



## ۱- مقدمه

مهندسين مدیریت منابع آب، با استفاده از مدل‌های محیطی، اثرات فعالیت‌های مدیریتی و تغییرات محیط را بر روی پاسخ‌های آینده هیدرولیکی و هیدرولوژیکی محیط بررسی می‌کنند. از مهم‌ترین فعالیت‌های موجود در زمینه مدیریت منابع آب می‌توان به روندیابی سیلاب، که می‌تواند به صورت روش‌های هیدرولیکی و هیدرولوژی صورت پذیرد، اشاره نمود. در سال‌های اخیر افزایش جمعیت در مناطق سیل خیز مثل حاشیه رودخانه‌ها موجب افزایش تلفات جانی و خسارات مالی شده است و این نشان دهنده اهمیت پهنه‌بندی سیلاب برای مدیریت صحیح و کنترل ساخت و ساز در چنین مناطقی می‌باشد. برای تعیین پهنه‌بندی سیل آگاهی از تغییرات ارتفاع سیل در طول مسیر رودخانه امری ضروری است؛ بنابراین روندیابی سیل در کاهش تلفات جانی و خسارات مالی ناشی از وقوع سیل نقش اساسی را ایفا می‌کند.

هر دو رویه هیدرولیکی و هیدرولوژی مدل‌سازی سیلاب از معادله پیوستگی استفاده می‌کنند؛ با این حال مدل‌های هیدرولیکی از معادله ممنوم و مدل‌های هیدرولوژی از معادله دبی-ذخیره به عنوان بخش دیگر معادلات حاکم بهره می‌برند. ساده سازی انجام شده در مدل‌های هیدرولوژی ناشی از عدم استفاده از معادله ممنوم، نیاز به تخمین پارامترها از طریق استفاده از روش‌های پیشرفته بهینه‌یابی و داده‌های ثبت‌شده سیلاب‌های گذشته و همچنین عدم اطمینان حاصل از تخمین پارامترهای تاریخی هیدرولوژی را موجب می‌شوند [۲۱]. در مقابل معادلات جریان غیردائمی متغیر تدریجی در رویه‌های هیدرولیکی پیچیده هستند و در اکثر مواقع نمی‌توان آنها را با استفاده از راه حل تحلیلی دقیقی حل نمود؛ بنابراین نیاز است که از روش‌های عددی برای حل معادلات حاکم استفاده شود [۳-۵]. همچنین این مدل‌ها به اطلاعات گسترده هندسی رودخانه و امکانات محاسباتی مناسب نیازمند می‌باشند [۶]. بر اساس اهداف پروژه و امکانات و داده‌های موجود، هر یک از رویه‌های هیدرولیکی یا هیدرولوژی می‌توانند در پروژه‌های طراحی مورد استفاده قرار گیرند.

در بین روش‌های هیدرولیکی، مدل موج دینامیکی که در آن معادلات سنت‌ونانت به صورت کامل با در نظر گرفتن تمامی ترم‌ها (ترم‌های گرادیان فشار، شتاب، ثقل و مقاومت

جریان) مد نظر است، به صورت گسترده‌ای در رودخانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷، ۸]. از طرف دیگر از بعضی ترم‌های معادله ممنوم به منظور ساده‌سازی محاسبات در بعضی دیگر از مدل‌های هیدرولیکی صرف‌نظر می‌شود. مثلاً در مدل موج سینماتیکی ترم‌های شتاب و گرادیان فشار، در مدل دیفیوژن ترم‌های شتاب محلی و جابجایی و در مدل شبه پایدار دینامیکی ترم شتاب محلی از معادله ممنوم حذف می‌شوند [۹-۱۲]. همچنین روش‌های ساده شده دیگری در این زمره قرار گرفته‌اند که از آن جمله می‌توان به روش ماسکینگام-کونژ و روش ماسکینگام با پارامترهای متغیر اشاره نمود [۱۳-۱۶].

پیش از این، تحقیقات گسترده‌ای در ارتباط با جنبه‌های مختلف مدل موج دینامیکی توسط محققین مختلف انجام شده است [۳، ۴، ۸ و ۲۱-۱۷]. در پژوهش حاضر ابتدا با کمک چندین روش عددی، معادلات حاکم بر جریان‌های غیردائمی متغیر تدریجی در چهارچوب مدل موج دینامیکی گسسته سازی شده و در ادامه به بررسی کارایی این روش‌های عددی در شبیه‌سازی سیلاب‌های میدانی پرداخته شده است. روش‌های مورد استفاده شامل روش ضمنی پریسمن، روش صریح لاکس و روش مشخصات می‌باشند [۲۲-۲۵]. سپس با انتخاب روش پریسمن به عنوان روش با کارایی بالاتر به بررسی علت و معلولی عوامل موثر در شبیه‌سازی سیلاب شامل شیب کف کانال، ضریب زبری مانینگ، فاکتور شکل هیدروگراف ورودی، زمان تا اوج، گام مکانی، گام زمانی، پارامتر وزنی و ترم‌های مختلف معادلات سنت‌ونانت، از طریق بیش از ۱۲۰۰ آزمایش عددی پرداخته شده است. در این راستا بین نتایج شبیه‌سازی عددی و عوامل فیزیکی موثر در میدان، به نحو مناسبی ارتباط برقرار شده و عوامل مختلف به بحث گذشته شده‌اند. پارامترهای اساسی مدیریت سیلاب شامل فروکش اوج سیلاب، تاخیر زمانی سیلاب و حجم سیلاب به عنوان عوامل ارزیابی مد نظر قرار گرفته‌اند. طبق اطلاعات نویسندگان چنین بررسی استقراری در ارتباط با روندیابی سیلاب پیش از این مورد توجه قرار نگرفته است.

**معادلات حاکم بر حرکت موج سیلاب:** معادلات حاکم بر جریان‌های متغیر تدریجی به معادلات سنت‌ونانت، معادله پیوستگی و معادله اندازه حرکت، معروف می‌باشند که به ترتیب توسط روابط (۱) و (۲) بیان شده‌اند.

$$D = \frac{1}{2}(D_{i-1}^n + D_{i+1}^n) \quad (7)$$

$$\frac{\partial D}{\partial x} = \frac{(D_{i+1}^n - D_{i-1}^n)}{2\Delta x} \quad (8)$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \frac{D_i^{n+1} - 0.5(D_{i-1}^n + D_{i+1}^n)}{\Delta t} \quad (9)$$

علاوه بر موارد فوق برای مدل کردن موج دینامیکی می توان از روش مشخصات استفاده نمود. در این روش، معادلات مشخصات برای جریان غیردائمی به صورت زیر است [۲۵]:

$$\left[ \frac{\partial V}{\partial t} + (V+c) \frac{\partial V}{\partial x} \right] + \frac{g}{c} \left[ \frac{\partial V}{\partial t} + (V+c) \frac{\partial V}{\partial x} \right] \quad (10)$$

$$= g(S_0 - S_f)$$

$$\left[ \frac{\partial V}{\partial t} + (V-c) \frac{\partial V}{\partial x} \right] - \frac{g}{c} \left[ \frac{\partial V}{\partial t} + (V-c) \frac{\partial V}{\partial x} \right] \quad (11)$$

$$= g(S_0 - S_f)$$

که در این روابط  $c = \sqrt{gA/T}$  سرعت موج است. این معادلات را می توان به فرم تفاضل محدود تبدیل نمود؛ به این ترتیب که در معادله نخست از  $dx/dt = V+c$  (یعنی مشخصه مثبت) و در معادله دوم از  $dx/dt = V-c$  (یعنی مشخصه منفی) در صفحه  $x-t$  استفاده نماییم.

در الگوهای صریح مانند شمای لاکس و همچنین در روش مشخصات برای همه گروه ها در همه گام های زمانی از شرط کورانت به عنوان قید پایداری مطابق رابطه (۱۲) استفاده می شود.

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{|V \mp c|} \quad (12)$$

که در این رابطه  $c = \sqrt{gD_d}$  و  $D_d$  عمق هیدرولیکی می باشد.

