

## شبیه‌سازی سیلاب با استفاده از مدل‌های آبنمود واحد لحظه‌ای تبدیل لاپلاس و H2U-Nash (مطالعه موردی: حوزه آبخیز جونقان)

زهره عبدالهیان دهکردی<sup>۱</sup>، خدایار عبداللهی<sup>۲</sup>، سید جواد ساداتی نژاد<sup>۱</sup>،  
افشین هنربخش<sup>۱</sup> و محمد نکویی مهر<sup>۳</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۷/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۸/۶)

### چکیده

بدون تحلیل دقیق داده‌های بارش-رواناب مشاهده‌ای، مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز جهت پیش‌بینی وقوع سیلاب و کاهش خطرات ناشی از آن موجب هدر رفت سرمایه و عدم ایجاد توسعه پایدار خواهد شد. کاربردی‌ترین مدل جهت شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب، مدل آبنمود واحد می‌باشد که با توجه به نقص کمی و کیفی آمار ایستگاه‌های هیدرومتری، ضرورت استفاده از روش‌های مصنوعی تهیه آن و به‌ویژه آبنمود واحد لحظه‌ای به دلیل حذف محدودیت‌های بارش مشهود می‌باشد. با توجه به عدم وجود مطالعه در مورد تعیین کارایی مدل‌های آبنمود واحد لحظه‌ای تبدیل لاپلاس و H2U-Nash در کشور ایران، پژوهش حاضر در حوزه آبخیز جونقان از زیر حوزه‌های کارون شمالی انجام شد. مدل تبدیل لاپلاس با استفاده از باران مؤثر و زمان تأخیر و مدل H2U-Nash به کمک گشتاورهای اول و دوم باران مؤثر و رواناب مستقیم اجرا گردید. میانگین مطلق خطای نسبی سیلاب مستخرج از مدل‌های H2U-Nash و تبدیل لاپلاس به ترتیب برابر ۰/۲۵ و ۰/۴۲ به دست آمد که مقایسه ظاهری و ضریب کارایی Nash-Sutcliffe نیز اولویت مدل H2U-Nash نسبت به مدل تبدیل لاپلاس را تأیید می‌کنند. قابل توجه است که هر دو مدل به ترتیب زمان پایه، زمان تا اوج، حجم و دبی اوج آبنمودهای مشاهده‌ای را با دقت بیشتری شبیه‌سازی نمودند.

واژه‌های کلیدی: آبنمود واحد لحظه‌ای، تبدیل لاپلاس، H2U-Nash، جونقان

۱. گروه آبخیزداری دانشگاه شهرکرد

۲. گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه VUB بروکسل

۳. مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: abdollahianz@gmail.com

## مقدمه

جهت دستیابی به مدیریت مطلوب سیلاب، توجه به داده‌های در دسترس که از رخدادهای قبلی موجود است ضروری می‌باشد؛ به بیانی دیگر بدون تحلیل دقیق داده‌های بارش-رواناب مشاهده‌ای، مدیریت جامع حوزه آبخیز جهت پیش‌بینی وقوع سیلاب و کاهش خطرات ناشی از آن موجب هدررفت سرمایه و عدم ایجاد توسعه پایدار خواهد شد. از سویی دیگر فقدان ایستگاه‌های باران‌سنجی و هیدرومتری یا عدم کمیت و کیفیت آمار آنها، لزوم استفاده از روش‌های شبیه‌سازی بارش-رواناب در قالب مدل‌های هیدرولوژیکی را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. طبق نگرش سیستمی، خروجی حوزه آبخیز تابعی از رفتار هیدرولوژیک آن در برابر ورودی است که این اصل، به‌همراه تعدد و تنوع فاکتورهای مؤثر در فرآیند بارش-رواناب عامل رواج انواع مدل‌های مذکور شده است (۸). کاربردی‌ترین مدل جهت شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب، مدل آبنمود واحد می‌باشد. این مفهوم ابتدا توسط شرمن در سال ۱۹۳۲ ارائه گردید که براساس تحقیقات انجمن مهندسين عمران بوستن بر روی سیلاب‌های سال ۱۹۲۷ نیوانگلند صورت گرفته بود (۱). آبنمود واحد به‌عنوان آبنمود شاخص حوزه آبخیز محسوب شده و طبق تعریف از یک واحد بارش مازاد ایجاد می‌شود. شایان ذکر است که منظور شرمن از کاربرد کلمه واحد، واحد زمانی بارش مؤثر بوده درحالی‌که بعداً به غلط به واحد ارتفاع رواناب تعبیر شده است (۶).

