

## مقایسه روشهای هیدرولیکی روندیابی سیل در بازه‌ای از رودخانه دوآب صمصامی

روح الله کریمیان کاکلی<sup>1\*</sup>، سید جواد ساداتی نژاد<sup>2</sup>، افشین هنربخش<sup>3</sup>، منصور نجفی حاجیور<sup>4</sup>، خسرو دودکانلوی میلان<sup>5</sup>  
تاریخ دریافت: 1391/2/3 تاریخ پذیرش: 1392/2/24

### چکیده

در روندیابی سیلاب به‌منظور تعیین آب‌نگار خروجی از بازه‌ی رودخانه می‌توان از روشهای هیدرولیکی و آب‌شناسی مختلفی استفاده کرد. روشهای روندیابی هیدرولیکی بر پایه‌ی معادلات سنت-ونانت بوده، و با توجه به معادله‌ی پیوستگی و جمله‌های درگیر از معادله‌ی اندازه‌ی حرکت به سه روش موج جنبشی، موج پخشیدگی و موج پویا تقسیم می‌شوند. در این تحقیق نیز با هدف بررسی کارایی دو روش موج جنبشی و موج پویا، بازه‌ای به طول 3/5 کیلومتر از رودخانه‌ی دوآب صمصامی از سرشاخه‌های کارون انتخاب گردید. پس از انجام عملیات صحرایی و جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز اقدام به روندیابی سیلاب با کاربرد روش موج جنبشی و با استفاده از برنامه‌ی رایانه‌ای تهیه شده گردید. برای روندیابی پویای سیلاب از تحلیل جریان غیرماندگار با کاربرد نرم‌افزار HEC-RAS استفاده شد. در ادامه آب‌نگارهای محاسبه شده از هر دو روش با آب‌نگارهای مشاهده‌ای در خروجی بازه با استفاده از فراسنج RMSE مقایسه گردیدند. در مجموع، نتایج تحقیق نشان دهنده‌ی دقت بیشتر شبیه HEC-RAS در برآورد آب‌نگارهای خروجی است. نتایج شبیه موج جنبشی تفاوت بسیار اندکی با دستاوردهای شبیه HEC-RAS دارد، و با توجه به سادگی روش حل معادلات، و همچنین داده‌های مورد نیاز کمتر، می‌توان از شبیه موج جنبشی در مطالعات مشابه، و رودخانه‌هایی با شیب تندتر برای بررسی روند سیل بهره برد.

**واژه‌های کلیدی:** روندیابی سیلاب، موج جنبشی، موج پویا، دوآب صمصامی، HEC-RAS

<sup>1</sup> - دانش آموخته کارشناسی ارشد رشته مهندسی آبخیزداری دانشگاه شهرکرد  
<sup>2</sup> - دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه شهرکرد  
<sup>3</sup> - استادیار گروه مرتع و آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه شهرکرد  
<sup>4</sup> - دانش آموخته کارشناسی ارشد رشته مهندسی آبخیزداری دانشگاه تهران  
<sup>5</sup> - دانش آموخته کارشناسی ارشد رشته مهندسی آبخیزداری دانشگاه شهرکرد  
\* - نویسنده‌ی مسئول: [karimian.roh@gmail.com](mailto:karimian.roh@gmail.com)

## مقدمه

روندیابی جریان در یک رودخانه به عنوان یک فرایند ریاضی برای پیش‌بینی تغییرات بزرگی، سرعت و شکل موج سیل به صورت تابعی از زمان در یک یا چند نقطه در طول آبراهه، نهر یا آبگیر در نظر گرفته شده است. اگر جریان مربوطه سیلابی باشد به آن روندیابی سیل گفته می‌شود (چو 1982).

روندیابی سیل از طرق مختلفی امکان‌پذیر است، اما در حالت کلی روشهای محاسباتی فرایند روندیابی به دو دسته اصلی آب‌شناسی و هیدرولیکی تقسیم می‌گردند. روشهای آب‌شناسی روندیابی جریان فقط بر پایه‌ی معادله‌ی پیوستگی جریان و معادلات تجربی و مشخصات رودخانه استوار است، در حالی‌که در روشهای هیدرولیکی، معادلات پیوستگی اندازه‌ی حرکت، که همان معادلات سنت-ونانت می‌باشند، بطور همزمان به صورت تحلیلی یا عددی حل می‌شوند تا آب‌نگار خروجی در فاصله‌ای مشخص در پایین‌دست از آب‌نگار ورودی به‌دست آید. روشهای روندیابی هیدرولیکی با توجه به جمله‌های درگیر از معادله‌ی اندازه‌ی حرکت به سه دسته روندیابی موج جنبشی، موج پخشیدگی و موج پویا تقسیم می‌شوند.