**شرایط مرزی و آغازین:** برای انجام حل عددی معادلات سنت ونانت به کمک روش های مختلف موج دینامیکی، نیاز به تعیین شرایط جریان در مرزهای شبکه محاسباتی در قالب شرایط مرزی و آغازین است. به عنوان شرط آغازین جریان به صورت دائمی، که به معنی در جریان بودن دبی پایه در زمان صفر می باشد، در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به اینکه جریان زیر بحرانی می باشد، یک شرط مرزی در بالادست و یک شرط مرزی در پایین دست احتیاج است. به عنوان شرط مرزی بالادست از هیدروگراف دبی در این محل استفاده می گردد. از طرف دیگر برای شرط مرزی پایین دست از منحنی دبی اشل استفاده شده

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \left( \frac{\partial y}{\partial x} - S_0 \right) + gAS_f = 0 \quad (2)$$

در این روابط  $Q$  دبی،  $A$  سطح مقطع جریان،  $x$  مسافت در طول کانال،  $t$  متغیر زمان،  $g$  شتاب گرانش،  $y$  عمق جریان،  $S_0$  شیب کف رودخانه و  $S_f$  شیب اصطکاکی هستند. زمانی که از رابطه مانینگ برای بیان مقاومت جریان استفاده شود، شیب اصطکاکی از رابطه (۳) محاسبه می گردد.

$$S_f = \frac{n^2 V |V|}{R^{4/3}} \quad (3)$$

که در آن  $n$  ضریب زبری مانینگ،  $V=Q/A$  سرعت جریان،  $R=A/P$  شعاع هیدرولیکی و  $P$  محیط مرطوب می باشد.

**الگوی های ضمنی، صریح و روش مشخصات:** در این بخش تقریبات تفاضل محدود مورد استفاده در روش های ضمنی پریسمن، صریح لاکس و مشخصات برای مشتقات جزئی و ضرایب، معرفی می گردند.

روش پریسمن از جمله روش های رایج تفاضل محدود ضمنی است که مقادیر در مراحل زمانی معلوم و مجهول در تقریب مشتقات مکانی و زمانی و همچنین در متغیرهای وابسته استفاده شده اند. در این رویه مشتقات جزئی و ضرایب به صورت زیر تقریب زده شده اند:

$$D = \frac{1}{2} \theta (D_{i+1}^{n+1} + D_i^{n+1}) + \frac{1}{2} (1-\theta) (D_{i+1}^n + D_i^n) \quad (4)$$

$$\frac{\partial D}{\partial x} = \frac{\theta (D_{i+1}^{n+1} - D_i^{n+1})}{\Delta x} + \frac{(1-\theta) (D_{i+1}^n - D_i^n)}{\Delta x} \quad (5)$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \frac{(D_i^{n+1} + D_{i+1}^{n+1}) - (D_i^n + D_{i+1}^n)}{2\Delta t} \quad (6)$$

در این روابط  $\Delta x$  گام مکانی،  $\Delta t$  گام زمانی،  $i$  و  $n$  به ترتیب اندیس های مکانی و زمانی،  $\theta$  پارامتر وزنی و  $D$  پارامتر عمومی در مشتقات جزئی می باشد. این روش برای  $\theta$  بین ۰/۵ تا ۱ بدون قید پایدار است. فاکتور وزنی  $\theta=۱$  منجر به شمای کاملاً ضمنی و  $\theta=۰/۵$  منجر به شمای جعبه می شود [۲۳].

از سوی دیگر در طرح های تفاضل محدود صریح، معادلات جبری صریح برای تعیین شرایط جریان در هر گره شبکه محاسباتی به دست می آیند. شمای لاکس از جمله طرح های تفاضل محدود صریح است که در آن مشتقات جزئی و ضرایب به صورت زیر تقریب زده شده اند [۲۲]:

در این روابط  $T=M\Delta t$ ،  $\Delta t$  گام زمانی و  $M$  تعداد داده‌ها می‌باشد. مقدار مطلوب معیار بقای جرم صد درصد است.

**ارزیابی میدانی مدل‌های موج دینامیکی:** به منظور مقایسه مشاهده‌های میدانی و نتایج مدل‌سازی و همچنین انتخاب بهترین مدل موج دینامیکی (از میان الگوهای تفاضل محدود صریح (لاکس) و ضمنی (پریسمن) و روش مشخصات) برای انجام آزمایش‌های عددی، از داده‌های بازه-ای از رودخانه کارون استان خوزستان استفاده شده است. بازه مورد نظر دارای طولی برابر  $60/5$  کیلومتر، عرض سطح آب  $276/5$  متر، ضریب زبری مانینگ  $0/025$  و شیب بستر  $0/0011$  حد فاصل ایستگاه‌های ملاتانی تا اهواز می‌باشد. برای ارزیابی از دو سیلاب تک‌پیکه و چندپیکه این رودخانه استفاده شده است. هیدروگراف‌های ورودی و روندیابی شده به کمک مدل‌های مختلف موج دینامیکی برای سیلاب‌های تک و چند پیکه به ترتیب در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده‌اند.

بر اساس آزمایش‌های صورت گرفته بر روی تغییر ابعاد شبکه محاسباتی و در نظر گرفتن هماهنگی نتایج با مقادیر مشاهداتی و همچنین شرایط پایداری مدل‌های مختلف، مقادیر گام‌های زمانی و مکانی در سیلاب تک‌پیکه برای الگوی پریسمن به ترتیب  $15$  دقیقه و  $0/5$  کیلومتر و برای روش‌های لاکس و مشخصات به ترتیب به  $50$  ثانیه و  $100$  متر در نظر گرفته شده‌اند. در سیلاب‌های چندپیکه نیز با توجه به طولانی‌تر بودن زمان شبیه‌سازی و همچنین در نظر گرفتن شرایط پایداری مقادیر گام‌های زمانی و مکانی برای الگوی پریسمن به ترتیب  $60$  دقیقه و یک کیلومتر و برای روش‌های لاکس و مشخصات به ترتیب به  $180$  ثانیه و  $250$  متر در نظر گرفته شده‌اند.

با توجه به نتایج شبیه‌سازی این دو سیلاب و هشت سیلاب دیگر برای بازه‌های رودخانه‌های دارلینگ، سرباز و کارون مشاهده می‌شود که مدل‌های تهیه شده از هماهنگی مناسبی با مقادیر مشاهداتی در محدوده وسیعی از پارامترهای ورودی برخوردار می‌باشند [۴۳]. همچنین مشاهده می‌شود که سه الگوی پریسمن، لاکس و مشخصات از لحاظ دقت در سطح تقریباً برابری قرار دارند؛ ولی بررسی‌های دقیق‌تر نشان می‌دهد الگوی پریسمن، با توجه به قابلیت تغییر پارامتر وزنی، در پیش‌بینی مقدار دبی اوج هیدروگراف موثرتر عمل می‌کند. به علاوه با توجه به اینکه

است. در این مقطع، عمق و دبی با زمان تغییر می‌کنند و ارتباط آنها از طریق این منحنی برقرار می‌شود. مقایسه بین الگوی‌های ضمنی، صریح و روش مشخصات نشان می‌دهد که مشکل مدل‌سازی الگوی ضمنی در این است که دستگاه معادلات حاصل با استفاده از تکنیک‌های تکراری مانند نیوتن رافسون قابل حل می‌باشند؛ در حالی که دو روش دیگر چنین نیازی ندارند. از سوی دیگر مدل کردن شرایط مرزی در شماهای تفاضل محدود صریح و مشخصات به مراتب سخت‌تر از شماهای تفاضل محدود ضمنی است. در این شماها از معادلات مشخصه مثبت و منفی به ترتیب در پایین دست و بالادست استفاده می‌گردد.

