

ارزیابی کارایی روش‌های روندیابی هیدرولوژیکی سیل در رودخانه دز

مجید عباسی زاده*

دانشجوی دکتری، دانشکده منابع طبیعی، گروه آبخیزداری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

محمد مهدوی

استاد دانشکده منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران

علی سلاجقه

دانشیار دانشکده منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران

چکیده

روند یابی سیل، کاربرد فراوانی در مسایل مربوط به پیش بینی سیل، طراحی مخازن، سامان دهی رودخانه، محاسبه ارتفاع سیل بندها، دیواره های موازی رودخانه و غیره دارد. با وجود تکنیک‌های روندیابی و داشتن هیدروگراف سیل یک نقطه، می توان ارتفاع سیل مورد نظر را در هر نقطه از مسیر رودخانه تعیین کرد.

برای روندیابی سیلاب در رودخانه از روش‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی استفاده می شود. حل روش‌های هیدرولیکی پیچیده و طولانی می باشد بنابراین استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی که با محاسبات کمتر و ساده تر می‌تواند جواب‌های قابل قبولی ارائه کند اجتناب ناپذیر است.

در این تحقیق به منظور انتخاب مناسب ترین روش روندیابی هیدرولوژیکی روش‌های ماسکینگام، کانوکس و آت-کین اصلاح شده و مناسب ترین ضرایب هر مدل، تعداد ۲۶ سیل در بازه حرمه-بامدژ در بخشی از رودخانه دز انتخاب شد. برای ارزیابی کارایی روش‌ها از شاخص‌های نکویی برازش مجذور میانگین مربعات خطا و ضریب کارایی و ضریب همبستگی استفاده شد. شاخص مجذور میانگین مربعات خطا بیشترین همخوانی را با دید چشمی داشت. نتایج نشان داد که در روش‌های ماسکینگام و کانوکس، روش گرافیکی مناسب ترین روش تعیین ضرایب است. روش‌های کانوکس (گرافیکی)، ماسکینگام (لوپ) و آت-کین به ترتیب، دارای بیشترین دقت بودند. مقایسه خطاها نشان داد که در روش‌های مختلف روندیابی، تفاوت چشمگیری در انتخاب دبی مینا وجود ندارد ولی با این حال دبی متوسط و دبی ۵۰ درصد دبی پیک (نصف دبی پیک) به عنوان دبی مینا، اولویت استفاده دارند.

واژگان کلیدی: رودخانه دز، ضریب کارایی، روش ماسکینگام، روش کانوکس، روش آت-کین.

مقدمه

مطالعات روندیابی سیل به لحاظ پایه بودن برای مطالعات پهنه بندی سیلاب، پیش بینی سیلاب و سیستم‌های هشدار سیل، سامان دهی رودخانه، طراحی سازه‌های رودخانه‌ای و شهرسازی^۱، شبیه سازی سیلاب

حوضه‌های فاقد آمار و کنترل از اهمیت بسیار زیادی برخوردار می‌باشد و یکی از اقداماتی است که مهندسين الزاما با آن روبرو هستند (بهبهانی، ۱۳۸۰، ۳۴۰).

روندیابی سیل به مجموعه عملیاتی گفته می‌شود که به وسیله آن زمان و بزرگی یک موج سیل (مشخصات هیدروگراف) را در نقطه‌ای از مسیر رودخانه با استفاده از اطلاعات فرضی یا حقیقی موجود در یک یا چند نقطه بالادست جریان تعیین می‌نمایند (راگونات^۱، ۱۹۹۷). به طور کلی روش‌های روندیابی سیل را می‌توان به دو گروه روندیابی هیدرولیکی^۲ و روندیابی هیدرولوژیکی^۳ تقسیم کرد (چادهوری^۴، ۲۰۰۲). اگر جریان آب فقط به صورت تابعی از زمان در محلی مشخص روندیابی شود، این نوع روش، روندیابی هیدرولوژیکی و یا روندیابی متمرکز یا توده‌ای نامیده می‌شود (وینمن و لارنسون، ۱۹۷۹) و در آن از اصل پیوستگی جریان و رابطه دبی-ذخیره (با فرض یکنواخت بودن جریان) استفاده می‌شود. اگر روندیابی جریان در طول سیستم به صورت تابعی از زمان و مکان مد نظر باشد، این روش به نام روندیابی هیدرولیکی یا روندیابی توزیعی^۵ شناخته می‌شود (چاو^۶، ۱۹۸۸) و در این روش از معادله پیوستگی جریان و معادله اندازه حرکت استفاده شده و اساس آن بر تئوری جریان‌های غیر دائمی (معادلات سنت-ونانت^۷)، استوار است (شاو^۸، ۱۹۹۴).

روندیابی هیدرولیکی، دقیقتر است ولی مشکل اصلی آن دشواری و پیچیدگی حل معادلات مربوطه می‌باشد. هنگامی که اثر برگشت آب وجود داشته در چنین حالاتی روندیابی هیدرولیکی بهتر از روندیابی هیدرولوژیکی می‌باشد (تسای^۹، ۲۰۰۵). روندیابی هیدرولوژیکی ساده تر است ولی از طرفی جواب‌های به دست آمده از این روش دقت کمتری دارند ولی به هر حال این جواب‌ها برای استفاده در کارهای عملی و طرح‌های آبی می‌توانند با اطمینان کافی به کار گرفته شوند (SCS، ۱۹۸۵).

باری و باجراچاری^{۱۰} (۱۹۹۵) روش روندیابی ماسکینگام-کانژ را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که برای پایداری این مدل باید عدد کورانت کمتر از ۰/۵ باشد تا جواب‌های تخمینی دقت لازم را داشته باشد.

بیرکهد و جیمز^{۱۱} (۲۰۰۲)، در تحقیقی مدل ماسکینگام را برای حالتی که آب وارد دشت سیلابی می‌شود مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که این روش برای حالتی که آب وارد دشت سیلابی می‌شود مناسب نیست.

1 - Raghunath

2 - Hydraulic Methods

3 - Hydrologic Methods

4 - Choudhury et al., 2002

5 - Distributed Flow Routing

6 - Chow

7 - Saint-Venant

8 - Shaw

9 - Tsai

10 - Bajracharya, K & Barry, D.

