بررسي و مقايسه كاربرد ميداني شماهاي مبتني بر روش ماسكينگام-كونژ در رودخانه‌ها

مريم صميمي[۱]، صلاح كوچك‌زاده[۲*] و عاطفه پرورش‌ريزي[۳]
[۱] كارشناس ارشد مهندسي رودخانه, شركت مديريت منابع آب ايران, وزارت نيرو
[۱] استاد دانشكده مهندسي آب و خاک, پرديس كشاورزي و منابع طبيعي، دانشگاه تهران، ايران
[۱] استاديار دانشكده مهندسي آب و خاک, پرديس كشاورزي و منابع طبيعي، دانشگاه تهران، ايران
(تاريخ دريافت: ٨٥/٢/٣، تاريخ تصويب: ٨٧/١١/١٣)

چكيده

روش ماسكينگام-كونژ از روش‌هاي بسيار رايج رونديابي سيلاب است. در اين روش نيازي به واسنجي مدل بر پايه سيلاب‌هاي گذشته نيست و مشخصه‌هاي رونديابي تنها بر مبناي ويژگي‌هاي فيزيكي و آبي جداگانه محاسبه مي‌شوند. تعديل‌هاي بيشماري به منظور افزايش دقت در چند سال اخير براي اين روش پيشنهاد شده است. در اين پژوهش روش ماسكينگام-كونژ و تعديل‌هاي مختلف آن بررسي شده و كارآيي و دقت روش‌ها و شماهاي محاسباتي مبتني بر اين روش تعيين شده است. به منظور بررسي و ارائه قابليت كاربرد روش‌هاي مختلف مشخصه‌هاي ثابت و متغير ماسكينگام-كونژ در مسائل كاربردي, بيشماري از سيلاب‌هاي رودخانه كارون مورد بهره‌گيري قرار گرفت. به‌كمک روش‌هاي ياد شده هيدروگراف سيلاب‌ها رونديابي شده و نتايج به دست آمده با هيدروگراف‌هاي ديده شده خروجي مقايسه شده‌اند. همچنين نتايج روش‌هاي يادشده با نتايج بدست آمده از اجراي مدل هيدروليكي HEC-RAS براي همان هيدروگراف‌ها مقايسه شده‌اند. نتايج اين بررسي‌ها علاوه بر تاييد كارايي روش‌هاي ساده شده رونديابي نشان داد كه در شرايطي كه داده‌هاي جامع مورد نياز مدل‌هاي هيدروليكي در دسترس نباشند كاربرد اين روش‌ها مي‌تواند به نتايج بسيار رضايت بخشي منجر شوند. در اين پژوهش بر پايه مقايسه نتايج روش‌هاي مختلف با نتايج مدل هيدروليكي, بهترين روش براي شرايط آزمون شده تعيين و معرفي شد.

واژه‌هاي كليدي: رونديابي, جريان غيرماندگار, ماسكينگام-كونژ, مدل هيدروديناميك, شماي محاسباتي

* نويسنده مسئول: صلاح كوچک‌زاده ‏ تلفن: ۰۲۶۱۲۲۴۱۱۱۹ ‏ فاكس: ۰۲۶۱۲۲۴۱۱۱۹ ‏ E-mail: skzadeh@ut.ac.ir

مقدمه

نتايج بررسي‌هاي روندیابی سیلاب در بسياري از مسائل مهندسي رودخانه و بررسي‌هاي کنترل و کاهش خطرهاي سیلاب 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[۱] (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[۲] 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[۳] 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[٤] 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[٥]،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[٦] (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

۱- Mc Carthy
۲- Damping
۳- Diffusion
٤- Finite Difference Scheme
٥- Cunge
٦- Koussis

(پرومال[۱]،۱۹۸۹) با گسترش كاربرد روش ماسكينگام-كونژ، محاسبه مشخصه‌هاي روندیابي به صورت ثابت و به عنوان تابعي از یک دبي مرجع[۲] معين و يا به شكل متغير و متناسب با تغيير دبي در هر سلول محاسباتي، براي بدست آوردن ضريب‌هاي روندیابي متغير مطرح شد. كوسيس (۱۹۷۸) پيشنهاد كرد كه ميزان مشخصه X ثابت فرض شده و مشخصه K كه برابر نسبت $\Delta x/c$ است، با دبي تغيير كند، در اين رابطه Δx گام مكاني و c سرعت موج سينماتيک است.

پونس و يوجويچ[۳] (۱۹۷۸)، ضمن اصلاح روش ماسكينگام-كونژ مرسوم، بهره‌گيري ازميانگين‌هاي دو، سه و چهارنقطه‌اي از ميزان دبي و سرعت موج در نقاط مختلف سلول محاسباتي براي تعيين ميزان سرعت موج و عدد رينولدز سلولي[٤] را بررسي كرده و به اين نتيجه رسيدند كه روش‌هاي سه‌نقطه‌اي و چهارنقطه‌اي با ضريب‌هاي متغير مناسب‌ترند. از نتايج اين گونه بررسي‌هاي در ۴ مدل HEC-1 بهره‌گيري شد. در روش ماسكينگام-كونژ با مشخصه‌هاي متغير بر خلاف روش مشخصه‌هاي ثابت، ميزان حجم ورودي به بازه روندیابي در طول بازه ثابت نمي‌ماند. با اين حال روش مشخصه‌هاي متغير بدليل ماهيت غير خطي, كارآيي بيشتري در مسائل روندیابي دارد.

پونس (۱۹۸۹) پيشنهاد كرد كه به منظور محدود كردن پراكندگي عددي[٥]، عدد كورانت تا حد امكان نزديک به واحد نگهداشته شود. بدين ترتيب كاربرد روش ماسكينگام-كونژ به روندیابي موج ها از نوع پخشيدگي كه علامتي از اثرگذاري حركتي مانند پس زدن آب در آنها مشاهده نمي‌شود، محدود مي‌شود، لازم به يادآوري است كه بيشتر موج‌هاي سيل از نوع موج پخشيدگي مي‌باشند.