## ۲- روش پژوهش

**معیارهای بررسی و ارزیابی نتایج:** برای ارزیابی نتایج از سه معیار میزان پایین افتادگی دبی اوج،  $\varepsilon$ ، (رابطه ۱۳)، میزان تاخیر بین هیدروگراف‌های بالادست و پایین دست،  $\xi$ ، (رابطه ۱۴) و معیار بقای جرم،  $VOL$ ، (رابطه ۱۵) استفاده شده است. این معیارها به ترتیب برای کنترل دبی اوج، زمان تا اوج و بقای جرم، که همگی از جمله پارامترهای اساسی مدیریت سیلاب می‌باشند، در نظر گرفته شده‌اند.

$$\varepsilon(\%) = \left(1 - \frac{Q_{po}}{Q_{pi}}\right) \times 100 \quad (13)$$

$$\xi(\%) = \left(1 - \frac{T_{pi}}{T_{po}}\right) \times 100 \quad (14)$$

$$VOL\% = \left(\int_0^T Q_{out} dt \bigg/ \int_0^T Q_{in} dt\right) \times 100 \quad (15)$$

در این روابط  $Q_{pi}$  و  $Q_{po}$  به ترتیب دبی اوج هیدروگراف‌های خروجی و ورودی،  $T_{pi}$  و  $T_{po}$  به ترتیب زمان تا اوج هیدروگراف‌های خروجی و ورودی و  $Q_{in}$  و  $Q_{out}$  به ترتیب دبی خروجی و ورودی بازه در هر لحظه از زمان می‌باشند. انتگرال‌های صورت و مخرج رابطه (۹) را می‌توان با کمک روش‌های انتگرال‌گیری عددی نظیر قانون سیمپسون به صورت رابطه (۱۶) محاسبه نمود:

$$\int_0^T Q dt = \frac{\Delta t}{3} \left[ Q(0) + 4 \sum_{\substack{n=1 \\ Odd}}^{M-1} Q(n\Delta t) + 2 \sum_{\substack{n=2 \\ Even}}^{M-2} Q(n\Delta t) + Q(M\Delta t) \right] \quad (16)$$

معادله منتمم به صورت کامل از معادله ساده شده موج سینماتیکی (بدون ترم‌های اینرسی و گرادیان فشار) نیز استفاده شده است. لازم به ذکر است که طبق بررسی‌های صورت گرفته زمان پایه هیدروگراف ورودی تأثیر بسزایی در معیار بقای جرم دارد؛ در حالی که این زمان بر مقدار دبی اوج و زمان رخ دادن آن بی‌تأثیر است. با در نظر گرفتن این شرایط متناسب با شرایط جریان و کانال مقدار زمان پایه هیدروگراف ورودی به نحوه شایسته‌ای انتخاب شده است، تا تأثیر آن بر معیار بقای جرم حداقل گردد.

پیش از بررسی نتایج، شایان ذکر است که محدوده تغییر پارامترها در آزمایش‌های عددی برای اهداف مختلف و بر اساس تغییرات آنها در میدان طراحی شده‌اند. دو پارامتر زمان تا اوج و ضریب شکل هیدروگراف برای تولید هیدروگراف‌های ورودی متفاوت، متغیر در نظر گرفته شده‌اند. با افزایش  $\gamma$  هیدروگراف ورودی پهن و کشیده‌تر می‌گردد. همچنین با افزایش  $T_p$  علاوه بر پهن شدن هیدروگراف ورودی بازوی بالاروندی آن نیز طولانی‌تر می‌گردد. تغییرات این دو پارامتر می‌تواند انتقال دهنده اثرات عواملی همچون مساحت حوزه، شکل حوزه، مورفولوژی رودخانه، خاک و پوشش گیاهی و شدت و مدت بارندگی باشد. به عنوان مثال شکل هیدروگراف در حوزه‌های بزرگتر نسبت به حوزه‌های کوچکتر کشیده‌تر و پخ‌تر (یعنی زمان تا اوج و فاکتور شکل هیدروگراف بزرگ‌تر) می‌باشد. از طرف دیگر مشخصات سیلاب و بارش نظیر شدت بارش و مدت بارندگی اثرات مهمی در شکل هیدروگراف دارند. هر اندازه مدت بارندگی بیشتر باشد، با توجه به اشباع شدن خاک و افزایش سهم رواناب هیدروگراف شکلی کشیده با پایه زمانی طولانی پیدا می‌کند. همچنین شکل هیدروگراف برای سیلاب‌های سریع با شدت بارش زیاد (یعنی زمان تا اوج و فاکتور شکل هیدروگراف کوچک‌تر) تیزتر از سیلاب‌هایی هستند که ناشی از بارش‌های با شدت کم می‌باشند.

تعیین ضریب زبری مانینگ که بیان‌کننده مقاومت اصطکاکی جریان است، در دنیای واقعی دارای عدم قطعیت‌های فراوانی می‌باشد. برخی از عواملی که موجب عدم اطمینان در تعیین مقدار زبری می‌باشند، شامل: (۱) اختلافات سطح، (۲) تغییرات در شکل و اندازه کانال، (۳) مقدار پوشش گیاهی، (۴) انحناء و مئاندرهای موجود در مسیر، (۵) تغییرات فصول، (۶) تغییر دما و (۷) آبستگي و فرسایش، هستند [۲۳].

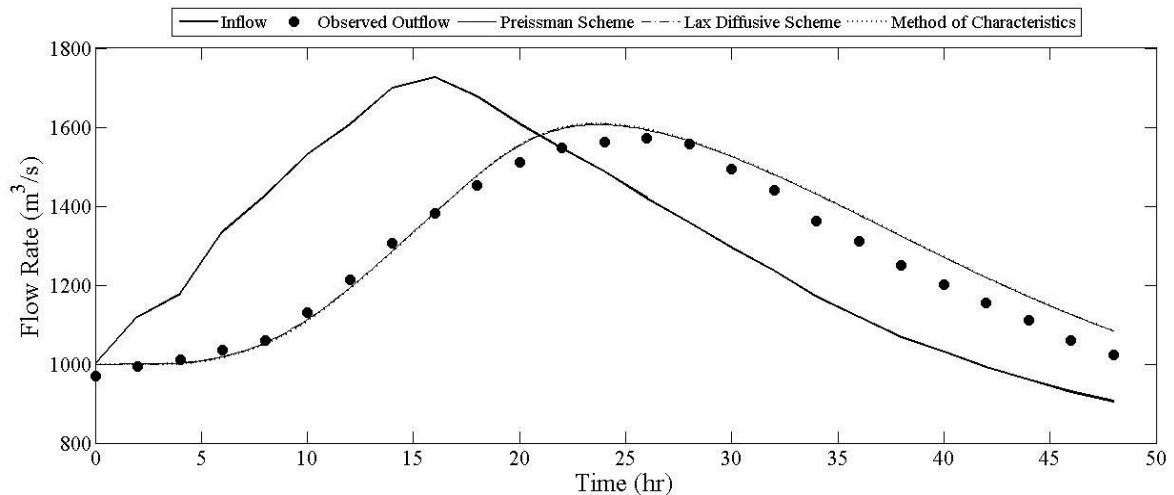
در این روش نیازی به کنترل شرط کورانت، که موجب زیاد شدن زمان انجام محاسبات به دلیل افزایش تعداد گام زمانی می‌گردد، نمی‌باشد و همچنین پایداری بالاتر الگوی پریسمن نسبت به روش‌های لاکس و مشخصات در آزمایش‌های عددی برای بررسی استقراری پارامترهای مؤثر بر حرکت موج سیلاب از روش پریسمن استفاده شده است.

### ۳- نتایج و بحث

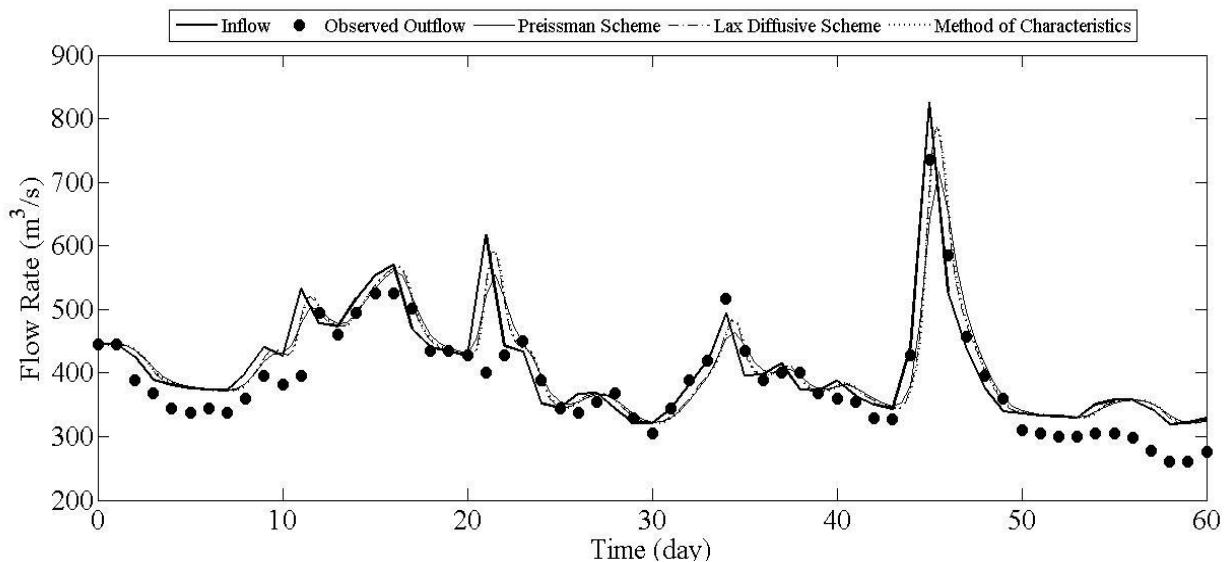
**طراحی آزمایش‌های عددی:** هنگام استفاده از یک مدل برای شبیه‌سازی پدیده‌های محیطی می‌بایست نحوه پاسخ مدل نسبت به تغییر پارامترهای ورودی به درستی مورد بررسی قرار گیرد. در تحقیق حاضر بیش از ۱۲۰۰ آزمایش روندیابی بر اساس ترکیب مشخصات متفاوت کانال (شیب بستر و ضریب زبری)، مشخصات متفاوت جریان (زمان تا اوج و فاکتور شکل هیدروگراف)، مشخصات متفاوت مدل (گام زمانی، گام مکانی و پارامتر وزنی) و معادله اندازه حرکت متفاوت در یک کانال با مقطع مستطیلی به عرض ۵۰ متر و طول ۳۰ کیلومتر اجرا شده است. به عنوان شرط مرزی بالادست از هیدروگراف تولید شده توسط توزیع چهار پارامتری پیرسن نوع سه، رابطه (۱۷)، استفاده شده است.

