

ارزیابی مقایسه‌ای روش‌های تخمین پارامترهای مدل‌های نش و هیبرید به منظور مدل‌سازی فرآیند بارش - رواناب (مطالعه موردی: حوضه الندچای)

جواد بهمنش^{۱*}، ندا خان محمدی^۲، بابک امیرعطایی^۳

۱. دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

۲. دانشجوی دوره دکتری مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

۳. دانشجوی دوره دکتری مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱/۱۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۱۰/۵)

چکیده

مدل‌های هیدرولوژیک بارش-رواناب به‌عنوان ابزاری مهم و ضروری برای مدیریت منابع آب در دنیا شناخته شده‌اند. در این میان، دو مدل نش و هیبرید به‌عنوان مدل‌های بارش-رواناب در سال‌های اخیر توسعه پیدا کردند. در این تحقیق، روش‌های مختلف جهت تخمین پارامترهای این دو مدل در حوضه الندچای آذربایجان غربی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. بدین منظور، پارامترهای مدل هیبرید بر اساس یک روش تجربی و پارامترهای مدل نش از هشت روش مختلف برآورد گردید. شاخص‌های آماری MAE، R^2 و RMSE جهت ارزیابی قابلیت دو مدل مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر کم شاخص‌های خطا و مقدار زیاد ضریب تبیین قابلیت هر دو مدل در مدل‌بندی هیدروگراف سیل را نشان داد. مقایسه مقادیر شاخص‌های آماری و خطای بدست آمده، نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل نش نسبت به مدل هیبرید بود. متوسط خطای دبی اوج سیلابی برای مدل‌های نش و هیبرید به ترتیب برابر ۵/۹۹ و ۱۲/۰۷ مترمکعب بر ثانیه و متوسط خطای زمان اوج هیدروگراف سیلاب به ترتیب برای مدل‌های مذکور برابر صفر و سه ساعت بدست آمد.

واژه‌های کلیدی: فرآیند بارش-رواناب، مدل نش، مدل هیبرید، هیدروگراف واحد، حوضه الندچای.

مقدمه

مدل‌های بارش-رواناب به‌عنوان ابزاری مهم و ضروری در علوم هیدرولوژی و مدیریت منابع آب به شمار می‌رود. نقش و اهمیت فرآیند بارش-رواناب در مطالعات منابع آب موجب شده که این فرآیند از دیرباز مورد توجه متخصصین قرار گیرد (Wang et al., 2004; Aytek et al., 2008). مفهوم هیدروگراف واحد ارائه شده توسط Sherman (1932) به‌عنوان یکی از ابزارهای قوی جهت مدل‌سازی فرآیند بارش-رواناب در هیدرولوژی کاربردی تبدیل شده است. امروزه از هیدروگراف واحد در مدل‌سازی فرآیند بارش-رواناب استفاده فراوان می‌شود (Nalbantis, et al., 1995). در دهه‌های اخیر نیز تلاش‌های بسیاری برای فهم فرآیندهای بارش-رواناب و تعیین هیدروگراف واحد لحظه‌ای در حوضه‌های فاقد ایستگاه هیدرومتری و آمار در نقاط مختلف دنیا صورت گرفته که می‌تواند نقش مؤثری در پایش اثرات خشکسالی بر سیستم‌های منابع آب داشته باشد. به دلیل پیچیدگی روابط بارش-رواناب، مدل‌های مفهومی برای تحلیل و

شبیه‌سازی این روابط توسعه یافته‌اند. مدل خطی مخزن یکی از مدل‌های ساده شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب می‌باشد که در سال ۱۹۳۴ توسط Zoch ارائه شده و اساس بسیاری از مدل‌های مفهومی می‌باشد (Chow, et al., 1988). در این میان، مدل نش در سال ۱۹۵۷ توسط Nash به‌عنوان یک مدل مفهومی مخازن خطی آبشاری با ضرایب ذخیره ثابت ارائه گردید. این مدل به دلیل ارائه یک رابطه صریح و روشن برای هیدروگراف واحد لحظه‌ای، به‌عنوان یکی از مدل‌های رایج، شناخته شده است. پارامترهای این مدل نشان‌دهنده ویژگی‌های فیزیکی حوضه‌های آبخیز می‌باشند. یکی از چالش‌های کاربرد این مدل، تخمین پارامترهای آن بوده که شامل تعداد مخازن خطی (n) و ضریب ذخیره (k) می‌باشد که به‌طور فیزیکی قابل اندازه‌گیری نیستند. یکی از روش‌های رایج تخمین پارامترهای مدل نش، کالیبراسیون مدل می‌باشد. در این روش، ابتدا فرآیند بارش-رواناب شبیه‌سازی شده و سپس مقادیر پارامترهای مدل با تطبیق داده‌های مشاهداتی رواناب بدست می‌آید. Nash (1958) روش‌های تخمین پارامترهای هیدرولوژیکی را با استفاده از روش گشتاورها ارائه نمود. این تکنیک بستگی به توزیع زمانی بارش و رواناب داشته و دارای خطای محاسباتی زیادی می‌باشد (Dong,

هیبرید، به نظر می‌رسد کاربرد معادلاتی ساده بتواند مشکل تخمین پارامترهای این دو مدل را حل نماید. بدین منظور، تحقیق حاضر با هدف ارزیابی روش‌های مختلف در تخمین پارامترهای دو مدل نش و هیبرید برای استخراج هیدروگراف سیل در ایستگاه بدلان واقع در حوضه آبخیز الوندچای در استان آذربایجان غربی انجام شده است. علاوه بر این، مقایسه دو مدل جهت مدل‌سازی هیدروگراف سیل‌های ایستگاه مورد مطالعه از دیگر اهداف این مطالعه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق، حوضه آبخیز الوندچای واقع در شمال استان آذربایجان غربی، در شهرستان خوی و در محل ایستگاه آب-سنجی بدلان که از ارتفاعات ۳۶۰۰ متری سرچشمه می‌گیرد، به دلیل داشتن شرایط کاملاً طبیعی و دست نخورده، انتخاب شده است. حوضه مورد بررسی جزء حوضه آبخیز ارس می‌باشد. متوسط حداکثر، حداقل دمای مطلق و میانگین دما در حوضه به ترتیب ۴۰/۲، ۱۰/۲- و ۱۳/۸ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. به طور متوسط تعداد روزهای یخبندان در حوضه مذکور برابر ۱۰۶ روز می‌باشد.