۱- Perumal
۲- Reference Discharge
۳- Ponce & Yevjevich
٤- Cell Reynolds Number
٥- Numerical Dispersion

پونس و چاگانتي[٦](۱۹۹۴) در بررسي‌هاي خود به اين نتيجه رسيدند كه در حالتي‌كه سرعت موج مرجع برپايه ميانگين سه يا چهار نقطه‌اي دبي محاسبه شود, در مقايسه با زماني كه سرعت موج مرجع برابر ميانگين سرعت نقاط سلول محاسباتي فرض شود، بقاء حجم بهتر رعايت مي‌شود و ميزان اتلاف حجم با افزايش نسبت دبي بيشينه ورودي به دبي پايه، افزايش مي‌يابد. پونس و همكاران (۱۹۹۶) با مقايسه نتايج حل تحليلي و روش مشخصه‌هاي ثابت براي روندیابي یک هيدروگراف سينوسي، نتيجه گرفتند كه در روش ماسكينگام-كونژ بيشينه ميزان جريان خروجي و زمان انتقال موج نسبت به حل تحليلي در حدود ۲-۱% اختلاف دارند.

تانگ و همكاران (۱۹۹۹) با مقايسه ميزان بقاء حجم در شماهاي متداول روش ماسكينگام-كونژ با مشخصه‌هاي متغير و ثابت و نيز دو شماي جديد ارائه شده، اثر تغيير شيب و ميزان‌هاي مختلف گام‌هاي زماني و مكاني را در ميزان تلفات حجم بررسي كردند. برپايه اين بررسي‌ها روش ماسكينگام-كونژ با مشخصه‌هاي ثابت در هر شرايطي حجم را حفظ مي‌كند، اما در روش مشخصه‌هاي متغير با كاهش شيب بستر جريان، اتلاف حجم افزايش مي‌يابد. به‌طوركلي ميزان تلفات حجم در شماهاي چهارنقطه‌اي از شماهاي سه نقطه‌اي كمتر است. همچنين برپايه نتايج اين پژوهش ميزان مختلف اندازه گام مكاني (شمار تقسيم‌هاي بازه) در آبراهه‌هاي با شيب تند، تأثير چنداني روي دبي بيشينه خروجي ندارد اما با كاهش شيب ميزان اين تأثير افزايش مي‌يابد. به‌طور كلي شماهاي سه نقطه‌اي به طوركامل تحت تأثير ميزان‌هاي گام مكاني مي‌باشند در حالي‌كه شماهاي چهار نقطه‌اي به اين تغييرها كمتر حساس هستند.

پرومال (۱۹۹۴) با فرض ثابت بودن شيب سطح آب در طول یک بازه كوچک از آبراهه و برقراري جريان ماندگار بين عمق در وسط بازه و دبي در مقطعي در پايين‌دست، روش ماسكينگام با مشخصه‌هاي متغير را براي روندیابي موج سيل در آبراهه‌هاي منشوري با مقطع ثابت و

٦- Ponce & Chaganti

جريان‌هايي که معادله‌هاي مقاومت[۱] بر آنها حاکم است، به طورمستقيم از معادله‌هاي سنت ونانت بدست آورد. كارايي اين روش براي شرايط واقعي توسط پرومال و همكاران (۲۰۰۱) به‌كمک داده‌هاي روزانه و ساعتي ۶ بازه از سه رودخانه در استراليا و قسمتي از شبکه آبراهه‌هاي رودخانه تاين در انگليس بررسي شد. با توجه به نتايج به‌دست آمده اين روش از كارآيي مناسبي برخوردار بوده و با كمترين اطلاعات نقشه برداري و بي‌نياز به واسنجي عامل زبري يا تعيين مشخصه‌هاي روندیابي، نتايج قابل قبولي ارائه مي‌دهد.

پرومال و رانگ راجو[۲] برپايه معادله‌هاي سنت ونانت روشي براي روندیابي جريان غيرماندگار ارائه نمودند که همانند فرمول مورد به كاربرده شده در روش ماسکینگام با مشخصه‌هاي متغير، بوده و براي روندیابي از هيدروگراف اشل بهره‌گيري مي‌كند. در اين روش هيدروگراف دبي نيز به‌طور همزمان با هيدروگراف اشل روندیابي شده محاسبه مي‌شود.

گاربرشت و برانر[۳] (۱۹۹۱) کاربرد روش ماسکینگام-کونژ با مشخصه‌هاي متغير را در روندیابي سيل در شبكه‌هاي زهکشي بزرگ با آبراهه‌هاي داراي مقاطع مرکب بررسي كردند. اما تانگ و نايت[٤] (۱۹۹۹) روش ماسکینگام-کونژ با مشخصه‌هاي متغير را براي روندیابي سيلاب در آبراهه منشوري با مقطع مركب بكار گرفته و ميزان تاثير روش‌هاي مختلف تعيين روابط دبي- سرعت موج در مقاطع مركب، شيب‌هاي مختلف بستر، ميزان‌هاي متفاوت زبري سيلاب‌دشت و نيز نسبت دبي اوج به دبي پايه بر نتايج روندیابي را بررسي نمودند. نتايج نشان داد که در آبراهه‌هاي با شيب ملايم ميزان‌هاي دبي بيشينه و زمان رسيدن به آن در هيدروگراف خروجي بيش از آبراهه‌هاي با شيب تند تحت تاثير نوع روش بكار رفته براي تعيين رابطه دبي- سرعت موج قرار مي‌گيرد. سزل و گاسپار[٥](۲۰۰۰) با اعمال شماي ماسکینگام-کونژ بر معادله انتقال-پخشيدگي، شرط‌هاي لازم براي برابري پخشيدگي عددي با پخشيدگي فيزيكي و حذف نوسان‌هاي عددي و نيز شرط‌هاي كافي براي پايداري[٦] شماي ماسکینگام-کونژ را تعريف كردند. يونس و لوگو (۲۰۰۱) با توجه به مفهوم پخشيدگي آبي حرکتي[۷]در روش چهارنقطه‌اي مرسوم، مدل ماسکینگام-کونژ را اصلاح نمودند.