ساده‌ترین شکل شبیه روندیابی توزیعی، شبیه موج جنبشی است که در آن از جمله‌های شتاب محلی، شتاب انتقالی و جمله‌ی فشار در معادله‌ی اندازه‌ی حرکت صرف‌نظر گردیده است؛ لذا، در این شبیه نیروی اصطکاکی و گرانشی در تعادل با یکدیگرند. حال چنانچه کلیه جمله‌های معادله‌ی اندازه‌ی حرکت، اعم از جمله‌های شتاب و فشار در نظر گرفته شوند، به همراه معادله‌ی پیوستگی، می‌توان روندیابی سیلاب را به روش موج پویا انجام داد (چو و همکاران 1988). این روش با توجه به جمله‌های درگیر در معادلات، نیازمند اطلاعات بیشتری بوده، و در مقابل انتظار می‌رود نتایج حاصل از آن دارای دقت بیشتری باشند. در زمینه‌ی روندیابی سیلاب مطالعات متعددی صورت گرفته‌اند که در ادامه به برخی تحقیقات مرتبط اشاره می‌گردد. سونترنو (1991)، با هدف انجام مقایسه بین روشهای مختلف روندیابی سیل از پنج روش ماسکینگام-کانز، روش خصوصیات، روش موج جنبشی، روش موج پویا و روش UBC استفاده کرد، و دریافت که

جریان محاسبه شده از همه‌ی شبیه‌های فوق با جریان مشاهده شده خروجی تطابق خوبی دارند، ولی شبیه موج پویا به علت صحت بیشتر نتایج و جنبه کاربردی آن قابل اعتمادترین روش می‌باشد. هیکس (1996) با تذکر این نکته که شبیه‌های روندیابی هیدرولیکی به‌رغم پیش‌بینی دقیقتر از روند سیل نیازمند داده‌های هندسی وسیعتری از بازه‌ی مورد مطالعه می‌باشند، به توسعه یک شبیه روندیابی هیدرولیکی سیل با استفاده از داده‌های میدانی محدود و تکمیلی با کاربرد نقشه‌های پستی و بلندی پرداختند. پاتریسا و ریموندو (2005) در تحقیق خود روشهای حل عددی معادلات سنت-ونانت را برای مطالعه‌ی سیل در رودخانه‌ها مورد بررسی قرار داده و در نهایت نتیجه گرفتند که فراسنجهای هیدرولیکی در بررسی ساز و کار انتشار موج سیل نقش عمده و مهمی را ایفا می‌کنند.

نبل و همکاران (2005) با تلفیق شبیه‌های HEC-HMS و HEC-RAS در حوزه‌ی سن‌آنتونیو واقع در ایالات تگزاس آمریکا شبیه منطقه‌ای را برای سیلاب ارائه نمودند، و کارایی شبیه را در پیش‌بینی وقوع سیلاب متذکر شدند. شولتس (2009) به روندیابی پویای سیل با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS در بازه‌هایی از مناطق شهری-روستایی واقع در کارولینای شمالی پرداخت و نتیجه گرفت که کاهش شیب و افزایش زبری دشت سیلابی و نهر تأثیر بیشتری بر افت قدرت امواج سیل دارد. قبادیان (1387)، در تحقیقی به روندیابی هیدرولیکی سیلاب در رودخانه قره سو با استفاده از حل معادلات جریان غیرماندگار پرداخت و دریافت که آب‌نگارهای بده و مقیاس محاسبه شده در مقاطع مختلف بازه‌ی مذکور با مقادیر محاسبه شده به‌وسیله‌ی شبیه HEC-RAS تطابق بسیار خوبی از خود نشان می‌دهند. حقیقی و اشرفی (1385)، یک تحقیق مقایسه‌ای را بین روشهای موج پویا و جنبشی در روندیابی سیل در رود انجام دادند. بدین منظور فراسنجهای مؤثر در نتیجه روندیابی سیل را با استفاده از موج جنبشی در مقایسه با موج پویا مورد تحلیل و بررسی قرار داده و حدود مناسب شیب بستر را به‌منظور تحلیل جنبشی به‌جای پویایی پیشنهاد کردند.

