



### مقدمه

با توجه به کمبود آمار هیدرومتری در بیشتر آبخیزهای کشور، استفاده از مدل‌های هیدرولوژیک ساده و مناسب و توسعه‌ی آنها در آبخیزهای فاقد ایستگاه از موارد ضروری است. به گفته‌ی کومار و همکاران [۱۲]، هیدروگراف واحد ارائه شده توسط شرمن در سال ۱۹۳۲، به یکی از ابزارهای قوی در هیدرولوژی کاربردی تبدیل شده است.

در صورت وجود داده‌های ثبت شده‌ی بارش و رواناب از روش‌های کولینز<sup>۳</sup>، ماتریس معکوس و حداقل مربعات برای تعیین هیدروگراف واحد حوزه استفاده می‌شود. نجفی [۷]، در حوزه‌های فاقد آمار هیدرومتری، می‌تواند هیدروگراف واحد مصنوعی<sup>۴</sup> را با استفاده از روش‌های اشنایدر<sup>۵</sup> ۱۹۳۸، کلارک<sup>۶</sup> ۱۹۴۵، ۱۹۵۷ SCS، گری<sup>۷</sup> ۱۹۶۱ و ناش<sup>۸</sup>، استخراج نمود. در این میان کاربرد مدل مخزن خطی ناش به دلیل سادگی همواره مورد توجه بوده است. اساس هیدروگراف واحد لحظه‌ای ناش بر فرض رفتار آبخیز به عنوان آبخیزی<sup>۹</sup> از مخازن خطی<sup>۱۰</sup> متوالی بنا نهاده شده است.

هدف از این پژوهش بررسی و ارزیابی مدل ناش به عنوان یک روش ایجاد آمار رواناب در مطالعات هیدرولوژیک است. در این راستا با استفاده از روش گشتاور اول و دوم بارش موثر و رواناب مستقیم، پارامترهای  $n$  و  $k$  در مدل مخزن خطی ناش محاسبه می‌شود. سپس با شبیه‌سازی فرایند بارش- رواناب، هیدروگراف جریان آبخیز جعفرآباد روندیابی می‌گردد. در ادامه میزان دقت و کارایی مدل مخزن خطی ناش، در برآورد هیدروگراف جریان، با معیارهای آماری مورد ارزیابی و بحث قرار می‌گیرد.

آگیر و همکاران [۸]، با در نظر گرفتن زیرحوزه‌های آبخیز اکسولا<sup>۱۱</sup> در شمال اسپانیا به عنوان مخازن ذخیره‌ای متوالی، یک روش ژئومورفولوژیکی هیدروگراف واحد را ارائه نمود و نتایج

### شبیه‌سازی هیدروگراف جریان با استفاده از مدل مخزن خطی ناش در آبخیز جعفرآباد استان گلستان

رئوف مصطفی زاده<sup>۱</sup> و عبدالرضا بهره‌مند<sup>۲</sup>  
تاریخ دریافت: ۸۷/۸/۱۳ تاریخ پذیرش: ۸۷/۱۲/۲۵

### چکیده

برآورد واکنش رواناب در حوزه‌های فاقد آمار همواره مورد توجه هیدرولوژیست‌ها و سازمان‌های مدیریت منابع آب در برنامه‌ریزی، توسعه و اجرای بسیاری از پروژه‌ها بوده است. این پژوهش با هدف کاربرد مدل آبخیزی ناش در پیش‌بینی شکل، ابعاد و روند هیدروگراف سیل در آبخیز جنگلی جعفرآباد استان گلستان با مساحتی در حدود ۱۰۹ کیلومترمربع، انجام شده است. پس از تهیه‌ی آمار دبی و بارش ساعتی ایستگاه‌های منطقه، با استفاده از روش گشتاور مقادیر  $n$  و  $k$  مدل ناش در ۳۳ رویداد واقعی رگبار و سیل متناظر تعیین شد. با در نظر گرفتن میانگین پارامترهای واسنجی شده، نتایج مدل ناش برای چهار رویداد دیگر اعتبارسنجی شد. جهت ارزیابی نتایج از معیارهای آماری استفاده گردید. مقایسه‌ی هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و معیار ارزیابی نش- ساتکلیف، به میزان میانگین ۷۰ درصد نشان از تطابق مناسب نتایج مدل با داده‌های ثبت شده است. همچنین درصد خطای نسبی در دبی پیک، درصد خطای نسبی در زمان تا اوج و خطای برآورد حجم جریان به ترتیب برابر ۱۰/۷، ۱۰/۲۵ و ۲۵/۷ درصد بوده است و نیز میانگین مجموع مربعات باقیمانده‌ها ۳/۹۴ می‌باشد. بر اساس نتایج پژوهش، دقت روش گشتاور در برآورد پارامترهای  $n$  و  $k$  از داده‌های بارش و رواناب شایان توجه است. به منظور توسعه و کاربرد مدل ناش در آبخیزهای فاقد آمار مشابه، برآورد منطقه‌ای پارامترهای  $n$  و  $k$  در این مدل هیدرولوژیک توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی بارش- رواناب، مدل مخزن خطی ناش، هیدروگراف واحد لحظه‌ای، روش گشتاور و آبخیز جعفرآباد

- 3- Collins
- 4- Synthetic Unit Hydrograph
- 5- Snyder
- 6- Clark
- 7- Gray
- 8- Nash
- 9- Cascade
- 10- Linear Reservoir
- 11- Aixola

- ۱- نویسنده مسئول و دانشجوی کارشناسی ارشد آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان raooofmostafazadeh@yahoo.com
- ۲- استادیار گروه آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

عین سادگی به منظور برآورد دبی اوج رواناب خروجی، دارای دقت بالایی هستند. مدل ناش دارای کمترین میانگین خطای نسبی در برآورد مولفه های جریان است و در برآورد شکل دقیق هیدروگراف رواناب خروجی روش هیدروگراف واحد لحظه ای ژئومورفولوژیک نسبت به سایر روش ها از کارایی بهتری برخوردار است.