به اين ترتيب ديده مي‌شود که به‌رغم پيشرفت‌هاي بدست آمده در زمينه نرم‌افزار و سخت‌افزارهاي رايانه‌اي، موضوع بررسي و بهبود روش‌هاي ساده شده روندیابي بدليل كارايي و ضرورت بكارگيري در موارد ويژه در سرلوحه فعاليت‌هاي مهندسان و پژوهشگران قرار گرفته است. در اين مقاله بررسي جامعي از تعديل‌هاي پيشنهاد شده براي روش روندیابي ماسکینگام ارائه شده و با تدوين مدل رايانه اي براي مجموعه روش‌هاي پيشنهادي، ميزان كارايي و تفاوت شماها و روش‌هاي محاسباتي در روندیابي سيلاب‌هاي واقعي، آزمون و نتايج بدست‌آمده ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

در اين بخش تعديل‌هاي صورت گرفته برروي روش ماسکینگام-کونژ به همراه روش‌هاي مبتني بر اين روش بررسي مي‌شوند. همچنين مدل هيدروديناميكي به كاربرده شده به همراه مدل‌هاي عددي تدوين شده براي روندیابي معرفي مي‌شوند.

روش ماسکینگام-کونژ

برپايه بررسي‌هاي كونژ (۱۹۶۹)، مدل اجزاء محدود موج سينماتيک مي‌تواند با تطابق دقيق پخشيدگي عددي با پخشيدگي فيزيكي, هر دو نوع موج سينماتيک و پخشيدگي را توصيف نمايد. بر اين پايه روش ماسکینگام-

۱- Friction Law
۲- Ranga Raju
۳- Garbrecht & Brunner
٤- Tang & Knight
٥- Szél and Gáspár
٦- Stability
۷- Dynamic Hydraulic Diffusivity

كونژ براي نشان دادن پخشيدگي واقعي موج سيل پيشنهاد شده است. معادله اصلي روندیابي در اين روش همانند معادله بكار رفته در روش ماسكينگام است:

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

كه 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 كه Δt برابر اندازه گام زماني محاسبات است (شكل ۱). ضريب‌هاي روندیابي، C_1، C_2 و C_3 بترتيب زير محاسبه مي‌شوند:

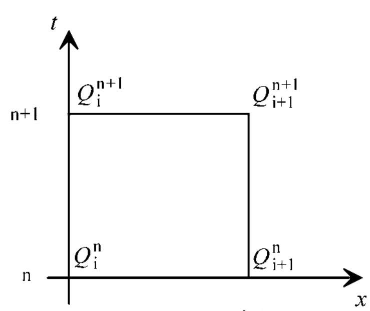
$$C_1 = \frac{KX + 0.5\Delta t}{K(1-X) + 0.5\Delta t} \qquad (۲)$$

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

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

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

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



شكل ۱- شماي سلول محاسباتي

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

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

روش ماسكينگام-كونژ با مشخصه‌هاي ثابت[1]

در اين روش كه به اختصار CPMC ناميده مي‌شود، مشخصه‌هاي روندیابي در همه مراحل ثابت مي‌باشند. اين مشخصه‌ها بر پايه دبي مرجع و بكارگيري 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 كردند:

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

كه 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 ماسكينگام-كونژ 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 مي‌كند. 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 شبكه محاسباتي يعني نقاط (i,n)، (i,n+1)

۱- 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[۱] (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 رونديابي 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[۲] **(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 رونديابي 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 رونديابي 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 رونديابي و محاسبه ضريب‌هاي رونديابي همانند روش ماسکينگام- کونژ با مشخصه‌هاي متغير است. با اين تفاوت که مشخصه‌هاي رونديابي، K و X، برپايه سرعت موج و دبي در مقطع ۳، c_3 و Q_3، به‌صورت زير محاسبه مي‌شوند:

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

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

$$Q_3 = XQ_I + (1-X)Q_O \qquad (۱۳)$$

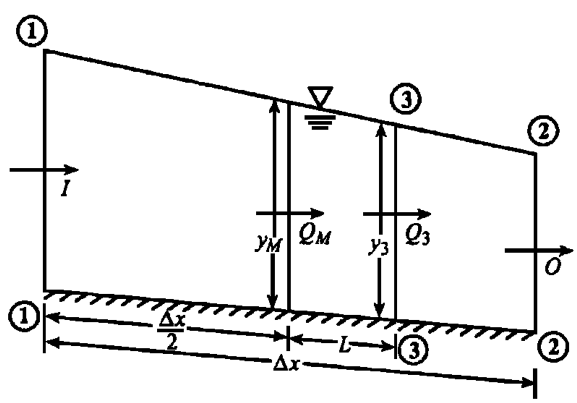
که در آن Q_I، دبي ورودي در آغاز بازه و Q_O، دبي خروجي در پايان بازه را نشان مي‌دهند. معادله رونديابي در اين حالت همانند معادله روش مرسوم ماسکينگام-کونژ است. در اين حالت درآغاز مشخصه‌هاي رونديابي بر پايه دبي خروجي در پايان بازه در زمان t+1 از معادله (۱) و بر پايه مشخصه‌هاي رونديابي محاسبه شده در مرحله 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 رونديابي اصلاح شده در زمان t+1 بدست مي‌آيند. سپس با بهره‌گيري از مشخصه‌هاي رونديابي 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.