بنابراین، از معادله‌ی فوق، که از ترکیب معادله‌ی پیوستگی و اندازه‌ی حرکت به‌دست آمده برای شبیه‌سازی موج جنبشی در روندیابی سیل استفاده می‌گردد.

موج جنبشی، که بر اثر تغییر در بده  $Q$  ایجاد می‌گردد، با سرعت مشخصی به سوی پایین دست در حال حرکت است که مقدار آن از رابطه‌ی زیر تبعیت می‌کند:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dQ}{dA} = C_k \quad (7)$$

که در آن  $C_k$  سرعت موج جنبشی است، و این بدان معناست که اگر ناظری با سرعت  $C_k = \frac{dx}{dt}$  همراه با جریان حرکت کند، مشاهده می‌کند که میزان بده‌ی جریان با شدت  $\frac{dQ}{dx}$  در حال افزایش است.

#### حل عددی موج جنبشی

هدف از حل عددی معادله‌ی (6)، به دست آوردن  $Q(x,t)$  در هر نقطه از شبکه‌ی  $x-t$  طبق شکل (1) و بر حسب فرانسجهای معلوم  $\alpha$  و  $\beta$  نهر و نیز بده‌ی جانبی  $q(t)$ ، و همچنین شرایط اولیه و مرزی معین است. برای حل عددی معادله‌ی دیفرانسیلی (6)، مشتقات زمانی و مکانی  $Q$  را روی شبکه‌ی  $x-t$  مطابق شکل (1) در نظر می‌گیریم. تقریبهای تفاضل محدود پسرو برای مشتق مکانی و زمانی برای مقادیر  $Q$  به ترتیب مطابق روابط زیر می‌باشند:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \approx \frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1}}{\Delta x} \quad (8)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \approx \frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i+1}^j}{\Delta t} \quad (9)$$

چنانچه مقدار  $Q_{i+1}^{j+1}$  در معادله‌ی (6) به جای  $Q$  گذاشته شود، یک معادله‌ی غیر خطی بر حسب  $Q_{i+1}^{j+1}$  به‌دست می‌آید. برای خطی‌سازی این معادله، مقدار  $Q$  در جمله  $\alpha\beta Q^{\beta-1}$  با میانگیری از مقادیر قطری نشان داده شده در شکل (1) جایگذاری می‌گردد؛ لذا:

$$Q \approx \frac{Q_{i+1}^j + Q_i^{j+1}}{2} \quad (10)$$

با تعیین مقدار بده‌ی جریان جانبی  $q$  با میانگیری در خط مکان  $(j+1)$ ، جایگذاری مقدار  $Q_{i+1}^{j+1}$  در معادله‌ی

در این تحقیق دو روش موج جنبشی و موج پویا از جمله روشهای هیدرولیکی سیلاب در یک مطالعه موردی در رود دوآب صمصامی واقع در استان چهارمحال و بختیاری با یکدیگر مقایسه شدند. هدف اصلی این تحقیق بررسی کارایی روش ساده‌تر موج جنبشی در مقابل روش کامل و پیچیده‌ی موج پویا می‌باشد که به‌منظور روندیابی سیل به روش موج پویا از نرم‌افزار HEC-RAS استفاده گردیده است.

#### مواد و روشها

##### شبیه موج جنبشی

شبیه موج جنبشی با معادلات زیر تعریف می‌گردد:  
معادله‌ی پیوستگی:

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

معادله‌ی اندازه‌ی حرکت:

$$S_o = S_f \quad (2)$$

همچنین، معادله‌ی اندازه‌ی حرکت را می‌توان به شکل زیر بیان کرد:

$$A = \alpha Q^\beta \quad (3)$$

با نوشتن معادله‌ی مانینگ بر حسب  $A$  داریم:

$$A = \left( \frac{\frac{2}{n} P^{\frac{2}{3}}}{\sqrt{S_0}} \right)^{\frac{3}{5}} Q^{\frac{3}{5}} \quad (4)$$

$$\text{و لذا } \alpha = \left( \frac{\frac{2}{n} P^{\frac{2}{3}}}{\sqrt{S_0}} \right)^{\frac{3}{5}} \text{ و } \beta = \frac{3}{5} \text{ است.}$$