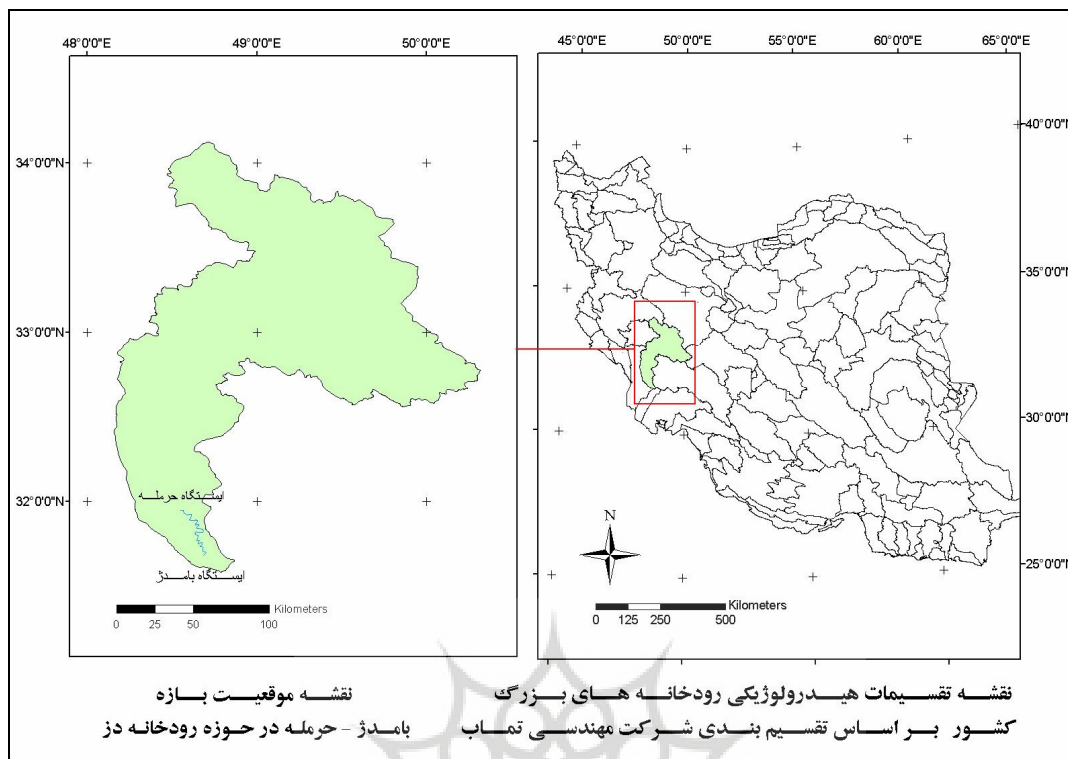
11 - Birkhead, A.L. James, C, S.

موسوی جهرمی (۱۳۶۸، ۱۱۵) مدل کامپیوتری روش ماسکینگام و ماسکینگام- کانژ را نوشت و نتیجه‌گیری کرد که روندیابی سیل با روش ماسکینگام، علیرغم اطلاعات کمی که جهت انجام محاسبات نیاز دارد نسبت به روش کانژ ازدقت بیشتری برخوردار است و دقتی نزدیک به روش‌های هیدرولیکی دارد. عبدالشاه نژاد (۱۳۷۵، ۱۳۲) به مطالعه روش‌های مختلف روندیابی هیدرولیکی و هیدرولوژیکی سیلاب در بخشی از رودخانه کارون پرداخت. وی مدل‌های ماسکینگام، کانژ، آت- کین، کانوکس و مدل هیدرودینامیکی MIKE 11 را مورد بررسی قرار داد و مدل کانوکس را به عنوان بهترین مدل پیشنهاد کرد. دهقانی و کرمی (۱۳۸۳، ۷۲) به منظور انتخاب مناسب‌ترین روش روندیابی هیدرولوژیکی در رودخانه زهره، بازه دهملا- هندیجان را انتخاب کرد. وی برای ارزیابی کارایی روش‌ها از شاخص‌های آماری مجذور میانگین مربعات خطا و ضریب کارایی استفاده کرد. نتایج نشان داد که مناسب‌ترین روش انتخاب ضرایب، روش گرافیکی است.

پیشرفت‌های مختلف در زمینه سخت افزار و نرم افزار باعث شده که نرم افزارهای تخصصی روندیابی نیز توسعه یابند. از این دست می‌توان به نرم افزارهای HEC-RAS، HEC-HMS، MIKE11، MIKE21 و MUPERS اشاره کرد. در این تحقیق هدف، تعیین میزان کارایی روش‌های مختلف روندیابی هیدرولوژیکی در برآورد و پیش بینی هیدروگراف‌های خروجی در رودخانه دز می باشد.

موقعیت جغرافیایی منطقه

جهت انجام مطالعات، ابتدا با استفاده از نقشه رودخانه‌ها و نقشه موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری ایران، بازه‌ای به طول ۵۹/۵ کیلومتر در رودخانه دز انتخاب شد که ایستگاه حرمله در بالادست بازه و ایستگاه بامدژ در انتهای آن واقع می‌شود (شکل ۱). رودخانه دز از نظر میزان آبدهی دومین رودخانه ایران محسوب می‌شود که دبی رودخانه به دنبال بارندگی‌های شدید به بیش از یک هزار متر مکعب در ثانیه نیز خواهد رسید.



شکل ۱. نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه

مواد و روش‌ها

به منظور انجام تحقیق پس از انتخاب بازه مذکور، اقدام به جمع آوری آمار دبی، آمار دبی - آشل و دبی - سطح مقطع در ایستگاه‌های حرمله و بامدژ شد و ۲۶ واقعه سیلابی انتخاب شد و هیدروگراف‌های هر یک از آن‌ها هم در ابتدا (ورودی) و هم در انتهای بازه (خروجی) ترسیم شدند. در این تحقیق به منظور تعیین سرعت مینا که در معادلات قرار داده می‌شود، از سرعت مربوط به دبی‌های پیک هیدروگراف ورودی، سرعت مربوط به دبی ۵۰ درصد پیک، و سرعت متناظر دبی ۷۵ درصد پیک و سرعت متناظر دبی متوسط استفاده شد (ویلسون و رافینی، ۱۹۸۸).