همچنین کارایی روش هیدروگراف لحظه ای ناش در کشورهای لهستان، چین و ونزوتلا نیز مورد تایید قرار گرفته است. مرور منابع نشان می دهد که پژوهش های اندکی در مورد استفاده و ارزیابی درستی مدل های مخزن خطی، به ویژه مدل ناش، در کشور صورت گرفته است.

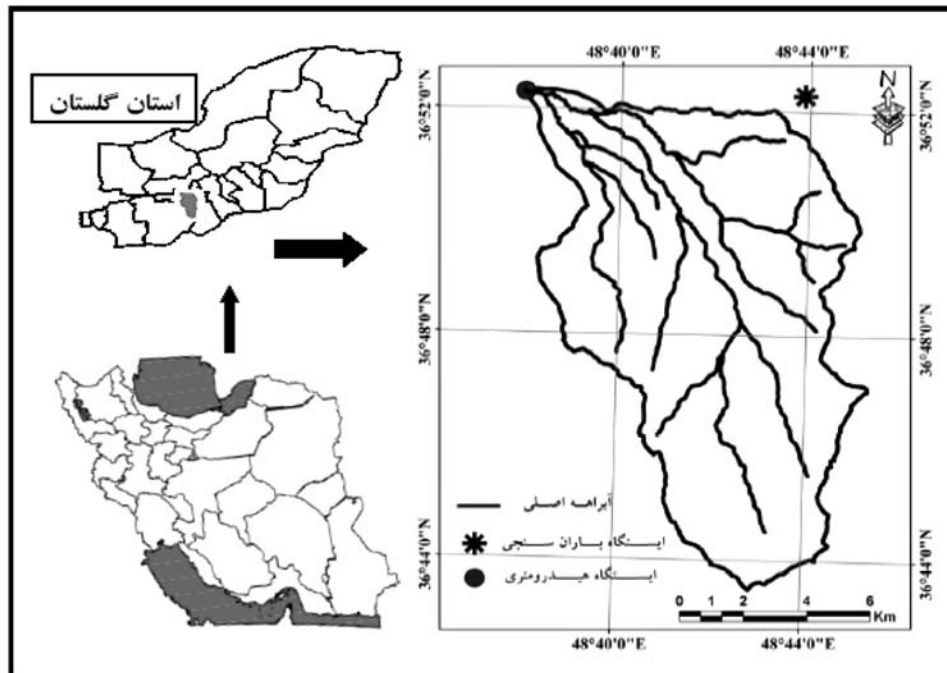
### مواد و روش ها

#### ویژگی های آبخیز جعفرآباد

آبخیز جعفرآباد از زیرحوزه های گرگانرود با مساحتی در حدود ۱۰۹۴۷ هکتار در ۲۵ کیلومتری جنوب شرق گرگان و در محدوده ی جغرافیایی ۴۸° ۳۷' تا ۴۸° ۴۵' طول شرقی و ۳۶° ۴۳' تا ۳۶° ۵۲' عرض شمالی واقع شده است. شیب زیاد حوزه یکی از عامل های تشدید کننده ی سیلاب در حوزه ی مورد مطالعه است. میانگین دمای سالانه ۱۵/۴۵ درجه ی سانتی گراد، میانگین بارش، ۵۶۶ میلی متر و کمینه و بیشینه ی ارتفاع منطقه به ترتیب ۸۰ و ۲۵۳۰ متر است. بخش شایان توجهی از حوزه را جنگل تشکیل داده، خاک منطقه جزء گروه های هیدروژئیک B و C است و زمین شناسی بیشتر مربوط به سازندهای خوش بیلاق، جیروود و لس است. در تجزیه و تحلیل های هیدروژئیک از آمار دبی ایستگاه

اجرای آن را در ۱۸ رگبار با مدل هیدروگراف لحظه ای ناش مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که مدل یاد شده بهتر از مدل ناش قادر به برآورد هیدروگراف خروجی از آبخیز است. لوپز و همکاران [۱۴]، با در نظر گرفتن ۱۶۹ آبخیز کوچک زراعی در اسپانیا به عنوان آبخیز از مخازن خطی، با دو رویکرد زیرحوزه و مساحت های میان خطوط ایزوکرون فرایند بارش رواناب را با هیدروگراف واحد شبیه سازی نمودند و نتیجه گرفتند که مدل نسبت به افزایش تعداد مخازن حساسیت زیادی از خود نشان نمی دهد. نجفی [۱۵]، با هدف تبدیل بارش موثر به رواناب، پس از تهیه ی مدل مفهومی فیزیوگرافیک و اجرای آن در آبخیز کلار دریافت که حداکثر خطای نسبی مدل در برآورد پارامترهای جریان به میزان ۵/۸ درصد است که در صورت استفاده از داده های بارش و تفکیک دقیق میزان بارش موثر، نتایج بهبود خواهد یافت.

سینگ و همکاران [۱۸]، پس از توسعه ی مدل هیبرید با ایجاد یک کانال خطی میان دو مخزن متوالی در مدل ناش، اقدام به مقایسه ی نتایج سه مدل هیبرید، هیبرید توسعه یافته و ناش در پنج حوزه ی آبخیز نمودند و نتیجه گرفتند که مدل هیبرید توسعه یافته در آبخیزهای بزرگ، نتایج بهتری از سایر مدل ها ارائه خواهد داد. حشمت پور و همکاران [۱]، در مقایسه ی کارایی روش های مورد بررسی در شبیه سازی ۸ رگبار به این نتیجه رسیدند که روش ژئومورفولوژیک به ترتیب نسبت به روش های ژئومورفوکلیماتیک، ناش، روسو و SCS به ترتیب، ۱۰۶/۷۹، ۱۷۱/۱۲، ۱۰۶/۵۶ و ۱۱۲/۶۴ درصد کاراتر است. عرفانیان [۳]، در بررسی واکنش هیدروژئیک آبخیز جزین سمنان با استفاده از روش های گوناگون هیدروگراف واحد لحظه ای نتیجه گرفت که دو مدل روسو و ناش در



شکل ۱ - موقعیت آبخیز جعفرآباد در ایران و استان گلستان

هیدرومتری تقی آباد و آمار بارش ایستگاه باران سنجی فاضل آباد استفاده شده است که در جدول (۱) برخی از ویژگی های رویدادهای مورد استفاده در تجزیه و تحلیل ارائه شده است.