معادله‌ی پیوستگی (1) دارای دو متغیر وابسته  $A$  و  $Q$  است، که می‌توان به جای  $A$  از معادله‌ی (3) جایگذاری کرد. با مشتق‌گیری از معادله‌ی (3) و جایگذاری در معادله‌ی (1) داریم:

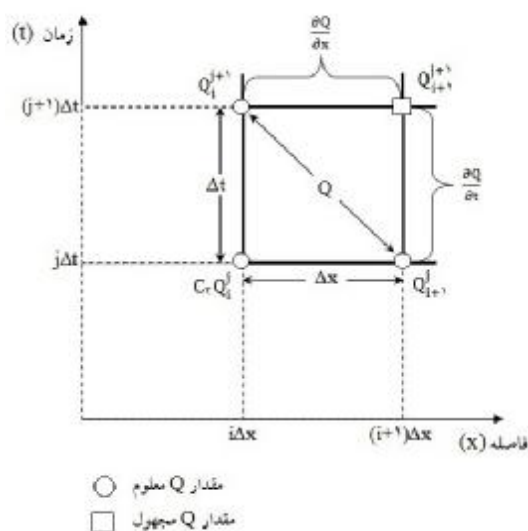
$$\frac{\partial A}{\partial t} = \alpha\beta Q^{\beta-1} \left( \frac{\partial Q}{\partial t} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \alpha\beta Q^{\beta-1} \left( \frac{\partial Q}{\partial t} \right) = q \quad (6)$$

برای حل عددی معادله‌ی موج جنبشی، برنامه‌ای رایانه‌ای با استفاده از روش ماکرونویسی در محیط Visual Basic تحت نرم‌افزار Excel تهیه گردید، که با استفاده از روش خطی معادله‌ی فوق را برای محاسبه بده در مقاطع و زمانهای مختلف بر اساس آب‌نگارهای مشاهده‌ای در مقطع ورودی و سایر خصوصیات بازه رودخانه حل نموده و آب‌نگار خروجی را به دست می‌دهد.

(6) به جای  $Q$ ، و حل معادله‌ی حاصل بر حسب مقدار مجهول  $Q_{i+1}^{j+1}$ ، شکل تفاضلهای محدود معادله‌ی موج جنبشی به شکل زیر به دست می‌آید [6]:

$$Q_{i+1}^{j+1} = \left[ \frac{\Delta t}{\Delta x} Q_i^{j+1} + \alpha \beta Q_{i+1}^j \left( \frac{Q_{i+1}^j + Q_i^{j+1}}{2} \right)^{\beta-1} + \Delta t \left( \frac{q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^j}{2} \right) \right] / \left[ \frac{\Delta t}{\Delta x} + \alpha \beta \left( \frac{Q_{i+1}^j + Q_i^{j+1}}{2} \right)^{\beta-1} \right] \quad (11)$$



شکل 1- شکل تفاضلهای محدود برای حل معادله‌ی موج جنبشی با کاربرد روش خطی.

معادله‌ی اندازه‌ی حرکت:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \left( \frac{\partial y}{\partial x} - S_0 + S_f \right) = 0 \quad (13)$$

با توجه به رابطه‌ی فوق معادله‌ی اندازه‌ی حرکت مشتمل بر 5 جمله فیزیکی است، که به ترتیب از چپ به راست عبارتند از: جمله‌ی شتاب محلی که نشانگر تغییر اندازه‌ی حرکت ناشی از تغییر سرعت در زمان است. جمله‌ی شتاب انتقالی که نشانگر تغییر اندازه‌ی حرکت ناشی از تغییر سرعت در طول نهر، جمله‌ی نیروی فشاری که متناسب با تغییر عمق آب در طول آبراهه، جمله‌ی نیروی گرانش که متناسب با شیب بستر  $S_0$  و نهایتاً جمله‌ی نیروی اصطکاکی که متناسب با شیب اصطکاکی  $S_f$  است. جمله‌های شتاب محلی و انتقالی نشانگر تأثیرهای نیروهای لختی بر جریان می‌باشند. روش حل برای معادلات پیوستگی و اندازه‌ی حرکت، استفاده از الگوی تفاضلهای