با توجه به عدم وجود ایستگاه‌های هیدرومتری یا ناکافی بودن آمار آنها به‌منظور تهیه آبنمود واحد، لزوم استفاده از روش‌های آبنمود واحد مصنوعی مشهود می‌باشد. روش‌های شنايدر، SCS و آبنمود واحد لحظه‌ای از جمله روش‌های تهیه آبنمود واحد مصنوعی هستند. آبنمود واحد لحظه‌ای به‌دلیل مستقل بودن از تداوم بارش مؤثر و در نتیجه عدم محدودیت نسبت به توزیع یکنواخت بارش در مقایسه با سایر آبنمودهای واحد به‌عنوان راه حل مطلوبی مطرح می‌باشد (۷ و ۲۰). البته این موضوع صرفاً یک مسئله تئوری بوده و در حوزه‌های آبخیز

وجود خارجی ندارد؛ اما راه‌حل مفیدی به‌نظر می‌رسد زیرا آبنمود واحد لحظه‌ای واکنش حوزه آبخیز را بدون نیاز به تداوم بارش ارائه می‌کند (۲). بنابراین با تعیین و بسط دقیق‌ترین روش تهیه آبنمود واحد لحظه‌ای برای هر حوزه آبخیز و انجام مطالعات جامع می‌توان رفتار هیدرولوژیک آن را پیش‌بینی کرده، میزان خسارات مالی و جانی ناشی از سیل را کاهش داده و حتی از این پدیده مخرب به نفع افزایش منابع آبی استفاده نمود. اولین بار در سال ۱۹۴۵، کلارک مفهوم آبنمود واحد لحظه‌ای را ارائه نمود. در این مدل سه پارامتر زمان تمرکز، ضریب ذخیره و منحنی زمان-سطح، مؤثر هستند و با روندیابی یک واحد بارش مؤثر لحظه‌ای در مخزن خطی رودخانه قابل محاسبه است (۲۳). در سال ۱۹۵۲ مدل تبدیل لاپلاس توسط پیتتر جهت تعیین آبنمود واحد لحظه‌ای به‌کار گرفته شد (۵)؛ پارامترهای مورد نیاز این مدل شامل باران مؤثر و زمان تأخیر می‌باشند. در سال ۱۹۵۸ مدل نش توسط فردی به‌همین نام ارائه گردید؛ این مدل با فرض وجود تعدادی مخازن سری در حوزه آبخیز و با انجام حالت خاصی از روش روندیابی ماسکینگام قابل اجرا است (۱۷). در سال ۱۹۷۹، رودریگوئز و والدز مدل آبنمود واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژی را بر پایه ارتباط عوامل ژئومورفولوژی، اقلیمی و هیدرولوژی ارائه نمودند که شروع تازه‌ای در تحقیقات هیدروژئومورفولوژی بود (۲۲). در سال ۱۹۹۳، میدمنت با استفاده از روش ژئومورفولوژی و بهره‌گیری از قابلیت‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) مدل آبنمود واحد توزیعی را ارائه نمود (۱۴). در سال ۱۹۹۷، کودنیک و دوهرسن مدل H2U (مخفف فرانسوی Hydrogramme Unitaire Universel) را بر پایه پارامترهای رتبه و میانگین زمان پیمایش حوزه آبخیز پیشنهاد نمودند (۹ و ۱۸). همچنین در همین سال، گاتوت سومارگو و همکاران با ترکیب ریاضیاتی دو مدل نش و H2U مدل H2U-Nash را معرفی نمودند (۱۰). تاکنون مطالعات زیادی جهت بررسی میزان کارایی مدل‌های مختلف آبنمود واحد لحظه‌ای صورت گرفته است. جانسون در سال ۱۹۷۰ طی مطالعه‌ای اعلام نمود که مدل

نقاط ضعف احتمالی آنها از طریق مقایسه آبنمود حاصل از آنها با آبنمود مشاهده‌ای، این پژوهش در حوزه آبخیز جونقان از توابع حوزه آبخیز کارون شمالی انجام شد.

### مواد و روش‌ها

حوزه آبخیز جونقان در شمال شرقی استان چهارمحال و بختیاری با مساحت ۸۷۹ کیلومتر مربع یکی از زیر حوزه‌های آبخیز کارون شمالی می‌باشد. این حوزه آبخیز در طول‌های جغرافیایی ۴۴۰۲۲۱ و ۴۷۹۶۴۲ و عرض‌های جغرافیایی ۳۵۴۸۰۰۰ و ۳۵۹۴۰۳۲ واقع شده است و بر طبق رده‌بندی اقلیمی آمبرژه در اقلیم نیمه مرطوب سرد قرار دارد. متوسط بارندگی حوزه آبخیز مذکور ۶۰۰ میلی‌متر می‌باشد و به ترتیب ایستگاه‌های باران‌سنجی و هیدرومتری فارسان و تنگ درکش ورکش جهت تهیه آمار همزمان بارش-رواناب آن مناسب می‌باشند. موقعیت این حوزه آبخیز در شکل ۱ نشان داده شده است. با استفاده از آمار ایستگاه‌های فارسان و تنگ درکش ورکش ۵۸ رخداد همزمان بارش-رواناب استخراج گردید. وقایع مذکور، تنها هنگامی قابل استفاده در مدل‌های هیدرولوژیکی بارش-رواناب هستند که دارای آبنمود صاف و ایزوله، نقطه اوج منحصر به فرد و توزیع یکنواخت مکانی و زمانی بارش در سطح حوزه آبخیز در طی مدت بارش باشند. با توجه به این ویژگی‌ها ۶ رخداد مناسب جهت شبیه‌سازی مدل‌های آبنمود واحد لحظه‌ای انتخاب گردید. سپس از روش ترسیم خط مستقیم بین نقاط ابتدایی و انتهایی آبنمودها به منظور جداسازی آب پایه و از روش شاخص  $\Phi$  جهت تهیه باران نمای باران مؤثر استفاده گردید.