جدول ۱- ویژگی های رویدادهای انتخابی برای تجزیه و تحلیل

ردیف	تاریخ رویداد	مدت بارش (موثر) (ساعت)	میزان بارش (میلی متر)	میزان نفوذ (میلی متر در ساعت)
۱	۱۳۶۹/۱۰/۱۵	۶	۲۵/۵	۲/۴۷
۲	۱۳۶۹/۰۸/۱۰	۴	۱۷/۸	۲/۶۸
۳	۱۳۷۰/۰۱/۲۴	۴	۱۳	۱/۲۸
۴	۱۳۷۰/۰۲/۱۳	۱۲	۴۴/۸	۱/۶
۵	۱۳۷۰/۰۳/۰۲	۲	۱۷/۷	۲/۵۸
۶	۱۳۷۲/۰۸/۲۳	۴	۲۷/۸	۲/۶
۷	۱۳۷۳/۰۲/۱۶	۸	۱۹/۲	۱/۲
۸	۱۳۷۴/۰۴/۰۱	۶	۴۶/۷	۲/۷
۹	۱۳۷۷/۰۲/۰۴	۶	۳۰/۲	۲/۲
۱۰	۱۳۷۷/۱۱/۰۱	۶	۱۲/۵	۰/۷۴
۱۱	۱۳۷۷/۱۲/۲۶	۸	۴۵/۳	۱/۵۳
۱۲	۱۳۷۸/۰۷/۲۱	۴	۶۳/۵	۴/۸
۱۳	۱۳۷۸/۰۸/۲۹	۴	۵/۷	۱/۲
۱۴	۱۳۷۹/۱۱/۱۶	۸	۲۲/۷	۱/۴
۱۵	۱۳۸۰/۰۶/۱۰	۲	۱۲/۴	۶
۱۶	۱۳۸۰/۰۳/۰۴	۸	۲۱/۴	۱/۵۲
۱۷	۱۳۸۰/۰۲/۲۸	۴	۵/۴	۰/۵
۱۸	۱۳۸۱/۰۱/۰۳	۴	۱۰/۳	۱
۱۹	۱۳۸۱/۰۳/۱۷	۲	۵	۲/۹
۲۰	۱۳۸۲/۰۳/۰۳	۴	۱۸/۷	۲
۲۱	۱۳۸۲/۰۴/۰۳	۴	۲۰/۱	۱/۹
۲۲	۱۳۸۳/۱۲/۱۵	۸	۱۵/۷	۱/۳
۲۳	۱۳۸۳/۱۲/۰۴	۲	۶/۸	۲/۶
۲۴	۱۳۸۳/۱۰/۰۷	۲	۶/۴	۲/۶
۲۵	۱۳۸۳/۰۹/۰۸	۴	۱۳	۱/۴
۲۶	۱۳۸۳/۰۸/۲۸	۲	۳۴	۸
۲۷	۱۳۸۳/۰۶/۲۸	۴	۷/۲	۱/۲
۲۸	۱۳۸۳/۰۴/۲۰	۴	۸/۷	۱
۲۹	۱۳۸۳/۰۴/۱۰	۴	۱۰	۱/۱
۳۰	۱۳۸۴/۱۱/۲۸	۴	۱۷/۷	۲/۸
۳۱	۱۳۸۴/۰۶/۰۸	۲	۱۵/۸	۲/۶
۳۲	۱۳۸۴/۰۲/۱۶	۶	۴۵/۸	۴/۳
۳۳	۱۳۸۴/۰۲/۳۰	۸	۱۷/۳	۳

### روش پژوهش

#### روش مخزن خطی در تعیین روند سیل در حوزه

بر اساس مفهوم هیدروگراف واحد لحظه ای، ناش در سال ۱۹۵۹ مدلی مفهومی ارائه نمود که به روش مخزن خطی شناخته شده است. سینگ و همکاران [۱۸] و اگیر و همکاران [۸]، فرمول بندی هیدروگراف واحد لحظه ای ناش بر فرض رفتار آبخیز به عنوان آبشاری از مخازن خطی متوالی بنا نهاده شده است (شکل ۲) که بارش موثر به صورت لحظه ای به نخستین مخزن وارد می گردد. در این روش حوزه ی آبخیز از n مخزن خطی تشکیل می شود که به صورت سری به هم ارتباط دارند به گونه ای که بین انبارش (ذخیره) و جریان خروجی هر مخزن رابطه  $S=ko$  برقرار است. فرض بر این است که پس از پر شدن نخستین مخزن، جریان خروجی وارد دومین مخزن و به همین ترتیب تا آخرین مخزن ادامه می یابد.

سیمکویکنز [۱۹]، اگیر و همکاران [۸]، بنابراین روابط پیوستگی (رابطه ی ۱) و ذخیره (رابطه ی ۲) برای هر یک از مخازن اعمال می شود.

$$I(t)-O(t) = k \left[ \frac{dO}{dt} \right] \quad (1)$$

$$S(t) = kO(t) \quad (2)$$

که در آن  $I(t)$ ، ورودی به مخزن، شامل بارش یا رواناب و یا هر دو،  $O(t)$ ، جریان خروجی از مخزن بوده و  $S(t)$ ، میزان ذخیره و  $k$  ضریب ثابت ذخیره (متوسط مدت زمان فروکش) بر حسب زمان است.