شکل (۱) موقعیت منطقه و حوضه آبخیز مورد مطالعه را نشان می‌دهد. مقدار متوسط بارندگی و ضریب تغییرات سالیانه حوضه آبخیز الوندچای طی دوره آماری ۱۳۶۰ الی ۱۳۸۹ به ترتیب برابر با ۵۲۶ میلیمتر و ۰/۶۵ می‌باشد. خلاصه‌ای از پارامترهای فیزیکی و این حوضه نیز در جدول (۱) ارائه شده است.

مدل نش

نش مدل مخازن خطی آبشاری را با استفاده از تابع گاما برای هیدروگراف واحد لحظه‌ای یا IUH (Instantaneous Unit Hydrograph) به صورت زیر ارائه نمود:

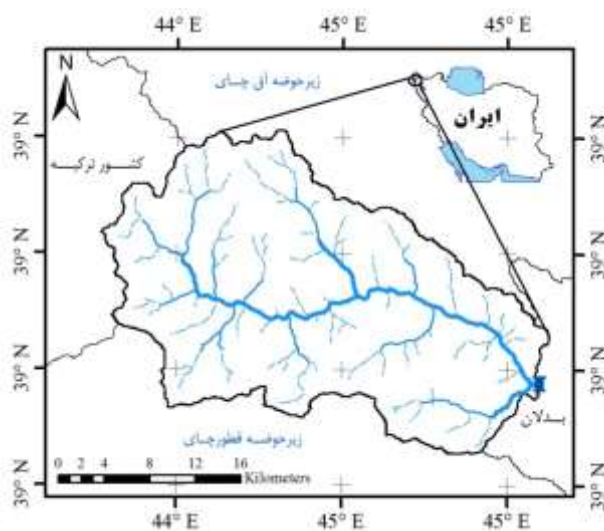
$$q = \frac{1}{k\Gamma(n)} \left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} e^{-\frac{t}{k}} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن، n و k به ترتیب تعداد مخازن و ضریب ذخیره در هر مخزن (بر حسب زمان) بوده که شکل IUH را توصیف می‌کنند، q عمق رواناب در واحد زمان در واحد باران مؤثر (با بعد عکس زمان)، $\Gamma(n)$ تابع گاما و t زمان می‌باشد. با در دست داشتن مقادیر n و k می‌توان شکل کامل هیدروگراف واحد مصنوعی را از معادله (۱) به دست آورد.

در این روش جفت پارامترهای مختلفی برای هر رویداد بدست می‌آید که مقدار متوسط جفت پارامترها برای کلیه رویدادها در نظر گرفته می‌شود. Rosso (1984)، با استفاده از ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی حوضه آبخیز، معادلاتی برای بدست آوردن پارامترهای مدل نش ارائه نمود. این معادلات تجربی نیازمند برآورد پارامتر سرعت جریان می‌باشد. مطالعات مختلفی نیز برای بدست آوردن پارامتر سرعت با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی حوضه آبخیز صورت گرفته است (Zelazinski, 1986; Al-Wagdany and Rao, 1977; Sahoo et al., 2006)؛ اما این روش مستلزم واسنجی پارامتر سرعت بوده که خود باعث افزایش تعداد پارامترهای هیدروولوژیکی مدل می‌گردد. Bhunya et al. (2005) برای رفع محدودیت‌های مدل نش، پیشنهاد تقسیم مخزن خطی منفرد نش به دو مخزن متصل سری با ضرایب ذخیره متفاوت را مطرح نمودند. در این روش، مجموعه ترکیب سری دو مخزن به عنوان یک مدل هیبرید ارائه شده است.

ارائه مدل‌ها و مطالعات صورت گرفته، مبنای کار مطالعات افراد دیگر قرار گرفت. (Sahoo et al., 1997) و (Bhaskar et al., 2006)، بعد برآورد پارامترهای مدل نش، از آن برای برآورد سیلاب حوضه‌های آبخیز فاقد آمار استفاده کرده و نشان دادند که این مدل از دقت قابل قبولی در تخمین سیلاب برخوردار است. (Bardossy, 2007) بیش از یک جفت پارامتر مدل نش را برای برآورد هیدروگراف رواناب در یک مطالعه موردی مشخص تعیین نمود. ایشان از چهار تابع هدف برای برآورد جفت پارامتر منحصر به فرد پارامترهای مدل نش با استفاده از متوسط مقادیر تابع هدف برای واسنجی رویدادها استفاده نمودند. از طرف دیگر، (Singh et al., 2007)، یک مدل هیبریدی برای شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب بر اساس مدل نش ارائه نمودند. در این روش تعداد واحدهای هیبرید و ضرایب ذخیره با استفاده از معادلات تجربی بدست می‌آید. همچنین، Bahreman and Mostafazadeh (2010)، روش‌های مختلف تخمین پارامترهای مدل نش را مورد ارزیابی قرار دادند و روش‌های مناسب را برای تخمین پارامترهای مذکور را در منطقه مورد مطالعه ارائه نمودند. در مطالعه دیگری نیز (Ahmadin et al., 2011) به ارزیابی دو مدل هیبرید و نش در یک حوضه آبخیز موردی پرداختند. ایشان در تحقیق خود پارامترهای مدل هیبرید را توسط روش ارائه‌شده توسط (Bhunya et al., 2005) برآورد و به برتری مدل هیبرید نسبت به مدل نش در برآورد هیدروگراف واحد لحظه‌ای ادعان داشتند.