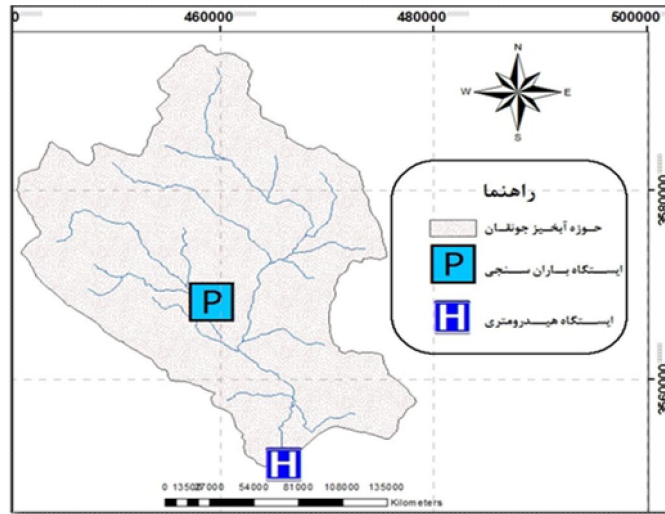
### مدل تبدیل لاپلاس

محاسبات بارش-رواناب براساس تابع لاپلاس و با استفاده از رابطه زیر قابل اجرا هستند:

$$Q(s) = h(s)I(s) \quad [1]$$

نش نسبت به مدل تبدیل لاپلاس جهت شبیه‌سازی آبنمودهای واحد لحظه‌ای انگلستان مناسب‌تر است (۱۲). سینگ و همکاران در سال ۱۹۸۵ به ترتیب مدل‌های نش، ژئومورفولوژیکی و کلارک را به‌عنوان دقیق‌ترین روش‌ها به منظور پیش‌بینی رخدادهای بارش-رواناب ایتالیا معرفی نمودند (۲۲). گاتوت سومارگو و همکاران در سال ۱۹۹۷ با کاربرد مدل H2U-Nash در شبیه‌سازی وقایع چندین حوزه آبخیز اندونزی نتیجه گرفتند که مدل مذکور بدون نیاز به کالیبراسیون و با میزان دقت مناسب آبنمود سیلاب را برآورد می‌کند (۱۰). لی و چنگ در سال ۲۰۰۵ جهت بررسی میزان کارایی مدل نش با استفاده از تبدیل لاپلاس و میزان تأثیر ضریب ذخیره در آن به بررسی ۱۷ رخداد بارش-رواناب در سه حوزه آبخیز کشور چین پرداخته و اعلام نمودند که روش پیشنهادی دارای ضریب کارایی اندکی بیشتر و قدر مطلق خطای نسبی کمتری نسبت به مدل اصلی نش می‌باشد (۱۳). موهان و ویجایالکشمی در سال ۲۰۰۸ به‌منظور تعیین روش بهینه برای تهیه آبنمود واحد لحظه‌ای نش از سه روش گشتاور مبتنی بر تبدیل لاپلاس، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم Hill climbing در حوزه‌های آبخیز آمریکا و ایرلند استفاده کرده و سرانجام روش الگوریتم ژنتیک را به‌عنوان مناسب‌ترین روش معرفی نمودند (۱۵). نجفی حاجی‌ور در سال ۱۳۸۷ طی مطالعه‌ای مشخص نمود که روش کلارک در مقایسه با مدل نش جهت شبیه‌سازی وقایع بارش-رواناب حوزه‌های آبخیز بافت، جونقان و خانمیرزا از توابع استان چهارمحال و بختیاری مطلوب‌تر است (۴).