میرباقری [۶]، چون برای نخستین مخزن در زمان  $t > 0$  جریان ورودی یعنی  $I=O$  است، رابطه ی (۱) به صورت رابطه ی (۳) تا (۶) نشان داده می شود:

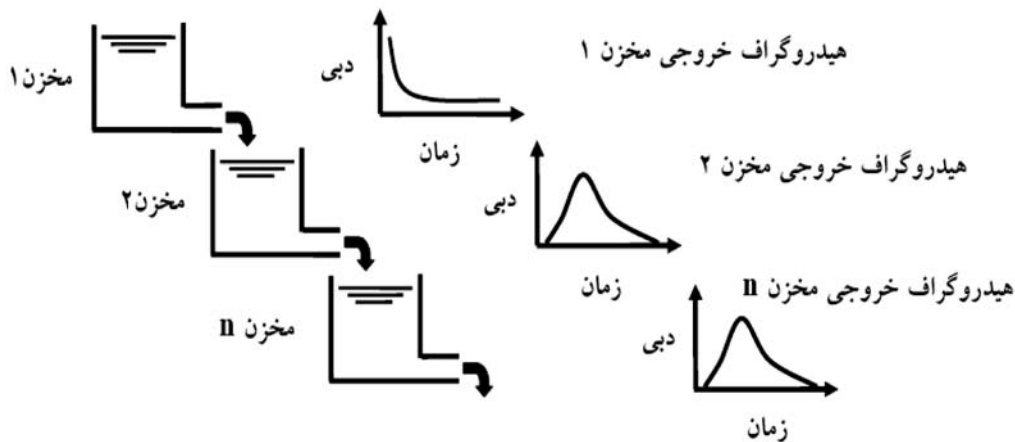
$$-O_1 = k \frac{dO_1}{dt} \quad (3)$$

$$-\frac{1}{k} dt = \frac{dO_1}{O_1} \quad (4)$$

$$\ln O_1 = -\frac{1}{k} t \quad (5)$$

$$O_1 = \frac{1}{k} e^{-\frac{t}{k}} \quad (6)$$

رابطه ی (۶) جریان خروجی از نخستین مخزن را بیان می کند. در ادامه جریان خروجی نخستین مخزن به صورت جریان ورودی به مخزن بعدی در نظر گرفته می شود، رابطه های (۷) تا (۹) برای n مخزن به صورت سری به ترتیب زیر نوشته می شود:



شکل ۲- آبشار مخازن خطی متوالی در مدل ناش آگیر و همکاران [۸]

کارآموز و عراقی نژاد [۴]، که در آن  $M_{II}$  و  $M_{I2}$ ، به ترتیب، گشتاور اول و دوم بارش موثر نسبت به مبداء زمان تقسیم بر مجموع بارش مازاد و  $M_{Q1}$  و  $M_{Q2}$ ، گشتاور اول و دوم رواناب مستقیم نسبت به مبداء زمان تقسیم بر مجموع رواناب مستقیم است. آگیر و همکاران [۸] و مهدوی [۵]، در این پژوهش، ۳۷ رویداد سیل و بارش متناظر انتخاب شد. مقادیر دبی پایه به روش مستقیم تفکیک و سپس حجم رواناب، ارتفاع رواناب سطحی و میانگین شدت نفوذ (شاخص W)، به منظور محاسبه میزبان و مدت بارش موثر، برای هر رویداد محاسبه گردید. سارنگی و همکاران [۱۷]، جریان رواناب مستقیم هر آبخیز بیش از هر عامل دیگری به ویژگی های رگبار بستگی دارد.

رویدادهای بارش و رواناب موجود به صورت تصادفی به دو دسته تقسیم شدند. به منظور درستی و دقت بیش تر در برآورد مقادیر ورودی مدل از ۳۳ رویداد مشاهداتی دسته ی اول برای محاسبه ی مقادیر پارامترهای  $n$  و  $k$  به روش گشتاورها استفاده شد. سپس مدل مخزن خطی ناش تهیه گردید. بر اساس نظر هاووز و آبراهامز [۱۱]، در ارزیابی کارایی مدل باید توجه نمود که پارامترهای ورودی با دقت بالایی برآورد شده باشند در غیر این صورت نتایج ارزیابی قابل اعتماد نخواهد بود، بنابراین تعداد رویدادهای بیش تری برای برآورد پارامترها در مرحله ی واسنجی در نظر گرفته شدند و اعتبار سنجی مدل برای چهار رویداد دسته ی دوم انجام گرفت. گفتنی است که از رویدادهای دسته ی دوم در مرحله ی برآورد پارامترها استفاده نشده است. سینگ و همکاران [۱۷]، میانگین مقادیر پارامترهای برآورد شده  $n$  و  $k$  در مرحله ی قبلی برای اعتبارسنجی و آزمون مدل ناش مورد استفاده قرار گرفت در مرحله ی بعد هیدروگراف واحد لحظه ای آبخیز جعفرآباد تهیه شد. سپس با در نظر گرفتن یکنواخت نبودن توزیع زمانی بارش در هیتوگراف و با در نظر گرفتن تاخیر و ضربان های بارش، هیدروگراف رواناب مستقیم شبیه سازی شد. نتایج مدل با هیدروگراف های رواناب مستقیم رگبارهای دسته ی دوم مورد مقایسه قرار گرفت. بر اساس پژوهش های سارنگی و همکاران [۱۷]، لهوم [۱۳]، صادقی و دهقانی [۹]، بهره مند [۱۱]، در ارزیابی کارایی مدل، معیارهای نش-

$$O_1 - O_2 = k \frac{dO_2}{dt} \quad (7)$$

$$O_2 = \frac{1}{k} \left[ \frac{t}{k} \right] e^{-\frac{t}{k}} \quad (8)$$

$$O_3 = \frac{1}{2k} \left[ \frac{t}{k} \right]^2 e^{-\frac{t}{k}} \quad (9)$$

با توجه به رابطه های (۱) و (۲) توصیف رفتار آبخیز بر اساس رابطه ی (۱۰) خواهد بود.

$$(kD+1) O = 1 \quad (10)$$

که در آن،  $D$  برابر با  $\frac{dO}{dt}$  است. سینگ و همکاران [۱۸]، با در نظر گرفتن رابطه ی (۱۰) خروجی به دست آمده از درون  $n$  مخزن خطی و ضریب ذخیره ی  $k$ ، به صورت رابطه ی (۱۱) بیان خواهد شد.

$$O_n = \frac{1}{k\Gamma(n)} \left[ \frac{t}{k} \right]^{n-1} e^{-\frac{t}{k}} \quad (11)$$

رابطه ی ۱۱، سیمکویکز [۱۹]، میرباقری [۶]، نجفی [۷]، یک توزیع گاما با پارامترهای  $n$  و  $k$  است که می توان آن را با استفاده از قضیه ی تلفیق لاپلاس اثبات نمود. در این توزیع پارامتر  $\Gamma(n)$  تابع گامای  $n$  است که برابر با  $(n-1)!$  فاکتوریل است.

