نشریه مرتع و آبخیزداري، دانشکده منابع طبیعي، دوره ۶۲، شماره ۱، بهار ۱۳۸۸، از صفحه ۸۱ تا ۹۸

بررسي و مقایسه کاربرد میداني شماهاي مبتني بر روش ماسکینگام-کونژ در رودخانه‌ها

مریم صمیمي[۱]، صلاح کوچک‌زاده[۲*] و عاطفه پرورش‌ریزي[۳]

[۱] کارشناس ارشد مهندسي رودخانه, شرکت مدیریت منابع آب ایران, وزارت نیرو

[۱] استاد دانشکده مهندسي آب و خاک, پردیس کشاورزي و منابع طبیعي، دانشگاه تهران، ایران

[۱] استادیار دانشکده مهندسي آب و خاک, پردیس کشاورزي و منابع طبیعي، دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۸۵/۲/۳، تاریخ تصویب: ۸۷/۱۱/۱۳)

چکیده

روش ماسکینگام-کونژ از روش‌هاي بسیار رایج روندیابي سیلاب است. در این روش نیازي به واسنجي مدل بر پایه سیلاب‌هاي گذشته نیست و مشخصه‌هاي روندیابي تنها بر مبناي ویژگي‌هاي فیزیکي و آبي جداگانه محاسبه مي‌شوند. تعدیل‌هاي بیشماري به منظور افزایش دقت در چند سال اخیر براي این روش پیشنهاد شده است. در این پژوهش روش ماسکینگام-کونژ و تعدیل‌هاي مختلف آن بررسي شده و کارآیي و دقت روش‌ها و شماهاي محاسباتي مبتني بر این روش تعیین شده است. به منظور بررسي و ارائه قابلیت کاربرد روش‌هاي مختلف مشخصه‌هاي ثابت و متغیر ماسکینگام-کونژ در مسائل کاربردي, بیشماري از سیلاب‌هاي رودخانه کارون مورد بهره‌گیري قرار گرفت. به‌کمک روش‌هاي یاد شده هیدروگراف سیلاب‌ها روندیابي شده و نتایج به دست آمده با هیدروگراف‌هاي دیده شده خروجي مقایسه شده‌اند. همچنین نتایج روش‌هاي یادشده با نتایج بدست آمده از اجراي مدل هیدرولیکي HEC-RAS براي همان هیدروگراف‌ها مقایسه شده‌اند. نتایج این بررسي‌ها علاوه بر تایید کارایي روش‌هاي ساده شده روندیابي نشان داد که در شرایطي که داده‌هاي جامع مورد نیاز مدل‌هاي هیدرولیکي در دسترس نباشند کاربرد این روش‌ها مي‌تواند به نتایج بسیار رضایت بخشي منجر شوند. در این پژوهش بر پایه مقایسه نتایج روش‌هاي مختلف با نتایج مدل هیدرولیکي, بهترین روش براي شرایط آزمون شده تعیین و معرفي شد.

واژه‌هاي کلیدي: روندیابي, جریان غیرماندگار, ماسکینگام-کونژ, مدل هیدرودینامیك, شماي محاسباتي

---

* نویسنده مسئول: صلاح کوچک‌زاده   تلفن: ۰۲۶۱۲۲۲۴۱۱۱۹   فاکس: ۰۲۶۱۲۲۲۴۱۱۱۹   E-mail: skzadeh@ut.ac.ir

مقدمه

نتايج بررسي‌هاي روندیابي سيلاب در بسياري از مسائل مهندسي رودخانه و بررسي‌هاي کنترل و کاهش خطرهاي سيلاب کاربرد دارد. امروزه رغم امکان حل معادله‌هاي پيچيده همانندسازي جريان غيرماندگار با بهره‌گيري از مدل‌هاي هيدروليکي و رايانه‌هاي پيشرفته، در شرايط ويژه اي از جمله نبود امکان دسترسي به داده‌هاي ورودي کامل و با دقتي که مورد نياز مدل‌هاي هيدروديناميکي باشد و هزينه بالاي تهيه آنها، ناچار به بهره‌گيري از روش‌هاي ساده‌تري براي روندیابي هستيم. يکي از معضلات کشور در زمينه بررسي‌هاي روندیابي سيلاب، نبود امکان دسترسي به آمار و داده‌هاي کامل در مورد رودخانه‌ها و شمار محدود ايستگاه‌هاي آبسنجي است که بهره‌گيري از روش‌هاي نيازمند آمار کامل و دقيق را با تنگناهاي مواجه مي‌سازد. از طرفي برخي روش‌هاي آبشناختي مانند روش ماسکينگام نيز در بسياري از موارد به‌دليل وجود محدوديت در تهيه آمار مانند نبود امکان دسترسي به هيدروگراف‌هاي ورودي و خروجي مشاهده شده مربوط به سيلاب‌هايي که در گذشته رخ داده‌اند، از کارايي لازم برخوردار نخواهند بود. بررسي‌هاي بسياري به منظور توسعه روش‌هاي ساده شده‌اي، مانند روش ماسکينگام-کونژ، که با وجود بکارگيري کمترين داده‌هاي در دسترس، از دقت قابل قبولي برخوردار باشند، صورت گرفته است. يکي از مهم‌ترين ويژگي‌هاي اين روش نياز به کمترين مقطع‌برداري و در نتيجه صرف هزينه و زمان کمتر در مقايسه با مدل‌هاي هيدروليکي است, در حالي‌که نتايج آن مي‌توانند با نتايج اين مدل‌ها قابل قياس باشند.

روش ماسکينگام نخستين بار توسط مک کارتي[1] (۱۹۳۸) و بر پايه بررسي‌هاي انجام شده بر روي رودخانه ماسکينگام در ايالت اوهايو در آمريکا، ارائه شد. در اين روش با فرض يک به يک بودن رابطه بين دبي و عمق، معادله ديفرانسيلي بدست مي‌آيد که در حل تحليلي آن استهلاک[2] موج رخ نمي‌دهد. به عبارت ديگر ميزان دبي بيشينه ورودي در طول بازه کاهش نيافته و برابر دبي بيشينه خروجي خواهد بود. درحالي‌که در عمل, هيدروگراف موج سيل با افت دبي اوج و پخشيدگي[3] مواجه است. با اين حال روش ماسکينگام، به رغم حل تحليلي، در عمل استهلاک موج در طول بازه را نشان مي‌دهد. کونژ علت تناقض موجود در اين روش را استخراج فرمول ماسکينگام از شماي تفاضل محدودي[4] که جايگزين ديفرانسيل‌هاي جزئي در معادله موج سينماتيک شده است، مي‌داند. اين شما موجب ايجاد خطايي در حل تحليلي معادله اصلي روش ماسکينگام مي‌شود که به‌صورت افت مصنوعي شدت جريان، نمود پيدا مي‌کند. با تطبيق پخشيدگي عددي و فيزيکي، مي‌توان روش ماسکينگام را طوري اصلاح کرد که در آن مشخصه‌هاي روندیابي با توجه به ويژگي هاي فيزيکي رودخانه محاسبه مي‌شوند و رابطه بين دبي و عمق يک به يک نيست (کونژ[5]،۱۹۶۹). با توجه به قابليت‌هاي اين روش که به نام ماسکينگام-کونژ شناخته مي‌شود، تاکنون بررسي‌هاي زيادي به‌منظور اصلاح آن انجام شده است.

پونس (۱۹۷۹)، با تعيين ميزان مشخصي براي وزن‌هاي توابع ورودي و خروجي در معادله ماسکينگام براي محاسبه گام‌هاي زماني و مکاني، روش روندیابي ساده شده‌اي را ارائه نمود. کوسيس[6] (۱۹۸۰) با فرض خطي بودن تغييرهاي هيدروگراف ورودي در بازه زماني معين، معادله‌ي جايگزيني براي ضريب‌هاي ماسکينگام ارائه کرد و با تطبيق پخشيدگي عددي و پخشيدگي فيزيکي، معادله جديدي براي عامل وزني X در فرمول ماسکينگام بدست آورد. با اين وجود نتايج شماي ماسکينگام-کونژ اوليه و شماي اصلاح شده با کوسيس در محدوده معيني يکسان هستند. در حالي که شماي مرسوم ماسکينگام-کونژ در مقايسه با حل تحليلي معادله ماسکينگام، نتايج بهتري ارائه مي‌کند

---

[1] ۱- Mc Carthy

[2] ۲- Damping

[3] ۳- Diffusion

[4] ٤- Finite Difference Scheme

[5] ٥- Cunge

[6] ٦- Koussis

(پرومال[1]،۱۹۸۹) با گسترش کاربرد روش ماسکينگام-کونژ، محاسبه مشخصه‌هاي روندیابي به صورت ثابت و به عنوان تابعي از یک دبي مرجع[2] معین و یا به شکل متغیر و متناسب با تغییر دبي در هر سلول محاسباتي، براي بدست آوردن ضریب‌هاي روندیابي متغیر مطرح شد. کوسیس (۱۹۷۸) پیشنهاد کرد که میزان مشخصه X ثابت فرض شده و مشخصه K که برابر نسبت $\Delta x/c$ است، با دبي تغییر کند، در این رابطه Δx گام مکاني و c سرعت موج سینماتیک است.