با توجه به محدودیت‌ها و دشواری‌های موجود در کاربرد روش‌های مختلف جهت تعیین پارامترهای دو مدل نش و



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز الندچای

جدول ۱- پارامترهای فیزیکی حوضه آبخیز مورد مطالعه

نام حوضه	نام ایستگاه آبسنجی	مساحت (Km)	ارتفاع ماکزیمم (m)	ارتفاع مینیمم (m)	شیب متوسط (%)
الندچای	بدلان	۶۷۷	۳۶۰۰	۱۴۹۴	۳۲

جدول ۲- روش های مختلف جهت محاسبه پارامترهای مدل نش

روش	منبع	فرمول	پارامترها
اول	Safavi (2006); Bahremand, and Mostafazadeh (2010)	$n = 2.29L^{0.1}$ $k = \left(\frac{1.2A^{0.3}}{L^{0.1}S^{0.3}} \right)$	L: طول آبراهه اصلی (کیلومتر) A: مساحت حوضه (کیلومتر مربع) S: شیب حوضه k بر حسب واحد ساعت
دوم	Bahremand, and (Mostafazadeh, 2010)	$n = \left(\frac{t_p}{t_i - t_p} \right)^2 + 1$ $k = \frac{t_i}{n - 1 + (n - 1)^{0.5}}$	t _p : زمان تا اوج هیدروگراف (hr) t _i : زمان تا نقطه عطف هیدروگراف (hr)
سوم	Bhunya et al. (2003)	$n = \begin{cases} 5.53\beta^{1.75} + 1.04 & 0.01 < \beta < 0.35 \\ 6.29\beta^{1.998} + 1.157 & \beta \geq 0.35 \end{cases}$ $k = \frac{t_p}{n - 1}$	β = q _p t _p t _p : زمان تا اوج (h) q _p : دبی اوج (mm/h/mm)
چهارم	Singh (1998)	$n = 1.09 + 0.164\beta + 6.19\beta^2$	
پنجم	Singh (2000)	$n = 7 / 6 + 2\pi\beta^2$	
ششم	Aron and White (1982)	$\alpha = 0.045 + 0.5\phi + 5.6\phi^2 + 0.3\phi^3$	$\phi = Q_p t_p / (1.008A')$ $\alpha = n - 1$ A': مساحت حوضه (ایکر)
هفتم	Collins (1983)	$\alpha = 0.5\phi + 5.9\phi^2$	
هشتم	Hann et al. (1994)	$n = 1 + 6.5 \left(\frac{Q_p t_p}{V} \right)^{1.92}$	V: حجم کل رواناب

k_2 معلوم، معادله (۳) زمان اوج، دبی اوج و شاخه‌های صعودی و نزولی و در کل یک IUH را نشان می‌دهد. بنابراین معادله (۳) نسخه اصلاح شده نش می‌باشد، که در آن همان‌طور که اشاره شد $k_2 > k_1$ بوده و مقادیر آنها مثبت است. برای واحد دوم نیز می‌توان مشابه واحد اول عمل کرد با این تفاوت که ورودی به واحد دوم، خروجی از واحد اول منظور گردد که در نهایت معادله (۴) حاصل می‌شود:

(رابطه ۴)

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

معادله (۴) تابع واکنش خروجی برای واحد دوم در نتیجه ورود یک پالس بارش واحد به این واحد را نشان می‌دهد و t_p آن از رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$t_p = \frac{k_1 + k_2}{k_2 - k_1} (\sqrt{k_1 k_2}) \quad (\text{رابطه ۵})$$

بنابراین یک هیدروگراف واحد متناظر با هر بارندگی در یک حوضه می‌تواند با معلوم بودن Q_p و t_p استخراج شود. در اینجا باید توجه کرد که کاربرد یک واحد تنها یا یک ترکیب دوتایی شبیه به هم می‌تواند وابسته به داده‌های قابل دسترس ایجاد گردد. با این وجود ممکن است یک واحد هیبرید تنها در شبیه‌سازی یک شاخه صعودی پهن یا یک توزیع نزدیک به توزیع نرمال با شکست روبرو شود. بنابراین در بیشتر مواقع، یک واحد، برای شبیه‌سازی داده‌های واقعی ترجیح داده می‌شود (Ahmadin et al., 2011).

در این تحقیق برای تعیین مقادیر k_1 و k_2 از رابطه تجربی ارائه شده توسط (Bhunya et al., 2005) (معادلات ۶ و ۷) استفاده شد.

(رابطه ۶)

$$k_2 = \frac{\beta t_p}{9.4452(\beta)^3 - 8.2173(\beta)^2 + 4.306(\beta) - 0.4466} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$k_1 = \frac{k_2}{-0.2073(\lambda)^3 + 1.772(\lambda)^2 + 5.2535(\lambda) + 7.1051}$$

که در آنها، β ، α' و λ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\beta = q_p t_p \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$\alpha' = \frac{k_2}{k_1} \quad (\text{رابطه ۹})$$

IUH استخراج شده توسط مدل نش بر پایه مفهوم n مخزن خطی با ضرایب ذخیره یکسان، یک توزیع گامای دو پارامتری است (Ahmadin et al., 2011). برای تخمین مقادیر n و k در مدل نش روش‌های مختلفی توسط محققان پیشنهاد شده است. در این تحقیق، جهت تخمین پارامترهای مدل نش، هشت روش مختلف مورد استفاده قرار گرفته است که معادلات آنها در جدول (۲) ارائه شده است. لازم به ذکر است، در تمامی روابط اشاره شده در جدول (۲) که فقط برای محاسبه مقدار n ارائه شده‌اند، از فرمول (۲) جهت محاسبه k استفاده شده است:

$$k = t_p / (n - 1) \quad (\text{رابطه ۲})$$

مدل هیبرید

هر واحد مدل هیبرید شامل دو مخزن با ضرایب ذخیره نابرابر و متصل به صورت سری می‌باشد. بارش وارد اولین مخزن شده و سپس وارد دومین مخزن و نهایتاً با مسیریابی تا انتهای واحد هیبرید اول پیش می‌رود تا در خروجی به صورت یک هیدروگراف خارج شود که این خروجی برای واحد هیبرید دوم (با ویژگی‌های شبیه واحد اول) به عنوان ورودی محسوب می‌گردد. به‌همین ترتیب می‌توان آخرین خروجی را به صورت تحلیلی استنتاج کرد. برای توصیف هیدروگراف واحد، حداقل دو واحد هیبرید پایه به صورت سری توصیه شده است (Ahmadin et al., 2011). برای حوضه‌های بزرگ‌تر با شیب کم، انتظار می‌رود که هیدروگراف واحد به یک توزیع متقارن میل کند و در صورت ضرورت، می‌توان تعداد بیشتری از واحدهای هیبریدی را در نظر گرفت (Ahmadin et al., 2011).

