f_{0.01}=8/47)$ مقدار کمتری دارد. بنابراین خطای مدل معنی‌دار نمی‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که مدل هیبرید ژئومورفولوژی



شکل ۳- مقایسه هیدروگراف‌های رواناب مستقیم محاسبه شده با مدل GHM و هیدروگراف‌های رواناب مستقیم مشاهداتی در حوضه قرمزگل

پیش‌بینی کرده است. نتایج کاربرد مدل نش در حوضه قرمزگل با استفاده از روابط Bhunya et al. (2003) نشان داد این مدل کارایی کمتری نسبت به مدل هیبرید ژئومورفولوژی در این حوضه دارد (شکل ۴). جدول (۶) نتایج مقایسه این دو مدل را نشان می‌دهد. بطوریکه از این جدول می‌توان استنباط کرد مقدار شاخص نش-ساتکلیفدر مدل نش برابر با ۰/۰۰۶ بدست آمده است که کارایی کم این مدل را در حوضه قرمزگل نسبت به مدل هیبرید ژئومورفولوژی نشان می‌دهد. خطای استاندارد مدل نش ۰/۸۵ است که تقریباً دو برابر مقدار این خطا در مدل هیبرید ژئومورفولوژی است. نتایج کاربرد مدل در حوضه قرمزگل تأییدی بر نتایج بدست آمده از مطالعه Bhunya et al. (2005) نیز می‌باشد. در کل مدل دو مخزنی هیبرید بهتر از مدل تک مخزنی نش عمل می‌کند. Ahmadein (1387) و Ghasemi (1389) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند.

مدل هیبرید در مورد پیش‌بینی سیلاب‌هایی که خیلی زود اوج می‌گیرند دقت نسبتاً خوبی ندارد. زیرا دارای دو مخزن است که باعث کند شدن حرکت جریان و کاهش بزرگی دبی اوج آن می‌شوند. کمترین مقدار شاخص نش-ساتکلیفدر رویداد ۸۵/۸/۱۱ بدست آمده است این هیدروگراف یک ساعت پس از بارش به اوج رسیده است و مدل هیبرید دو واحدی نتوانسته زمان رسیدن به اوج را به خوبی پیش‌بینی کند، مقدار متوسط شاخص نش-ساتکلیف در این حوضه برابر با ۰/۷۴ بدست آمده‌است، که هرچه این مقدار به یک نزدیک‌تر باشد، کارایی مدل و قابلیت اعتماد به آن بیشتر است. در این بررسی مدل هیبرید ژئومورفولوژی دبی اوج و زمان رسیدن به اوج هیدروگراف رواناب مستقیم را بسیار نزدیک به مشاهدات پیش‌بینی کرده است که بهتر از عملکرد مدل هیبرید معمولی در بررسی Bhunya et al. (2005) و Ahmadein (1387) و Ghasemi (1389) بوده است. مدل هیبرید معمولی عموماً در این بررسی‌ها دبی اوج را بیشتر و زمان رسیدن به اوج را دیرتر

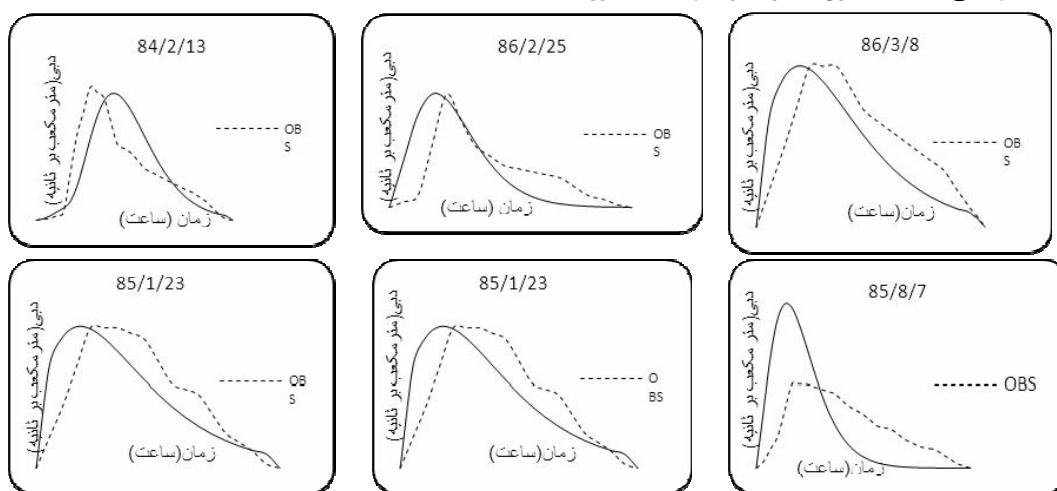
جدول ۶- مقایسه خطاهای مدل‌های GHM و NASH در حوضه قرمزگل