باتوجه به این‌که حوزه آبخیز کارون شمالی با مساحتی بالغ بر ۲۷۰۷۲ کیلومتر مربع (تا محل سد شهید عباسپور) یکی از حوزه‌های بزرگ آبخیز خلیج فارس محسوب شده و عمدتاً با معضل سیلاب روبرو است و از آنجا که مدل‌های آبنمود واحد لحظه‌ای تبدیل لاپلاس و H2U-Nash تاکنون در کشور ایران ارزیابی نشده‌اند؛ لذا به‌منظور آزمون کارایی این مدل‌ها در ارزیابی‌های هیدرولوژیک، شناخت تجربی و عینی نارسایی‌ها و



شکل ۱. موقعیت حوزه آبخیز جونقان

معرفی می شود:

$$\bar{L} = \bar{t} \cdot v \quad [5]$$

بنابراین آبنمود واحد لحظه‌ای مدل H2U به صورت زیر می باشد:

$$\rho(t) = \left(\frac{r}{\sqrt{t}}\right)^{\frac{r}{\gamma}} \frac{1}{\Gamma\left(\frac{r}{\gamma}\right)} t^{\frac{r}{\gamma}-1} \exp\left(-\frac{rt}{\sqrt{t}}\right) \quad [6]$$

$\Gamma(r)$  تابع گاما می باشد که از رابطه  $\Gamma(r) = (r-1)!$  قابل محاسبه است. دو پارامتر  $r$  و  $\bar{t}$  شامل رتبه و میانگین زمان پیمایش حوزه آبخیز می باشند که با استفاده از پارامترهای مدل نش و از روابط زیر به دست می آیند:

$$K_{Nash} = \frac{\bar{t}}{r} (H \cdot U) \quad [7]$$

$$n_{Nash} = \frac{r}{\gamma} (H \cdot U) \quad [8]$$

مقادیر  $n$  و  $K$  مدل نش شامل تعداد و زمان تأخیر مخازن می باشند که با استفاده از گشتاورهای اول و دوم بارش مؤثر و رواناب مستقیم به دست می آیند. چنانچه گشتاور اول بارش  $(M_{ERH_1})$  و گشتاور اول رواناب مستقیم  $(M_{DRH_1})$  باشد، می توان نشان داد:

$$M_{DRH_1} - M_{ERH_1} = nK \quad [9]$$

همچنین اگر گشتاور دوم بارش  $(M_{ERH_2})$  و گشتاور دوم

$I(s)$ ،  $h(s)$  و  $Q(s)$  به ترتیب فرم لاپلاس بارش، آبنمود واحد و رواناب می باشند. جهت محاسبه  $I(s)$  لازم است مقادیر بارش به صورت یک تابع پیوسته در نظر گرفته شوند. بدین جهت از تابع پله‌ای واحد  $u_1(t)$  برای بیان مؤلفه‌های بارش استفاده می شود:

$$I(t) = \sum_{j=0}^m w_j u_1(t - jD) \quad [2]$$

پارامتر  $D$  بازه زمانی اندازه‌گیری بارش بوده و وزن‌های  $w$  نیز به صورت زیر به دست می آیند:

$$\begin{aligned} w_0 &= I_0 \\ w_j &= I_j - I_{j-1} \quad j = 1, 2, 3, \dots, m \end{aligned} \quad [3]$$

#### مدل H2U-Nash

مدل H2U-Nash ترکیبی از دو مدل H2U و نش می باشد. تابع چگالی طول هیدرولیکی مدل H2U عبارتست از:

$$\rho(L) = \left(\frac{r}{\sqrt{L}}\right)^{\frac{r}{\gamma}} \frac{1}{\Gamma\left(\frac{r}{\gamma}\right)} L^{\frac{r}{\gamma}-1} \exp\left(-\frac{rL}{\sqrt{L}}\right) \quad [4]$$

که در این رابطه  $\bar{L}$  میانگین طول تمامی آبراهه‌ها و  $r$  رتبه حوزه آبخیز به روش استراهلر است. با در نظر گرفتن سرعت متوسط ثابت برای آب در کانال‌ها ( $v$ ) و میانگین زمان پیمایش آب ( $\bar{t}$ )، پارامتر میانگین طول آبراهه به شرح ذیل

جدول ۱. ارزیابی آماری ویژگی‌های آبنمودهای مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده

| ضریب کارایی |              | خطای نسبی |              |           |              |             |              |          |              | رخداد      |
|-------------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-------------|--------------|----------|--------------|------------|
|             |              | حجم       |              | زمان پایه |              | زمان تا اوج |              | دبی اوج  |              |            |
| H2U-Nash    | تبدیل لاپلاس | H2U-Nash  | تبدیل لاپلاس | H2U-Nash  | تبدیل لاپلاس | H2U-Nash    | تبدیل لاپلاس | H2U-Nash | تبدیل لاپلاس |            |
| ۰/۷۷        | ۰/۵۹         | -۰/۲۵     | ۰/۵۴         | ۰/۱۳      | ۰/۲۹         | -۰/۱۴       | ۰            | -۰/۴۵    | ۰/۳۰         | ۱۳۶۸/۰۹/۱۳ |
| ۰/۴۴        | ۰/۷۲         | ۰/۴۷      | ۰/۲۹         | ۰/۰۹      | ۰/۳۰         | -۰/۳۶       | -۰/۴۳        | ۰/۵۵     | ۰/۲۹         | ۱۳۷۳/۰۸/۲۶ |
| ۰/۷۴        | ۰/۶۶         | ۰/۰۱      | ۰/۰۷         | -۰/۰۲     | ۰/۰۲         | ۰/۲۵        | ۰/۵۰         | -۰/۲۲    | -۰/۱۹        | ۱۳۷۵/۰۱/۲۷ |
| -۰/۵۸       | ۰/۰۹         | ۰/۷۷      | -۰/۲۵        | ۰/۱۱      | ۰/۱۱         | -۰/۱۱       | -۰/۵۶        | ۰/۷۵     | -۰/۰۶        | ۱۳۷۸/۱۲/۰۶ |
| ۰/۹۱        | -۱/۱۵        | ۰/۱۷      | ۰/۹۰         | ۰/۰۹      | ۰/۳۰         | ۰/۰۷        | -۰/۱۳        | ۰/۲۰     | ۱/۴۴         | ۱۳۸۱/۱۲/۲۱ |
| ۰/۷۳        | -۱/۳۰        | -۰/۳۵     | ۱/۰۴         | ۰/۰۷      | ۰/۴۸         | -۰/۰۳       | -۰/۶۰        | -۰/۴۰    | ۱/۱۲         | ۱۳۸۵/۰۱/۰۹ |

H2U، مدل‌های مطالعاتی توسط برنامه‌های تهیه شده اجرا شده و سپس با تبدیل آبنمودهای به‌دست آمده به آبنمودهای رواناب مستقیم، نمودارهای شکل ۲ تهیه گردیدند.

جهت مقایسه آبنمودهای برداشت شده از ایستگاه هیدرومتری تنگ در کش ورکش و آبنمودهای رواناب مستقیم مستخرج از مدل‌های تبدیل لاپلاس و H2U-Nash از دو روش مقایسه ظاهری و آماری می‌توان استفاده نمود که مقایسه ظاهری از اهمیت بیشتری برخوردار است (۱۱). مطابق شکل ۲ آبنمودهای حاصل شده از مدل H2U-Nash در مقایسه ظاهری با مدل تبدیل لاپلاس جهت پیش‌بینی آبنمودهای رواناب مستقیم رخدادهای حوزه آبخیز جونقان موفق‌تر هستند؛ همچنین آبنمودهای این مدل به شکل پخ‌تر، نرمال‌تر (زنگوله‌ای) و با شیب ملایم قله (دبی اوج) نسبت به آبنمودهای مدل تبدیل لاپلاس برآورد شدند و هر دو مدل شیب شاخه اوج آبنمودها را بیشتر از شیب شاخه خشکیدگی پیش‌بینی نمودند. مدل H2U-Nash در تمامی رخدادهای بارش-رواناب با مقدار و تداوم کم بارندگی، دبی اوج را بیشتر و زمان تا اوج را کمتر از حالت مشاهده‌ای پیش‌بینی نموده در حالی که مدل تبدیل لاپلاس، تنها زمان تا اوج را در چنین رخدادهایی کمتر برآورد نموده است. مقایسه آماری آبنمودهای برآوردی و مشاهده‌ای را می‌توان برای چهار ویژگی دبی اوج، زمان تا اوج، زمان پایه و حجم آبنمودها انجام داد. جدول ۱ نشان‌دهنده مقادیر آماره‌های ارزیابی آبنمودها می‌باشد.

رواناب مستقیم ( $M_{DRH_T}$ ) باشد. می‌توان نشان داد:

$$M_{DRH_T} - M_{ERH_T} = n(n+1)K^2 + 2nKM_{ERH_T} \quad [10]$$

پس از تهیه پارامترهای هر مدل و با انجام برنامه‌نویسی به زبان Macro، آبنمود واحد لحظه‌ای مدل‌ها تهیه گردید. جهت ایجاد شرایط مقایسه بین داده‌های استخراج شده از مدل‌ها با آبنمودهای مشاهده‌ای، داده‌های خروجی مدل‌ها ابتدا به آبنمود واحد و سپس با استفاده از انتگرال پیچشی به آبنمود رواناب مستقیم تبدیل شدند. ارزیابی آبنمودهای استخراج شده از مدل‌ها به کمک آماره‌های خطای نسبی (RE)، میانگین مطلق خطای نسبی (MARE) و ضریب کارایی نش-سانکلیف ( $R^2$ ) صورت گرفت:

$$RE = \frac{Q_s - Q_o}{Q_o} \quad [11]$$

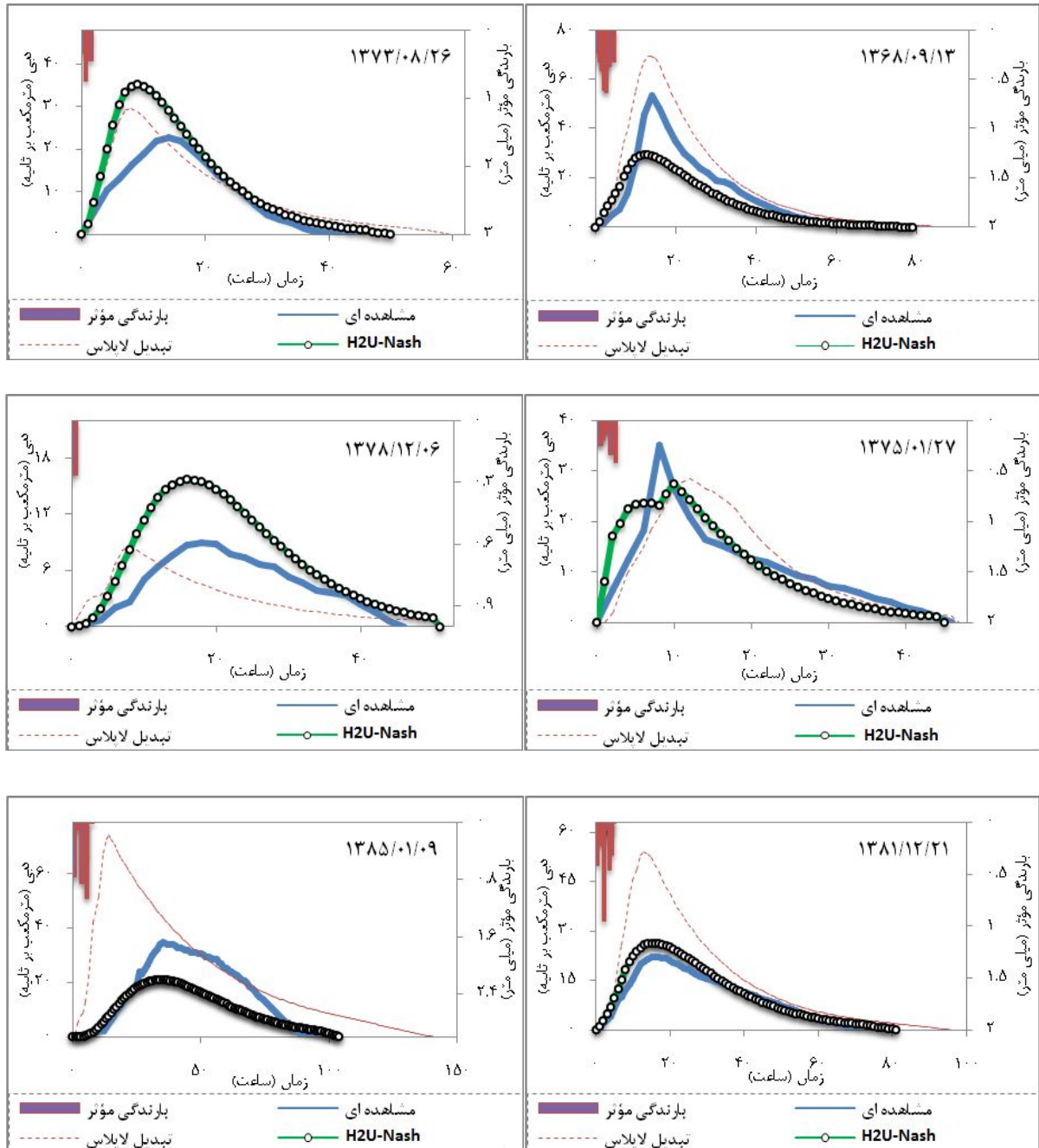
$$MARE = \frac{\sum_{i=1}^n |RE|}{n_n} \quad [12]$$

$$R^2 = \frac{F_o^2 - F^2}{F_o^2} \Leftrightarrow \begin{cases} F_o^2 = \sum_{i=1}^n [Q_o(t) - \overline{Q_o(t)}] \\ F^2 = \sum_{i=1}^n [Q_o(t) - Q_s(t)] \end{cases} \quad [13]$$

که در این روابط  $Q_s$  به‌عنوان داده برآوردی،  $Q_o$  داده مشاهده‌ای و  $n_n$  تعداد وقایع می‌باشد.

## نتایج

پس از استخراج پارامترهای باران مؤثر و زمان تأخیر برای مدل تبدیل لاپلاس، تعداد و زمان تأخیر مخازن برای مدل نش و سرانجام رتبه و میانگین زمان پیمایش حوزه آبخیز برای مدل



شکل ۲. آبنمودهای مشاهداتی و شبیه‌سازی شده

## بحث

رخدادها را در ۱/۳ ابتدایی زمان پایه پیش‌بینی نمودند که علت آن واکنش سریع مدل‌ها به رگبارهای ورودی سیستم می‌باشد. همچنین مدل‌ها در پیش‌بینی شکل شاخه صعودی آبنمودهای مشاهداتی موفق‌تر عمل نمودند که دلیل آن را می‌توان در وابستگی همسوی مدل‌ها و شاخه صعودی آبنمودها به ویژگی‌های بارش دانست.