پونس و یوجویچ[3] (۱۹۷۸)، ضمن اصلاح روش ماسکينگام-کونژ مرسوم، بهره‌گیري ازمیانگین‌هاي دو، سه و چهارنقطه‌اي از میزان دبي و سرعت موج در نقاط مختلف سلول محاسباتي براي تعیین میزان سرعت موج و عدد رینولدز سلولي[4] را بررسي کرده و به این نتیجه رسیدند که روش‌هاي سه‌نقطه‌اي و چهارنقطه‌اي با ضریب‌هاي متغیر مناسب‌ترند. از نتایج این گونه بررسي‌هاي در ۴ مدل HEC-1 بهره‌گیري شد. در روش ماسکينگام-کونژ با مشخصه‌هاي متغیر بر خلاف روش مشخصه‌هاي ثابت، میزان حجم ورودي به بازه روندیابي در طول بازه ثابت نمي‌ماند. با این حال روش مشخصه‌هاي متغیر بدلیل ماهیت غیر خطي، کارآیي بیشتري در مسائل روندیابي دارد.

پونس (۱۹۸۹) پیشنهاد کرد که به‌منظور محدود کردن پراکندگي عددي[5]، عدد کورانت تا حد امکان نزدیک به واحد نگهداشته شود. بدین ترتیب کاربرد روش ماسکينگام-کونژ به روندیابي موج‌ها از نوع پخشیدگي که علامتي از اثرگذاري حرکتي مانند پس زدن آب در آنها مشاهده نمي‌شود، محدود مي‌شود، لازم به یادآوري است که بیشتر موج‌هاي سیل از نوع موج پخشیدگي مي‌باشند.

پونس و چاگانتي[6](۱۹۹۴) در بررسي‌هاي خود به این نتیجه رسیدند که در حالتي‌که سرعت موج مرجع برپایه میانگین سه یا چهار نقطه‌اي دبي محاسبه شود, در مقایسه با زماني که سرعت موج مرجع برابر میانگین سرعت نقاط سلول محاسباتي فرض شود، بقاء حجم بهتر رعایت مي‌شود و میزان اتلاف حجم با افزایش نسبت دبي بیشینه ورودي به دبي پایه، افزایش مي‌یابد. پونس و همکاران (۱۹۹۶) با مقایسه نتایج حل تحلیلي و روش مشخصه‌هاي ثابت براي روندیابي یک هیدروگراف سینوسي، نتیجه گرفتند که در روش ماسکينگام-کونژ بیشینه میزان جریان خروجي و زمان انتقال موج نسبت به حل تحلیلي در حدود ۲-۱% اختلاف دارند.

تانگ و همکاران (۱۹۹۹) با مقایسه میزان بقاء حجم در شماهاي متداول روش ماسکينگام-کونژ با مشخصه‌هاي متغیر و ثابت و نیز دو شماي جدید ارائه شده، اثر تغییر شیب و میزان‌هاي مختلف گام‌هاي زماني و مکاني را در میزان تلفات حجم بررسي کردند. برپایه این بررسي‌ها روش ماسکينگام-کونژ با مشخصه‌هاي ثابت در هر شرایطي حجم را حفظ مي‌کند، اما در روش مشخصه‌هاي متغیر با کاهش شیب بستر جریان، اتلاف حجم افزایش مي‌یابد. به‌طورکلي میزان تلفات حجم در شماهاي چهارنقطه‌اي از شماهاي سه نقطه‌اي کمتر است. همچنین برپایه نتایج این پژوهش میزان مختلف اندازه گام مکاني (شمار تقسیم‌هاي بازه) در آبراهه‌هاي با شیب تند، تأثیر چنداني روي دبي بیشینه خروجي ندارد اما با کاهش شیب میزان این تأثیر افزایش مي‌یابد. به‌طور کلي شماهاي سه نقطه‌اي به طورکامل تحت تأثیر میزان‌هاي گام مکاني مي‌باشند در حالي‌که شماهاي چهار نقطه‌اي به این تغییرها کمتر حساس هستند.

پرومال (۱۹۹۴) با فرض ثابت بودن شیب سطح آب در طول یک بازه کوچک از آبراهه و برقراري جریان ماندگار بین عمق در وسط بازه و دبي در مقطعي در پایین‌دست، روش ماسکينگام با مشخصه‌هاي متغیر را براي روندیابي موج سیل در آبراهه‌هاي منشوري با مقطع ثابت و

---

[1] Perumal

[2] Reference Discharge

[3] Ponce & Yevjevich

[4] Cell Reynolds Number

[5] Numerical Dispersion

[6] Ponce & Chaganti

جریان‌هایي که معادله‌هاي مقاومت[1] بر آنها حاکم است، به طورمستقیم از معادله‌هاي سنت ونانت بدست آورد. کارایي این روش براي شرایط واقعي توسط پرومال و همکاران (۲۰۰۱) به‌کمک داده‌هاي روزانه و ساعتي ۶ بازه از سه رودخانه در استرالیا و قسمتي از شبکه آبراهه‌هاي رودخانه تاین در انگلیس بررسي شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده این روش از کارآیي مناسبي برخوردار بوده و با کمترین اطلاعات نقشه برداري و بي‌نیاز به واسنجي عامل زبري یا تعیین مشخصه‌هاي روندیابي، نتایج قابل قبولي ارائه مي‌دهد.

پرومال و رانگ راجو[2] برپایه معادله‌هاي سنت ونانت روشي براي روندیابي جریان غیرماندگار ارائه نمودند که همانند فرمول مورد به کاربرده شده در روش ماسکینگام با مشخصه‌هاي متغیر، بوده و براي روندیابي از هیدروگراف اشل بهره‌گیري مي‌کند. در این روش هیدروگراف دبي نیز به‌طور همزمان با هیدروگراف اشل روندیابي شده محاسبه مي‌شود.

گاربرشت و برانر[3] (۱۹۹۱) کاربرد روش ماسکینگام-کونژ با مشخصه‌هاي متغیر را در روندیابي سیل در شبکه‌هاي زهکشي بزرگ با آبراهه‌هاي داراي مقاطع مرکب بررسي کردند. اما تانگ و نایت[4] (۱۹۹۹) روش ماسکینگام-کونژ با مشخصه‌هاي متغیر را براي روندیابي سیلاب در آبراهه منشوري با مقطع مرکب بکار گرفته و میزان تاثیر روش‌هاي مختلف تعیین روابط دبي- سرعت موج در مقاطع مرکب، شیب‌هاي مختلف بستر، میزان‌هاي متفاوت زبري سیلاب‌دشت و نیز نسبت دبي اوج به دبي پایه بر نتایج روندیابي را بررسي نمودند. نتایج نشان داد که در آبراهه‌هاي با شیب ملایم میزان‌هاي دبي بیشینه و زمان رسیدن به آن در هیدروگراف خروجي بیش از آبراهه‌هاي با شیب تند تحت تاثیر نوع روش بکار رفته براي تعیین رابطه دبي- سرعت موج قرار مي‌گیرد. سزل و گاسپار[5] (۲۰۰۰) با اعمال شماي ماسکینگام-کونژ بر معادله انتقال-پخشیدگي، شرط‌هاي لازم براي برابري پخشیدگي عددي با پخشیدگي فیزیکي و حذف نوسان‌هاي عددي و نیز شرط‌هاي کافي براي پایداري[6] شماي ماسکینگام-کونژ را تعریف کردند. یونس و لوگو (۲۰۰۱) با توجه به مفهوم پخشیدگي آبي حرکتي[7] در روش چهارنقطه‌اي مرسوم، مدل ماسکینگام-کونژ را اصلاح نمودند.

به این ترتیب دیده مي‌شود که به‌رغم پیشرفت‌هاي بدست آمده در زمینه نرم‌افزار و سخت‌افزارهاي رایانه‌اي، موضوع بررسي و بهبود روش‌هاي ساده شده روندیابي بدلیل کارایي و ضرورت بکارگیري در موارد ویژه در سرلوحه فعالیت‌هاي مهندسان و پژوهشگران قرار گرفته است. در این مقاله بررسي جامعي از تعدیل‌هاي پیشنهاد شده براي روش روندیابي ماسکینگام ارائه شده و با تدوین مدل رایانه اي براي مجموعه روش‌هاي پیشنهادي، میزان کارایي و تفاوت شماها و روش‌هاي محاسباتي در روندیابي سیلاب‌هاي واقعي، آزمون و نتایج بدست‌آمده ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

در این بخش تعدیل‌هاي صورت گرفته برروي روش ماسکینگام-کونژ به همراه روش‌هاي مبتني بر این روش بررسي مي‌شوند. همچنین مدل هیدرودینامیکي به کاربرده شده به همراه مدل‌هاي عددي تدوین شده براي روندیابي معرفي مي‌شوند.