رویدادها	NASH			GHM		
	E-NASH	R ²	STDER	E-NASH	R ²	STDER
۸۴/۲/۱۳	۰/۵۸	۰/۷۵	۰/۶۹	۰/۸۷	۰/۷۵	۰/۳
۸۶/۲/۲۵	-۰/۶۶	۰/۵۱	۱/۲۹	۰/۷	۰/۷	۰/۷۷
۸۶/۳/۸	۰/۵۲	۰/۶۳	۰/۲۸	۰/۹۴	۰/۹۷	۰/۱۰۶
۸۵/۱/۲۳	۰/۶	۰/۶۴	۰/۵۲	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۱۵
۸۵/۸/۱۱	۰/۸	۰/۹۵	۰/۲۲	۰/۴	۰/۵	۰/۳۹
۸۵/۸/۲۷	-۱/۸۲	۰/۳۲	۲/۱۲	۰/۶	۰/۷۵	۰/۷
متوسط	۰/۰۰۶	۰/۷۴	۰/۸۵	۰/۷۴	۰/۷۷	۰/۴

نتیجه‌گیری

داشته باشد، زیرا روند جریان در این حوضه‌ها و کاهش سرعت و بزرگی آن در جهت شیب حوضه با مدل دو مخزنی و ضرایب ذخیره متفاوت بهتر توجیه می‌شود. با توجه به این واقعیت که حوضه پس از دریافت بارش همانند مخزن عمل می‌کند و خصوصیات سطح آن و شبکه آبراهه‌های موجود برای انتقال جریان همانند ضرایب ذخیره مخزن عمل می‌کنند، لذا می‌توان نتیجه گرفت که بین پارامترهای مدل هیبرید و خصوصیات ژئومورفولوژی حوضه ارتباط وجود دارد. نتایج حاصل از این تحقیق وجود چنین ارتباطی را بصورت غیر خطی تصدیق می‌کند.

در این مطالعه مدل هیبرید دو واحدی به دلیل انعطاف آن در برآورد سیلاب با انواع شکل‌ها و مزیت‌هایی که نسبت به مدل نش دارد برای بررسی پاسخ حوضه به بارش، انتخاب و پارامترهای آن بر اساس خصوصیات ژئومورفولوژی حوضه‌ها برآورد شد. نتایج کاربرد مدل مذکور در حوضه‌های مورد مطالعه نشان داد مدل هیبرید دو واحدی قابلیت خوبی در برآورد سیلاب‌های منطقه مورد مطالعه دارد. وجود دو مخزن با ضرایب ذخیره متفاوت باعث شده مدل هیبرید عملکرد بهتری در مقایسه با مدل‌هایی با یک مخزن منفرد در حوضه‌های بزرگ



شکل ۴- مقایسه هیدروگراف‌های رواناب مستقیم محاسبه شده با مدل NASH و هیدروگراف‌های مشاهده‌ای در حوضه قرمزگل

اطلاعات آن در استخراج روابط رگرسیونی استفاده نشده بود، نشان داد مدل هیبرید ژئومورفولوژی تطابق خوبی با مشاهدات دارد و دقت آن در برآورد رواناب بسیار رضایت بخش می‌باشد. مدل هیبرید ژئومورفولوژی در حوضه‌های فاقد آمار و همچنین حوضه‌هایی که آمار رواناب آنها بصورت ناقص ثبت شده قابل استفاده می‌باشد. استفاده از مدل هیبرید با بیش از دو واحد نیز در مطالعات آتی توصیه می‌شود.