برای محاسبه ی رابطه ی ۱۱، باید مقادیر  $n$  و  $k$  برآورد شود. روش های گوناگونی برای محاسبه ی مقادیر  $n$  و  $k$  وجود دارد. از میان این روش ها می توان به روش گشتاورها، روش سعی و خطا، روش کرولی<sup>۱</sup> و روش تجربی ناش اشاره کرد. با توجه به پژوهش دونگ [۱۰]، حشمت پور و همکاران [۱]، آگیر و همکاران [۸]، از روش گشتاورهای اول و دوم بارش موثر و رواناب مستقیم، به عنوان مناسب ترین روش محاسبه ی مقادیر  $n$  و  $k$ ، استفاده شده است روش گشتاورها به صورت رابطه های ۱۲ و ۱۳ بیان می شود:

$$M_{Q1} - M_{II} = nk \quad (12)$$

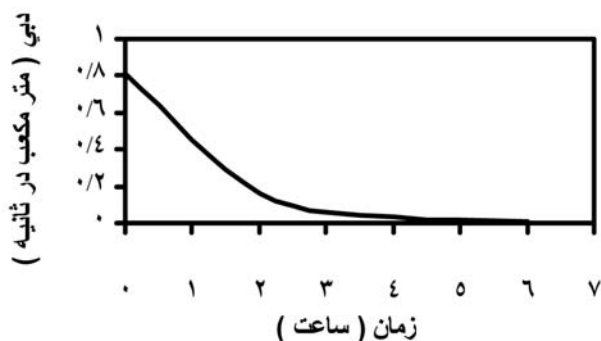
$$M_{Q2} - M_{I2} = n(n+1)k^2 + 2nkM_{II} \quad (13)$$

1- Croley

جدول ۲- مقادیر n و k بدست آمده از روش گشتاورها برای رویدادها در مرحله واسنجی

تاریخ رویداد	مقدار n	مقدار k	تاریخ رویداد	مقدار n	مقدار k
۱۳۶۹/۱۰/۱۵	۱۱	۰/۹۱	۱۳۸۱/۰۱/۰۳	۱۰	۱/۰۷
۱۳۶۹/۰۸/۱۰	۱۰	۱/۰۰	۱۳۸۱/۰۳/۱۷	۱۰	۱/۸۷
۱۳۷۰/۰۱/۲۴	۱۲	۱/۰۳	۱۳۸۲/۰۳/۰۳	۱۹	۱/۲۱
۱۳۷۰/۰۲/۱۳	۲۵	۱/۲۳	۱۳۸۲/۰۴/۰۳	۲۰	۱/۱۴
۱۳۷۰/۰۳/۰۲	۲۰	۰/۹۹	۱۳۸۳/۱۲/۱۵	۲۰	۰/۷۹
۱۳۷۲/۰۸/۲۳	۱۴	۰/۸۰	۱۳۸۳/۱۲/۰۴	۱۵	۱/۰۱
۱۳۷۳/۰۲/۱۶	۱۰	۲/۳۲	۱۳۸۳/۱۰/۰۷	۱۴	۰/۹۶
۱۳۷۴/۰۴/۰۱	۱۸	۰/۸۴	۱۳۸۳/۰۹/۰۸	۱۶	۰/۸۲
۱۳۷۷/۰۲/۰۴	۲۴	۰/۸۵	۱۳۸۳/۰۸/۲۸	۱۹	۰/۹۹
۱۳۷۷/۱۱/۰۱	۲۳	۰/۷۱	۱۳۸۳/۰۶/۲۸	۲۰	۰/۷۷
۱۳۷۷/۱۲/۲۶	۱۷	۰/۸۴	۱۳۸۳/۰۴/۲۰	۴	۳/۱۸
۱۳۷۸/۰۷/۲۱	۱۲	۱/۰۸	۱۳۸۳/۰۴/۱۰	۱۲	۰/۸۹
۱۳۷۸/۰۸/۲۹	۱۰	۰/۲۹	۱۳۸۴/۱۱/۲۸	۱۷	۰/۷۳
۱۳۷۹/۱۱/۱۶	۲۲	۰/۸۳	۱۳۸۴/۰۶/۰۸	۱۶	۰/۸۸
۱۳۸۰/۰۶/۱۰	۱۳	۰/۸۸	۱۳۸۴/۰۲/۱۶	۱۷	۰/۵۵
۱۳۸۰/۰۳/۰۴	۲۴	۰/۸۸	۱۳۸۴/۰۲/۳۰	۱۱	۱/۹۵
۱۳۸۰/۰۲/۲۸	۱۵	۰/۹۵	-	-	-

جریان با معیارهای آماری، در جدول (۳) آمده است. مقایسه‌ی ظاهری هیدروگراف‌ها و میانگین معیارهای ارزیابی در رویدادهای مورد نظر نشان می‌دهد که مدل مخزن خطی ناش مولفه‌های هیدروگراف جریان را به صورت مناسب و با دقت قابل قبول شبیه‌سازی می‌نماید.