۱- Cappelaere

۲- Alternative Variable Parameter Muskingum Method

جدول ۱- روابط محاسبه دبي و سرعت موج مرجع

رديف	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	$\left(\frac{Q}{c}\right)_r = \sum_{i=1}^{3} \left(\frac{Q_i}{c_i}\right) \Big/ 3 \quad for \quad X$ $c_r = \sum_{i=1}^{3} c_i \Big/ 3 = \sum_{i=1}^{3} f(Q_i) \Big/ 3 \quad for \quad K$	تانگ و همكاران (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	$\left(\frac{Q}{c}\right)_r = \sum_{i=1}^{4} \left(\frac{Q_i}{c_i}\right) \Big/ 4 \quad for \quad X$ $c_r = \sum_{i=1}^{4} c_i \Big/ 4 = \sum_{i=1}^{4} f(Q_i) \Big/ 4 \quad for \quad K$	تانگ و همكاران (۱۹۹۹)



شكل ۲- بازه به كاربرده شده در روندیابي به روش ماسكينگام با مشخصه‌هاي متغير

روش ماسکینگام با مشخصه‌هاي متغیر براي روندیابي هیدروگراف عمق[۱] (VPMSH)

پرومال و رانگ راجو (۱۹۹۸) بر پایه استدلال بالا روشي براي روندیابي جریان غیرماندگار برمبناي معادله‌هاي سنت ونانت و بهره‌گیري از هیدروگراف اشل[۲] 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:

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

(۱۵)

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

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:

$$y_{i+1}^{n+1} = C_1 y_i^{n+1} + C_2 y_i^n + C_3 y_{i+1}^n \quad (۱۶)$$

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:

(۱۷)

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

همچنین از رابطة

$$\left|(1/S_0)\partial y/\partial x\right| < 1 \quad (۱۸)$$

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:

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

که در آن V_d نمایانگر عدد ودرنیکوف بوده و به‌صورت

۱- Variable-Parameter Muskingum-Type Method for Stage-Hydrograph Routing

۲- Stage Hydrograph

نسبت سرعت موج سينماتيک به سرعت موج حرکتي، v، بيان مي‌شود:

$$V_d = \frac{c}{v} = \frac{c}{\sqrt{gy}} \qquad (٢٠)$$

چنانچه عدد ودرنيکوف برابر واحد باشد، پخشيدگي آبي از بين مي‌رود. عدد رينولدز سلولي در اين حالت برابر است با:

$$\lambda = \frac{q}{2S\Delta x}(1 - V_d{}^2) \qquad (٢١)$$

به اين ترتيب ضريب‌هاي رونديابي به کمک رابطه‌هاي ارائه شده توسط پونس و يوجويچ (١٩٧٨) محاسبه مي شوند:

$$C_1 = \frac{-1 + C_n - \lambda}{1 + C_n + \lambda} \qquad (٢٢)$$

$$C_2 = \frac{1 + C_n + \lambda}{1 + C_n + \lambda} \qquad (٢٣)$$

$$C_3 = \frac{1 - C_n + \lambda}{1 + C_n + \lambda} \qquad (٢٤)$$

در هريک از روش‌هاي مورد نظر براي سرعت موج که در محاسبه ضريب‌هاي رونديابي وارد مي‌شود، عمق جريان به ضرورت بايد معلوم باشد. ساده‌ترين و رايج‌ترين روش تعيين عمق جريان، بکارگيري فرمول مانينگ و نيز از آزمون و خطا است. وطن‌خواه و کوچک‌زاده (١٣٨٠)، توابعي را به منظور محاسبه صريح عمق عادي در آبراهه‌هايي با اشکال هندسي مختلف ارائه کردند. با توجه به اين که شکل بستر بسياري از رودخانه‌ها را مي‌توان به‌صورت مقطع مستطيلي تقريب نمود، در اين مقاله از روش محاسبه عمق در آبراهه‌هاي مستطيلي شکل بهره‌گيري مي‌شود.

همچنين سرعت موج سينماتيک با توجه به معادله‌هاي مربوط به جريان يکنواخت از جمله معادله مانينگ به‌صورت زير تعيين مي‌شود:

$$c = \frac{dQ}{dA} = \frac{1}{B}\frac{dQ}{dy} = \beta V \qquad (٢٥)$$

که در آن ضريب β در صورت به کاربردن از معادله مانينگ برابر ٥/٣ و V سرعت ميانگين جريان است.

کاربرد روش ماسکينگام-کونژ در مقاطع مرکب

در اين مقاله براي جداسازي جريان در آبراهه اصلي از جريان در سيلابدشت از روش تقسيم‌بندي مقطع مرکب به‌کمک خطوط تقسيم عمودي بهره‌گيري شده است. در اين روش آبراهه اصلي به‌کمک خطوط عمودي از سيلاب‌دشت جدا مي‌شود و به دليل صرفنظر از اثر تداخل بين دو قسمت آبراهه، جريان بيش از ميزان واقعي برآورد مي‌شود (تانگ و نايت, ١٩٩٩).

مدل هيدروديناميکي **HEC-RAS** [١]

نرم‌افزار تحليل سامانه‌هاي رودخانه‌اي، HEC-RAS، توسط مرکز مهندسي آبشناسي رسته مهندسي ارتش آمريکا توسعه يافته و به‌صورت گسترده‌اي براي مدل کردن جريان‌هاي يک‌بعدي ماندگار و غيرماندگار بکار مي‌رود. نسخه گونه 3.1.2 اين مدل که در اين بررسي به کاربرده شده است، قابليت محاسبه پروفيل‌هاي سطح آب در جريان ماندگار، همانندسازي جريان غيرماندگار و نيز محاسبه‌هاي مربوط به انتقال رسوب در بسترهاي متحرک[٢] را دارد.