روش ماسکینگام-کونژ

برپایه بررسي‌هاي کونژ (۱۹۶۹)، مدل اجزاء محدود موج سینماتیک مي‌تواند با تطابق دقیق پخشیدگي عددي با پخشیدگي فیزیکي, هر دو نوع موج سینماتیک و پخشیدگي را توصیف نماید. بر این پایه روش ماسکینگام-

---

[1] - Friction Law

[2] - Ranga Raju

[3] - Garbrecht & Brunner

[4] - Tang & Knight

[5] - Szél and Gáspár

[6] - Stability

[7] - Dynamic Hydraulic Diffusivity

کونژ براي نشان دادن پخشيدگي واقعي موج سيل پيشنهاد شده است. معادله اصلي روندیابي در اين روش همانند معادله بکار رفته در روش ماسکينگام است:

$$Q_{i+1}^{n+1} = C_1 Q_i^{n+1} + C_2 Q_i^n + C_3 Q_{i+1}^n \qquad (۱)$$

که در آن Q_i^n و Q_i^{n+1} دبي‌هاي ورودي و Q_{i+1}^n و Q_{i+1}^{n+1} دبي‌هاي خروجي به‌ترتيب در مراحل زماني t و t+Δt مي‌باشند به‌طوري که Δt برابر اندازه گام زماني محاسبات است (شکل ۱). ضريب‌هاي روندیابي، C_1، C_2 و C_3 بترتيب زير محاسبه مي‌شوند:

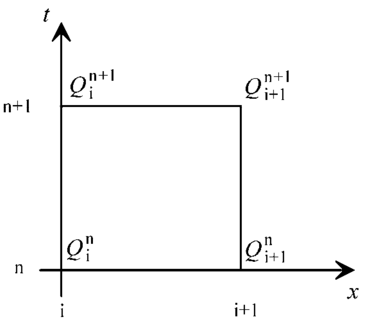
$$C_1 = \frac{KX + 0.5\Delta t}{K(1-X) + 0.5\Delta t} \qquad (۲)$$

$$C_2 = \frac{-KX + 0.5\Delta t}{K(1-X) + 0.5\Delta t} \qquad (۳)$$

$$C_3 = \frac{K(1-X) - 0.5\Delta t}{K(1-X) + 0.5\Delta t} \qquad (۴)$$

که در آن Δt اندازه گام زماني و K و X مشخصه‌هاي روندیابي مي‌باشند که به‌صورت زير تعريف مي‌شوند:

$$K = \frac{\Delta x}{c_r} \qquad (۵)$$



شکل ۱- شماي سلول محاسباتي

$$X = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{Q_r}{BS_o c_r \Delta x}\right) \qquad (۶)$$

که در آن Q_r و c_r به ترتيب دبي و سرعت موج مرجع؛ B، عرض آبراهه در سطح آب و S_o شيب کف آبراهه است. برپايه ثابت ماندن يا تغيير مشخصه‌هاي روندیابي متناسب با تغيير دبي در هر سلول محاسباتي دو روش ماسکينگام-کونژ با مشخصه‌هاي ثابت و متغير تعريف شده‌اند.

روش ماسکينگام-کونژ با مشخصه‌هاي ثابت[1]

در اين روش که به اختصار CPMC ناميده مي‌شود، مشخصه‌هاي روندیابي در همه مراحل ثابت مي‌باشند. اين مشخصه‌ها بر پايه دبي مرجع و بکارگيري معادله‌هاي (۵) و (۶) محاسبه مي‌شوند. روابط مختلفي براي تعيين دبي مرجع وجود دارد. پونس و چاگانتي (۱۹۹۴) ميزان دبي مرجع را با توجه به رابطه زير محاسبه کردند:

$$Q_r = \frac{\left(Q_b - Q_{pi}\right)}{2} \qquad (۷)$$

که در آن Q_b و Q_{pi} بترتيب دبي پايه و بيشينه دبي ورودي مي‌باشند. نتايج اين روش تحت تاثير روش تعيين دبي مرجع قرار دارند.

روش ماسکينگام-کونژ با مشخصه‌هاي متغير

در اين روش مشخصه‌هاي روندیابي بر پايه معادله‌هاي (۵) و (۶) و دبي مرجع هر سلول محاسباتي تعيين مي‌شوند. بنابراين ميزان هر مشخصه متناسب با تغييرهاي غيرخطي دبي در هر مرحله محاسبات تغيير مي‌کند. ميزان دبي و سرعت موج مرجع برپايه شماهاي سه‌نقطه‌اي و چهارنقطه‌اي تعيين مي‌شوند. در شماهاي سه‌نقطه‌اي محاسبات به صورت صريح انجام مي‌گيرد و تنها دبي گره‌هاي معلوم شبکه محاسباتي يعني نقاط (i,n)، (i,n+1)

---

[1] 1- Constant Parameter Muskingum Cunge Method

و(i+1,n) در نظر گرفته مي‌شود (شکل ۱). اما در شماهاي چهارنقطه‌اي دبي نقطه (i+1,n+1) نيز در محاسبه‌ها دخالت داده مي‌شود و اين شماها ضمني هستند. براي تعيين ميزان‌هاي مرجع در هر دو شما روش‌هاي مختلفي پيشنهاد شده است که برخي در سال‌هاي اخير ارائه شده‌اند و ميزان کارايي و تفاوت آنها در تعيين ميزان جواب‌هاي نهايي بويژه براي هيدروگراف‌هاي واقعي هنوز به درستي روشن نشده است. روابط پيشنهادي تعيين ميزان‌هاي مرجع در هر يک از روش‌هاي مختلف سه و چهار نقطه‌اي در جدول (۱) خلاصه شده‌اند.

علاوه بر شماهاي يادشده, شماي VPMC4-4 نيز به منظور بهبود بقاء حجم و برپايه ديدگاه‌هاي کاپيلار[1] (۱۹۹۷) معرفي شده است، در اين شما درآغاز سرعت موج و ضريب پخشيدگي با اعمال عامل تصحيح، *cor*، (معادله ۸) و برپايه معادله‌هاي (۹) و (۱۰) اصلاح مي‌شوند. سپس مشخصه‌ها و ضريب‌هاي روندیابي به کمک اين ميزان‌ها اصلاح شده و با توجه به معادله‌هاي (۲)تا (۶)، تعيين مي‌شوند:

$$cor = \sqrt{1-\mu\frac{2D}{cQ_r}\frac{\partial Q}{\partial x}} \qquad (۸)$$

$$c' = c \cdot cor \qquad (۹)$$

$$D' = \frac{D}{cor} \qquad (۱۰)$$

روش ماسکينگام جايگزين با مشخصه‌هاي متغير[2] (AVPM)

پرومال (۲۰۰۱) با فرض ثابت بودن شيب سطح آب در طول يک بازه کوچک از آبراهه و برقراري جريان ماندگار بين عمق در وسط بازه و دبي در مقطعي در پايين‌دست آن، روشي معادل روش ماسکينگام با مشخصه‌هاي متغير را به طورمستقيم از معادله‌هاي سنت ونانت براي روندیابي موج سيل در آبراهه‌هاي منشوري با مقطع ثابت و جريان‌هايي که معادله‌هاي مقاومت بر آنها حاکم باشد، بدست آورد. شکل (۲) شماي کلي بازه به کاربرده شده در روندیابي براي اين روش را نشان مي‌دهد. پايه کار در اين روش بر فرض وجود جريان ماندگار بين عمق در ميانه بازه (مقطع M) و دبي در نقطه‌اي به فاصله L در پايين‌دست (مقطع ۳) استوار است. در اين روش معادله‌هاي به کاربرده شده براي روندیابي و محاسبه ضريب‌هاي روندیابي همانند روش ماسکينگام- کونژ با مشخصه‌هاي متغير است. با اين تفاوت که مشخصه‌هاي روندیابي، K و X، برپايه سرعت موج و دبي در مقطع ۳، c_3 و Q_3، به‌صورت زير محاسبه مي‌شوند:

$$K = \frac{\Delta x}{c_3} \qquad (۱۱)$$

$$X = \frac{1}{2} - \frac{Q_3}{2S_o B c_3 \Delta x} \qquad (۱۲)$$

$$Q_3 = XQ_I + (1-X)Q_O \qquad (۱۳)$$

که در آن Q_I، دبي ورودي در آغاز بازه و Q_O، دبي خروجي در پايان بازه را نشان مي‌دهند. معادله روندیابي در اين حالت همانند معادله روش مرسوم ماسکينگام-کونژ است. در اين حالت درآغاز مشخصه‌هاي روندیابي بر پايه دبي خروجي در پايان بازه در زمان t+1 از معادله (۱) و بر پايه مشخصه‌هاي روندیابي محاسبه شده در مرحله t برآورد مي‌شوند. ميزان دبي در مقطع ۳، Q_3، با بهره‌گيري از معادله (۱۳) محاسبه شده و سپس با بهره‌گيري از ميزان Q_3 و c_3 و معادله‌هاي (۱۱) و (۱۲)، مشخصه‌هاي روندیابي اصلاح شده در زمان t+1 بدست مي‌آيند. سپس با بهره‌گيري از مشخصه‌هاي روندیابي اصلاح شده مي‌توان دبي خروجي اصلاح شده در پايان بازه در زمان t+1 را محاسبه نمود. مراحل بالا براي هر گام مکاني Δx تا رسيدن به انتهاي رودخانه تکرار مي‌شوند.