شکل ۳- هیدروگراف خروجی از نخستین مخزن خطی در آبخیز جعفرآباد

ساتکلیف<sup>۱</sup> (رابطه‌ی ۱۴)، میزان خطای نسبی در دبی پیک (رابطه‌ی ۱۵)، میزان خطای نسبی در زمان تا اوج (رابطه‌ی ۱۶)، خطای حجم جریان (رابطه‌ی ۱۷) و مجموع مربعات باقیمانده‌ها (رابطه‌ی ۱۸)، مورد استفاده قرار گرفت.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Si} - Q_{Oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{Oi} - \bar{Q}_O)^2} \quad (14)$$

$$RE\%_{QP} = 100 \left| \frac{Q_S(peak) - Q_O(peak)}{Q_O(peak)} \right| \quad (15)$$

$$RE\%_{Tp} = 100 |Tp_S - Tp_O| / Tp_O \quad (16)$$

$$RE\%_{Vf} = \sum_{i=1}^n Q_{Si} / \sum_{i=1}^n Q_{Oi} - 1 \quad (17)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{Oi} - Q_{Si})^2 / n} \quad (18)$$

که در آنها  $Q_{Si}$ ،  $Tp_S$  دبی و زمان تا اوج شبیه‌سازی شده و  $Q_{Oi}$  و  $Tp_O$ ، دبی و زمان تا اوج مشاهداتی هستند،  $\bar{Q}_O$  میانگین دبی‌های مشاهداتی و n تعداد مشاهدات است. بهره‌مند [۹]، صادقی و دهقانی [۲]، در معیار نش- ساتکلیف، مقدار یک نشان‌دهنده‌ی تطابق کامل هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهداتی است و هر چه میزان خطای نسبی در دبی پیک و زمان تا اوج و خطای برآورد حجم جریان و مجموع مربعات باقیمانده‌ها، کم‌تر باشد، کارایی مدل بالاتر خواهد بود.

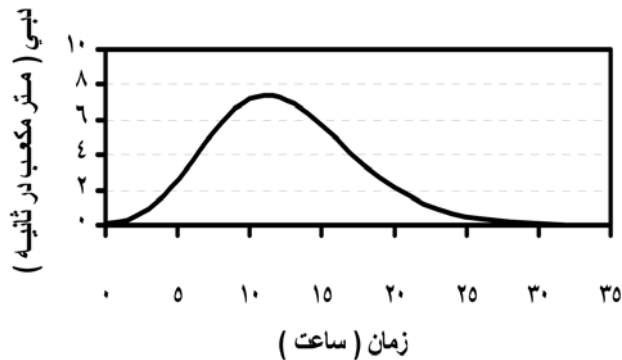
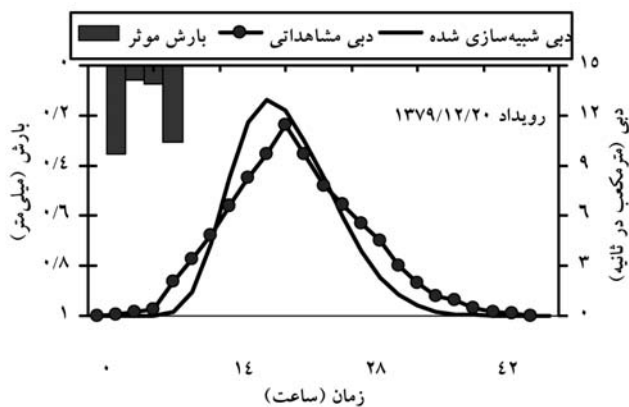
## نتایج

همان‌گونه که در روش پژوهش اشاره شد، پس از محاسبه‌ی مقادیر پارمترهای n و k، به روش گشتاور، مدل هیدروگراف لحظه‌ای ناش، برای رویدادهای انتخابی اجرا و سپس هیدروگراف رواناب مستقیم هر رگبار، شبیه‌سازی شد. مقادیر پارمترهای n و k، برای ۳۳ رویداد در مرحله‌ی واسنجی در جدول (۲) ارائه شده است. میانگین مقادیر n و k، به ترتیب برابر ۱۵ و ۱/۰۶ ساعت محاسبه شد و این مقادیر میانگین برای اجرا و اعتبارسنجی مدل در چهار رویداد متفاوت دیگر در نظر گرفته شد.

شکل (۳) هیدروگراف خروجی از نخستین مخزن خطی در مدل ناش را نمایش می‌دهد و نیز در شکل (۴)، هیدروگراف واحد لحظه‌ای ناش آبخیز جعفرآباد ارائه شده است.

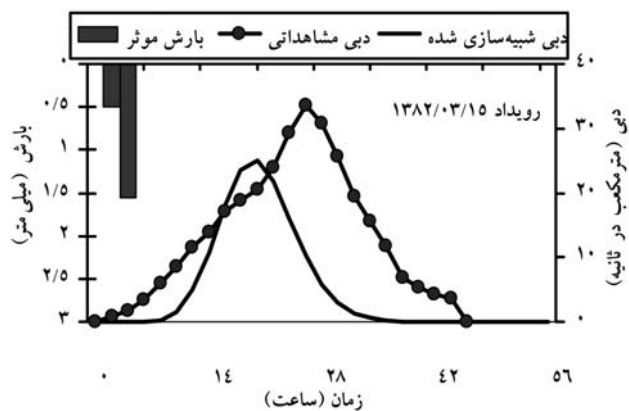
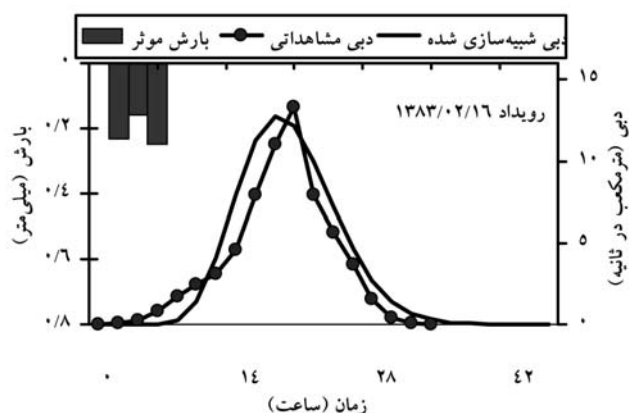
هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل مخزن خطی ناش در مرحله‌ی اعتبارسنجی در شکل‌های ۵ تا ۸ ارائه شده است. نتایج ارزیابی کارایی مدل ناش در برآورد ویژگی‌های هیدروگراف