$$Q(t) = Q_{base} + (Q_{peak} - Q_{base}) \left(\frac{t}{T_p}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \exp\left[\frac{(1-t/T_p)}{\gamma-1}\right] \quad (17)$$

در این رابطه  $Q_{base}$  دبی پایه،  $Q_{peak}$  دبی اوج،  $T_p$  زمان تا اوج،  $t$  پارامتر زمان و  $\gamma$  ضریب چولگی (فاکتور شکل هیدروگراف ورودی) را نشان می‌دهند. دبی پایه و دبی اوج به ترتیب ۱۰۰ و ۵۰۰ متر مکعب بر ثانیه در نظر گرفته شده‌اند. همچنین در این آزمایش‌های محدوده شیب بستر شامل ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۸، ۱، ۲، ۳ (m/km)، محدوده ضریب زبری مانینگ شامل ۰/۰۲، ۰/۰۳، ۰/۰۴، ۰/۰۵، ۰/۰۶ (s/m<sup>1/3</sup>)، محدوده زمان تا اوج هیدروگراف ورودی شامل ۵، ۱۵، ۲۰ (h)، محدوده پارامتر شکل هیدروگراف شامل ۱/۰۵، ۱/۲۵، ۱/۵، (-)، محدوده گام زمانی شامل ۳۰۰، ۶۰۰، ۹۰۰، ۱۵۰۰، ۱۸۰۰ (s)، محدوده گام مکانی شامل ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳، ۵ (km) و محدوده پارامتر وزنی شامل ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸، ۰/۹، ۱ (-) در نظر گرفته شده‌اند. همچنین دبی پایه و دبی اوج به ترتیب ۱۰۰ و ۵۰۰ متر مکعب بر ثانیه در نظر گرفته شده‌اند. به‌علاوه برای بررسی اثرات ترم‌های معادله اندازه حرکت، علاوه بر



شکل ۱: شبیه‌سازی هیدروگراف تک‌پیکه رودخانه کارون



شکل ۲: شبیه‌سازی هیدروگراف چندپیکه رودخانه کارون

اهمیت می‌باشد. به علاوه بررسی اثرات تغییر پارامترها با در نظر گرفتن ترم‌های مختلف معادله اندازه حرکت، می‌تواند قابل توجه باشد. بنابراین از مدل ساده شده موج سینماتیکی نیز در آزمایش‌های استفاده شده است. از طرف دیگر بعضی پارامترها مانند دبی اوج و طول بازه، که بر اساس هدف پروژه انتخاب می‌شوند، در این مطالعه تغییر داده نشده‌اند. همچنین پارامترهایی نظیر عرض بستر و دبی پایه، مطابق پژوهش‌های پیشین، اثرات ناچیزی بر روی نتایج خروجی دارند [۳]. لذا پارامترهای اخیر را در مطالعه حاضر تغییر نداده ایم. به این ترتیب با کمک این آزمایش‌های عددی می‌توان ارتباط بین عوامل فیزیکی موثر بر شکل هیدروگراف و نتایج خروجی را به نحو شایسته‌ای مورد بررسی قرار داد.

بنابراین تعیین مقدار مناسب ضریب زبری و بررسی اثرات آن بر روی نتایج خروجی، امری روشن می‌باشد. پارامتر شیب کف بیان‌کننده اثرات نیروی ثقل بر روی شبیه‌سازی جریان غیردائمی می‌باشد. به علت سطح آزاد نیروی ثقل عامل محرکه در جریان کانال‌های باز است؛ بنابراین مقدار شیب کف نقش اساسی در شبیه‌سازی سیلاب‌ها دارد. اگرچه شمای ضمنی پریرسمن بدون قید پایدار است؛ ولی همگرایی نتایج وابسته به مقدار ابعاد شبکه محاسباتی می‌باشد. همچنین یکی از مراحل مهم استفاده از روش‌های عددی تعیین مقادیر مناسب پارامترهای وابسته به مدل مانند پارامتر وزنی  $\theta$  است. چنین پارامترهایی می‌توانند بر روی نتایج خروجی اثرات قابل توجهی داشته باشند. از این رو بررسی اثرات تغییر این عوامل بر خروجی‌های مدل حائز

زبری درصد فروکش اوج سیلاب و همچنین درصد تاخیر زمانی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش ضریب زبری مانینگ هیدروگراف خروجی پهن‌تر می‌گردد. شدت این تغییرات برای مقادیر شیب بستر کوچکتر بیشتر است. همچنین پهن‌تر شدن هیدروگراف خروجی با افزایش ضریب زبری، با افزایش ضریب چولگی افزایش می‌یابد.

یک از عوامل مؤثر در پهنه بندی سیلاب و کاهش خسارت ناشی از وقوع سیلاب بررسی تغییرات عمق سیلاب است. در شکل (۵) تغییرات شیب کف برای ضریب زبری ۰/۰۲ و ۰/۰۶ و در شکل (۶) تغییرات ضریب زبری برای شیب کف ۰/۰۰۰۲ و ۰/۰۰۰۲ بر روی هیدروگراف عمق خروجی نشان داده شده است. در این دو شکل مقدار ضریب چولگی برابر ۱/۲۵ و مقدار زمان تا اوج ۵ ساعت در نظر گرفته شده‌اند.

بررسی نتایج نشان می‌دهد که با افزایش شیب کف عمق جریان دچار کاهش می‌شود. شدت این تغییرات برای ضریب زبری مانینگ بزرگتر، بیشتر است. همچنین می‌توان گفت با افزایش ضریب زبری مانینگ عمق جریان دچار افزایش می‌شود. شدت این تغییرات برای شیب کف کوچکتر، بیشتر است. بعلاوه به طور کلی مشاهده می‌شود که عمق جریان نسبت به شیب کف، در مقایسه با ضریب زبری مانینگ، حساسیت بیشتری دارد. از جمله عوامل مؤثر دیگر بر تغییرات عمق جریان می‌توان به عرض و شیب جانبی مقطع کانال اشاره نمود.

در جدول (۱) نتایج تغییرات گام مکانی بر روی معیار فروکش با تغییر دیگر پارامترها ارائه شده است. با تجزیه و تحلیل نتایج در می‌یابیم که با افزایش گام مکانی درصد فروکش اوج سیلاب ممکن است دچار کاهش یا افزایش گردد. بررسی‌های دقیق‌تر نشان می‌دهد که این تغییرات اکثراً به صورت رابطه درجه دوم است. همچنین با افزایش گام مکانی، درصد تاخیر در بیشتر موارد دچار تغییر قابل توجهی نمی‌شود و می‌توان گفت تاثیر اصلی تغییرات گام مکانی بر روی معیار فروکش است. همچنین تغییرات گام مکانی تاثیرات ناچیزی بر معیار بقای جرم دارد.