امروزه GIS به یکی از ابزارهای مهم در مطالعات هیدرولوژیکی تبدیل شده و استفاده از خصوصیات ژئومورفولوژی برای بررسی پاسخ‌های هیدرولوژیکی حوضه در بیشتر موارد مقرون به صرفه است و زمان کمتری نیز صرف جمع‌آوری اطلاعات ورودی می‌شود. پارامترهای مدل هیبرید ژئومورفولوژی ارائه شده در این بررسی براحتی از نقشه‌های توپوگرافی و GIS استخراج شدند، نتایج کاربرد مدل در حوضه قرمزگل که از

REFERENCES

- Ahmadin, A., (2008). Derivation of IUH from Hybrid model and evaluation on Lighvan watershed. Master thesis, University of Tabriz. (In Farsi)
- Behera, R., Kumar, A. and Singh, J. K., (2008). GIUH model for runoff estimation from a small hilly watershed. IE (I) Journal AG, 89, 17-21.
- Bhaskar, N. R., P. Parida, B. and Nayak, K. A., (1997). Flood estimation for ungauged catchments using the GIUH. Journal of Water Resources Planning and Management, 123 (4), 228- 238.
- Bhunya, P. K., Mishra, S. K. and Berndtsson, R., (2003). Simplified two-parameter gamma distribution for derivation of synthetic unit hydrograph. Journal of Hydrologic Engineering, 8 (4), 226- 230.
- Bhunya, P.K., Ghosh, N.C., Mishra, S.K., Ojha, C.S.P. and Berndtsson, R., (2005). Hybrid model for derivation of synthetic unit hydrograph. Journal of Hydrologic Engineering, 10 (6), 458- 467.
- Ghasemi, M., Bahremand, A., Vahedbordi, S., (2010). Derivation of IUH from Hybrid model in Kelesan watershed. In: Sixth National Seminar on Watershed Management and forth National Seminar on Soil and Sediment. 28-29 Apr., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (In Farsi)
- Jena, S. K. and Tiwari, K. N., (2006). Modeling

- synthetic unit hydrograph parameters with geomorphologic parameters of watersheds. *Journal of Hydrology*, 319, 1-14.
- Kumar, A. and Kumar, D., (2008). Predicting direct runoff from hilly watershed using geomorphology and stream-order law ratios: case study. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13 (7), 570-576.
- Kumar, R., Chatterjee, C., Lohani, A. K., Kumar, S. and Singh, R.D., (2002). Sensitivity analysis of the GIUH based Clark model for a catchment. *Water Resources Management*, 16, 263-278.
- Li, C., Guo, S., Zhang, W., Zhang, J., (2008). Use of Nash IUH and DEMs to identify the parameters of an unequal- reservoir cascade IUH model. *Hydrological Processes*, 22, 4073-4082.
- Lopez, J. J., Gimena, F. N., Goni, M. and Agirre, U., (2005). Analysis of a unit hydrograph model based on watershed geomorphology represented as a cascade of reservoirs. *Agricultural Water Management*, 77, 128-143.
- Mishra, S. K. and Singh, V. P., (1999). Hysteresis-based flood wave analysis, *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 4(4), 358-365.
- Nash, J. E. (1957). The form of the instantaneous unit hydrograph. *Int. Assoc. Sci. Hydrol.*, Vol. 45 (3), 114-121.
- Rodríguez-Iturbe, I., Valdes, J.B., (1979). The geomorphologic structure of hydrologic response. *Water Resources Research*, 15 (6), 1409-1420.
- Rosso, R., (1984). Nash model relation to Horton orderratios. *Water Resources Research*, 20, 914-920.
- Sahoo, B., Chatterjee, C., S. Raghuwanshi, N., Singh, R., and Kumar, R., (2006). Flood estimation by GIUH- based Clark and Nash models. *Journal of Hydrologic Engineering*, 11, (6), 515-525.
- Singh, P. K. , Bhunya, P. K., Mishra, S. K., Chaube, U. C., (2007). An extended hybrid model for synthetic unit hydrograph derivation. *Journal of Hydrology*, 336, 347-360.
- Singh, V. P., (1988). *Hydrologic systems: Rainfall-Runoff Modeling*, Vol. 1, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Straub, T. D., Melching, C. C. and Kocher, K. E., (2000). Equations for estimating Clark unithydrograph parameters for small rural watersheds in Illinois. Urbana, IL, U.S. Geological Survey, *Water Resources Investigations Report* 00-4184
- Tung, Y. K., (1997). Regionalization of unit hydrograph parameters: 1. Comparison of regression analysis techniques. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 11,145-17
- Wilkerson, J., and Merwade, V., (2010), Incorporating Surface Storage and Slope to Estimate Clark Unit Hydrographs for Ungauged Indiana Watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(11), 918-930.