مدل عددي تدوين شده

به منظور رونديابي سيلاب‌هاي مورد نظر با بهره‌گيري از هر يک از روش‌هاي مشروح، برنامه‌هاي رايانه اي تدوين گرديد که در هر يک از آنها سيلاب‌هاي ورودي به‌کمک روش‌هاي مختلف روش ماسکينگام-کونژ با مشخصه‌هاي

١- Hydrologic Engineering Center’s River Analysis System

٢- Movable Boundary Sediment Transport

ثابت و متغير، روش ماسكينگام جايگزين، روش ماسكينگام با مشخصه‌هاي متغير براي روندیابي هیدروگراف عمق و روش اصلاح شده ماسكينگام برپايه مفهوم پخشيدگي هيدروليكي ديناميک روندیابي شدند. با تنظيم خروجي برنامه مي‌توان هیدروگراف دبي روندیابي شده را در هر مكان دلخواه در طول بازه روندیابي بدست آورد. در هر برنامه امكان گزينش ميزان‌هاي مختلف اندازه گام مكاني و زماني وجود دارد.

داده‌هاي صحرايي

بازه گزينش شده براي روندیابي سيلاب در حدفاصل دو ايستگاه آبسنجي ملاثاني و اهواز در رودخانه كارون قرار دارد. شيب عمومي رودخانه در بازه مورد نظر در حدود ۰/۰۰۰۱۵ مي‌باشد. داده‌هاي اندكي در مورد مقاطع عرضي رودخانه در اين بازه موجود است. بزرگترين عرض سطح آب در اين مقطع (عرض لبريزي يا عرضي كه در آن آبراهه اصلي كاملاً پرآب باشد) در حدود ۱۷۵ متر است. عرض سيلاب‌دشت‌ها و آبراهه اصلي نيز در حدود ۵۶۳ متر است. دبي لبريز در رودخانه كارون به طور ميانگين در حدود ۲۵۰۰ مترمكعب بر ثانيه برآورد شده است (ايدر، ۱۳۷۷). از آنجا كه شكل واقعي مقطع رودخانه در حد فاصل دو ايستگاه آبسنجي در دست نيست برپايه داده‌هاي هندسي موجود يک مقطع مستطيلي معادل در طول بازه روندیابي تعريف شده و سيلاب‌هاي مورد بررسي در اين مقطع معادل روندیابي مي‌شوند.

مشخصه VC كه بقاء حجم را نشان مي‌دهد، بصورت زير محاسبه مي‌شود:

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

در اين بررسي شمار شش هیدروگراف مربوط به سيلاب‌هاي مختلف رودخانه كارون به‌كمک مدل‌هاي تدوين شده براي روش‌هاي مختلف روندیابي مي شوند. در ادامه نتايج اجراي مدل‌هاي عددي ارائه مي‌شود.

نتايج

در اين قسمت به‌منظور بررسي كارايي و دقت روش‌هاي مبتني بر روش ماسكينگام-كونژ، سيلاب‌هاي رودخانه كارون را به‌كمک هر يک از روش‌هاي شرح داده شده روندیابي كرده و با مقايسه نتايج بدست آمده با ميزان واقعي مشاهده شده در بازه روندیابي مناسب‌ترين روش روندیابي براي بكارگيري در شرايط ويژه اين رودخانه گزينش مي‌شود. لازم به يادآوري است كه اندازه گام مكاني در همه محاسبه‌ها برابر ۱۰۰۰ متر و گام زماني برابر يک ساعت درنظر گرفته شده است.

نتايج بدست‌آمده براي هر يک از روش‌هاي مورد اشاره در شكل‌هاي (۳ تا ۱۰) ارائه شده است. در اين شكل‌ها ميزان دبي بيشينه خروجي و زمان رسيدن به آن در هيدروگراف‌هاي روندیابي شده برپايه هر يک از روش‌هاي مورد نظر با ميزان مشاهده شده مقايسه شده‌اند. به اين ترتيب امكان تعيين ميزان انطباق نتايج بدست آمده با ميزان‌هاي مشاهده شده در انتهاي بازه روندیابي به‌كمک مقايسه ميزان پراكندگي نقاط بدست‌آمده از خط ۴۵ درجه يا خط انطباق كامل، كه در شكل‌ها با Per.Line معرفي شده، فراهم مي‌آيد. خطوط %۱۰+ و %۱۰- نيز به ترتيب محدوده بيشتر و كمتر از %۱۰ براي اختلاف ميزان محاسبه شده و مشاهده شده را نشان مي‌دهند. هر يک از نقاط معرف يک سيلاب معين است كه به كمک سال رخداد آن شناخته مي‌شود.

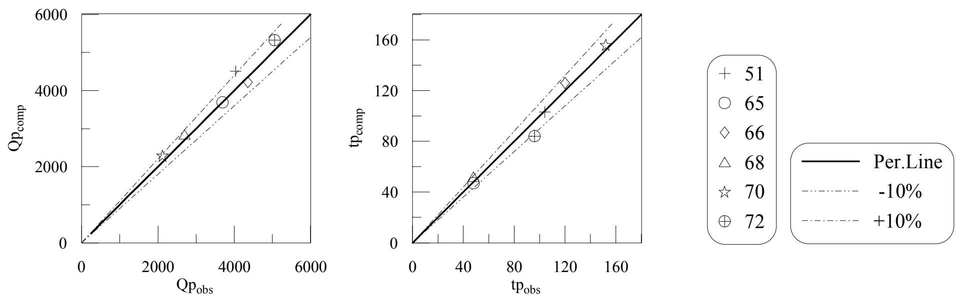
در شكل‌هاي (۶ و ۷) ميزان دبي بيشينه و زمان رسيدن به آن كه برپايه روش‌هاي AVPM و VPMSH روندیابي شده‌اند با ميزان مشاهده شده در پايان بازه مقايسه مي‌شوند.