مقایسه ظاهری آبنمودهای شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های مطالعاتی با آبنمودهای مشاهداتی مؤید برتری مدل H2U-Nash نسبت به مدل تبدیل لایلاسی می‌باشد که این نتیجه با حاصل کار جانسون برای اولویت بندی دو مدل نش و تبدیل لایلاسی مطابقت دارد (۱۲). هر دو مدل مطالعاتی، زمان تا اوج اکثر

جدول ۲. خلاصه نتایج مقایسه آماری مدل‌ها با حالات مشاهده‌ای

| مدل          | میانگین ضریب کارایی | میانگین مطلق خطای نسبی |             |           |
|--------------|---------------------|------------------------|-------------|-----------|
|              |                     | دبی اوج                | زمان تا اوج | زمان پایه |
| تبدیل لاپلاس | -۰/۰۶               | ۰/۵۷                   | ۰/۳۷        | ۰/۲۵      |
| H2U-Nash     | ۰/۵۰                | ۰/۴۳                   | ۰/۱۶        | ۰/۳۳      |

مدل‌ها به صورت کلی در نظر گرفته شود؛ مدل H2U-Nash نسبت به تبدیل لاپلاس از دقت بیشتری برخوردار است. همچنین عملکرد هر دو مدل مطالعاتی در برآورد میزان زمان پایه مطلوب‌تر بوده و پس از آن به ترتیب پارامترهای زمان تا اوج، حجم و دبی اوج آبنمودهای مشاهده‌ای با دقت بیشتری شبیه‌سازی شدند. زمان پایه اکثر رخدادهای توسط مدل‌های تبدیل لاپلاس و H2U-Nash، بیشتر از مقدار واقعی برآورد شده که با نتیجه مطالعه رودریگوئز و همکاران در مورد مدل H2U و موسی در مورد مدل تبدیل لاپلاس همخوانی داشته (۲۱ و ۱۶) در صورتی که با حاصل پژوهش‌های مصطفی زاده و همکاران در مورد مدل کلارک و نورانی و همکاران در مورد مدل نش مطابقت ندارد (۳ و ۱۹).

با توجه به تعدد پژوهش‌های انجام شده در مورد مدل‌های آبنمود واحد لحظه‌ای در حوزه‌های آبخیز مختلف، هنوز هم نمی‌توان مدل قابل اعتمادی را جهت تعیین آبنمود خروجی تمامی حوزه‌های آبخیز معرفی نمود. بنابراین لازم است برای هر حوزه آبخیز مدل‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته و دقیق‌ترین آنها جهت پیش‌بینی داده‌ها تعیین گردد. دو مدل آزمون نشده در حوزه‌های آبخیز ایران، مدل‌های تبدیل لاپلاس و H2U-Nash می‌باشند که طی انجام این مطالعه ثابت شد مدل H2U-Nash با میانگین مطلق خطای نسبی ۰/۲۵ نسبت به مدل تبدیل لاپلاس جهت شبیه‌سازی رخدادهای بارش-رواناب مناسب‌تر می‌باشد.

مدل H2U-Nash آبنمودهای متنوع‌تری را نسبت به مدل تبدیل لاپلاس پیش‌بینی نموده است؛ زیرا مدل H2U-Nash به مقادیر بارش مؤثر و رواناب مستقیم وابسته است در حالی که عوامل مؤثر در مدل تبدیل لاپلاس، بارش مؤثر و زمان تأخیر می‌باشند؛ به بیانی دیگر تغییرات شدید رواناب مستقیم نسبت به زمان تأخیر در طی رخدادهای بارش-رواناب هر حوزه آبخیز عامل مهمی در تفاوت میزان یکنواختی خروجی این دو مدل می‌باشد. خلاصه مقایسه مقادیر برآورد شده توسط مدل‌ها نسبت به آبنمودهای مشاهده‌ای با استفاده از معیارهای ارزیابی، در جدول ۲ نشان داده شده است.

مطابق جدول فوق، کارایی مدل H2U-Nash نسبت به مدل تبدیل لاپلاس جهت شبیه‌سازی رخدادهای همزمان بارش-رواناب حوزه آبخیز جوتقان بیشتر می‌باشد. با استفاده از آماره میانگین مطلق خطای نسبی نیز مدل H2U-Nash تمامی ویژگی‌های دبی اوج، زمان تا اوج، زمان پایه و حجم آبنمودها را با دقت بیشتری نسبت به مدل دیگر برآورد نموده است. علت تغییرات شدید مقادیر این آماره را می‌توان در اشکال فرضیه عملکرد خطی سیستم حوزه آبخیز دانست زیرا اگرچه با استفاده از این فرض، آبنمود واحد مقادیر نزدیک به واقعیت را ارائه می‌کند ولی خطای برآوردهای آن قابل توجه می‌باشد که این نتیجه با تحقیقات عبداللهی و نجفی حاجی‌ور همخوانی دارد (۲ و ۴).