روش کانوکس^۱

این روش بر مبنای این استدلال است که جریان خروجی در هر زمان t به خروجی Q و ورودی I ابتدای فاصله زمانی Δt بستگی دارد. فرض کنید c ثابت باشد و $0 \leq c \leq 1$ ، از این رو می‌توان نوشت:

$$Q_{t+\Delta t} = cI_t + (1-c)Q_t \quad (1)$$

I_t : دبی هیدروگراف ورودی در لحظه t

Q_t : دبی هیدروگراف خروجی در لحظه t

$Q_{t+\Delta t}$: دبی هیدروگراف خروجی در لحظه $t+\Delta t$

c : ضریب کانوکس است و برای محاسبه آن، از روابط مربوط به روش تراول تایم $c = \frac{\Delta t}{k}$ ، روش سینگ

$$c = \frac{\bar{v}}{1.7 + \bar{v}}, \text{ روش سازمان حفاظت خاک آمریکا } c = \frac{\bar{v}}{0.518 + \bar{v}} \text{ و روش گرافیکی } c = \frac{\sum(Q_2 - Q_1)(I_1 - Q_1)}{\sum(I_1 - Q_1)^2}$$

استفاده شد (مهدوی، ۱۳۸۱، ۲۷۴).

روش آت-کین اصلاح شده^۱

این معادله به صورت زیر است که در آن مقدار C_m برابر $\frac{2\Delta t}{2K + \Delta t}$ فرض شده و به آن ضریب آت-کین گفته می‌شود. بنابراین:

$$Q_2 = C_m I_1 + (1 - C_m) Q_1 \quad (7)$$

برای به دست آوردن مقدار K از رابطه $K = \frac{L}{mV}$ استفاده می‌شود که m از رابطه موجود بین سطح مقطع و دبی جریان، ($Q = xA^m$) بدست می‌آید. گام زمانی با توجه به رابطه $K/3 \leq \Delta t \leq K$ انتخاب می‌شود.

روش ماسکینگام

این روش یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای روندیابی سیل در رودخانه‌ها است که در آن از معادله پیوستگی، و معادله ذخیره-دبی به شکل $S = k[xI + (1-x)Q]$ استفاده شده است (گیل، ۱۹۷۹ و سینگ، ۱۹۸۰).

$$Q_{t+\Delta t} = C_1 I_{t+\Delta t} + C_2 I_t + C_3 Q_t \quad (8)$$

که در آن:

$$C_3 = \frac{2K - 2Kx - \Delta t}{2K - 2Kx + \Delta t} \quad \text{و} \quad C_2 = \frac{2Kx + \Delta t}{2K - 2Kx + \Delta t} \quad \text{و} \quad C_1 = \frac{\Delta t - 2Kx}{2K - 2Kx + \Delta t} \quad (9)$$

جمع این ضریب‌ها برابر یک می‌باشد. k و x پارامترهای روندیابی هستند. از نظر فیزیکی، k معادل زمان پیمایش قطعه رودخانه در نظر گرفته می‌شود و x ضریب وزنی است که از دید تئوری می‌تواند بین ۰ تا ۱ باشد. عموماً هر چه مقدار Δt کوچکتر باشد، نتایج دقیق‌تر خواهند بود. دامنه مناسب برای Δt نیز به صورت $k/3 < \Delta t < k$ (ویسمن و همکاران ۱۹۷۷) و یا $2Kx \leq \Delta t \leq K$ چاو (۱۹۶۴) پیشنهاد شده است. روش‌ها و معادلات مختلفی جهت تعیین پارامترهای مورد استفاده در این روش وجود دارد که به طور خلاصه در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. روش‌های تعیین پارامترها و ضرایب ماسکینگام

معادله	نام روش
$k = \frac{L}{V}$ و $x = \frac{1}{n} S^{\frac{1}{2}} P^{\frac{2}{3}}$	روش استفاده از شیب و سطح مقطع کانال
$k = A + B$ و $x = \frac{A}{k}$ $B = \frac{\sum S_0 Q \sum I^2 - \sum S_0 I \sum IQ}{\sum I^2 \sum Q^2 - (\sum IQ)^2}$ $A = \frac{\sum S_0 I \sum Q^2 - \sum S_0 Q \sum IQ}{\sum I^2 \sum Q^2 - (\sum IQ)^2}$	روش حداقل مربعات (ترسیمی)
$k = \frac{L}{V}$ و $x = \frac{0.5V}{1.7+V}$	روش استفاده از سرعت متوسط جریان
در این روش K و x محاسبه نمی‌شوند و مستقیماً ضرایب تعیین می‌شود.	روش بهینه‌سازی مستقیم*
$k = \frac{\Delta X}{1.5V_0}$ و $x = \frac{1}{2} - \frac{1}{3} \left(1 - \frac{F^2}{4} \right) \left(\frac{y_0}{S_0 \Delta X} \right)$	روش هیدرولیکی دوگ

در جدول بالا V_0 سرعت مبنا، y_0 عمق مبنا، F عدد بدون بعد فرود (Froud number)، P محیط خیس شده برای یک دبی مشخص، n ضریب زبری مانینگ، L طول بازه و S شیب بازه مورد نظر است. در روش بهینه‌سازی مستقیم (استفنسون، ۱۹۷۹) مقادیر ضرایب C_1 ، C_2 و C_3 مستقیماً محاسبه می‌شوند بدون این که ابتدا k و x محاسبه شود. در این روش معادله ماسکینگام به شکل زیر تغییر یافته و به صورت معادله ای از نوع رگرسیون چند متغیره می باشد ($Y = ax_1 + bx_2$) که در آن a و b متناظر C_2 و C_3 هستند:

$$Q_{t+\Delta t} - I_{t+\Delta t} = C_2(I_{t+\Delta t} - I_t) + C_3(I_{t+\Delta t} - Q_t) \quad (14)$$