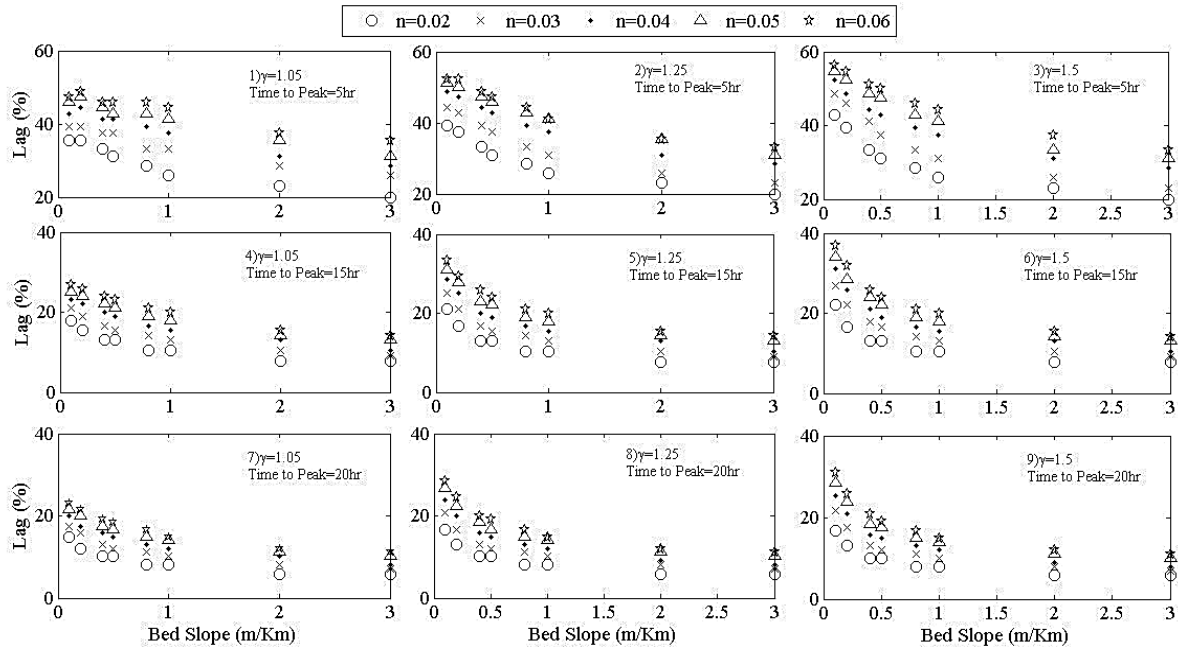
در جدول‌های (۲) نتایج تغییرات گام زمانی بر روی معیارهای فروکش ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش گام زمانی درصد فروکش اوج سیلاب افزایش می‌یابد. همچنین اثرات تغییر گام زمانی بر روی معیار فروکش به مراتب بیشتر از اثرات تغییر گام مکانی است.

**بررسی نتایج آزمایش‌های عددی:** در این بخش به بررسی قیاسی نتایج آزمایش‌های عددی و بحث بر روی تغییر پارامترهای شیب کف و ضریب زبری مانینگ (مشخصات وابسته به فیزیک رودخانه)، فاکتور شکل هیدروگراف و زمان تا اوج (مشخصات وابسته به سیلاب و حوزه آبریز)، گام‌های مکانی و زمانی و پارامتر وزنی (عوامل وابسته به روش حل عددی) و ترم‌های ثقل و گرادیان فشار (عوامل وابسته به معادلات حاکم) و اثرات این تغییرات بر پارامترهای اساسی مدیریت سیلاب پرداخته می‌شود.

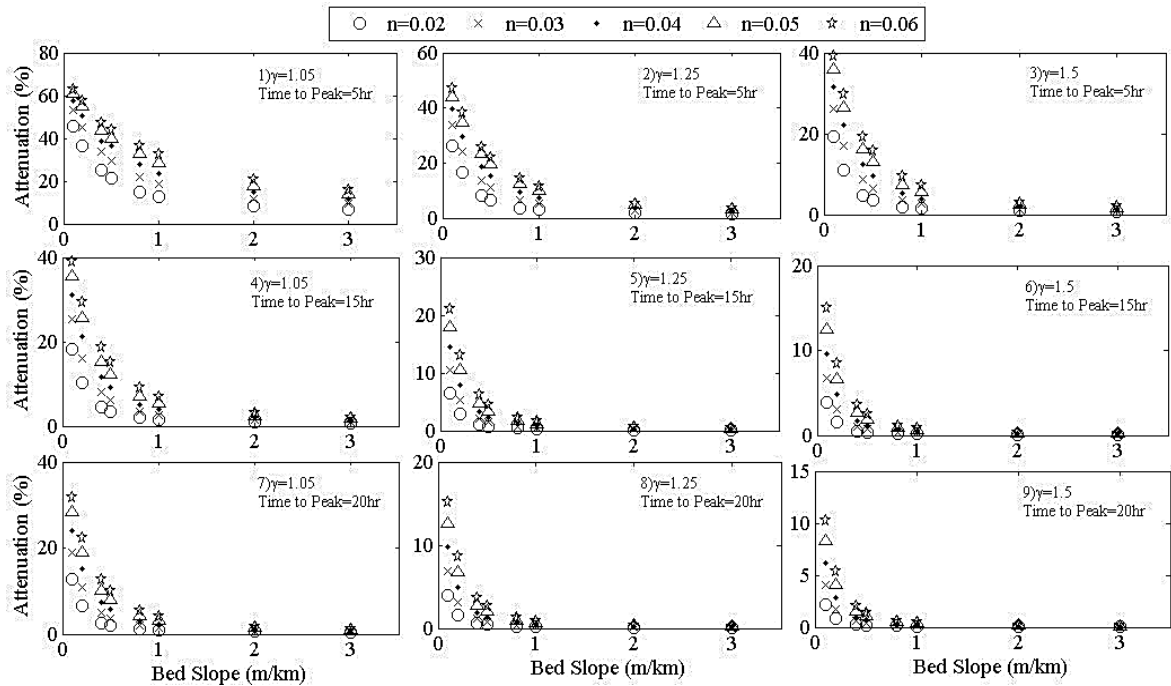
ابتدا به طور کلی می‌توان گفت برای همه پارامترهای مد نظر تغییر پارامترها بیشترین اثر را بر معیار فروکش از خود به جای می‌گذارد. در رتبه بعدی معیار تاخیر قرار گرفته است و معیار بقای جرم کمترین تاثیر پذیری را از تغییر پارامترها از خود نشان می‌دهد. به ترتیبی که می‌توان گفت شمای ضمنی پرسمن به نحو شایسته و مناسبی در بقای جرم عمل نموده است و تغییر عوامل ورودی در این مورد تقریباً بی اثر می‌باشد.

نتایج آزمایش‌های عددی مربوط به اثرات عوامل وابسته به فیزیک رودخانه و مشخصات وابسته به سیلاب و حوزه آبریز بر روی معیارهای فروکش و تاخیر به ترتیب در شکل‌های (۳) و (۴) ارائه شده‌اند. هر یک از این شکل‌ها از سه شکل داخلی تشکیل شده است که هر یک از این شکل‌های داخلی مشخص کننده یک هیدروگراف ورودی خاص با ضریب چولگی و زمان تا اوج خاص می‌باشد و در آن ضریب زبری در پنج حالت و شیب کف در هشت حالت تغییر داده شده است.