1- Nash-Sutcliffe



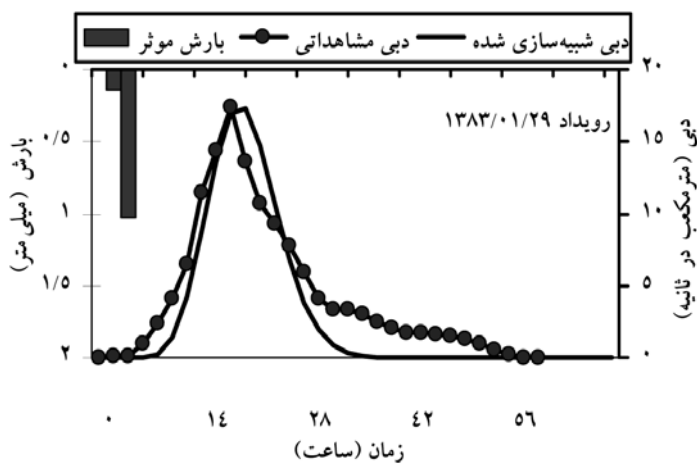
شکل ۴- هیدروگراف واحد لحظه‌ای آبخیز جعفرآباد

شکل ۵- هیدروگراف جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده رویداد مورخ ۱۳۷۹/۱۲/۲۰



شکل ۶- هیدروگراف جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده رویداد مورخ ۱۳۸۲/۰۳/۱۵

شکل ۷- هیدروگراف جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده رویداد مورخ ۱۳۸۳/۰۲/۱۶



شکل ۸- هیدروگراف جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده رویداد مورخ ۱۳۸۳/۰۱/۲۹

## بحث و نتیجه‌گیری

روش مخزن خطی ناش به عنوان یک روش ایجاد آمار رواناب سطحی، از بارش‌های گوناگون در آبخیزهای بدون ایستگاه هیدرومتری، همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. در روش به کار رفته در این پژوهش، فقط با داشتن آمار بارش که در فاصله‌های زمانی مناسب اندازه‌گیری و ثبت شده است می‌توان هیدروگراف جریان سطحی ناشی از رگبار را محاسبه نمود. بر اساس پژوهش‌های صادقی و دهقانی [۲] و دونگ [۱۰]، دقت نتایج مدل‌سازی هیدرولوژیک و جلوگیری از بروز خطا، به میزان زیادی به دقت برآورد پارامترهای ورودی بستگی دارد. با توجه به این که با افزایش مقدار  $n$  یا تعداد مخازن میزان، ضریب ذخیره‌ی ( $k$ )، کاهش می‌یابد می‌توان از مجموعه‌هایی از پارامترهای  $n$  و  $k$  استفاده نمود. در این پژوهش استفاده از روش گشتاورها و داده‌های بارش رواناب واقعی باعث بهبود محاسبه‌ی پارامترهای مدل ناش و نتایج شبیه‌سازی جریان شده است. همان‌گونه که در شکل‌های ۵ تا ۸ مشاهده می‌شود، شیب شاخه‌ی صعودی و نزولی هیدروگراف‌های محاسباتی با شبیه‌سازی شده مطابقت دارد، که نشان از محاسبه‌ی مناسب مقادیر  $n$  و  $k$  است، ولی وجود خطا در حجم هیدروگراف‌ها را می‌توان با نبود دقت در محاسبه‌ی میزان بارش مازاد نسبت داد زیرا در این پژوهش از روش میانگین نفوذ (شاخص  $W$ ) استفاده شده است. گفتنی است که در صورت امکان و وجود داده‌های دقیق کاربری اراضی، جزئیات بافت خاک و میزان نفوذ خاک می‌توان از روش‌های دیگری مانند روش شماره‌ی منحنی و یا منحنی‌های تغییرات نفوذ برای محاسبه‌ی میزان دقیق بارش مازاد استفاده نمود که با نتایج نجفی [۱۵]، مبنی بر تاثیر دقت داده‌های بارش در نتایج شبیه‌سازی همخوانی دارد و نیز فاصله‌ی ایستگاه باران سنجی از مرکز ثقل حوزه نیز می‌تواند یکی از دلایل ایجاد خطا در نتایج شبیه‌سازی مدل باشد.

در این پژوهش دقت روش گشتاورها در تعیین ورودی‌های مدل ناش به میزان ۱۵ مخزن، هر کدام با ضریب ذخیره ۱/۰۶ ساعت، نیز مورد تایید قرار می‌گیرد که با نتایج لوپز و همکاران [۱۴]، در خصوص عدم نیاز به تعداد بالای  $n$  (تعداد مخازن) مطابقت دارد.

بر اساس نتایج شبیه‌سازی و مقایسه‌ی ظاهری در اشکال ۵ تا ۸، می‌توان نتیجه گرفت مدل مخزن خطی ناش، دقتی بالا در برآورد ویژگی‌های هیدروگراف جریان در آبخیز جعفرآباد دارد و با این حال می‌توان با صرف کم‌ترین زمان و هزینه برآوردی مناسب از واکنش آبخیز در مقابل بارش ورودی بدست آورد.

میانگین معیار نش - ساتکلیف به میزان ۷۰ درصد (جدول ۳)، نشان‌دهنده‌ی درستی نتایج مدل در مدل‌سازی جریان سطحی در این پژوهش است که با نتایج لهوم [۱۳] و بهره‌مند [۹]، در میزان و استفاده از شاخص ارزیابی نتایج مدل، همسو است. درصد خطای پایین مدل در برآورد دبی اوج و زمان تا اوج، از موردهای شایان توجه در این پژوهش است که با نتایج حشمت پور و همکاران [۱]، در این خصوص مطابقت دارد. در مقابل، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که دقت مدل ناش در برآورد حجم جریان چندان مناسب نیست. نتایج این پژوهش در مقایسه با نتایج آگیر و همکاران [۸]، ضعیف‌تر است زیرا آنها مدل ناش را با یک روش ژئومورفولوژیکی تلفیق کردند و نتایج بهتری از مدل ناش دریافت نمودند. همچنین سینگ و همکاران [۱۸]، با در نظر گرفتن کانال‌هایی در فواصل مخازن متوالی و توسعه‌ی مدل، با دقتی بالاتر هیدروگراف جریان را شبیه‌سازی کردند. عرفانیان [۳]، بیان نمود که از مدل آبشاری ناش، در عین سادگی می‌توان به منظور برآورد دبی اوج رواناب خروجی و شکل هیدروگراف رواناب خروجی استفاده نمود که نتایج این پژوهش، این موضوع را تایید می‌نماید. توصیه می‌گردد درستی نتایج مدل ناش در سایر آبخیزهای کشور، مورد بررسی قرار گیرد و با برآورد منطقه‌ای ضرایب آن جهت شبیه‌سازی هیدروگراف رواناب در آبخیزهای فاقد آمار مورد استفاده قرار گیرد.