مدل هیبرید دو واحدی

با در نظر گرفتن رابطه تعادل حجمی در اولین مخزن برای یک زمان بسیار کوتاه و نیز با توجه به این نکته که خروجی از هر مخزن به عنوان ورودی مخزن بعدی باشد، در نهایت رابطه (۳) حاصل می‌شود:

$$Q_1(t) = \frac{1}{(k_1 - k_2)} \left[e^{\frac{-t}{k_1}} - e^{\frac{-t}{k_2}} \right] \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آنها، k_1 و k_2 به ترتیب ضرایب ذخیره اولین و دومین مخزن خطی در هر واحد می‌باشند. معادله (۳) برای $k_2 > k_1$ نتایج درستی ارائه داده و در حالت‌های دیگر، مقادیر منفی یا غیر قابل قبول برای دبی حاصل می‌کند که پذیرفتنی نیستند (Singh et al., 2007). این معادله واکنش در خروجی واحد اول، در نتیجه یک پالس بارش واحد در ورودی را نشان می‌دهد. در این معادله، اگر $k_2 = 0$ و $k_1 = k$ باشد، معادله (۳) تبدیل به معادله مخزن خطی منفرد نش خواهد شد. برای k_1 و

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Q_i - \hat{Q}_i| \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (\hat{Q}_i - \bar{\hat{Q}})(Q_i - \bar{Q}) \right]^2}{\sum_{i=1}^N (\hat{Q}_i - \bar{\hat{Q}})^2 \times \sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

که در آنها، \hat{Q}_i : مقادیر دبی برآوردی از مدل مربوطه، $\bar{\hat{Q}}$: میانگین مقادیر دبی برآوردی از مدل، Q_i : مقادیر دبی مشاهداتی، \bar{Q} : میانگین مقادیر دبی مشاهداتی و N: اندازه نمونه می‌باشد. هر چه مقادیر شاخص‌های خطا به صفر و مقادیر ضریب تبیین به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده عملکرد خوب مدل به کار گرفته شده است.

علاوه بر شاخص‌های آماری، از مفهوم خطا نیز برای بیان تفاوت بین دو مدل نش و هیبرید استفاده شده است. رابطه (۱۴) برای بیان درصد خطا در پیش‌بینی مقدار t_p (e_{tp}) توسط مدل‌های مربوطه و رابطه (۱۵) برای بیان درصد خطا در پیش‌بینی مقدار Q_p (e_{qp}) به کار رفته است.

$$e_{tp} = \left| \frac{t_p - \hat{t}_p}{t_p} \right| \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

$$e_{qp} = \frac{|Q_p - \hat{Q}_p|}{Q_p} \times 100 \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

در معادلات (۱۴) و (۱۵)، Q_p : مقدار دبی پیک هیدروگراف مشاهداتی، \hat{Q}_p : مقدار دبی پیک هیدروگراف برآوردی، t_p : مقدار زمان پیک هیدروگراف مشاهداتی و \hat{t}_p : مقدار زمان پیک هیدروگراف برآوردی می‌باشد.

نتایج و بحث

با توجه به اینکه برای تخمین پارامترهای مدل‌های نش و هیبرید، مقادیر t_p و q_p هر رویداد مورد نیاز است، این مقادیر پس از محاسبه، در جدول (۳) برای ایستگاه مورد مطالعه ارائه شده است.

جدول ۳- مقادیر t_p و q_p رویدادهای مشاهداتی

ایستگاه مربوطه	رویدادهای مشاهداتی (تاریخی)	t_p (h)	q_p (m ³ /s)
بدلان	۱۳۸۸/۰۴/۱۹	۴	۰/۱۶۵
	۱۳۹۰/۰۱/۲۹	۸	۰/۱۰۷
	۱۳۹۰/۰۱/۳۰	۸	۰/۱۰۲
	۱۳۹۰/۰۲/۰۲	۱۲	۰/۰۶۹
متوسط		۸	۰/۱۱

$$\lambda = \frac{t_p}{k_2} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

مقدار β مقدار تیزی یا حلقه‌ای بودن شکل هیدروگراف را مشخص می‌کند، α' توان ذخیره و λ نشان‌دهنده نسبت زمان اوج به زمان نگهداری مؤثر k_2 است. بنابراین برای t_p و q_p معلوم یک هیدروگراف واحد و با به دست آوردن مقادیر K_1 و K_2 شکل کامل هیدروگراف واحد را می‌توان از مدل هیبرید دو واحدی (معادله ۴) استخراج کرد (Ahmadin et al., 2011). در این تحقیق نیز از همین معادله جهت محاسبه هیدروگراف واحد و سپس تبدیل آن به هیدروگراف مشاهداتی استفاده گردید.

روش تحقیق

در این مطالعه، رویدادهای مربوط به ایستگاه بدلان مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و پارامترهای فیزیوگرافی مورد نیاز در محاسبه پارامترهای ورودی مدل نش از قبیل مساحت، محیط، طول آبراهه اصلی و شیب حوضه برای ایستگاه مورد نظر در محیط GIS استخراج شد. از بین آمار موجود، چهار رویداد، دارای یک هیدروگراف مشخص در بازه ساعتی بوده و قابلیت ارائه به صورت یک سیل مجزا را دارا بودند. داده‌های سیل مربوط به ایستگاه هیدرومتری بوده و از سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی اخذ گردید. برای هر رویداد پارامترهای مربوط به هر مدل بدست آمد. برای هر رویداد پس از تفکیک دبی پایه به روش مستقیم، حجم رواناب، ارتفاع رواناب سطحی و پارامترهای مورد نیاز جهت کاربرد فرمول‌های مختلف محاسبه گردید.