ملاحظه مي‌شود كه در همه روش‌هاي روندیابي بكارگرفته شده در شكل‌هاي بالا اختلاف بين ميزان‌هاي دبي خروجي بيشينه با ميزان مشاهده شده بيش از %۱۰ نمي‌باشد تنها در مورد نتايج روندیابي سيلاب سال ۱۳۶۵ با روش ماسكينگام كونژ با مشخصه‌هاي متغير اين اختلاف اندكي بيش از %۱۰ است. در مورد زمان رسيدن به بيشينه دبي نيز اختلاف قابل توجهي بين ميزان محاسبه شده و مشاهده

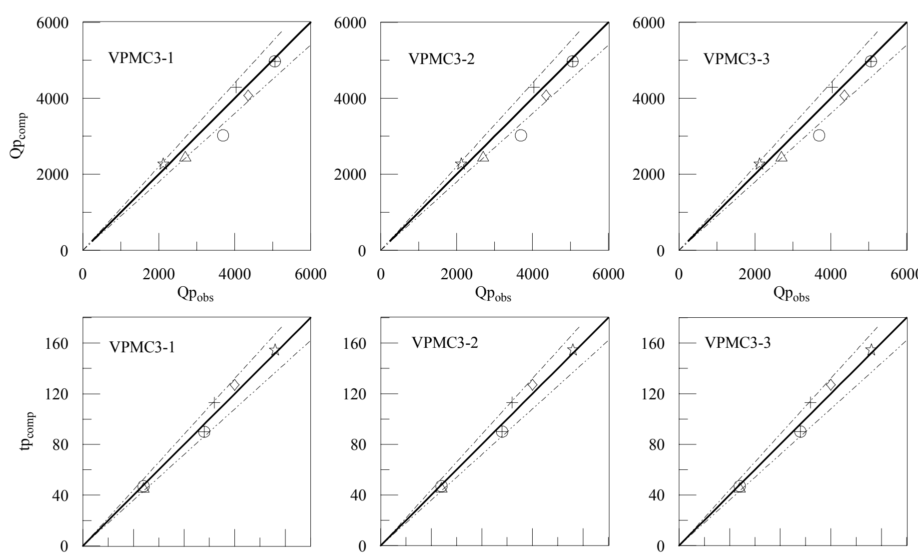
شده وجود ندارد تنها در مورد روندیابي سيلاب سال ۱۳۷۲ با روش‌هاي AVPM و VPMSH اين اختلاف اندكي بيش از ۱۰% است.

نتايج بدست‌آمده از اصلاح روش‌هاي ماسكينگام-كونژ با مشخصه‌هاي ثابت و متغير به‌كمك اعمال عدد ودرنيكوف در محاسبه مشخصه‌هاي روندیابي (بمنظور در نظر گرفتن پخشيدگي هيدروليكي ديناميک) در شكل‌هاي (۸ تا ۱۰) ارائه شده‌اند.

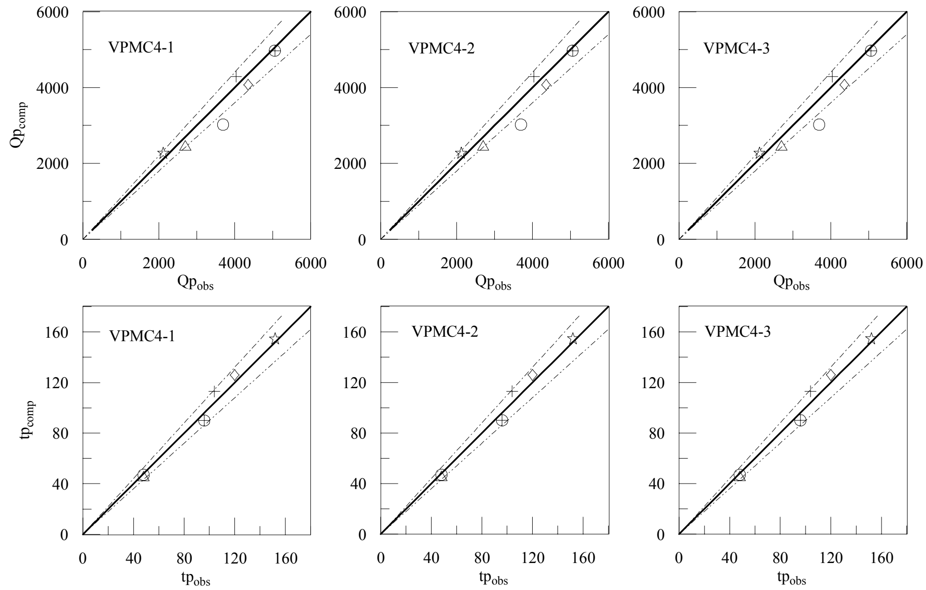
شكل (۱۱) نتايج مقايسه روش‌هاي مختلف بكار رفته براي روندیابي سيلاب‌هاي مورد بررسي با نتايج روندیابي به كمک مدل هيدروديناميكي HEC-RAS را نشان مي‌دهد.