انتخاب بهترین روش روندیابی

از مقایسه هیدروگراف‌های خروجی مشاهده‌ای و تخمینی، و با استفاده از شاخص‌های آماری مجموع مربعات خطا، اختلاف نسبی دبی پیک، اختلاف نسبی حجم، اختلاف نسبی زمان پیک، ضریب تبیین و ضریب کارایی که توسط ^۱ASCE (۱۹۹۳) توصیه شده اند می توان میزان خطا و یا دقت هر کدام از روش‌های روندیابی مورد استفاده در تحقیق را مشخص کرد. در تحقیق حاضر از فرمول‌های زیر برای مقایسه کمی بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر تخمینی هیدروگراف استفاده شده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Q_o - Q_e)^2}{n}} \quad (16)$$

$$CE = 1 - \frac{\sum(Q_o - Q_e)^2}{\sum(Q_o - \bar{Q}_o)^2} \quad (17)$$

$$R^2 = \frac{[\sum(Q_o - \bar{Q}_o)(Q_e - \bar{Q}_e)]^2}{\sum(Q_o - \bar{Q}_o)^2 \sum(Q_e - \bar{Q}_e)^2} \quad (18)$$

در روابط بالا:

$RMSE$: مجذور میانگین مربعات خطا (متر مکعب بر ثانیه)

CE : ضریب کارایی است که در بعضی منابع آن را با E یا EI نیز نشان می‌دهند و به نام ضریب ناش-سو تکلیف نیز خوانده می‌شود. بر این اساس هر چه میزان ضریب کارایی به ۱ نزدیکتر باشد مدل از نظر آماری قابل قبول تر است.

R^2 : ضریب تشخیص، تبیین یا تعیین نامیده می‌شود که بین ۰ تا ۱ متغیر است.
 Q_0, Q_e : به ترتیب دبی هیدروگراف تخمینی و مشاهداتی در لحظه t می‌باشند.

یافته‌ها

یافته‌های مربوط به روش کانوکس و آت-کین

پس از تعیین ضریب کانوکس (جدول ۲)، هیدروگراف‌های خروجی ترسیم شدند و با مقایسه آن‌ها با هیدروگراف‌های خروجی مشاهده‌ای مقادیر خطای هریک از روش‌ها محاسبه شد. بر اساس مقادیر متوسط $RMSE$ ، EI ، R^2 ، بهترین و متمایزترین روش تخمین ضریب کانوکس، روش گرافیکی است (جدول ۳). ضریب کانوکس در روش گرافیکی نسبت به سایر روش‌ها کوچکتر است (جدول ۱). سایر روش‌های تخمین ضریب کانوکس تفاوت قابل ملاحظه‌ای با یکدیگر ندارند و در بیش از ۸۰ درصد از وقایع، دقت مشابه دارند و نمی‌توان با اطمینان زیاد آن‌ها را اولویت داد هرچند دارای ضریب C و Δt متفاوتی هستند (جدول ۲)، اما به هر حال با توجه به مقدار میانگین $RMSE$ (جدول ۳)، به ترتیب روش $C = \frac{dt}{L/V}$ ، روش سینگ و روش SCS در اولویت هستند.

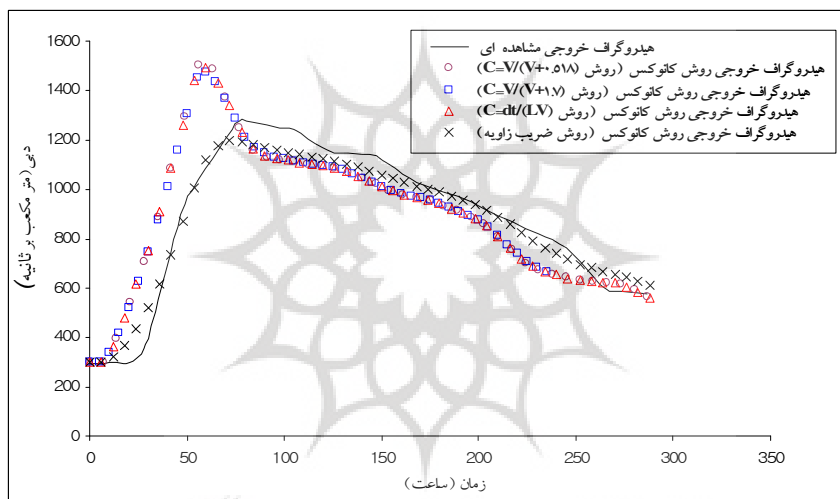
جدول ۲. مراحل تعیین ضرایب روش کانوکس و روش آت-کین

شماره سیل	زمان پایه سیلاب (ساعت)	دبی پیک ورودی	دبی پیک خروجی	عمق نرمال	سرعت جریان	زمان پیمایش (hr)	روش سینگ		روش scs		روش تراول تایم		روش گرافیکی (ضریب ضریب زاویه)			روش آت-کین		
							Δt	C	Δt	C	Δt	C	Δt	C	Δt	C	k	Δt
۱	۴۸۰	۵۲۹	۵۰۸	۳/۰۸	۱/۱۶	۱۴	۶	۰/۶۹	۱۰	۰/۴۲	۶	۰/۲۴	۶	۰/۴۵	۵	۹	۶	۰/۴۱
۲	۱۱۹	۷۱۸	۵۶۸	۲/۷۸	۱/۳۲	۱۳	۵	۰/۷۲	۹	۰/۴۸	۶	۰/۳۲	۶	۰/۵	۵	۸	۶	۰/۴۴
۳	۲۸۸	۱۵۹۴	۱۳۰۰	۴/۹۹	۱/۸۱	۹	۵	۰/۷۸	۷	۰/۶۶	۶	۰/۲۱	۶	۰/۵۴	۴	۵	۶	۰/۵۲
۴	۱۷۰	۷۴۹	۴۷۰	۲/۷۴	۱/۳۴	۱۲	۵	۰/۷۲	۹	۰/۴۹	۶	۰/۱۳	۶	۰/۵	۵	۷	۶	۰/۴۴
۵	۱۲۷	۷۷۰	۷۳۹	۳/۱۳	۱/۳۵	۱۲	۵	۰/۷۲	۹	۰/۴۹	۶	۰/۳۳	۶	۰/۵۱	۵	۷	۶	۰/۴۴
...
۲۶	۳۳۶	۱۳۲۵	۱۲۱۷	۴/۵۹	۱/۶۸	۱۰	۵	۰/۷۶	۸	۰/۶۱	۶	۰/۲۶	۶	۰/۵۱	۴	۶	۶	۰/۵