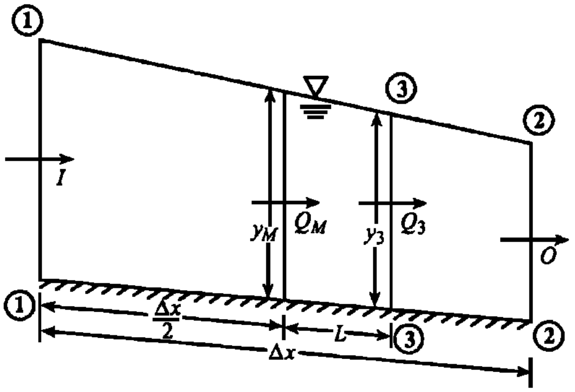
---

[1] ۱- Cappelaere

[2] ۲- Alternative Variable Parameter Muskingum Method

جدول ۱- روابط محاسبه دبي و سرعت موج مرجع

ردیف	نام روش	مشخصههاي روندیابي	ارائه دهندگان
۱	VPMC3-1	$Q_r = \sum_{i=1}^{3} Q_i \Big/ 3$ $c_r = \sum_{i=1}^{3} c_i \Big/ 3 = \sum_{i=1}^{3} f(Q_i) \Big/ 3$	پونس و چاگانتي (۱۹۹۴)
۲	VPMC3-2	$Q_r = \sum_{i=1}^{3} Q_i \Big/ 3$ $c_r = f(Q_r)$	پونس و چاگانتي (۱۹۹۴)
۳	VPMC3-3	$\left(\frac{Q}{c}\right)_r = \sum_{i=1}^{3} \left(\frac{Q_i}{c_i}\right) \Big/ 3 \quad for \;\; X$ $c_r = \sum_{i=1}^{3} c_i \Big/ 3 = \sum_{i=1}^{3} f(Q_i) \Big/ 3 \quad for \;\; K$	تانگ و همکاران (۱۹۹۹)
۴	VPMC4-1	$Q_r = \sum_{i=1}^{4} Q_i \Big/ 4$ $c_r = \sum_{i=1}^{4} c_i \Big/ 4 = \sum_{i=1}^{4} f(Q_i) \Big/ 4$	پونس و چاگانتي (۱۹۹۴)
۵	VPMC4-2	$Q_r = \sum_{i=1}^{4} Q_i \Big/ 4$ $c_r = f(Q_r)$	پونس و چاگانتي (۱۹۹۴)
۶	VPMC4-3	$\left(\frac{Q}{c}\right)_r = \sum_{i=1}^{4} \left(\frac{Q_i}{c_i}\right) \Big/ 4 \quad for \;\; X$ $c_r = \sum_{i=1}^{4} c_i \Big/ 4 = \sum_{i=1}^{4} f(Q_i) \Big/ 4 \quad for \;\; K$	تانگ و همکاران (۱۹۹۹)



شکل ۲- بازه به کاربرده شده در روندیابي به روش ماسکینگام با مشخصه‌هاي متغیر

روش ماسکینگام با مشخصه‌هاي متغیر براي روندیابي هیدروگراف عمق[1] (VPMSH)

پرومال و رانگ راجو (۱۹۹۸) بر پایه استدلال بالا روشي براي روندیابي جریان غیرماندگار برمبناي معادله‌هاي سنت ونانت و بهره‌گیري از هیدروگراف اشل[2] ارائه شده‌است. فرمول روندیابي در این روش به طورمستقیم از معادله‌هاي سنت ونانت استخراج شده و همانند فرمول به کاربرده شده در روش ماسکینگام با مشخصه‌هاي متغیر ارائه شده توسط پرومال مي‌باشد. هیدروگراف دبي نیز همزمان با هیدروگراف اشل روندیابي شده، محاسبه مي‌شود. در حالت به کاربردن معادله مانینگ و در یک مقطع مستطیلي یکنواخت مشخصه‌هاي روندیابي، K و X، به‌صورت زیر ساده مي‌شوند:

$$K=\frac{\Delta x}{\left[\frac{5}{3}-\frac{4}{3}\frac{y_3}{\left(B+2y_3\right)}\right]V_3} \tag{۱۴}$$

$$X=\frac{1}{2}-\frac{Q_3\left\{1-\frac{4}{9}F_M^2\left[1-2\frac{y_M}{\left(B+2y_M\right)}\right]^2\right\}}{2S_oB\left[\frac{5}{3}-\frac{4}{3}\frac{y_3}{\left(B+2y_3\right)}\right]V_3\Delta x} \tag{۱۵}$$

که در آن F_M وy_M، به‌ترتیب عدد فرود و عمق جریان در میانه بازه وQ_3 و V_3، دبي و سرعت در مقطع ۳ مي‌باشند. معادله به کاربرده شده براي روندیابي هیدروگراف اشل جریان به‌صورت معادله‌اي همانند معادله دیفرانسیل روش ماسکینگام کلاسیک، ساده مي‌شود:

$$y_{i+1}^{n+1}=C_1y_i^{n+1}+C_2y_i^n+C_3y_{i+1}^n \tag{۱۶}$$

که در آن y_i^n و y_i^{n+1} مقادیر عمق آب در ابتداي بازه و y_{i+1}^n و y_{i+1}^{n+1} مقادیر عمق آب در پایان بازه روندیابي به ترتیب در مراحل زماني t و t+Δt مي‌باشند. براي تعیین ضریب‌هاي روندیابي از معادله‌هاي (۲) تا (۴) بهره‌گیري مي‌شود. دبي خروجي مربوط به عمق روندیابي شده در پایین‌دست نیز با فرمول زیر محاسبه مي‌شود:

$$Q_O=Q_M+\left.\frac{\partial A}{\partial y}\right|_M\left[1+m\left(\frac{P\,\partial R/\partial y}{\partial A/\partial y}\right)_M\right]V_M\left(y_d-y_M\right) \tag{۱۷}$$

همچنین از رابطة

$$\left|\left(1/S_0\right)\partial y/\partial x\right|<1 \tag{۱۸}$$

براي ارزیابي هیدروگراف اشل ورودي و نیز تعیین کارایي روش روندیابي برپایه هیدروگراف عمق، VPMSH، بهره‌گیري شده است به طوري‌که اگر نامساوي بالا براي هیدروگراف ورودي برقرار باشد، نتایج به حل معادله‌هاي سنت ونانت نزدیک‌تر خواهند بود.

اصلاح روش ماسکینگام-کونژ بر پایه پخشیدگي آبي حرکتي

پونس و لوگو (۲۰۰۱) با فرمول‌بندي دوباره روش چهارنقطه‌اي مرسوم، مدل ماسکینگام-کونژ را اصلاح نمودند به طوري‌که منحني سنجه بدست‌آمده از حل آن حلقوي باشد. در این حالت با درنظر گرفتن شیب موضعي سطح آب و عدد ودرنیکوف در رابطه پخشیدگي آبي، هیدرولیکي دینامیک حرکتي محاسبه مي‌شود.