بررسی نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فاکتور شکل هیدروگراف معیار فروکش کاهش و برعکس درصد تاخیر هیدروگراف خروجی نسبت به هیدروگراف ورودی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر با افزایش زمان تا اوج درصد فروکش اوج سیلاب و درصد تاخیر هر دو دچار کاهش می‌شوند. افزایش شیب کف درصد فروکش اوج سیلاب و درصد تاخیر کاهش می‌یابند، هرچند شدت این تغییرات در معیار تاخیر کمتر می‌باشد. بعلاوه با افزایش شیب کف هیدروگراف خروجی تیزتر می‌شود. شدت این تغییرات برای مقادیر زبری کوچکتر بیشتر می‌باشد. همچنین تیزتر شدن هیدروگراف خروجی با افزایش شیب کف، با کاهش ضریب چولگی افزایش می‌یابد. از طرف دیگر با افزایش ضریب



شکل ۳: اثرات تغییر شیب کف، ضریب زبری و شکل هیدروگراف بر معیار فروکش سیلاب



شکل ۴: اثرات تغییر شیب کف، ضریب زبری و شکل هیدروگراف بر معیار تاخیر

افزایش و گاهی با کاهش روبرو می‌گردد. به‌علاوه تغییرات گام زمانی تاثیر بسیار ناچیزی بر معیار بقای جرم دارد. یکی از قابلیت‌ها بارز روش پریسمن در مقابل دیگر شمایای موج دینامیکی این موضوع است که در روش پریسمن امکان تغییر تیزی هیدروگراف خروجی، با تغییر دادن

بررسی‌های دقیق‌تر نشان می‌دهد با افزایش شیب بستر و کاهش ضریب زبری مانینگ اثرات تغییر گام زمانی بر روی معیار فروکش افزایش می‌یابد. همچنین تغییرات گام زمانی نسبت به تغییرات گام مکانی تاثیرات بیشتری بر معیار تاخیر دارد. با افزایش گام زمانی، معیار تاخیر گاهی با

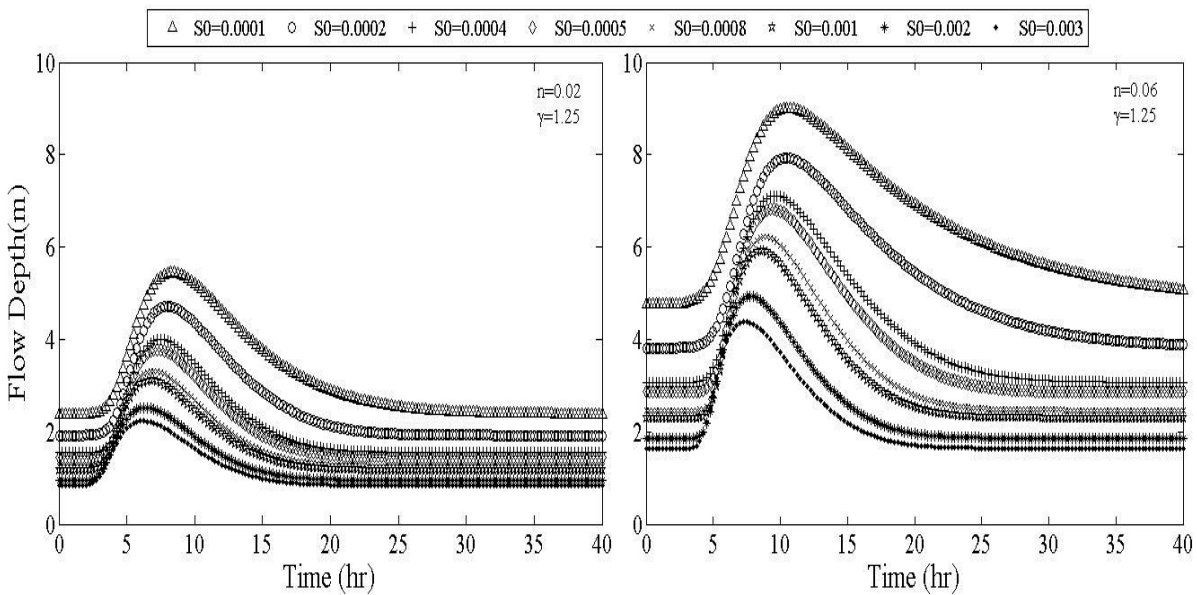


و یا پارامتر وزنی می‌باشد. همچنین می‌توان گفت اثرات تغییر پارامتر وزنی بر روی نتایج بیشتر از اثرات تغییر گام زمانی می‌باشد. حساسیت کم مدل عددی به تغییر ابعاد شبکه محاسباتی خصوصاً گام مکانی یکی از عوامل مؤثر در کارایی آن می‌باشد.

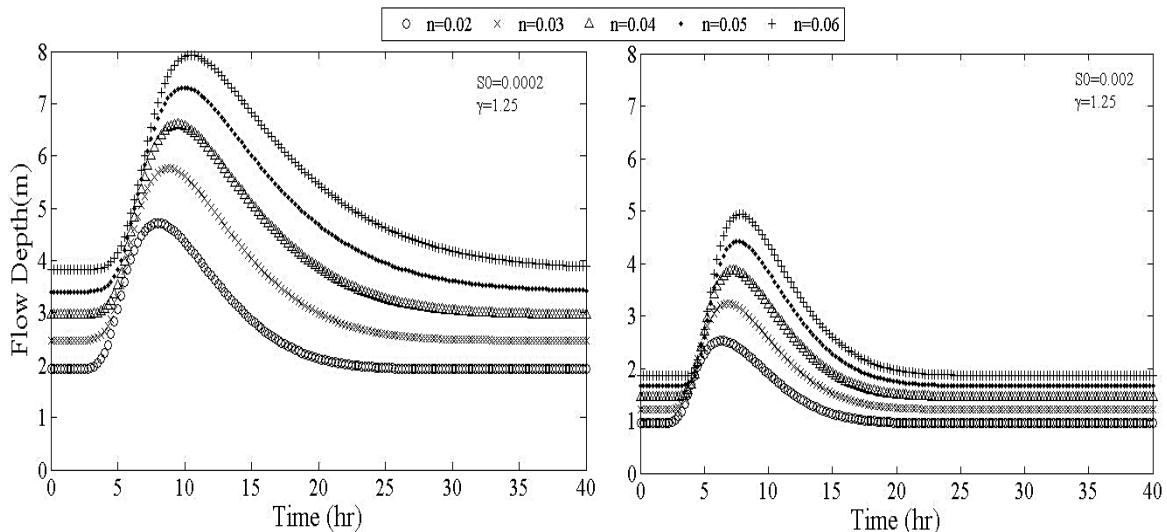
در ادامه، عوامل وابسته به معادلات حاکم یعنی اثرات نادیده گرفتن ترم‌های گرادیان فشار و ثقل بر روی نتایج خروجی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. برای مدل کردن این شرایط از روش موج سینماتیکی، که در آن در معادله اندازه حرکت از ترم‌های اینرسی و گرادیان فشار صرف نظر شده، در مقابل روش موج دینامیکی استفاده شده است. در شکل (۷) بخش‌های b و c از نوع نمودارهای پراکنده هستند.

پارامتر وزنی، وجود دارد. در جدول (۳) نتایج تغییرات پارامتر وزنی بر روی معیار فروکش ارائه شده است. بر این اساس مشاهده می‌شود که با افزایش پارامتر وزنی موج سیل پخش‌تر می‌شود؛ به عبارت دیگر دبی اوج کاهش می‌یابد. بررسی‌های دقیق‌تر نشان می‌دهد مشابه تغییرات گام زمانی با افزایش شیب بستر و کاهش ضریب زبری مانینگ اثرات تغییر پارامتر وزنی بر روی معیار فروکش افزایش می‌یابد. همچنین افزایش این پارامتر تاثیرات ناچیزی بر معیار تأخیر زمانی، عدد کورانته و معیار بقای جرم دارد.

در مجموع با مقایسه اثرات تغییر پارامترهای وابسته به مدل موج دینامیکی مشاهده می‌گردد اثرات تغییر گام مکانی بر روی نتایج خروجی به مراتب کمتر از اثرات تغییر گام زمانی