شکل ۲، هیدروگراف‌های خروجی محاسبه‌ای حاصل از روش‌های مختلف تخمین ضریب کانوکس را نشان می‌دهد. به عنوان نمونه مشاهده می‌شود که در مورد سیل ۳ روش ضریب زاویه (روش گرافیکی) بیشترین هم‌خوانی را با هیدروگراف مشاهده‌ای دارد و سایر روش‌ها جواب‌های نزدیکی دارند.

جدول ۳. شاخص‌های آماری مربوط به روش‌های تخمین ضریب کانوکس

روش گرافیکی	روش $C = \frac{dt}{L/V}$	روش سینگ	روش SCS	شاخص آماری
۵۷/۲۷	۸۹/۵۸	۹۱/۷۷	۹۴/۸۵	RMSE
۰/۸۶	۰/۶۸	۰/۵۹	۰/۷۶	EI
۰/۹۰	۰/۷۲	۰/۷۱	۰/۵۶	R ²



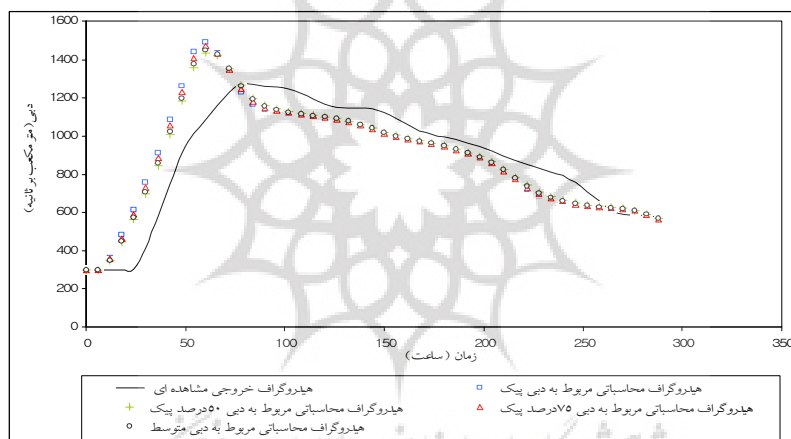
شکل ۲. مقایسه هیدروگراف‌های تخمینی و مشاهده‌ای جهت تعیین مناسب‌ترین روش تخمین ضریب کانوکس (سیل ۳)

بر طبق جدول (۴) مناسبترین دبی مورد استفاده (دبی مبنا) در روش کانوکس و روش آت-کین به ترتیب \bar{Q} ، $0.05Q_p$ ، $0.075Q_p$ می‌باشد. این مطلب به صورت چشمی نیز بررسی شد که به عنوان نمونه در مورد روش کانوکس (SCS) در شکل ۳، آورده شده است.

روش آت-کین در مقایسه با روش‌های کانوکس هرچند که در ۹۲ درصد از موارد دقت کمتری دارد اما مقادیر این اختلاف زیاد نیست.

جدول ۴. مقایسه شاخص های آماری جهت تعیین مناسب ترین دبی مبنا در روش کانوکس و آت-کین

شاخص آماری	\bar{Q}	Q_p	$0.75Q_p$	$0.5Q_p$
روش SCS $C = \frac{\bar{V}}{0.518 + \bar{V}}$	RMSE	۸۴/۰۱	۸۲/۶۵	۸۹/۴۸
	EI	۰/۷۵	۰/۸۱	۰/۷۷
	R^2	۰/۸۱	۰/۸۳	۰/۷۹
روش سینگ $C = \frac{V}{V+1.7}$	RMSE	۸۰/۵۶	۸۰/۶۴	۸۶/۵۱
	EI	۰/۶۹۶	۰/۶۹۲	۰/۶۶
	R^2	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۷۴
روش $C = \frac{dt}{L/V}$	RMSE	۷۸/۲۰	۷۸/۳۵	۸۴/۷۶
	EI	۰/۷۵۴	۰/۷۵	۰/۷۱
	R^2	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۷۴
روش گرافیکی	RMSE	-	-	-
	EI	-	-	-
	R^2	-	-	-
روش آت-کین	RMSE	۸۹/۱۰	۸۹/۲۳	۹۴/۹۹
	EI	۰/۶۲۷	۰/۶۲۱	۰/۵۷
	R^2	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۲



شکل ۳. مقایسه هیدروگراف های تخمینی و مشاهده ای جهت تعیین مناسب ترین دبی مبنا در روش کانوکس (رابطه تجربی SCS)

(سیل ۳)

یافته های مربوط به روش ماسکینگام

برای تعیین پارامترها و ضرایب ماسکینگام از پنج روش استفاده شد که مراحل تعیین ضرایب در جدول ۵ آورده شده است. بر اساس جدول ۶ و مقادیر RMSE، EI، R^2 مناسب ترین روش های تخمین ضرایب ماسکینگام به ترتیب روش ترسیمی (لوپ)، روش سرعت متوسط، روش دوگ، روش بهینه سازی مستقیم و روش شیب- سطح مقطع می باشند. شکل ۴ هیدروگراف های خروجی محاسبه ای حاصل از روش های مختلف تخمین ضرایب ماسکینگام را نشان می دهد.