### شبیه HEC-RAS و تحلیل غیرماندگار جریان

نرم‌افزار HEC-RAS در واقع سامانه‌ی تحلیل رود انجمن مهندسين ارتش آمریکا می‌باشد، که به‌وسیله‌ی مرکز مهندسی آبشناسی تهیه شده است. این نرم‌افزار قادر به انجام محاسبات یک بعدی در حالت جریان ماندگار و غیرماندگار می‌باشد. در این تحقیق، به‌منظور معرفی آب‌نگار سیل و روندیابی آن از تحلیل هیدرولیکی جریان در حالت غیرماندگار استفاده گردیده است. الگوی مورد استفاده به‌منظور تحلیل غیرماندگار جریان با کاربرد نرم‌افزار HEC-RAS در واقع همان الگوی غیرصریح پریزمان بوده که در ادامه معادلات به‌کار رفته در این شبیه به‌منظور تحلیل غیرماندگار جریان آورده شده است.

معادله‌ی پیوستگی:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} - q = 0 \quad (12)$$

زبری مانینگ برای هر زیر بازه، از تصاویر تهیه شده، و همچنین از نظرات کارشناسی، استفاده گردید. در گام بعد به منظور تأمین داده‌های لحظه‌ای جریان برای استفاده در روشهای مورد مطالعه، و مقایسه‌ی صحت نتایج محاسبه شده از هر روش، آب‌نگارهای مربوط به پنج سیلاب رخ داده در سالهای 1388 و 1389 در محل ورودی و خروجی بازه مورد نظر بطور همزمان و با فواصل زمانی 15 دقیقه، مشاهده و ثبت گردید. بدین منظور، تغییرات تراز آب در محل مقاطع ورودی و خروجی به صورت لحظه‌ای ثبت شد و با استفاده از منحنی بده-مقیاس مربوط به هر مقطع، آب‌نگار بده‌ی هر سیلاب تهیه گردید.

### اجرای روشهای حل مورد مطالعه

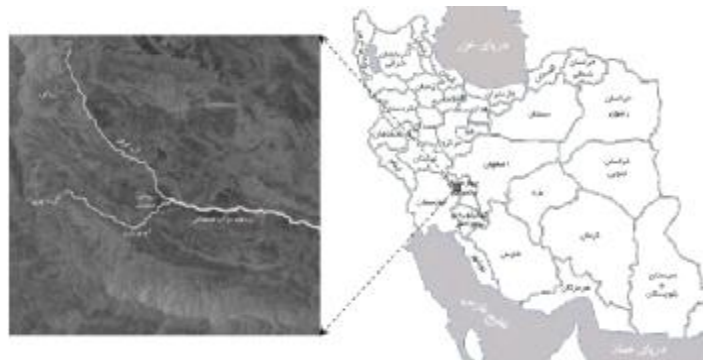
پس از جمع‌آوری و تنظیم آمار و داده‌های مورد نیاز برای استفاده در شبیه‌های مورد نظر، در ابتدا روش موج جنبشی با معرفی مقادیر لحظه‌ای جریان مربوط به آب‌نگار ورودی، ضریب زبری مانینگ و شیب طولی هر زیر بازه، خصوصیات هندسی و هیدرولیکی هر مقطع و فواصل بین مقاطع عرضی برداشت شده به برنامه رایانه‌ای تهیه شده برای محاسبه آب‌نگار خروجی، مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، به منظور روندیابی سیل با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS، پس از معرفی داده‌های هندسی و داده‌های جریان، شبیه اجرا گردید. هر دو شبیه مورد استفاده در این تحقیق برای روندیابی هر یک از 5 آب‌نگار ثبت شده در ورودی بازه اجرا گردید. آب‌نگارهای ورودی و خروجی مشاهده شده، و همچنین آب‌نگارهای خروجی محاسبه شده با کاربرد دو شبیه مورد استفاده در مبحث مربوط به نتایج آورده شده‌اند.