لازم به ذکر است، سیل حاصله از دو رویداد متوالی دو روز ۲۹ و ۳۰ فروردین سال ۹۰ به صورت مجزا بوده و هیدروگراف منفردی برای هر رویداد ثبت شده بود بطوریکه با پایان یافتن یک هیدروگراف و رسیدن به دبی پایه هیدروگراف بعدی شروع می‌شد. ذکر این نکته نیز ضروری به نظر می‌رسد که در این تحقیق، مدل‌ها واسنجی شده و صحت‌سنجی آنها مدنظر نبوده است.

ارزیابی عملکرد مدل‌ها

جهت ارزیابی کارایی دو مدل کاربردی در تحقیق و مقایسه آن دو با یکدیگر، از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب تبیین (R^2) که به صورت زیر بیان می‌شوند، استفاده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{N}} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

مقایسه بهتر دو مدل می‌باشد. نتایج Bahremand, and Mostafazadeh (2010) نیز عملکرد نامناسب روش اول را تأیید کرد، اما ایشان برخلاف نتیجه این تحقیق و نتایج Singh et al. (2007) و Ahmadin et al. (2011) نتایج قابل قبولی توسط روش سوم به دست نیاوردند. Bahremand, and Mostafazadeh (2010) برای روش دوم نیز نتایج ضعیفی به دست آوردند.

نتایج شاخص‌های آماری حاصل از کاربرد مدل هیبرید در ایستگاه مورد مطالعه در جدول (۵) ارائه شده است. با توجه با نتایج این جدول ملاحظه می‌شود که روش تجربی به کار رفته جهت محاسبه پارامترهای مدل هیبرید، روش مناسبی بوده و می‌توان این روش را جایگزینی مناسب برای روش‌های دشوار دانست.

نتایج روش دوم در ایستگاه بدلان از بین روش‌های مختلف، جهت مدل‌سازی هیدروگراف مربوطه به کار رفت. شکل (۲) جهت مقایسه بهتر عملکرد دو مدل در شبیه‌سازی هیدروگراف‌های مربوط به رویدادهای ثبت شده در ایستگاه مورد مطالعه رسم شده است.

همانطوریکه از جدول (۳) دیده می‌شود، به‌طور متوسط برای رویدادهای مشاهداتی مقدار t_p و q_p به ترتیب برابر ۸ ساعت و ۰/۱۱ مترمکعب بر ثانیه برآورد شده است.

جدول (۴) شاخص‌های آماری حاصله برای مدل نش با استفاده از هشت روش کاربردی را در ایستگاه مورد مطالعه نشان می‌دهد. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌گردد، روش اول در مقایسه با روش‌های دیگر در ایستگاه بدلان با متوسط خطای ۵/۸۵۲ مترمکعب در ثانیه نتایج قابل قبولی ارائه نداده است. نتایج این جدول نشان‌دهنده عملکرد مشابه روابط سوم تا هشتم در منطقه مورد مطالعه بوده و قابلیت آنها برای منطقه مورد مطالعه را مایید می‌کند. همچنین، روش دوم با متوسط خطای ۱/۲۸۳ مترمکعب در ثانیه در ایستگاه بدلان، به عنوان بهترین روش معرفی شده و مبنای مقایسه با روش هیبرید قرار گرفت. البته کاملاً مشخص است که اختلاف فاحشی بین نتایج روش‌های دوم تا هشتم نبوده (با مقدار متوسط خطای ۱/۵۱ مترمکعب در ثانیه) و همه این روش‌ها، نتایج قابل قبولی ارائه نموده‌اند و انتخاب یک روش به عنوان مبنای صرفاً جهت

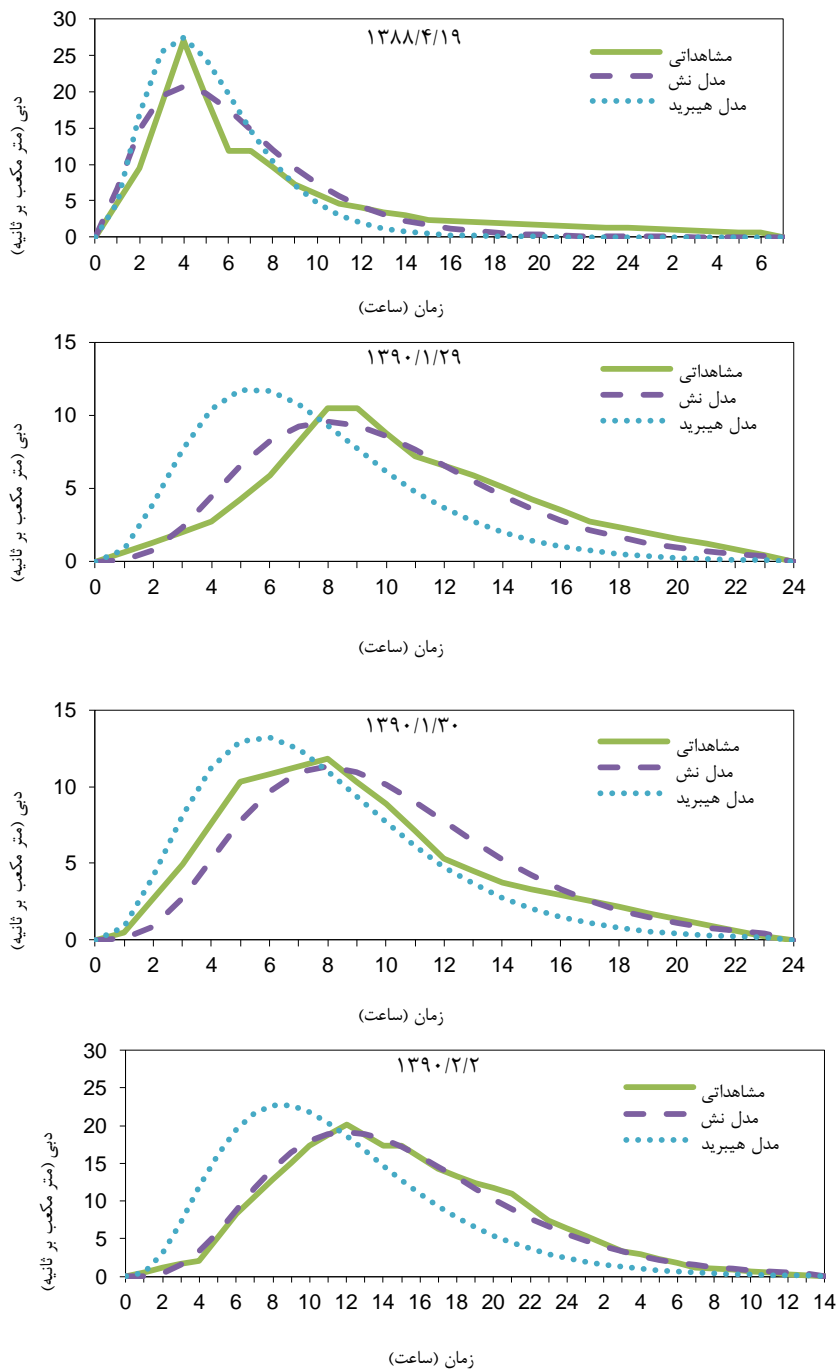
جدول ۴- شاخص‌های آماری مدل نش در ایستگاه بدلان