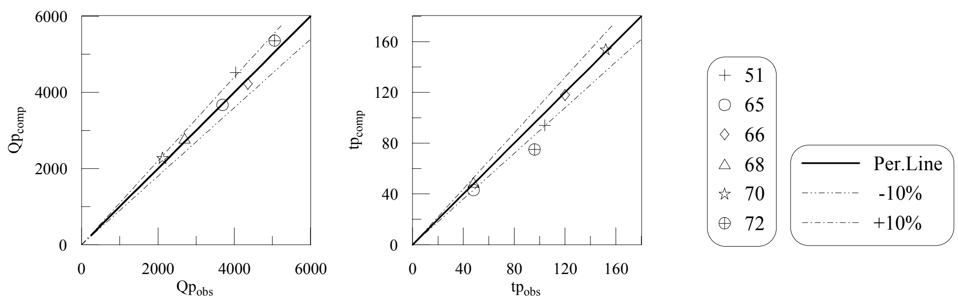
شكل ۳- مقايسه ميزان‌هاي محاسبه شده دبي بيشينه و زمان رسيدن به آن در روش **CPMC** با ميزان‌هاي مشاهده شده



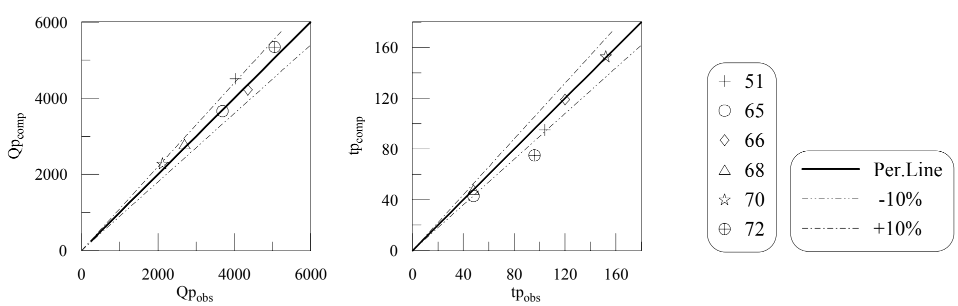
شكل ۴- مقايسه دبي بيشينه و زمان رسيدن به آن برپايه روش سه نقطه‌اي با ميزان‌هاي مشاهده شده



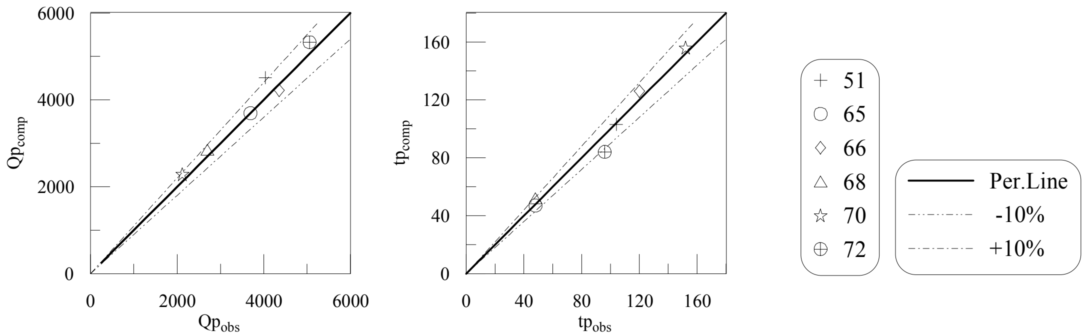
شکل ۵- مقایسه دبي بیشینه و زمان رسیدن به آن برپایه روش چهارنقطه‌اي با میزان‌هاي مشاهده شده



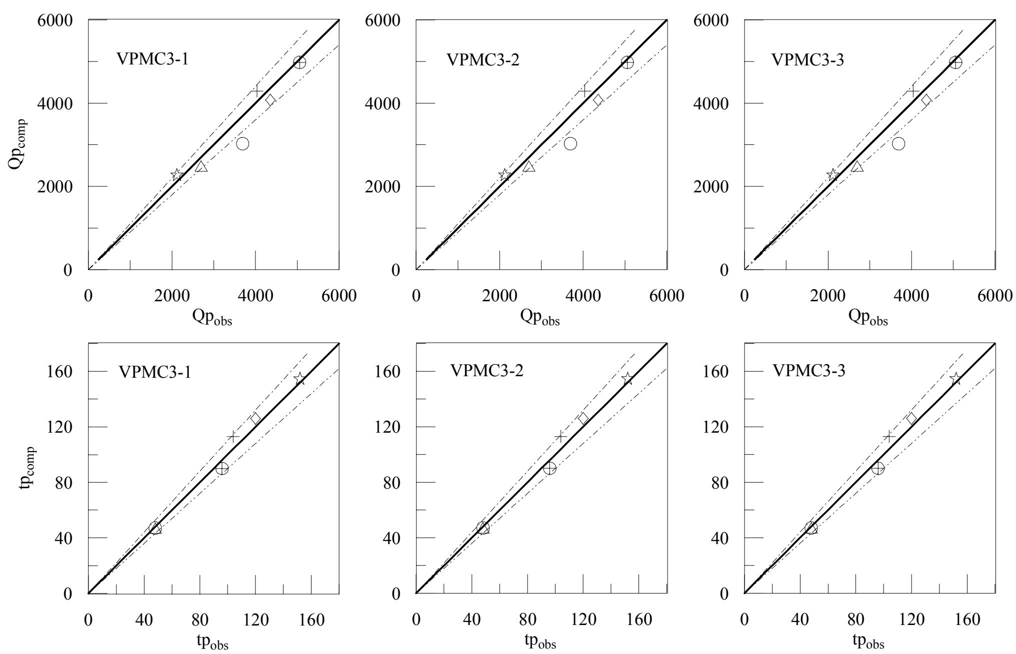
شکل ۶- مقایسه میزان‌هاي محاسبه شده دبي بیشینه و زمان رسیدن به آن برپایه روش **AVPM** با میزان‌هاي مشاهده شده