محدود غیر صریح (ضمنی) می‌باشد، که در این روش تقریب تفاضل محدود بر حسب متغیرهای مجهول جایگزین مشتقات مکانی می‌شود، و معادله‌های جبری حاصل را باید برای سامانه بطور همزمان حل کرد (انجمن مهندسی ارتش آمریکا 2010).

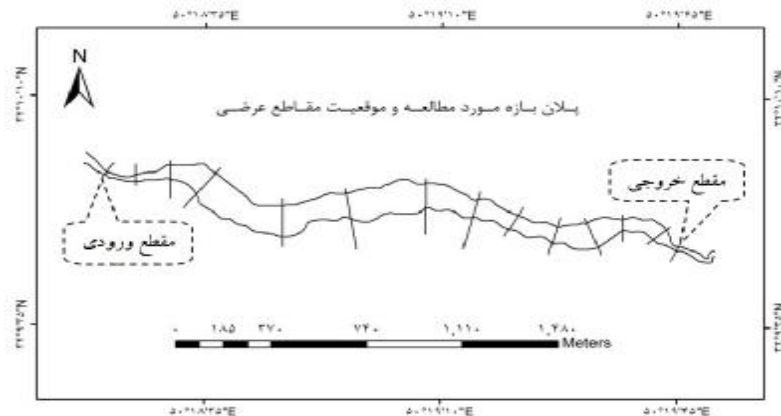
به منظور روندیابی آب‌نگار سیل با استفاده از شبیه HEC-RAS می‌بایست در ابتدا بازه‌ی رودخانه و رقوم مقاطع عرضی برداشت شده را به شبیه معرفی کرد. همچنین، داده‌های جریان شامل شرایط مرزی و شرایط اولیه نیز باید به شبیه معرفی گردند. پس از اجرای موفقیت‌آمیز شبیه کاربر قادر به مشاهده و استخراج آب‌نگارهای بده و مقیاس برای هر یک از مقاطع خواهد بود.

### مطالعه‌ی موردی

جهت بررسی موردی شبیه‌های مورد استفاده در این تحقیق برای روندیابی هیدرولیکی سیلاب، بازه‌ای به طول 3/5 کیلومتر از رودخانه‌ی دوآب صمصامی واقع در استان چهارمحال و بختیاری و از سرشاخه‌های اصلی رودخانه کارون بزرگ انتخاب گردید (شکل‌های 2 و 3). حوضه‌ی مربوط به رودخانه دوآب صمصامی دارای مساحتی حدود 177 کیلومترمربع بوده و میانگین بارندگی سالانه در آن برابر 1175 میلی‌متر می‌باشد. در عملیات میدانی پس از شناسایی مسیر بازه‌ی حالت مورد مطالعه، اقدام به ثبت 14 مقطع عرضی در طول بازه انتخابی با انجام عملیات نقشه‌برداری شد. سپس اقدام به ثبت خصوصیات فیزیکی مسیر رودخانه از جمله شیب طولی و مقدار ضریب زبری مانینگ هر زیر بازه گردید. برای تعیین مقادیر ضریب



شکل 2- موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه در ایران و استان چهارمحال و بختیاری.



شکل 3- نقشه‌ی بازه‌ی مسطحه‌ی مورد مطالعه، به همراه موقعیت مقاطع عرضی برداشت شده از رودخانه‌ی دوآب صمصامی.

مشاهده گردیده (RMSE) برای زمان اتفاق استفاده شد. روش محاسبه به شکل زیر است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_o - Q_c)^2} \quad (14)$$

در این رابطه  $Q_c$  مقادیر بدهی محاسبه شده و  $Q_o$  مقادیر مشاهده‌ای بده می‌باشند.  $n$  نیز تعداد زوج بده‌های مشاهده‌ای و محاسبه شده از هر شبیه است. مقادیر فراسنج RMSE برای نتایج هر یک از دو روش روندیابی در جدول (3) آورده شده‌اند. به‌منظور واپایش نتایج حاصل از مقایسه قبل و تشخیص عوامل خطا یا اشتباه احتمالی، در مرحله بعد مقادیر مشاهده‌ای و محاسبه‌ای برای هر سیلاب نیز بطور جداگانه مورد مقایسه قرار گرفتند.

جدول 1- مقادیر بدهی اوج مشاهده‌ای و محاسبه شده با کاربرد هر یک از دو روش روندیابی بر حسب متر مکعب بر ثانیه.