## تقدیر و تشکر

از کارشناسان محترم شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان آقای مهندس حسن فرازجو و خانم مهندس فاطمه مرادی به جهت همکاری صمیمانه در تهیه‌ی آمار هیدرومتری و هواشناسی منطقه‌ی مورد مطالعه، تشکر و قدردانی می‌گردد.

جدول ۳- مقادیر معیارهای کارایی مدل ناش در مرحله اعتبارسنجی

رویداد	معیار نش - ساتکلیف	خطای نسبی زمان تا اوج (%)	خطای نسبی دبی پیک (%)	مجموع مربعات باقیمانده‌ها	خطای برآورد حجم جریان (%)
۱۳۷۹/۱۲/۲۰	۰/۸۲	۱۰	۱۲/۷	۱/۴۱	۵/۹
۱۳۸۲/۰۳/۱۵	۰/۳۲	۱۱	۲۵/۳۷	۱۰/۸۹	۵۴/۱۸
۱۳۸۳/۰۲/۱۶	۰/۸۷	۹	۴/۰۱	۱/۵۳	۱۹/۴۹
۱۳۸۳/۰۱/۲۹	۰/۸۲	۱۱	۰/۷۵	۱/۹۳	۲۳/۴۹
میانگین	۰/۷۰	۱۰/۲۵	۱۰/۷۰	۳/۹۴	۲۵/۷۶

- Modeling runoff and runoff in a desert shrubland ecosystem, Jornada Basin, New Mexico. *Journal of Geomorphology*. 53: 45-73.
- 12- Kumar, R., Chatterjee, C., Lohani, A.K., Kumar, S., and Sing, R.D. 2002. Sensitivity Analysis of the GIUH based Clark model for a catchment. *Journal of Water Resources Management*. 16: 263-278.
- 13- Lhomme, J., Bouvier, C. and Perrin, J.L. 2004. Applying a GIS-based geomorphological routing model in urban catchments. *Journal of Hydrology*. 299: 203-216.
- 14- 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. *Journal of Agricultural Water Management*. 77: 128-143.
- 15- Najafi, M.R. 2003. Watershed modeling of rainfall excess transformation into runoff. *Journal of Hydrology*. 270: 273-281.
- 16- Sadeghi, S.H.R., and Dehghani, M. 2005. Efficiency of Clark instantaneous unit hydrograph in flood unit hydrograph regeneration. *Journal of Iran Water Resources Management*. 1(2): 97-99.
- 17- Sarangi, A., Madramootoo, C.A., Enright, P. and Prasher, S.O. 2007. Evaluation of three unit hydrograph models to predict the surface runoff from a Canadian watershed. *Journal of Water Resources Management*. 21:1127-1143.
- 18- 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.
- 19- Szymkiewicz, R. 2002. An alternative IUH form the hydrological lumped models. *Journal of Hydrology*. 259: 246-253.
- ۱- حشمت پور، ع.، محسنی ساروی، م.، سعدالدین، ا. و عرفانیان، م. ۱۳۸۱. بررسی کارایی هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک و ژئومورفوکلیماتیک در برآورد دبی سیلاب، مجله منابع طبیعی ایران، جلد ۵۵ شماره ۱ صفحات ۳ تا ۲۵
- ۲- صادقی، س.ح.ر. و دهقانی، م. ۱۳۸۵. دقت روش‌های تخمین ضریب ذخیره آبنمود واحد لحظه‌ای در بازسازی آبنمود واحد سیل. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، جلد ۱۳ شماره ۳. صفحات ۱۵۲ تا ۱۶۰
- ۳- عرفانیان، م. ۱۳۷۷. بررسی آبنمود واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیک و ژئومورفوکلیماتیک در آبخیز جزین سمنان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
- ۴- کارآموز، م. و عراقی نژاد، ش. ۱۳۸۴. هیدرولوژی پیشرفته، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۴۶۵ ص
- ۵- مهدوی، م. ۱۳۷۸. هیدرولوژی کاربردی، انتشارات دانشگاه تهران، جلد دوم ۴۰۱ ص
- ۶- میرباقری، ا. ۱۳۷۷. هیدرولوژی مهندسی، انتشارات دانشگاه شیراز، ۵۶۲ ص
- ۷- نجفی، م.ر. ۱۳۸۱. سیستم‌های هیدرولوژیکی مدل‌سازی بارش- رواناب، (ترجمه). انتشارات دانشگاه تهران، جلد (۱ و ۲) ۱۰۵۶ ص
- 8- Agirre, U., Goni, M., Lopez, J.J., and Gimena, F.N. 2005. Application of a unit hydrograph based on subwatershed division and comparison with Nash's instantaneous unit hydrograph. *Catena*. 64:321-332.
- 9- Bahremand, A. 2006. Simulating the effects of reforestation on floods using spatially distributed hydrologic modeling and GIS. Ph.D Thesis, Vrije Universiteit Brussel, Belgium. 122p.
- 10- Dong, S.H. 2007. Genetic Algorithm Based Parameter Estimation of Nash Model. *Journal of Water Resources Management* Doi 10.1007/s11269-007-9208-6.
- 11- Howesa, D.A., and Abrahams, A.D. 2003.