شکل ۵: اثرات تغییر شیب کف بر روی عمق جریان برای دو مقدار ضریب زبری مانینگ



شکل ۶: اثرات تغییر ضریب زبری بر روی عمق جریان برای دو مقدار شیب بستر

جدول ۱: اثرات تغییرات گام مکانی بر روی معیار فروکش

$\Delta x$ (km)			$S_0$							
			$\gamma=1/0.5$				$\gamma=1/5$			
$n=0/0.2$	$n=0/0.4$	$n=0/0.6$	$0/0.001$	$0/0.004$	$0/0.008$	$0/0.03$	$0/0.001$	$0/0.004$	$0/0.008$	$0/0.03$
0/5	-	-	18/1487	4/5920	2/0187	0/7880	3/8190	0/5213	0/2072	0/0796
1	-	-	18/1478	4/5923	2/0191	0/7882	3/8189	0/5214	0/2072	0/0796
1/5	-	-	18/1463	4/5928	2/0198	0/7884	3/8188	0/5215	0/2073	0/0796
2	-	-	18/1442	4/5935	2/0207	0/7886	3/8187	0/5217	0/2074	0/0796
2/5	-	-	18/1415	4/5944	2/0219	0/7891	3/8185	0/5220	0/2075	0/0797
3	-	-	18/1382	4/5955	2/0233	0/7895	3/8183	0/5223	0/2077	0/0797
5	-	-	18/1196	4/6012	2/0320	0/7922	3/8171	0/5242	0/2086	0/0799
-	0/5	-	31/0116	11/7673	5/1653	1/4378	9/6431	1/7534	0/5778	0/1448
-	1	-	31/0596	11/7666	5/1663	1/4383	9/6428	1/7527	0/5780	0/1448
-	1/5	-	31/0564	11/7554	5/1679	1/4392	9/6423	1/7542	0/5782	0/1449
-	2	-	31/0519	11/7638	5/1701	1/4404	9/6417	1/7550	0/5786	0/1450
-	2/5	-	31/0461	11/7617	5/1729	1/4420	9/6408	1/7559	0/5792	0/1451
-	3	-	31/0390	11/7590	5/1762	1/4439	9/6398	1/7571	0/5798	0/1453
-	5	-	30/9986	11/7424	5/1941	1/4554	9/6337	1/7639	0/5835	0/1463
-	-	0/5	39/1832	18/8196	9/1575	2/0889	14/9947	3/5950	1/1661	0/2145
-	-	1	39/1809	18/7719	9/1582	2/0901	14/9943	3/5955	1/1665	0/2146
-	-	1/5	39/1771	18/6613	9/1593	2/0921	14/9935	3/5964	1/1672	0/2148
-	-	2	39/1717	18/6549	9/1607	2/0948	14/9924	3/5976	1/1681	0/2150
-	-	2/5	39/1649	18/6467	9/1625	2/0984	14/9910	3/5991	1/1693	0/2153
-	-	3	39/1565	18/6367	9/1646	2/1028	14/9893	3/6009	1/1708	0/2156
-	-	5	39/1089	18/5778	9/1733	2/1288	14/9793	3/6116	1/1793	0/2179

جدول ۲: اثرات تغییرات گام زمانی بر روی معیار فروکش

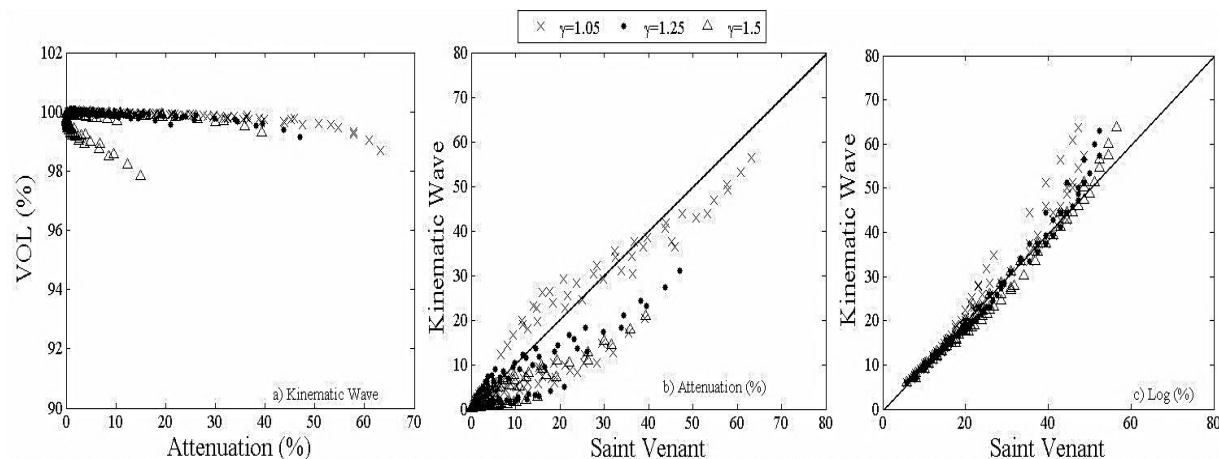
$\Delta t$ (sec)			$S_0$							
			$\gamma=1/0.5$				$\gamma=1/5$			
$n=0/0.2$	$n=0/0.4$	$n=0/0.6$	$0/0.001$	$0/0.004$	$0/0.008$	$0/0.03$	$0/0.001$	$0/0.004$	$0/0.008$	$0/0.03$
300	-	-	17/5600	3/7464	1/2692	0/2922	3/6587	0/4198	0/1296	0/0293
600	-	-	17/8650	4/1652	1/6331	0/5336	3/7371	0/4691	0/1674	0/0526
900	-	-	18/1442	4/5935	2/0207	0/7886	3/8187	0/5217	0/2074	0/0796
1500	-	-	18/7349	5/4782	2/8320	1/2640	3/9705	0/6237	0/2924	0/1280
1800	-	-	19/1003	5/9728	3/1302	1/6368	4/0567	0/6725	0/3275	0/1646
-	300	-	30/6229	10/7698	4/1112	0/6441	9/4661	1/5898	0/4545	0/0647
-	600	-	30/8407	11/2603	4/6519	1/0212	9/5553	1/6720	0/5172	0/1029
-	900	-	31/0519	11/7638	5/1701	1/4404	9/6417	1/7550	0/5786	0/1450
-	1500	-	31/4691	12/6985	6/1976	2/2629	9/8168	1/9269	0/7034	0/2326
-	1800	-	31/6753	13/2099	6/6886	2/5397	9/9168	1/9970	0/7642	0/2628
-	-	300	38/8491	17/7371	7/9559	1/1174	14/8299	3/3899	1/0018	0/1129
-	-	600	39/0113	18/1995	8/5641	1/6162	14/9112	3/4928	1/0850	0/1652
-	-	900	39/1717	18/6549	9/1607	2/0948	14/9924	3/5976	1/1681	0/2150
-	-	1500	39/4851	19/5609	10/3724	3/0457	15/1531	3/8013	1/3426	0/3151
-	-	1800	39/6460	20/0423	10/8454	3/5177	15/2397	3/9071	1/4191	0/3655

جدول ۳: اثرات تغییرات پارامتر وزنی بر روی معیار فروکش

$\theta (-)$			$S_0$								
			$\gamma=1/0.5$			$\gamma=1/5$					
$n=0/0.2$	$n=0/0.4$	$n=0/0.6$	0/0001	0/0004	0/0008	0/003	0/0001	0/0004	0/0008	0/003	
0/5	-	-	17/2665	3/3150	0/9029	0/0677	3/5824	0/3705	0/0917	0/0069	
0/6	-	-	17/5211	3/6835	1/2224	0/2724	3/6509	0/4137	0/1245	0/0276	
0/7	-	-	17/7726	4/0496	1/5419	0/4782	3/7182	0/4567	0/1557	0/0483	
0/8	-	-	18/0211	4/4130	1/8613	0/6850	3/7852	0/5000	0/1907	0/0691	
0/9	-	-	18/2665	4/7732	2/1799	0/8925	3/8522	0/5435	0/2241	0/0901	
1	-	-	18/5087	5/1300	2/4974	1/1005	3/9191	0/5874	0/2578	0/1113	
-	0/5	-	30/4167	10/2962	3/5829	0/2787	9/3772	1/5104	0/3937	0/0284	
-	0/6	-	30/6007	10/7226	4/0400	0/6098	9/4533	1/5811	0/4459	0/0611	
-	0/7	-	30/7828	11/1435	4/4945	0/9418	9/5289	1/6504	0/4987	0/0945	
-	0/8	-	30/9627	11/5585	4/9458	1/2742	9/6042	1/7200	0/5519	0/1281	
-	0/9	-	31/1405	11/9675	5/3933	1/6065	9/6791	1/7900	0/6055	0/1620	
-	1	-	31/3162	12/3703	5/8362	1/9311	9/7537	1/8603	0/6595	0/1961	
-	-	0/5	38/6893	17/2709	7/3696	0/6346	14/7483	3/2827	0/9172	0/0648	
-	-	0/6	38/8289	17/6745	7/8919	1/0507	14/8186	3/3737	0/9885	0/1073	
-	-	0/7	38/9671	18/0717	8/4045	1/4680	14/8883	3/4632	1/0600	0/1501	
-	-	0/8	39/1028	18/4622	8/9104	1/8859	14/9578	3/5527	1/1319	0/1933	
-	-	0/9	39/2392	18/8460	9/4092	2/3037	15/0269	3/6424	1/2044	0/2368	
-	-	1	39/3732	19/2231	9/9004	2/7206	15/0957	3/7322	1/2774	0/2806	

شیب کف و مقادیر بزرگتر ضریب زبری مانینگ اختلاف بیشتری با روش موج سینماتیکی دارد. خطای محاسبه حجم برای روش موج سینماتیکی در تمامی موارد کمتر از ۲/۵٪ و در اکثر موارد کمتر از ۱٪ است. همچنین در تمامی موارد خطای محاسبه حجم به صورت از دست رفتن حجم می‌باشد. همچنین بررسی دقیق‌تر نشان می‌دهد که خطای محاسبه حجم برای  $\gamma=1/5$  بیشتر از  $\gamma=1/0.5$  است، به عبارت دیگر با پهن شدن هیدروگراف ورودی این خطا افزایش پیدا می‌کند.