شماره‌ی سیلاب روش محاسبه	سیلاب شماره‌ی 1	سیلاب شماره‌ی 2	سیلاب شماره‌ی 3	سیلاب شماره‌ی 4	سیلاب شماره‌ی 5
شبیه HEC-RAS	40/66	14	16/9	52/09	11/7
روش موج جنبشی	39/19	13/95	16/81	50/97	11/33
مشاهده‌ی مستقیم	40/55	14/12	16/82	51/32	11/54

جدول 2- مقادیر زمان وقوع بدهی اوج مشاهده‌ای و محاسبه شده با کاربرد هر یک از دو روش روندیابی براساس زمان از

شروع سیلاب بر حسب ساعت.

شماره‌ی سیلاب روش محاسبه	سیلاب شماره‌ی 1	سیلاب شماره‌ی 2	سیلاب شماره‌ی 3	سیلاب شماره‌ی 4	سیلاب شماره‌ی 5
شبیه HEC-RAS	15/5	12/5	9/25	20/5	5/25
روش موج جنبشی	15/25	12/75	9/25	20/25	5/5
مشاهده‌ی مستقیم	15/5	12/5	9/25	20/75	5/25

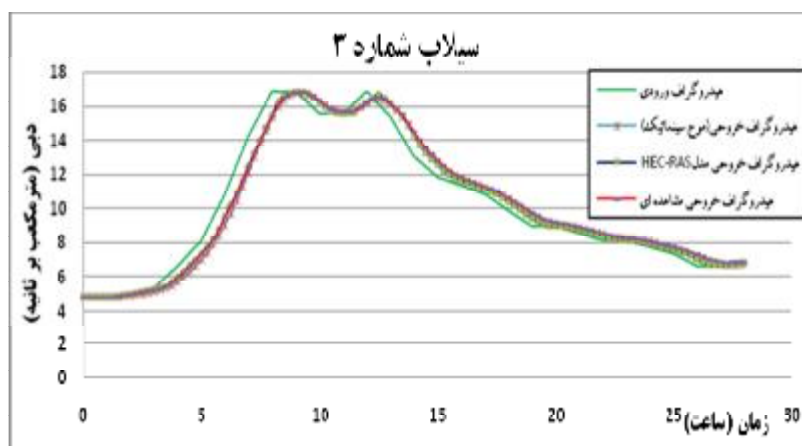
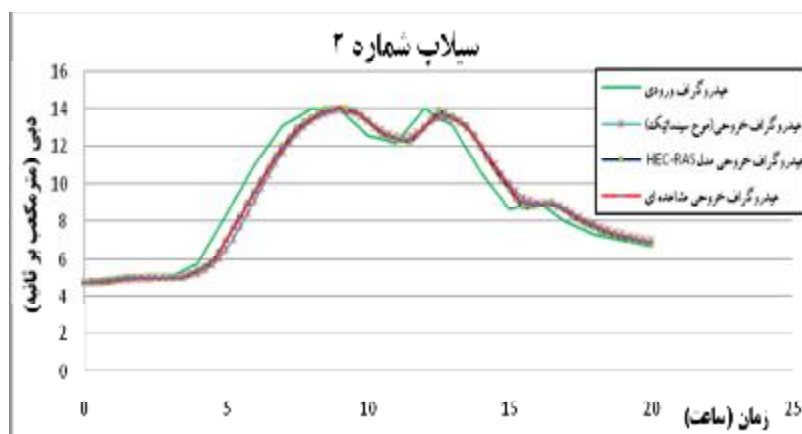
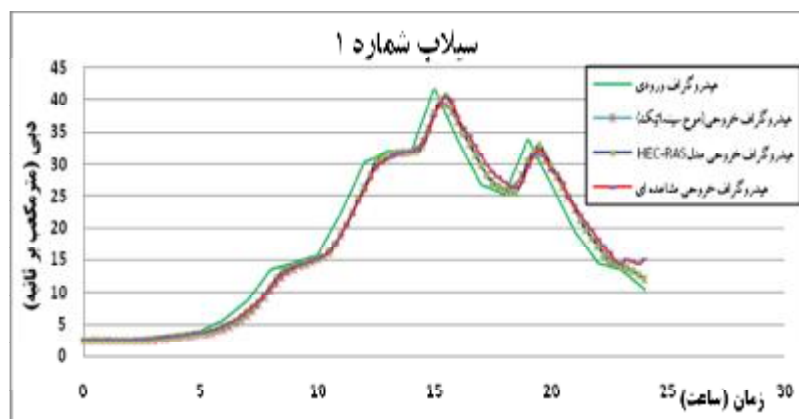
## نتایج و بحث