هیدرولیکي دینامیک حرکتي برابر است با:

$$\upsilon_d=\frac{q}{2S}(1-{V_d}^2) \tag{۱۹}$$

که در آن V_d نمایانگر عدد ودرنیکوف بوده و به‌صورت

---

[1] 1- Variable-Parameter Muskingum-Type Method for Stage-Hydrograph Routing

[2] 2- Stage Hydrograph

نسبت سرعت موج سینماتیک به سرعت موج حرکتي، v، بیان مي‌شود:

$$V_d = \frac{c}{v} = \frac{c}{\sqrt{gy}} \qquad (۲۰)$$

چنانچه عدد ودرنیکوف برابر واحد باشد، پخشیدگي آبي از بین مي‌رود. عدد رینولدز سلولي در این حالت برابر است با:

$$\lambda = \frac{q}{2S\Delta x}(1 - {V_d}^2) \qquad (۲۱)$$

به این ترتیب ضریب‌هاي روندیابي به کمک رابطه‌هاي ارائه شده توسط پونس و یوجویچ (۱۹۷۸) محاسبه مي شوند:

$$C_1 = \frac{-1 + C_n - \lambda}{1 + C_n + \lambda} \qquad (۲۲)$$

$$C_2 = \frac{1 + C_n + \lambda}{1 + C_n + \lambda} \qquad (۲۳)$$

$$C_3 = \frac{1 - C_n + \lambda}{1 + C_n + \lambda} \qquad (۲۴)$$

در هریک از روش‌هاي مورد نظر براي سرعت موج که در محاسبه ضریب‌هاي روندیابي وارد مي‌شود، عمق جریان به ضرورت باید معلوم باشد. ساده‌ترین و رایج‌ترین روش تعیین عمق جریان، بکارگیري فرمول مانینگ و نیز از آزمون و خطا است. وطن‌خواه و کوچک‌زاده (۱۳۸۰)، توابعي را به منظور محاسبه صریح عمق عادي در آبراهه‌هایي با اشکال هندسي مختلف ارائه کردند. با توجه به این که شکل بستر بسیاري از رودخانه‌ها را مي‌توان به‌صورت مقطع مستطیلي تقریب نمود، در این مقاله از روش محاسبه عمق در آبراهه‌هاي مستطیلي شکل بهره‌گیري مي‌شود.

همچنین سرعت موج سینماتیک با توجه به معادله‌هاي مربوط به جریان یکنواخت از جمله معادله مانینگ به‌صورت زیر تعیین مي‌شود:

$$c = \frac{dQ}{dA} = \frac{1}{B}\frac{dQ}{dy} = \beta V \qquad (۲۵)$$

که در آن ضریب β در صورت به کاربردن از معادله مانینگ برابر ۵/۳ و V سرعت میانگین جریان است.

کاربرد روش ماسکینگام-کونژ در مقاطع مرکب

در این مقاله براي جداسازي جریان در آبراهه اصلي از جریان در سیلابدشت از روش تقسیم‌بندي مقطع مرکب به‌کمک خطوط تقسیم عمودي بهره‌گیري شده است. در این روش آبراهه اصلي به‌کمک خطوط عمودي از سیلاب‌دشت جدا مي‌شود و به‌دلیل صرفنظر از اثر تداخل بین دو قسمت آبراهه، جریان بیش از میزان واقعي برآورد مي‌شود (تانگ و نایت, ۱۹۹۹).

مدل هیدرودینامیکي **HEC-RAS** [1]

نرم‌افزار تحلیل سامانه‌هاي رودخانه‌اي، HEC-RAS، توسط مرکز مهندسي آبشناسي رسته مهندسي ارتش آمریکا توسعه یافته و به‌صورت گسترده‌اي براي مدل کردن جریان‌هاي یک‌بعدي ماندگار و غیرماندگار بکار مي‌رود. نسخه گونه 3.1.2 این مدل که در این بررسي به کاربرده شده است، قابلیت محاسبه پروفیل‌هاي سطح آب در جریان ماندگار، همانندسازي جریان غیرماندگار و نیز محاسبه‌هاي مربوط به انتقال رسوب در بسترهاي متحرک[2] را دارد.

مدل عددي تدوین شده

به منظور روندیابي سیلاب‌هاي مورد نظر با بهره‌گیري از هر یک از روش‌هاي مشروح، برنامه‌هاي رایانه اي تدوین گردید که در هر یک از آنها سیلاب‌هاي ورودي به‌کمک روش‌هاي مختلف روش ماسکینگام-کونژ با مشخصه‌هاي

---

[1] Hydrologic Engineering Center's River Analysis System

[2] Movable Boundary Sediment Transport

ثابت و متغیر، روش ماسکینگام جایگزین، روش ماسکینگام با مشخصه‌هاي متغیر براي روندیابي هیدروگراف عمق و روش اصلاح شده ماسکینگام برپایه مفهوم پخشیدگي هیدرولیکي دینامیک روندیابي شدند. با تنظیم خروجي برنامه مي‌توان هیدروگراف دبي روندیابي شده را در هر مکان دلخواه در طول بازه روندیابي بدست آورد. در هر برنامه امکان گزینش میزان‌هاي مختلف اندازه گام مکاني و زماني وجود دارد.

داده‌هاي صحرایي

بازه گزینش شده براي روندیابي سیلاب در حدفاصل دو ایستگاه آبسنجي ملاثاني و اهواز در رودخانه کارون قرار دارد. شیب عمومي رودخانه در بازه مورد نظر در حدود ۰/۰۰۰۱۵ مي‌باشد. داده‌هاي اندکي در مورد مقاطع عرضي رودخانه در این بازه موجود است. بزرگترین عرض سطح آب در این مقطع (عرض لبریزي یا عرضي که در آن آبراهه اصلي کاملاً پرآب باشد) در حدود ۱۷۵ متر است. عرض سیلاب‌دشت‌ها و آبراهه اصلي نیز در حدود ۵۶۳ متر است. دبي لبریز در رودخانه کارون به‌طور میانگین در حدود ۲۵۰۰ مترمکعب بر ثانیه برآورد شده است (ایدر، ۱۳۷۷). از آنجا که شکل واقعي مقطع رودخانه در حد فاصل دو ایستگاه آبسنجي در دست نیست برپایه داده‌هاي هندسي موجود یک مقطع مستطیلي معادل در طول بازه روندیابي تعریف شده و سیلاب‌هاي مورد بررسي در این مقطع معادل روندیابي مي‌شوند.

مشخصه VC که بقاء حجم را نشان مي‌دهد، بصورت زیر محاسبه مي‌شود:

$$VC = 100 * (1 - \frac{VOL_{out} - VOL_{in}}{VOL_{in}}) \qquad (۲۶)$$

در این بررسي شمار شش هیدروگراف مربوط به سیلاب‌هاي مختلف رودخانه کارون به‌کمک مدل‌هاي تدوین شده براي روش‌هاي مختلف روندیابي مي شوند. در ادامه نتایج اجراي مدل‌هاي عددي ارائه مي‌شود.

نتایج

در این قسمت به‌منظور بررسي کارایي و دقت روش‌هاي مبتني بر روش ماسکینگام-کونژ، سیلاب‌هاي رودخانه کارون را به‌کمک هر یک از روش‌هاي شرح داده شده روندیابي کرده و با مقایسه نتایج بدست آمده با میزان واقعي مشاهده شده در بازه روندیابي مناسب‌ترین روش روندیابي براي بکارگیري در شرایط ویژه این رودخانه گزینش مي‌شود. لازم به یادآوري است که اندازه گام مکاني در همه محاسبه‌ها برابر ۱۰۰۰ متر و گام زماني برابر یک ساعت درنظر گرفته شده است.

نتایج بدست‌آمده براي هر یک از روش‌هاي مورد اشاره در شکل‌هاي (۳ تا ۱۰) ارائه شده است. در این شکل‌ها میزان دبي بیشینه خروجي و زمان رسیدن به آن در هیدروگراف‌هاي روندیابي شده برپایه هر یک از روش‌هاي مورد نظر با میزان مشاهده شده مقایسه شده‌اند. به این ترتیب امکان تعیین میزان انطباق نتایج بدست آمده با میزان‌هاي مشاهده شده در انتهاي بازه روندیابي به‌کمک مقایسه میزان پراکندگي نقاط بدست‌آمده از خط ۴۵ درجه یا خط انطباق کامل، که در شکل‌ها با Per.Line معرفي شده، فراهم مي‌آید. خطوط %۱۰+ و %۱۰- نیز به ترتیب محدوده بیشتر و کمتر از %۱۰ براي اختلاف میزان محاسبه شده و مشاهده شده را نشان مي‌دهند. هر یک از نقاط معرف یک سیلاب معین است که به کمک سال رخداد آن شناخته مي‌شود.

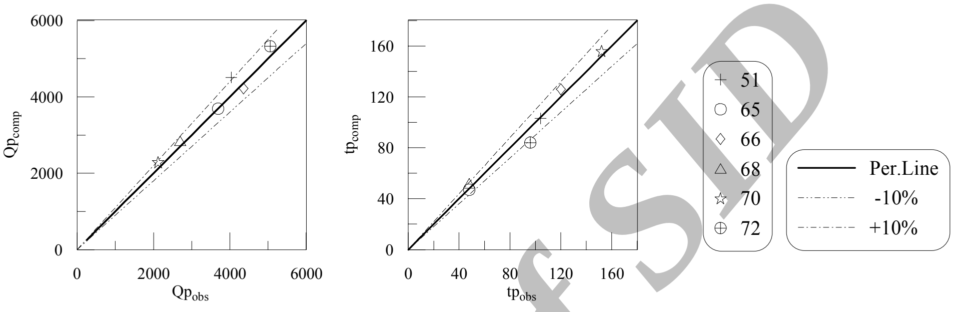
در شکل‌هاي (۶ و ۷) میزان دبي بیشینه و زمان رسیدن به آن که برپایه روش‌هاي AVPM و VPMSH روندیابي شده‌اند با میزان مشاهده شده در پایان بازه مقایسه مي‌شوند.