روش	رویداد	MAE(m ³ /sec)	R ²	RMSE(m ³ /sec)	روش	رویداد	MAE(m ³ /sec)	R ²	RMSE(m ³ /sec)
اول	۱۳۸۸/۰۴/۱۹	۵/۱۲۱	۰/۳۶۸	۷/۷۴۴	پنجم	۱۳۸۸/۰۴/۱۹	۱/۹۸۱	۰/۹۳۷	۲/۷۷۴
	۱۳۹۰/۰۱/۲۹	۲/۹۷۴	۰/۰۰۲	۴/۰۱۹		۱۳۹۰/۰۱/۲۹	۰/۸۲۳	۰/۹۲۴	۱/۰۸۸
	۱۳۹۰/۰۱/۳۰	۳/۷۸۴	۰/۰۶۶	۵/۱۶۵		۱۳۹۰/۰۱/۳۰	۰/۹۷۶	۰/۸۹۵	۱/۳۳۸
	۱۳۹۰/۰۲/۰۲	۵/۲۹	۰/۱۳۵	۶/۴۷۸		۱۳۹۰/۰۲/۰۲	۰/۷۴۵	۰/۹۸۴	۰/۹۸۵
	متوسط	۴/۲۹۲	۰/۱۴۳	۵/۸۵۲		متوسط	۱/۱۳۱	۰/۹۳۵	۱/۵۴۶
دوم	۱۳۸۸/۰۴/۱۹	۱/۵۴	۰/۹۰۳	۲/۱۵۵	ششم	۱۳۸۸/۰۴/۱۹	۱/۹۷۹	۰/۹۳۷	۲/۷۷۲
	۱۳۹۰/۰۱/۲۹	۰/۶۹۷	۰/۹۲۴	۰/۹۳		۱۳۹۰/۰۱/۲۹	۰/۸۲۲	۰/۹۲۴	۱/۰۸۶
	۱۳۹۰/۰۱/۳۰	۰/۹۴۴	۰/۸۹۷	۱/۲۸۴		۱۳۹۰/۰۱/۳۰	۰/۹۷۴	۰/۸۹۵	۱/۳۳۷
	۱۳۹۰/۰۲/۰۲	۰/۵۵۶	۰/۹۸۸	۰/۷۶۱		۱۳۹۰/۰۲/۰۲	۰/۷۴۲	۰/۹۸۴	۰/۹۸۱
	متوسط	۰/۹۳۴	۰/۹۲۸	۱/۲۸۳		متوسط	۱/۱۲۹	۰/۹۳۵	۱/۵۴۴
سوم	۱۳۸۸/۰۴/۱۹	۱/۹۷۹	۰/۹۳۷	۲/۷۷۱	هفتم	۱۳۸۸/۰۴/۱۹	۱/۹۷۹	۰/۹۳۷	۲/۷۷۲
	۱۳۹۰/۰۱/۲۹	۰/۸۲۲	۰/۹۲۴	۱/۰۸۷		۱۳۹۰/۰۱/۲۹	۰/۸۱۹	۰/۹۲۴	۱/۰۸۳
	۱۳۹۰/۰۱/۳۰	۰/۹۷۵	۰/۸۹۵	۱/۳۳۸		۱۳۹۰/۰۱/۳۰	۰/۹۷۳	۰/۸۹۵	۱/۳۳۶
	۱۳۹۰/۰۲/۰۲	۰/۷۴۳	۰/۹۸۴	۰/۹۸۲		۱۳۹۰/۰۲/۰۲	۰/۷۳۸	۰/۹۸۴	۰/۹۷۵
	متوسط	۱/۱۳۰	۰/۹۳۵	۱/۵۴۵		متوسط	۱/۱۲۷	۰/۹۳۵	۱/۵۴۲
چهارم	۱۳۸۸/۰۴/۱۹	۱/۹۷۷	۰/۹۳۷	۲/۷۶۸	هشتم	۱۳۸۸/۰۴/۱۹	۱/۹۹۷	۰/۹۳۷	۲/۷۹۳
	۱۳۹۰/۰۱/۲۹	۰/۸۲۲	۰/۹۲۴	۱/۰۸۶		۱۳۹۰/۰۱/۲۹	۰/۸۳۸	۰/۹۲۴	۱/۱۰۱
	۱۳۹۰/۰۱/۳۰	۰/۹۷۴	۰/۸۹۵	۱/۳۳۸		۱۳۹۰/۰۱/۳۰	۰/۹۸۹	۰/۸۹۵	۱/۳۴۸
	۱۳۹۰/۰۲/۰۲	۰/۷۴۳	۰/۹۸۴	۰/۹۸۱		۱۳۹۰/۰۲/۰۲	۰/۷۷۷	۰/۹۸۴	۱/۰۱۹
	متوسط	۱/۱۲۹	۰/۹۳۵	۱/۵۴۳		متوسط	۱/۱۵۰	۰/۹۳۵	۱/۵۶۵

همین مسئله است.