جدول ۵. مراحل تعیین ضرایب روش ماسکینگام

روش سرعت متوسط جریان ($x = 0.5 \frac{V}{V+1.7}$)						فرمول تجربی $x = \frac{S^{0.5}}{n P^{\frac{2}{3}}}$						سرعت جریان	شماره سیل
C_2	C_1	Δt	X	k		C_2	C_1	Δt	X	k			
۰/۶۳۵	۰/۴۶۷	-۰/۱۰۲	۹	۰/۲۰۳	۱۴	۰/۹۷۱	۰/۲۵۹	-۰/۲۲۹	۶	۰/۰۱۹	۱۴	۱/۱۶	۱
۰/۶۱۷	۰/۵۰۵	-۰/۱۲۳	۹	۰/۲۱۸	۱۳	۰/۹۷۲	۰/۲۸۱	-۰/۲۵۳	۵	۰/۰۱۹	۱۳	۱/۳۲	۲
۰/۵۸۲	۰/۶۰۸	-۰/۱۹	۹	۰/۲۵۸	۹	۰/۹۷۵	۰/۳۴۶	-۰/۳۲۲	۵	۰/۰۱۸	۹	۱/۸۱	۳
۰/۶۱۵	۰/۵۱۱	-۰/۱۲۶	۹	۰/۲۲۰	۱۲	۰/۹۷۲	۰/۲۸۵	-۰/۲۵۷	۵	۰/۰۱۹	۱۲	۱/۳۴	۴
۰/۶۱۳	۰/۵۱۴	-۰/۱۲۸	۹	۰/۲۲۲	۱۲۰	۰/۹۷۲	۰/۲۸۷	-۰/۲۵۹	۵	۰/۰۱۹	۱۲	۱/۳۵	۵
...
۰/۵۸۹	۰/۵۸۴	-۰/۱۷۳	۹	۰/۲۴۹	۱۰	۰/۹۷۴	۰/۳۳۱	-۰/۳۰۵	۵	۰/۰۱۸	۱۰	۱/۶۸	۲۶

ادامه جدول ۵. مراحل تعیین ضرایب روش ماسکینگام

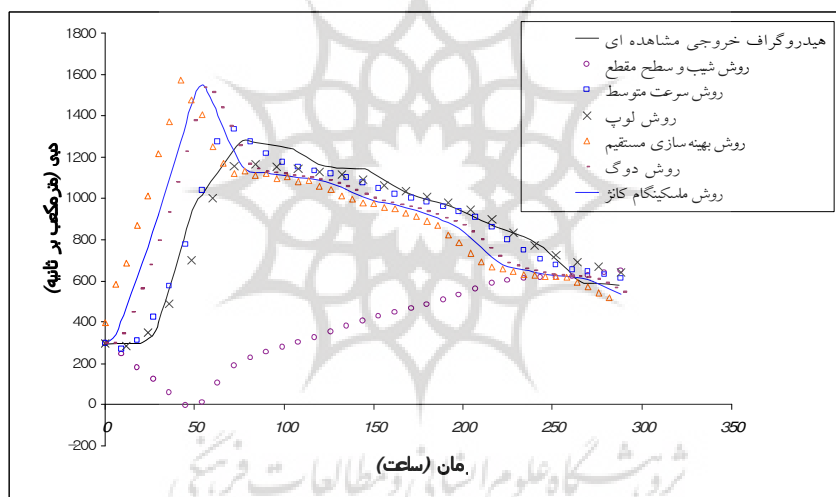
روش بهینه سازی مستقیم				روش دوگ						روش ترسیمی (لوب)						شماره سیل
C_2	C_1	Δt		C_2	C_1	Δt	X	k		C_2	C_1	Δt	X	k		
-۰/۹۷	۱/۰۵	۰/۹۲	۶	-۰/۱۱۵	۰/۸۵۷	۰/۲۵۹	۵	۰/۴۴۳	۱۱	۰/۶۷۲	۰/۳۳۲	-۰/۰۰۳	۱۲	۰/۲	۳۰/۶	۱
-۰/۷۵	۰/۲۴	۱/۵۱	۶	-۰/۱۶۰	۰/۸۶۷	۰/۲۹۳	۵	۰/۴۴۹	۱۱	۰/۵۳۲	۰/۴۶۵	۰/۰۰۲	۸	۰/۳	۱۳/۲	۲
-۰/۹۰	۰/۵۹	۱/۳۱	۶	-۰/۱۱۳	۰/۸	۰/۰۸۷	۵	۰/۴۰۸	۸	۰/۶۵۲	۰/۴۲۲	-۰/۰۷۵	۱۲	۰/۳	۲۸/۶	۳
-۰/۸۹	۰/۴۷	۱/۴۲	۶	-۰/۱۶۷	۰/۸۶۹	۰/۲۹۸	۵	۰/۴۴۹	۱۱	۰/۶۹۲	۰/۲۳۹	۰/۰۶۹	۱۲	۰/۱	۳۳	۴
-۰/۷۸	۰/۲۸	۱/۵۰	۶	-۰/۱۰۹	۰/۸۵۵	۰/۲۵۴	۵	۰/۴۴۲	۱۰	۰/۵۸۶	۰/۵۲۷	-۰/۱۱۴	۸	۰/۴	۱۵/۵	۵
...
-۰/۹۴	۰/۹۸	۰/۹۶	۶	-۰/۱۱۵	۰/۸۵۷	۰/۲۵۹	۵	۰/۴۱۵	۸	۰/۵۳۲	۰/۳۱۱	۰/۱۵۷	۱۶	۰/۱	۲۶/۲	۲۶

جدول ۶. شاخص های آماری مربوط به روش های مختلف تخمین ضرایب روش ماسکینگام

شاخص آماری	روش ترسیمی	روش سرعت متوسط	روش دوگ	روش بهینه سازی	روش شیب-سطح مقطع
RMSE	۵۷/۵۳	۷۶/۱۱	۱۲۶/۲۶	۱۵۶/۴۳	۲۷۵/۶۷
EI	۰/۸۷	۰/۷۶	۰/۲۳	-۰/۰۷	-۱/۴۸
R ²	۰/۹۰	۰/۸۳	۰/۵۹	۰/۳۹	۰/۰۱