به این ترتیب که هر اندازه نقاط به یک خط با شیب ۴۵ درجه نزدیک‌تر باشد، اختلاف دو روش کمتر خواهد بود. به طور کلی جبهه موج سینماتیکی نسبت به موج سینماتیکی تیزتر شبیه‌سازی شده است. همچنین مشاهده می‌شود که روش موج سینماتیکی در اکثر موارد درصد فروکش اوج سیلاب را کمتر از روش موج سینماتیکی پیش‌بینی نموده است. به علاوه بررسی درصد تاخیر زمانی نشان می‌دهد که در بسیاری از موارد اختلاف زمان تا اوج نتایج روش موج سینماتیکی با روش موج سینماتیکی ناچیز است. بررسی‌های دقیق‌تر روشن می‌کند که نتایج این روش برای مقادیر کم



شکل ۷: بررسی تاثیر ترم‌های اینرسی و گرادیان فشار بر روی پارامترهای اساسی مدیریت سیلاب

## ۷- نتیجه گیری

اهمیت تحقیق حاضر در تشخیص محدوده‌ای از پارامترها است که در آن محدوده نتایج دارای حساسیت بیشتری نسبت به تغییر آن پارامتر می‌باشند. همچنین به صورت استقرار عوامل موثر در شبیه‌سازی سیلاب مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. با توجه به اینکه نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیلاب در رودخانه‌های طبیعی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی در کانال مصنوعی طی آزمایش‌های عددی قابل مقایسه و مشابه می‌باشند، می‌توان نتایج حاصل از این آزمایشات عددی را، که در محدوده جامعی از پارامترهای ورودی انجام شده‌اند، به رودخانه‌های طبیعی تعمیم داد. به طور خلاصه در ارتباط با وابستگی نتایج عددی و عوامل فیزیکی می‌توان گفت اثرات تخمین نادرست در مقدار زبری و شیب بستر بر نتایج در حوزه‌های آبریز وسیع‌تر و یا بارش‌های طولانی‌تر، از حوزه‌های کوچکتر یا سیلاب‌های ناگهانی بیشتر است. همچنین برای حوزه‌های با شیب بستر بیشتر و یا تنش برشی کمتر اثرات عوامل وابسته به مدل موج دینامیکی از قبیل گام زمانی و پارامتر وزنی بر روی هیدروگراف خروجی بیشتر است. علاوه بر این اثرات نادیده گرفتن ترم‌های شتاب و گرادبان فشار برای هیدروگراف‌های تیزتر (مقادیر کوچکتر فاکتور شکل هیدروگراف و زمان تا اوج)، مثلاً حوضه‌های کوچکتر و یا بارش‌های با شدت بیشتر و مدت کوتاه‌تر، بیشتر می‌باشد. از سوی دیگر خطای روش موج سینماتیکی به خصوص برای رودخانه‌های طبیعی با شیب بستر کوچکتر و ضریب زبری مانینگ بزرگتر، بیشتر می‌باشد.

## مراجع

- [4] Akbari, G.H. and Barati, R., *Comprehensive analysis of flooding in unmanaged catchments*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management, Vol. 165, No. 4, pp. 229-238, **2012**.
- [5] Singh, V. P., *Flow routing in open channels: some recent advances*, Notes downloaded from the site <http://www.riverflow2004.unina.it> (Date of access: February 14, 2010), **2004**.
- [6] Samani, H. M. V., and Shamsipour, G. A., *Hydrologic flood routing in branched river systems via nonlinear optimization*, Journal of Hydraulic Research, Vol. 42, No. 1, pp. 55-59, **2004**.
- [7] Zhang X. Q., and Bao, W. M., *Modified Saint-Venant equations for flow simulation in tidal rivers*, Water Science and Engineering, Vol. 5, No. 1, pp. 34-45, **2012**.
- [8] Zhang, Y., *Simulation of open channel network flows using finite element approach*, Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, Vol. 10, No. 5, pp. 467-478, **2005**.
- [9] Tsai, C.W., *Applicability of kinematic, noninertia, and quasisteady dynamic wave models to unsteady flow routing*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 129, No. 8, pp. 613-627, **2003**.
- [10] Wang, G.T., Chen, S., Boll, J., and Singh, V.P., *Nonlinear convection-diffusion equation with mixing-cell method for channel flood routing*, Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 8, No. 5, pp. 259-265, **2003**.
- [11] Moramarco, T. Pandolfo, C., and Singh, V.P., *Accuracy of kinematic wave and diffusion wave approximations for flood routing, I: steady analysis*. Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 13, No. 11, pp. 1078-1088, **2008**.
- [12] Moramarco, T. Pandolfo, C., and Singh, V.P., *Accuracy of kinematic wave approximation for flood routing. II: unsteady analysis*, Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 13, No. 11, pp. 1089-1096, **2008**.
- [13] Ponce, V.M., and Lugo, A., *Modeling looped ratings in Muskingum-Cunge routing*, Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 6, No. 2, pp. 119-124, **2001**.
- [14] Wang, G.T., Yao, C., Okoren, C., and Chen, S., *4-Point FDF of Muskingum Method Based on the Complete St Venant Equations*, Journal of Hydrology, Vol. 324, pp. 339-349, **2006**.
- [15] Perumal, M., and Sahoo, B., *Volume conservation controversy of the variable parameter Muskingum-Cunge method*, Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 16, No. 4, pp. 391-393, **2011**.
- [1] Barati, R., *Discussion of 'Parameter Estimation for Nonlinear Muskingum Model based on Immune Clonal Algorithm*, Journal of Hydrologic Engineering, ASCE, Vol. 16, No. 4, pp. 391-393, **2011**.
- [2] Barati, R., *Parameter estimation of nonlinear Muskingum models using Nelder-Mead Simplex algorithm*, Journal of Hydrologic Engineering, ASCE, Vol. 16, No. 11, pp. 946-954, **2011**.
- [3] Akbari, G.H. Nezhad, A.H. and Barati, R., *Developing a model for analysis of uncertainties in prediction of floods*, Journal of Advanced Research, Vol. 3, No. 1, pp. 73-79, **2012**.

- [20] Anderson, B.G., Rutherford, I.D., and Western, A.W., *An analysis of the influence of riparian vegetation on the propagation of flood waves*, Environmental Modelling & Software, Vol. 21, No. 9, pp. 1290-1296, **2006**.
- [21] Kuiry, S. N., Sen, D., and Bates, P. D., *Coupled 1D-Quasi 2D flood inundation model with unstructured grids*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 136, No. 8, pp. 493-506, **2010**.
- [22] Sturm, T. W., *Open Channel Hydraulics*, McGraw-Hill Book Company, 493p, **2001**.
- [23] Akan, A.O., *Open Channel Hydraulics*, Elsevier, 364p, **2006**.
- [24] Chow, V. T., Maidment, D. R., and Mays, L. W., *Applied Hydrology*, McGraw-Hill International Editions: Singapore, 572p, **1988**.
- [25] Chaudhry, M. H., *Applied Hydraulic Transients (2nd edition)*, Van Nostrand Reinhold Company: New York, 503p, **1987**.
- of Hydraulic Engineering, Vol. 134, No. 4, pp. 475-485, **2007**.
- [16] Song X. M., Kong F. Z., Zhu Z. X. *Application of Muskingum routing method with variable parameters in ungauged basin*, Water Science and Engineering, Vol. 4, No. 1, pp. 1-12, **2011**.
- [17] Venutelli, M., *Stability and accuracy of weighted four-point implicit finite difference schemes for open channel flow*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 128, No. 3, pp. 281-288, **2002**.
- [18] Venutelli, M., *Analysis of dynamic wave model for unsteady flow in an open channel*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 137, No. 9, pp. 1072-1078, **2011**.
- [19] Helmiö, T., *Unsteady 1D flow model of a river with partly vegetated floodplains application to the Rhine River*, Environmental Modelling & Software, Vol. 20, No. 3, pp. 361-375, **2005**.