نتایج مقادیر خطا در جدول (۶) آمده است. با توجه به جدول (۶) ملاحظه می شود که مدل نش بدون هیچ خطایی، مقدار t_p را شبیه سازی نموده است در حالی که مدل هیبرید، مقدار t_p را به طور متوسط با ۳ ساعت خطا مدل نموده است. مقدار خطای Q_p (به جز در یک مورد) نیز نشان دهنده توانایی بیشتر مدل نش با متوسط خطای سه رویداد برابر با ۵/۹۹ مترمکعب در ثانیه نسبت به مدل هیبرید با متوسط خطای سه رویداد برابر با ۱۲/۰۷ مترمکعب در ثانیه می باشد.

مقایسه نتایج حاصل از مدل هیبرید با مدل نش در شکل (۲) نشان می دهد که در ایستگاه بدلان مدل نش بهتر از مدل هیبرید، هیدروگراف مشاهداتی را مدل بندی نموده است. این امر بدین معنی است که فرمول تجربی ارائه شده توسط *Bhunya et al.* (2005) جهت محاسبه پارامترهای مدل هیبرید در ایستگاه بدلان قابلیت کمتری نسبت به روش دوم جهت محاسبه پارامترهای مدل نش دارد. شکل (۲) نتایج حاصله از جدول (۵) در مقایسه با جدول (۴) را تأیید می کند. همچنین در این شکل به وضوح مشخص است که مدل هیبرید دبی اوج سیلابها را بیشتر برآورد کرده که نتایج (Ahmadin *et al.* (2011) نیز بیانگر



شکل ۲- هیدروگراف های مشاهداتی و برآوردی از دو مدل نش و هیبرید در ایستگاه بدلان در تاریخ های مختلف

جدول ۵- شاخص‌های آماری حاصله از کاربرد مدل هیبرید در ایستگاه بدلان

ایستگاه بدلان			
رویداد	MAE	R ²	RMSE (m ³ /s)
۱۳۸۸/۰۴/۱۹	۱/۹۷۲	۰/۹۳۵	۲/۸۲۵
۱۳۹۰/۰۱/۲۹	۲/۵۷۳	۰/۳۸۳	۳/۲۹۶
۱۳۹۰/۰۱/۳۰	۱/۲۰۲	۰/۹۰۶	۱/۵۰۳
۱۳۹۰/۰۲/۰۲	۳/۸۰۳	۰/۵۹۴	۵/۰۶۸
متوسط	۲/۳۸۸	۰/۷۰۵	۳/۱۷۳

نتایج جدول (۶) توانایی مدل نش در شبیه‌سازی مقدار t_p و Q_p را در ایستگاه مورد مطالعه نشان می‌دهد و ناتوانی مدل هیبرید را در مدل‌بندی این دو مقدار در ایستگاه‌های مورد مطالعه به اثبات می‌رساند. مقدار t_p محاسباتی توسط مدل هیبرید کمتر یا مساوی با مقدار واقعی حاصل شده است که با نتایج (Ahmadin et al., 2011) همخوانی ندارد. Ahmadin et al. (2011)، نتیجه گرفتند که مدل هیبرید بهتر از مدل نش، شاخه‌های صعودی و نزولی هیدروگراف مشاهداتی را شبیه‌سازی می‌کند.

جدول ۶- خطای مقادیر برآوردی Q_p و t_p توسط دو مدل نش و هیبرید در

ایستگاه بدلان					
ردیف	رویداد	هیبرید e_{tp}	هیبرید e_{Qp}	نش e_{tp}	نش e_{Qp}
۱	۱۳۸۸/۰۴/۱۹	۰	۱/۳۰۵۴	۰	۲۳/۲۶۷
۲	۱۳۹۰/۰۱/۲۹	۳	۱۱/۹۴۱۰	۰	۸/۴۰۳
۳	۱۳۹۰/۰۱/۳۰	۲	۱۱/۹۶۵۹	۰	۴/۳۱۷
۴	۱۳۹۰/۰۲/۰۲	۴	۱۲/۳۱۴۱	۰	۵/۲۵۰
متوسط رویدادهای ۲، ۳ و ۴					
		۳/۰۰	۱۲/۰۷	۰/۰	۵/۹۹

لازم به ذکر است که تمامی موارد ذکر شده برای حالتی است که از فرمول تجربی (Bhunya et al., 2005) جهت تعیین پارامترهای مدل هیبرید استفاده شود و ممکن است در حالت‌های دیگر، کاربرد روش‌های دیگر در تعیین پارامترها، شاهد عملکرد بهتر این مدل حتی نسبت به مدل نش باشیم.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق تلاش شده است تا با استفاده از روش‌های مختلف تخمین پارامترهای مدل‌های نش و هیبرید، وقایع تاریخی به منظور مدل‌سازی فرآیند بارش-رواناب شبیه‌سازی و عملکرد مدل‌ها ارزیابی شود که به صورت خلاصه، نتایج کلی به شکل زیر قابل ارائه می‌باشد:

- تحلیل شاخص‌های آماری در منطقه مورد مطالعه نشان

داد که همه روش‌های کاربردی، جز روش اول، جهت محاسبه پارامترهای نش (K و n) در منطقه مورد مطالعه مناسب می‌باشند. نتایج روش هفتم که مناسب‌ترین روش در منطقه مورد مطالعه نام گرفت به عنوان روش مینا جهت مقایسه با نتایج مدل هیبریدی که پارامترهای آن توسط روش تجربی Bhunya (2005) *et al.* حاصل شد، انتخاب گردید.