جدول ۷. مقایسه شاخص‌های آماری جهت تعیین مناسب‌ترین دبی مبنا در روش ماسکینگام

شاخص آماری		\bar{Q}	$0.05Q_p$	$0.75Q_p$	Q_p
روش شیب-سطح مقطع	RMSE	۲۷۱	۲۶۹	۲۷۹	۲۷۵/۶۷
	EI	-۱/۳۸	-۱/۳۴	-۱/۵۲	-۱/۴۸
	R ²	۰/۰۰۴	۰/۰۰۳	۰/۰۰۶	۰/۰۱
روش بهینه‌سازی مستقیم	RMSE	-	-	-	۱۵۶/۴۳
	EI	-	-	-	-۰/۰۷
	R ²	-	-	-	۰/۳۹
روش دوگ	RMSE	۱۳۴/۸۱	۱۳۵/۱۲	۱۳۰/۴۹	۱۲۶/۲۶
	EI	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۹	۰/۲۳
	R ²	۰/۵۵	۰/۵۳	۰/۵۶	۰/۵۹
روش سرعت متوسط جریان	RMSE	۷۵/۵۴	۷۵/۶۵	۷۵/۷۸	۷۶/۱۱
	EI	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۷۶
	R ²	۰/۸۱	۰/۸۱	۰/۸۳	۰/۸۳
روش ترسیمی لوپ	RMSE	-	-	-	۵۷/۵۳
	EI	-	-	-	۰/۸۷
	R ²	-	-	-	۰/۹۰



شکل ۴. مقایسه هیدروگراف‌های تخمینی و مشاهده‌ای جهت انتخاب مناسب‌ترین روش تخمین ضرایب ماسکینگام و

ماسکینگام کانژ (سیل ۳)

هیدروگراف‌های محاسباتی مربوط به روش بهینه‌سازی مستقیم و روش دوگ در اکثر موارد شبیه به هم بوده با این تفاوت که هیدروگراف‌های دوگ دارای زمان تا اوج نزدیکتری به هیدروگراف مشاهده‌ای هستند لذا دقت بیشتری دارند. بر طبق جدول ۷، روش دوگ، مناسب‌ترین دبی مبنا مورد استفاده به ترتیب Q_p و $0.75 Q_p$ می‌باشند. در روش سرعت متوسط، تفاوتی جهت انتخاب دبی مبنا وجود ندارد. مقدار ضریب تبیین بیش از ۸۱ درصد بوده و ضریب کارایی نیز به طور متوسط بیش از ۰/۷۵ است. بر طبق جدول ۷ در روش شیب-سطح مقطع و بر اساس پارامترهای آماری، تفاوت چندانی بین دبی‌های مبنا مورد استفاده وجود ندارد. مقدار ضریب تبیین در این روش بسیار ناچیز بوده و شامل مقادیر نزدیک به صفر است. ضریب کارایی نیز در تمامی موارد مقدار منفی دارد.

بحث و نتیجه گیری

به نظر استفنسون و گرین (۱۹۸۵) جهت مقایسه هیدروگراف خروجی مشاهداتی و محاسباتی، می توان از روش چشمی و روش تحلیل آماری استفاده کرد. در این تحقیق نیز علاوه بر روش تحلیل آماری از مقایسات چشمی نیز بهره گرفته شد. مقایسه چشمی در صورتی مفید می باشد که تفاوت هیدروگرافها محسوس باشد ولی در مواردی که به کمک دید چشمی نتوان روش مناسب را تشخیص داد بهتر است که از تحلیل آماری برای تعیین دقیق ترین روش استفاده شود. نوع پارامتر آماری مورد استفاده تا حدودی نتایج ارزیابی مدل‌ها را تغییر می دهد از میان شاخص‌های برآورد خطا مقادیر ضریب کارایی (EI) نمی تواند کاملا بیان کننده دقیق ترین روش باشد اما مقادیر RMSE بیشترین همخوانی را با مقایسه چشمی نشان میدهد و بهترین پارامتر برای ارزیابی مدل‌ها است.

بهترین و متمایزترین روش تخمین ضریب کانوکس، روش گرافیکی است و سایر روش‌های تخمین ضریب کانوکس تفاوت ناچیزی هم با یکدیگر و هم با روش آت-کین دارند. این مطلب با نتایج تحقیقات عبدالشاه نژاد (۱۳۷۵، ۱۳۲) و دهقانی و کرمی (۱۳۸۳، ۷۲) مشابه است.

برای تعیین پارامترها و ضرایب ماسکینگام از پنج روش استفاده شد که در تمامی این روش‌ها مقدار ضریب C_2 مثبت است ولی ضرایب C_1 و C_3 مقادیر منفی را نیز شامل شده اند. محاسبه پارامترهای ماسکینگام به تعبیر آن‌ها بستگی دارد. برای مثال اگر روش ماسکینگام به مدل پخشیدگی - همرفت ارتباط داده شود، آن-گاه پارامترها می‌توانند برحسب مشخصات هیدرولیکی و مورفولوژیکی قطعه کانال بیان شوند. از طرف دیگر، اگر مدل از نوع جعبه سیاه در نظر گرفته شود، آن‌گاه پارامترهای آن را می توان با استفاده از روش‌های استاندارد قابل اعمال در سیستم‌های خطی محاسبه کرد (گیل، ۱۹۷۹). استفاده از پارامترهای منفی هر چند که از لحاظ فیزیکی معنی ندارد ولی با این حال هیچ‌گونه مغایرتی به وجود نمی آید و در اغلب موارد حتی برای جلوگیری از اشتباه و افزایش دقت، تنها راه محسوب می شود (سزیلاگی، ۱۹۹۲). نتایج سزیلاگی نشان داد که پارامترهای وزنی منفی، در شکل نهایی الگوی طراحی ماسکینگام هیچ نقشی بازی نمی‌کنند. در این تحقیق نیز مشاهده می‌شود که با وجود پارامترها و ضرایب منفی و در حالی که در برخی از روش‌ها جمع جبری قدر مطلق ضرایب بیش از واحد است ولی جواب نهایی مدل‌ها مناسب و قابل قبول می باشد.

در این تحقیق مشخص شد که در روش ماسکینگام بهترین روش تخمین ضرایب به ترتیب روش ترسیمی (لوپ) و روش سرعت متوسط است که با نتایج تحقیقات محققانی از قبیل گیل (۱۹۷۹)، سینگ و همکارانش^۱ (۱۹۸۰)، هگن^۲ و همکارانش (۱۹۸۴) و آلداما (۱۹۹۰) یکی است.