ملاحظه مي‌شود که در همه روش‌هاي روندیابي بکارگرفته شده در شکل‌هاي بالا اختلاف بین میزان‌هاي دبي خروجي بیشینه با میزان مشاهده شده بیش از %۱۰ نمي‌باشد تنها در مورد نتایج روندیابي سیلاب سال ۱۳۶۵ با روش ماسکینگام کونژ با مشخصه‌هاي متغیر این اختلاف اندکي بیش از %۱۰ است. در مورد زمان رسیدن به بیشینه دبي نیز اختلاف قابل توجهي بین میزان محاسبه شده و مشاهده شده

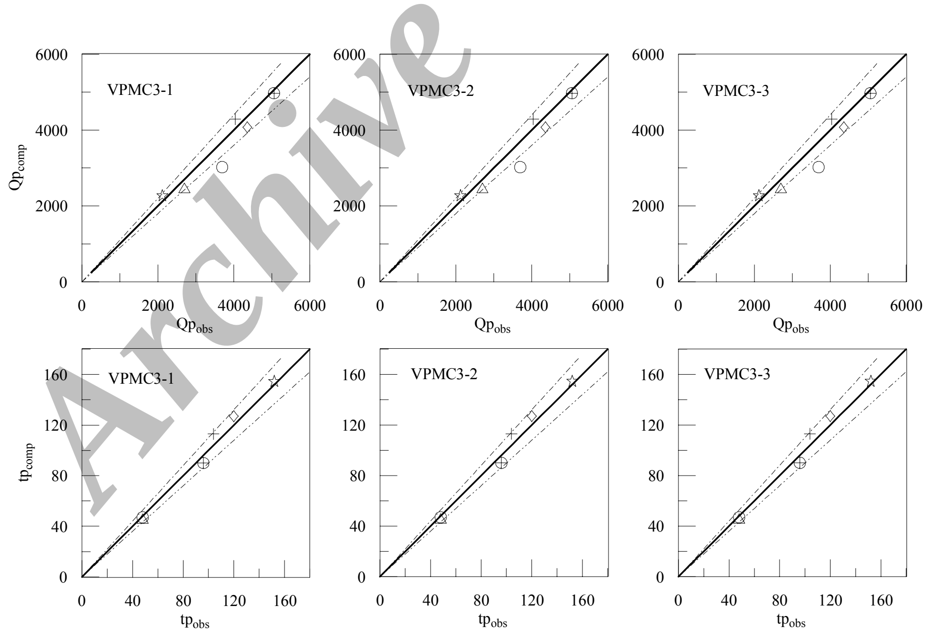
شده وجود ندارد تنها در مورد روندیابي سیلاب سال ۱۳۷۲ با روش‌هاي AVPM و VPMSH این اختلاف اندکي بیش از ۱۰% است.

نتایج بدست‌آمده از اصلاح روش‌هاي ماسکینگام-کونژ با مشخصه‌هاي ثابت و متغیر به‌کمک اعمال عدد ودرنیکوف در محاسبه مشخصه‌هاي روندیابي (بمنظور در نظر گرفتن پخشیدگي هیدرولیکي دینامیک) در شکل‌هاي (۸ تا ۱۰) ارائه شده‌اند.

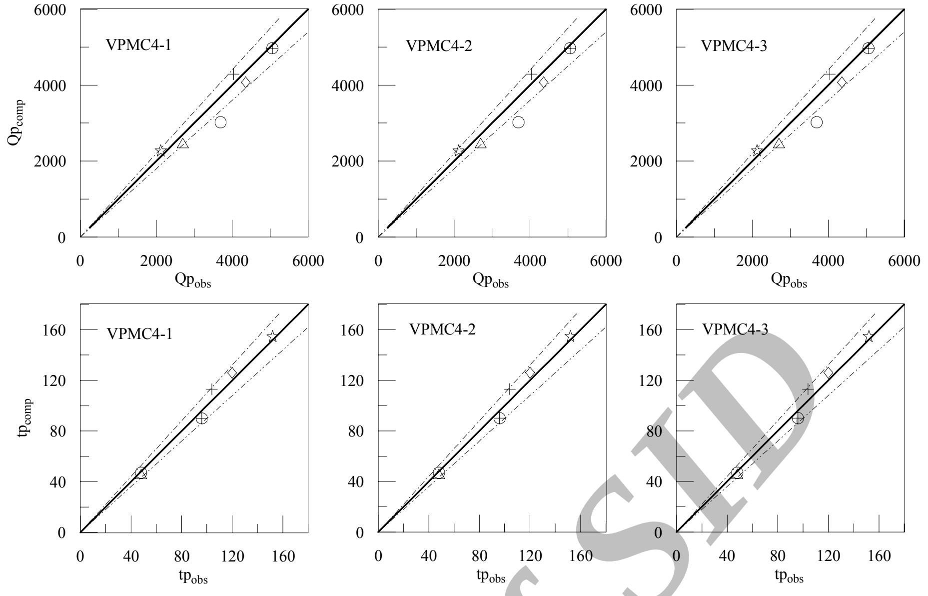
شکل (۱۱) نتایج مقایسه روش‌هاي مختلف بکار رفته براي روندیابي سیلاب‌هاي مورد بررسي با نتایج روندیابي به کمک مدل هیدرودینامیکي HEC-RAS را نشان مي‌دهد.



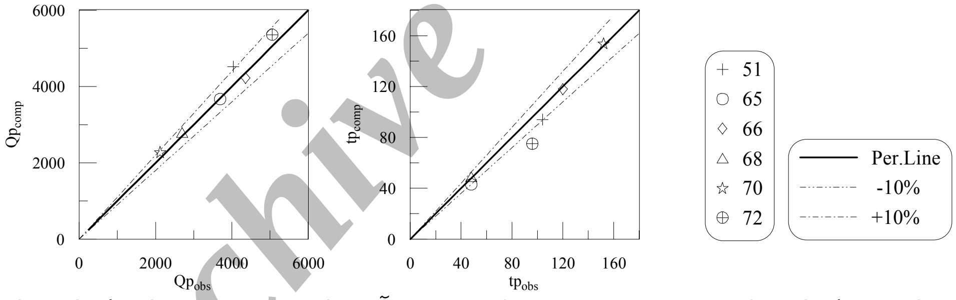
شکل ۳- مقایسه میزان‌هاي محاسبه شده دبي بیشینه و زمان رسیدن به آن در روش **CPMC** با میزان‌هاي مشاهده شده



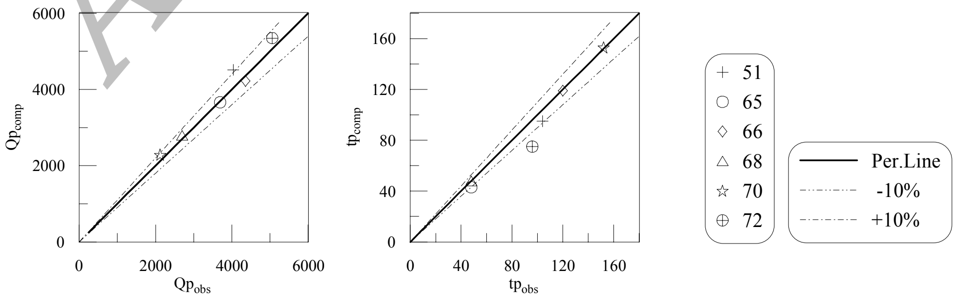
شکل ۴- مقایسه دبي بیشینه و زمان رسیدن به آن برپایه روش سه نقطه‌اي با میزان‌هاي مشاهده شده



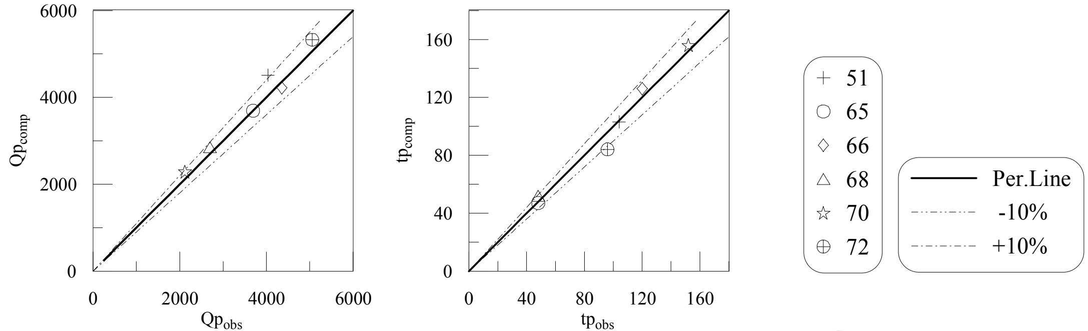
شکل ۵- مقايسه دبي بيشينه و زمان رسيدن به آن برپايه روش چهارنقطه‌اي با ميزان‌هاي مشاهده شده