با توجه به جدول ۲ اگر میزان خطای ویژگی‌های دبی اوج، زمان تا اوج، زمان پایه و حجم آبنمودهای استخراج شده از

## منابع مورد استفاده

۱. صفوی، ح. ر. ۱۳۸۸. هیدرولوژی مهندسی. انتشارات ارکان دانش، اصفهان.
۲. عبداللهی، خ. ۱۳۸۱. مدل‌سازی رواناب براساس ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی برای حوضه آبخیز خانمیرزا با استفاده از GIS. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس.
۳. مصطفی‌زاده، ر.، بهره مند، ع. و سعدالدین، ا. ۱۳۸۸. شبیه سازی هیدروگراف رواناب مستقیم با مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای کلارک (مطالعه موردی: آبخیز جعفرآباد استان گلستان). مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۱۶(۳): ۱۰۵-۱۲۲.
۴. نجفی حاجی‌ور، م. ۱۳۸۷. بررسی کارایی هیدروگراف‌های واحد لحظه‌ای نش و کلارک (مطالعه موردی کارون شمالی- استان چهارمحال و بختیاری). پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران.
۵. نجمایی، م. ۱۳۶۹. هیدرولوژی مهندسی. دانشگاه علم و صنعت، تهران.
6. Chow, V. T., D. R. Maidment and L.W. Mays. 1988. Applied Hydrology, McGraw- Hill book, New York.
7. Cleveland, T. G., X. He, W. H. Asquith, X. Fang and D. B. Thompson. 2006. Instantaneous unit hydrograph evaluation for rainfall-runoff modeling of small watersheds in north and south central Texas. Irrigation and Drainage Engineering. 479-485.
8. Dawdy, D. R. 1983. A review of rainfall-runoff modeling. Proceedings of the Tegucigalpa Hydromath Symposium. 152: 97-113.
9. Duchesne, J., C. Cudennec and V. Corbierre 1998. Relevance of the H2U model to predict the discharge of a catchment. Water Science and Technology. 36(5): 169-175.
10. Gatot Sumarjo, I., J. Duchesne and P. Perez. 1997. H2U: a transfer function model using fractal characteristics of the hydrographic network. International Congress on Modelling and Simulation, PP: 470-478.
11. Green, I. R. A. and D. Stephenson. 1986. Criteria for comparison of single event models. Hydrological Sci. 31(3): 395-411.
12. Johnson, P. 1970. Calculation of the instantaneous unit hydrograph using Laplas transform. J. of Hydrol. 9(2): 307-322.
13. Lee, K.T. and Ch. H. Chang. 2005. Incorporating subsurface-flow mechanism into geomorphology-based IUH modeling. J. of Hydrol. 311: 91-105.
14. Maidment, D. R. 1993. Developing a spatially distributed unit hydrograph by using GIS, Hydro GIS 93: Application of geographic information system in hydrology and water resources management. IAHS Publication. 211: 181-192.
15. Mohan, S. and D. P. Vijayalakshmi. 2008. Estimation of Nash IUH parameters using stochastic search algorithms. Hydrological Processes 22: 3507-3522.
16. Moussa, R. 1997. Geomorphological transfer function calculated from digital elevation models for distributed hydrological modeling. Hydrological Processes 11: 429-449.
17. Nash, J. E. 1958. The form of the instantaneous unit hydrograph. General assembly of Toronto. 42: 114-121.
18. Nasri, S., C. Cudennec, J. Albergel and R. Berndtsson. 2003. Use of a geomorphological transfer function to model design floods in small hillside catchments in semiarid Tunisia. J. of Hydrol. 287(1-4): 197-213.
19. Nourani, V., V. P. Singh and H. Delafrouz. 2009. Three geomorphological rainfall-runoff models based on the linear reservoir concept. Catena. 76: 206-214.
20. Ramirez, J. A. 2000. Prediction and modeling of flood hydrology and hydraulics. In: Wohl E (Ed.), Inland flood hazards. Cambridge University, Cambridge.
21. Rodriguez, F., Ch. Cudennec and H. Andrieu. 2005. Application of morphological approaches to determine unit hydrographs of urban catchments. Hydrological Processes. 19: 1021-1035.
22. Singh, V. P., C. Corradini and F. Melone. 1985. Comparison of some methods of deriving the instantaneous unit hydrograph. Nordic Hydrol. 16(1): 1-10.
23. Timothy, D. S., S. Charles and E. K. Kyle. 2000. Equations for estimating Clark unit hydrograph parameters for small rural watersheds in Illinois. Water Resources Investigations Report 00-4184.