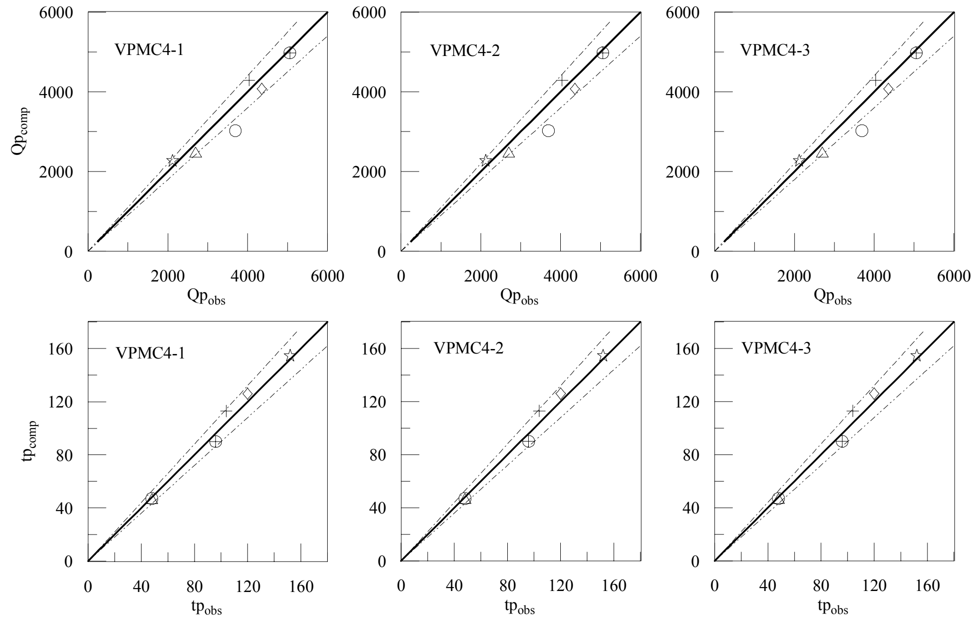
شکل ۷- مقایسه میزان‌هاي محاسبه شده دبي بیشینه و زمان رسیدن به آن برپایه روش **VPMSH** با میزان‌هاي مشاهده شده



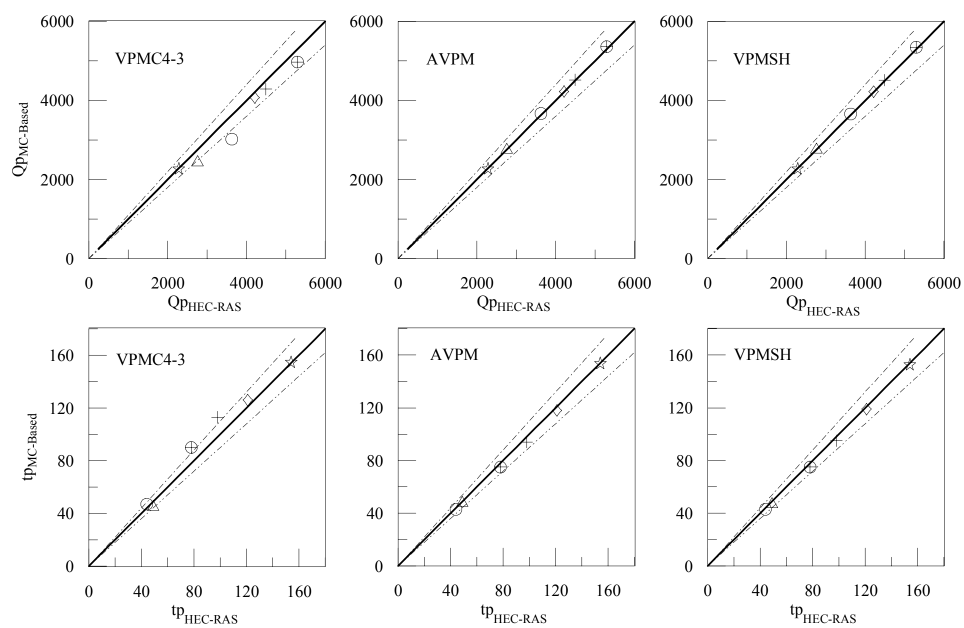
شکل ۸- مقایسه میزان‌هاي دبي بیشینه و زمان رسیدن به آن برپایه روش مشخصههاي ثابت و مفهوم پخشیدگي آبي با میزان‌هاي مشاهده شده



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



شکل ۱۰- مقايسه ميزان‌هاي دبي بيشينه و زمان رسيدن به آن برپايه شماهاي چهارنقطه‌اي و مفهوم پخشيدگي آبي
با ميزان‌هاي مشاهده شده



شکل ۱۱- مقايسه دبي بيشينه و زمان رسيدن به آن در مدل **HEC-RAS** با نتايج روش‌هاي مختلف مبتني بر روش ماسکينگام-کونژ

بحث

در اين مقاله امكان بهره‌گيري از روش‌هاي مبتني بر روش ماسكينگام-كونژ در رونديابي 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 رونديابي بيشتر سيلاب‌ها قابل قبول بوده و تنها در يک مورد خطاي محاسباتي بيش از ١٠ 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 رونديابي 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 رونديابي قادر به توليد منحني دبي- اشل واقعي رودخانه نمي‌باشد، معادله پيشنهادي روش VPMSH براي محاسبه دبي برپايه عمق‌هاي رونديابي 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 رونديابي 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 شرایط موفقیت روش‌هاي آبي روندیابي سیل در رودخانه‌ها، پایان‌نامه کارشناسي ارشد رشته مهندسي عمران، دانشکده فني دانشگاه تهران

۲- وطن خواه محمد آبادي، علیرضا و صلاح کوچک‌زاده، ۱۳۸۰. معادلات صریح براي تعیین عمق جریان یکنواخت در مقاطع هندسي مختلف، مجله کشاورزي و منابع طبیعي 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