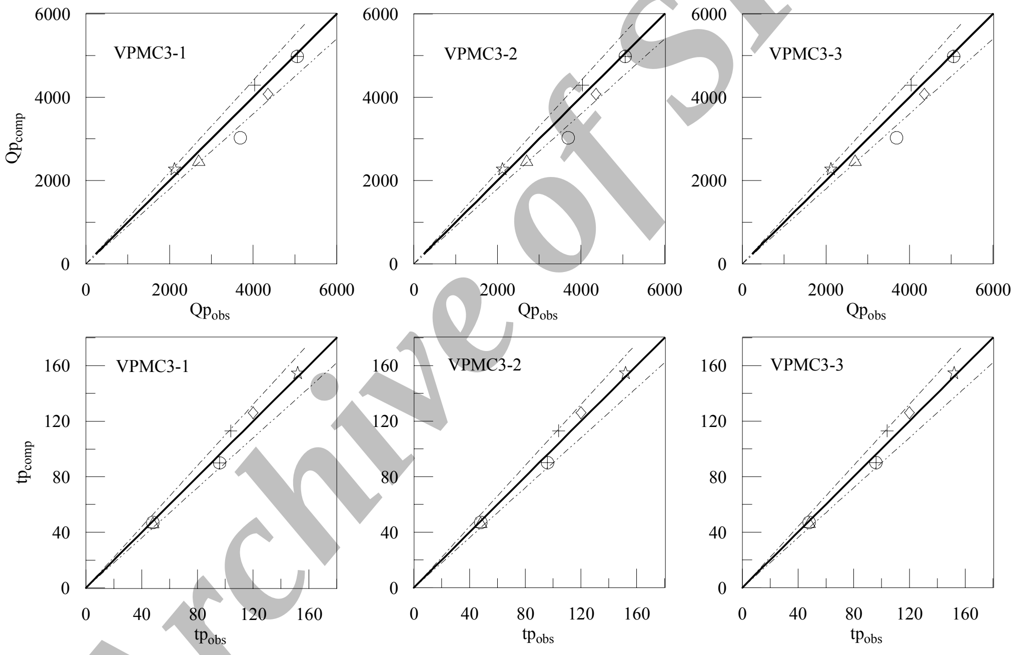
شکل ۶- مقايسه ميزان‌هاي محاسبه شده دبي بيشينه و زمان رسيدن به آن برپايه روش **AVPM** با ميزان‌هاي مشاهده شده



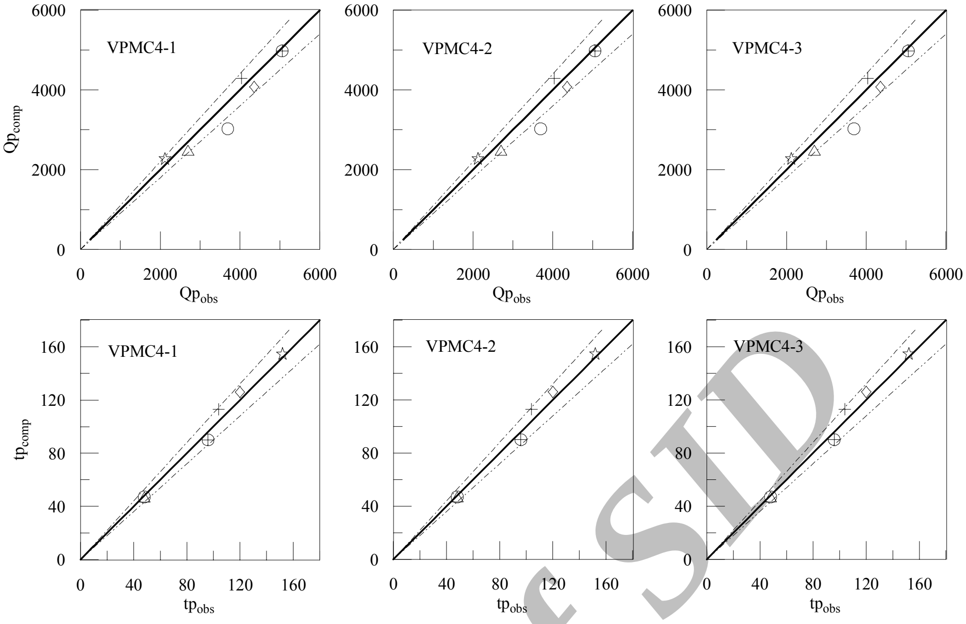
شکل ۷- مقايسه ميزان‌هاي محاسبه شده دبي بيشينه و زمان رسيدن به آن برپايه روش **VPMSH** با ميزان‌هاي مشاهده شده



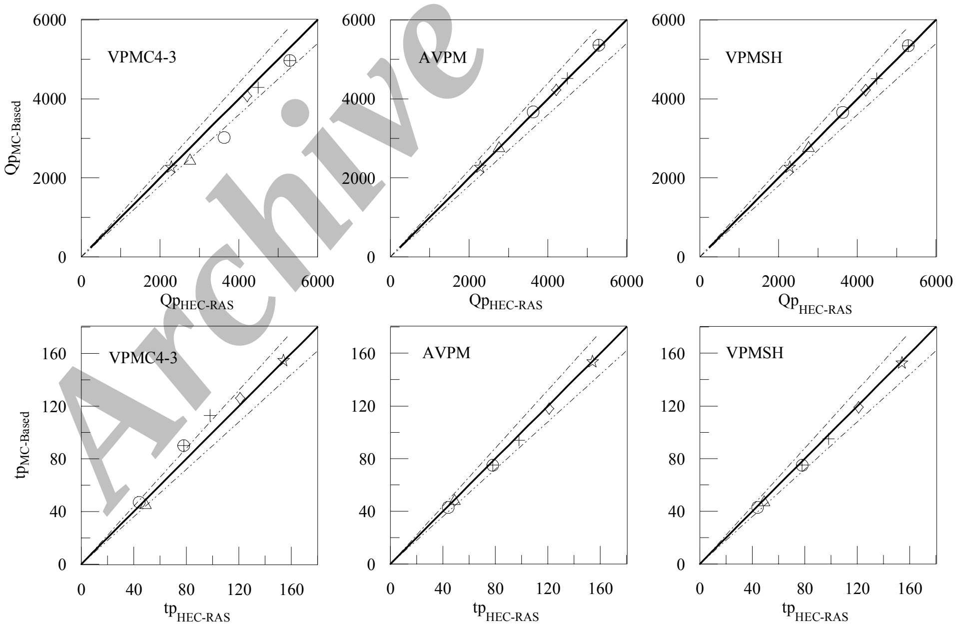
شکل ۸- مقایسه میزان‌هاي دبي بیشینه و زمان رسیدن به آن برپایه روش مشخصههاي ثابت و مفهوم پخشیدگي آبي با میزان‌هاي مشاهده شده



شکل ۹- مقایسه میزان‌هاي دبي بیشینه و زمان رسیدن به آن برپایه شماهاي سه‌نقطه‌اي و مفهوم پخشیدگي آبي با میزان‌هاي مشاهده شده



شکل ١٠- مقایسه میزان‌هاي دبي بیشینه و زمان رسیدن به آن برپایه شماهاي چهارنقطه‌اي و مفهوم پخشیدگي آبي با میزان‌هاي مشاهده شده



شکل ١١- مقایسه دبي بیشینه و زمان رسیدن به آن در مدل **HEC-RAS** با نتایج روش‌هاي مختلف مبتني بر روش ماسکینگام-کونژ

بحث

در اين مقاله امكان بهره‌گيري از روش‌هاي مبتني بر روش ماسكينگام-كونژ در روندیابي سيلاب، بويژه در مواردي كه داده‌هاي و آمار جامع و كاملي از شرايط رودخانه مانند داده‌هاي هندسي و يا آمار سيلاب‌هاي گذشته موجود نيست، بررسي شده است. بنابراين نتايج اين بررسي مي‌تواند براي رودخانه‌هاي بدون آمار (مانند رودخانه‌هاي سيلابي و فصلي) و با توجه به شرايط عنوان شده در پژوهش بكار گرفته شود. همه امواج سيلاب بكار رفته در محدوده تعريف شده براي موج پخشيدگي قرار دارند. بر پايه نتايج بدست آمده و با توجه به شكل‌هاي ارائه شده در شرايط رودخانه كارون، دو روش AVPM و VPMSH در مجموع نتايج بهتري نسبت به ديگر روش‌ها ارائه كرده‌اند. اصل بقاء حجم نيز به‌خوبي در اين دو روش رعايت شده است. با توجه به بررسي‌هاي به‌عمل آمده و مقايسه نتايج مربوط به شرايط مختلف برپايه معيارهاي بقاء حجم، دبي بيشينه خروجي و زمان رسيدن به آن، كه مشخصه‌هاي پايهي مديريت سيلاب به‌شمار مي‌روند، نتايج زير را مي‌توان بيان داشت:

- نتايج بدست‌آمده از روش‌هاي مختلف مبتني بر روش ماسكينگام-كونژ تفاوت قابل توجهي با يكديگر نداشته و مي‌توان بسته به شرايط و داده‌هاي مورد نياز هر يک از آنها را بكار گرفت.
- بيشترين درصد بقاء حجم در روش‌هاي ماسكينگام-كونژ با مشخصه‌هاي ثابت و AVPM بدست‌آمده شده است. با اين حال خطاي اين دو روش در محاسبه هيدروگراف خروجي سيلاب‌هاي رودخانه كارون تفاوت قابل ملاحظه‌اي با روش ماسكينگام-كونژ با مشخصه‌هاي متغير ندارد.
- نتايج بدست آمده از روش ماسكينگام-كونژ با مشخصه‌هاي متغير با توجه به كمترين داده‌هاي موجود در روندیابي بيشتر سيلاب‌ها قابل قبول بوده و تنها در يک مورد خطاي محاسباتي بيش از ۱۰ درصد گزارش شده است. با اين حال خطاي محاسبه زمان رسيدن به دبي اوج در هيدروگراف خروجي قابل توجه بوده و لازم است در موارد حساس، نتايج بدست‌آمده را با احتياط بيشتري بكار گرفت.
- نتايج روندیابي با شماهاي چهارنقطه‌اي به تقريب برابر نتايج بدست‌آمده از شماهاي سه‌نقطه‌اي است و تنها در برخي موارد اندكي افزايش در ميزان بقاء حجم مشاهده مي‌شود.
- روش‌هاي AVPM و VPMSH معرفي شده، براي مقاطع ساده توسعه يافته‌اند و در مورد سيلاب‌هايي كه وارد سيلاب‌دشت نمي‌شوند، نياز به بررسي‌هاي بيشتري دارند.
- با توجه به اينكه مقطع معادل گزينش شده براي كل بازه روندیابي قادر به توليد منحني دبي- اشل واقعي رودخانه نمي‌باشد، معادله پيشنهادي روش VPMSH براي محاسبه دبي برپايه عمق‌هاي روندیابي شده، پاسخ‌هاي منطقي توليد نمي‌كند.
- اعمال عدد ودرنيكوف در شماهاي مختلف روش‌هاي ماسكينگام-كونژ با مشخصه‌هاي ثابت و متغير, تفاوت چنداني در نتايج بوجود نمي‌آورد.
- در روندیابي با روش‌هاي مبتني بر روش ماسكينگام-كونژ حتي در صورت بهره‌گيري از مقاطع معادل بعنوان جايگزين مقطع اصلي نتايج مطلوبي بدست مي‌آيد.
- دقت نتايج بدست آمده از مدل هيدروديناميكي HEC-RAS در بيشتر موارد با دقت نتايج بدست‌آمده از روش‌هاي معرفي شده بويژه روش‌هاي AVPM و VPMSH قابل مقايسه است.

منابع

۱- ایدر، ادیب، ۱۳۷۷. بررسي شرايط موفقيت روش‌هاي آبي روندیابي سيل در رودخانه‌ها، پایان‌نامه کارشناسي ارشد رشته مهندسي عمران، دانشکده فني دانشگاه تهران

۲- وطن خواه محمد آبادي، عليرضا و صلاح کوچک‌زاده، ۱۳۸۰. معادلات صريح براي تعيين عمق جريان يکنواخت در مقاطع هندسي مختلف، مجله کشاورزي و منابع طبيعي دانشگاه گرگان, ۸ (۳):۱۷۳-۱۸۲.

3- Cappelaere, B., 1997. Accurate diffusion wave routing. J. Hydr. Engirg. 123(3):174-181

4- Cunge, .J. A., 1969. On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method). J. Hydr. Res., 7(2): 205-230.

5- Garbrecht, J. & G. Brunner, 1991. Hydraulic channel-flow routing for compound sections J. Hydr. Engrg., ASCE, 117(5): 629-642.

6- Heatherman, W. J., 2004. Muskingum-Cunge revisited. Proceedings of the World Water and Environmental Resources Congress: Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management, 2026-2036

7- Kousssis, A. D., 1980. Comparison of Muskingum method difference schemes. J. Hydr. Div., ASCE, 106(5): 925-929.

8- Perumal, M., 1994. Hydrodynamic derivation of a variable parameter Muskingum method: 1. Theory and solution procedure, Hydrological Sciences Journal. Oxford, U.K., 39(5): 431-441.

9- Perumal, M., 1994. Hydrodynamic derivation of a variable parameter Muskingum method: 2. Verification, Hydrological Sciences Journal. Oxford, U.K., 39(5): 443-458.

10- Perumal. M., P.E. O'Connell & K.G. Ranga Raju, 2001. Field application of a variable parameter Muskingum-Cunge method. J. Hydrologic Eng., ASCE, 6 (3): 196-207.

11- Perumal, M. & K. G. Ranga Raju, 1998. Variable-parameter stage- hydrograph routing method: I Theory. J. Hydrologic Engrg. ASCE, 3(2): 109-114.

12- Perumal, M. & K. G. Ranga Raju, 1998. Variable-parameter stage- hydrograph routing method: II Evaluation. J. Hydrologic Engrg. ASCE, 3(2): 115-121

13- Ponce, V. M., 1979. Simplified Muskingum routing equation. J. Hydr. Div., ASCE, 105(1): 85-91.

14- Ponce, V. M., 1986. Diffusion wave modeling of catchment dynamics. J.Hydr. Engrg., ASCE, 112(8): 716-727.

15- Ponce, V. M., 1989. Engineering Hydrology, Principles and Practices, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey:pp335

16- Ponce, V. M., 1991. New perspective on the vedernikov number. Water Resources Research, 27(7): 1777-1779

17- Ponce, V. M., & A. Lugo, 2001. Modeling looped rating in Muskingum-Cunge routing. J. Hydrologic Engrg. ASCE, 6(2): 119-124.

18- Ponce, V. M., A. K. Lohani, & C. Sheyhing, 1996. Analytical verification of Muskingum-Cunge routing. J. Hydro., ASCE, (179): 235-241.

19- Ponce, V. M., & P. V. Chaganti, 1994. Variable-parameter Muskingum-Cunge method revisited . J. Hydro., ASCE, (162): 433-439.

20- Ponce, V. M. & V. Yevjevich, 1978. Muskingum-Cunge method with variable parameters. J. Hydr. Div., ASCE, 104(12): 1663-1667.

21- Szél, S., & C. Gáspár, 2000. On the negative weighting factors in the Muskingum-Cunge scheme. J. Hydr. Res., 38(4): 299-306.

22- Tang, X. N., D. W. Knight, & P. G. Samuels, 1999. Volume conservation in variable parameter Muskingum-Cunge method . J. Hydr. Engrg., ASCE, 125(6): 610-620.

23- U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (USACE), 1990. HEC-1, Flood Hydrograph Package: User's Manual.

24- United States Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (USACE), 2001. HEC-RAS River Analyses System, Applications Guide, Version 3.1.2

Comparison of field application of Muskingum-Cunge based schemes in rivers

M. Samimi[1], S. Kouchakzadeh[*2] and A. Parvaresh-Rizi[3]
[1] River Engineer, Water Resources Management Company, Ministry of Energy, Tehran, I.R.Iran
[2] Professor, University College of Agriculture and Natural Resources, Karaj, I.R.Iran
[3] Assistant professor, University College of Agriculture and Natural Resources, Karaj, I.R.Iran
(Received: 23 April 2006, Accepted: 01 February 2009)

Abstract

Muskingum-Cunge is one of the widely employed methods for flood routing. Direct calibration of the model based on previous flood events is not required and the routing parameters in this method are determined according to physical characteristics and hydraulic conditions of the stream. During the last decade, different modifications were proposed for the method to increase its accuracy. In this paper Muskingum-Cunge method and its different modifications have been presented and the applicability and the precision of the proposed schemes were determined. To study the applicability of constant and variable parameter Muskingum-Cunge method in field conditions, some observed flood events of Karoon River have been routed with these methods. Inflow hydrographs were routed by the mentioned method and the results were compared with that of the observed values of the downstream end of the reach. The results were also compared with the outputs obtained by routing the same hydrographs by HEC-RAS hydrodynamic model. The results of this study demonstrated successful performance of the simplified routing methods and showed that in circumstances where the availability of intensive data required by hydrodynamic model are limited, relying on such simplified method would provide satisfactory results. Based on comparison among the results of the employed method with that of the hydrodynamic one, the most suitable method for the studied condition is determined.

Keywords: Flood routing, Unsteady flow, Muskingum-Cunge, Hydrodynamic model, Computational scheme

---

*Corresponding author: Tel: +982612241119 , Fax: +982612241119 , E-mail: skzadeh@ut.ac.ir