- نتایج حاصل از مقایسه دو مدل بر اساس شاخص‌های خطا و ضریب تبیین نشان داد که در ایستگاه بدلان روش نش بهتر از مدل هیبرید، هیدروگراف مشاهداتی را مدل‌بندی نموده است. مقایسه هیدروگراف‌های برآوردی و مشاهداتی نیز نشان داد که مدل هیبرید دبی اوج سیلاب‌ها را بیشتر برآورد می‌کند و برای زمان اوج، مقداری کمتر یا مساوی مقدار زمان پیک واقعی ارائه می‌دهد.

- بر اساس مفاهیم تعریفی خطا نیز مشخص شد که مقدار زمان اوج شبیه‌سازی شده توسط مدل نش همان مقدار زمان واقعی است و دبی‌های پیک حاصله توسط این روش نیز، به جز در یک مورد، نزدیک‌تر به مقدار واقعی می‌باشند، اما مدل هیبرید در مدل‌بندی این دو مقدار خطای بیشتری نسبت به مدل نش ارائه داد.

- ساختار مدل و انتخاب روش تخمین پارامترهای مدل نقش اساسی در تطبیق و عدم تطبیق مقادیر مشاهداتی و محاسباتی داشته و می‌تواند جزء ریشه‌های عدم قطعیت در مدل‌سازی توسط دو مدل مذکور بشمار آید.

در نهایت لازم به ذکر است که دورنمای تحقیق حاضر واسنجی مدل‌های مورد استفاده بوده که در این وضعیت تعداد رویدادها همانند حالت صحت‌سنجی که مقدار میانگین داده‌ها در آن منظور می‌گردد، نقش چندانی ندارد؛ البته این بدین معنی نمی‌باشد که تعداد وقایع انتخابی در نتایج حاصله بی‌تأثیر است و همین نتایج با در نظر گرفتن رویدادهای بیشتر حاصل خواهد شد.

پیشنهادها

پیشنهادها زیر در ادامه تحقیق حاضر ارائه می‌گردد:

- بررسی حساسیت پارامترهای مدل

- بررسی قابلیت روش‌های دیگر برآورد پارامترهای دو

مدل‌های نش و هیبرید

- انجام تحقیق حاضر در دیگر حوضه‌های آبخیز برای فهم

بیشتر قابلیت‌های مدل‌های مورد بررسی

- صحت‌سنجی مدل‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر

REFERENCES

- Ahmadin, A., Fakhri Fard, A. and Gorbani, M. A. (2011) Comparison of Hybrid and Nash models for derivation of instantaneous unit hydrograph (Case study: Lighvan watershed). *Water and Soil Science*, 21(1), 29-41. (In Farsi)
- Al-Wagdany, A.S., Rao, A.R. (1997) Estimation of the velocity parameter of the geomorphologic instantaneous unit hydrograph. *Water Resources Management*, 11, 1-16.
- Aron, G. and White, E. L. (1982) Fitting a gamma distribution over a synthetic unit hydrograph. *Water Resources Bulletin*, 18(1), 95-98.
- Aytek, A., Asce, M. and Alp, M. (2008) An application of artificial intelligence for rainfall-runoff modeling. *Journal of Earth System Science*, 117, 145-155.
- Bahremand, A.R. and Mostafazadeh, R. (2010) Comparison of different methods for parameter estimation of nash's instantaneous unit hydrograph in jafarAbad watershed. *Journal of Watershed Management Researches Journal (Pajouhesh & Sazandegi)* 86, 42-51. (In Farsi)
- Bardossy, A. (2007) Calibration of hydrologic model parameters for ungauged catchments. *Journal of Hydrol and Earth System Sciences*, 11, 703-710
- Bhaskar, N. R., Parida, B. P., Nayak, A. K. (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., 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.
- Chow, V. T., Maidment, D.R., Mays, L.W. (1988) *Applied hydrology*. New York: McGraw-Hill.
- Collins, M. A. (1983) Fitting a gamma distribution over a synthetic unit hydrograph. *Journal of Water Resources Bulletin*, 18(1), 303-304.
- Dong, S. H. (2007) Genetic algorithm based parameter estimation of Nash Model. *Journal of Water Resources Management*, 22(4), 525-533.
- Hann, C. T., Barfield, B. J. and Hayes, J. C. (1994) *Design hydrology and sedimentology for small catchment*. New York: Academic.
- Lin, G. F. and Chen, L. H. (2004) A non-linear rainfall-runoff model using radial basis function network. *Journal of Hydrology*, 289, 1-8.
- Nalbantis, I., Obled, C. and Rodriguez, J. Y. (1995) Unit hydrograph and effective precipitation identification. *Journal of Hydrology*, 168, 127-157.
- Rosso, R. (1984) Nash model relation to Horton order ratios. *Water Resources Research* 20(7):914-920.
- Safavi, H. R. (2006) *Engineering hydrology*. Iran: Arkan danesh. (In Farsi)
- Sahoo, B., Chandarnath, C., Narendra, S. R., Rajendra, S. and Rakesh, K. (2006) Flood estimation by GIUH based Clark and Nash models. *Journal of Hydrologic Engineering*, 11(6), 515-525
- Sherman, L.K. (1932) Stream flow from rainfall by the unit graph method. *Engineers News Record*, 108, 501-505.
- Singh, S. L. (1998) Reconstructing a synthetic unit hydrograph into a Gamma distribution. In: *Proceeding of International conference on Integrated water Resources Management*, 1-14 October, Alexandria University, Egypt, pp. 104-110.
- Singh, S. K. (2000) Transmuting synthetic unit hydrograph into Gamma distribution. *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(4), 380-385.
- Singh, P. K., Bhunya, P. K., Mishra, S. K. and Chaube, U. C. (2007) An extended Hybrid model for synthetic unit hydrograph derivation. *Journal of Hydrology*, 336, 347-360.
- Wang, H., Wang, C. M., Wang, J. H., Zhou, Z. H. and Chen, Y. M. (2004) Theory of annual runoff evolution under natural-artificial dual mode and case study rivers, Wuding River loosen in the middle Yellow River. *Journal of Science in China Series E-Engineering and Materials Science*, 47, 51-50.
- Zelazinski, J. (1986) Application of the geomorphological instantaneous unit hydrograph theory to development of forecasting models in Poland. *Hydrological Sciences*, 31(2), 263-270.