به طور کلی توصیه می شود که جهت کار روندیابی از دبی ۵۰ درصد دبی اوج و دبی متوسط، به عنوان دبی مبنا استفاده شود.

¹ - Singh and McCann

² - Heggen

منابع

- ۱) بهبهانی، سید محمود رضا (۱۳۸۰): هیدرولوژی آب‌های سطحی، انتشارات دانشگاه تهران. ۴۸۴ صفحه.
- ۲) دهقانی، م و کرمی، ع، (۱۳۸۳): ارزیابی کارایی روش‌های روندیابی سیلاب در رودخانه جزر و مدی زهره. پایانه کارشناسی ارشد آبخیزداری دانشگاه تربیت مدرس، ص ۱۴۰.
- ۳) عبدالشاه نژاد، ع، (۱۳۷۵): مقایسه روش‌های مختلف هیدرولیکی و هیدرولوژیکی روندیابی سیل در بخشی از رودخانه کارون، پایان نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران. ص ۱۶.
- ۴) موسوی جهرمی، ح، (۱۳۶۸): مدل ریاضی روندیابی سیل در رودخانه به روش خطوط مشخصه و مقایسه آن با سایر روش‌ها، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس گروه تاسیسات آبیاری، ۱۳۰ص.
- ۵) مهدوی، محمد (۱۳۸۱): هیدرولوژی کاربردی چاپ سوم، جلد دوم، انتشارات دانشگاه تهران. ۴۰۱ صفحه.
- 6- Aldama, A. (1990): Least-Squares Parameter Estimation for Muskingum Flood Routing, *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(4). Pp, 580-586.
- 7- American Society of Civil Engineering (1993): Criteria for Evaluation of Watershed Models, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 119(3). Pp, 429-442.
- 8- Barry, D and Bajracharya (1995): On The Muskingum–Conge Flood Routing Method. *Environment International*. Volume 21, Issue 5, 1995, Pages 485-490.
- 9- Birkhead, A. L. James, C, S (2002): Muskingum River Routing With Dynamic Bank Storage. *Journal of Hydrology Engineering*, Vol. 264, Issue 1-4, pp. 113-132
- 10- Choudhury, M (2002): Flood Routing in River Network Using Equivalent Muskingum Inflow. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7(6). Pp, 413-419.
- 11- Chow, V.T (1988): *Applied Hydrology*. Mc Graw-Hill, 572p.
- 12- Fread, D.L., (1981): "Flood Routing: A Synopsis of Past, Present, and Future Capability", *Proceedings, International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling*, Mississippi State University, Mississippi, Dlf Publication, PP. 521-541.
- 13- Gill, M.A (1979): Critical Examination of the Muskingum Method. *Nordic Hydrology*, 10(1). Pp, 10-15.
- 14- Green Ira and Stephenson D (1985): Comparison of Urban Drainage Models for Use in South Africa. WRC Report No 115/6/86. Water Research Commission, Pretoria, RSA.
- 15- Heggen, Richard, J (1984): Unvaried Least Squares Muskingum Flood routing, U. S. A., *Water Resources Bulletin (AWRA)*, Vol. 20 No. 1, Pp. 103-107.
- 16- Mutreja, K. N. (1990): *Applied Hydrology*. Tata. McGraw-Hill Pub. New Delhi. pp. 314-321.
- 17- NRCS (1972): Flood Routing. [Internet]. Natural Resources Conservation Service, US Department of Agriculture, Beltsville, USA. Available from: ftp://ftp.wcc.nrcs.usda.gov/downloads/hydrology_ydraulics/neh630/630ch17.Pdf [Accessed on 20 April, 2003].
- 18- NERC (1975): Flood Routing Studies. Report No V-III. Natural Environment Research Council, London, UK.
- 19- Raghunath, H, M (1997): *Hydrology (Principle, Analysis, Design)*. Wily Eastern Limited. P. 482.
- 20- SCS (1985): *Natural Engineering Handbook*, Section ,8, Flood Routing, US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, D.C, P 175.
- 21- SHAW, EM (1994): *Hydrology in Practice*. T.J. Press (Pads tow) LTD, Cornwall, UK.
- 22- Singh, V. P (1988): *Hydrology System*, Prentice Hall, P. 480.
- 23- Singh, V. P, and McCann, R. C (1980): Some Notes on Muskingum Method of Flood Routing, *Journal of Hydrology* 48, Pp. 343–361.

- 24- Stephenson, D (1979): "Direct Optimization of Muskingum Routing Coefficients," *Journal of Hydrology*. Vol. 41, Issues 1-2, Pp. 161-165.
- 25- Szilagyi, J (1992): Stage Forecasting by an Adaptive, Stochastic Model. *Vizugyi Kozleme'nyek* 74 (1), Pp. 91-104.
- 26- Tsai, C. W. (2005): Flood Routing in Mild-Sloped Rivers-Wave Characteristics and Downstream Backwater Effect. *Journal of Hydrology*. Volume 308, Issues 1-4, Pages 151-167.
- 27- US ARMY CORPS OF ENGINEERS (1994): Engineering Design and Flood-Runoff Analysis. [Internet]. Washington DC, USA. Available from: <http://www.usace.army.mil/inet/usace-docs/eng-manuals/em1110-2-1417/c-9.Pdf>. Accessed on 15 April, 2003.
- 28- Viessman, W., Jr., Knapp, J.W., Lewis, G.L. and Harbaugh, T.E., (1977): "Introduction to Hydrology", Dun-Donnelly Publishers, New York, 2nd Edition.
- 29- Weinmann, P.E., and Laurens on, E. M., (1979): Approximate Flood Routing Methods: A Review. *Journal of The Hydraulic Division, ASCE* 105 (12), Pp. 1521-1536.
- 30- WILSON BN and RUFFINI JR (1988): Comparison of Physically-Based Muskingum Methods. *Transactions of The ASAE*. 31 (1), Pp. 91-97.