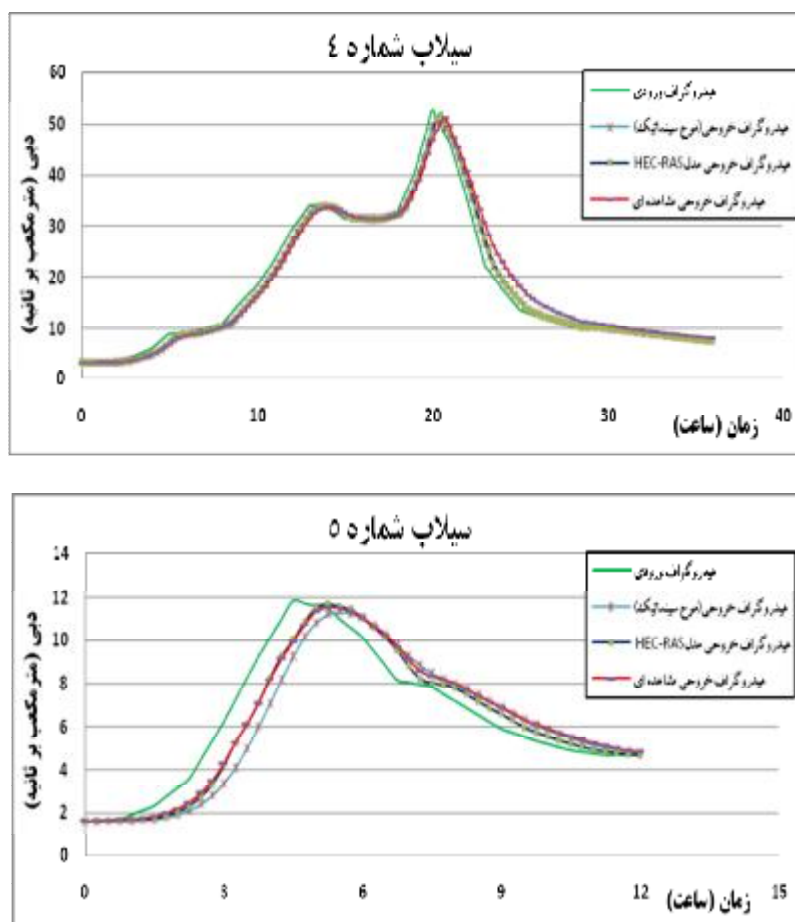
### نتایج روندیابی سیلاب

آب‌نگارهای مشاهده شده از هر 5 سیلاب ثبت شده در محل مقاطع ورودی و خروجی به همراه آب‌نگارهای خروجی محاسبه شده از هر دو روش موج جنبشی و شبیه HEC-RAS در شکل (4) آورده شده‌اند. از جمله فراسنجهای مهم حاصل از نتایج روندیابی سیلاب در رودخانه‌ها، مقادیر بدهی اوج و زمان تا اوج می‌باشد، لذا به منظور تعیین دقت این دو شبیه در محاسبه این دو فراسنج، مقادیر بدهی و زمان تا اوج مربوط به هر سیلاب استخراج گردیدند که در جداول (1) و (2) آورده شده‌اند. برای بررسی آماری آب‌نگارهای محاسبه شده از عامل جذر مجموع مربع تفاضلات بده‌های محاسبه شده از

## جدول 3 - مقادیر فراسنج RMSE برای هر یک از پنج سیلاب و کل سیلابها.

شماره‌ی سیلاب	سیلاب شماره‌ی 1	سیلاب شماره‌ی 2	سیلاب شماره‌ی 3	سیلاب شماره‌ی 4	سیلاب شماره‌ی 5	کل سیلابها
روش محاسبه	0/696	0/173	0/148	1/402	0/431	0/845
روش موج جنبشی	0/715	0/082	0/162	1/109	0/2	0/694
شبیه HEC-RAS						

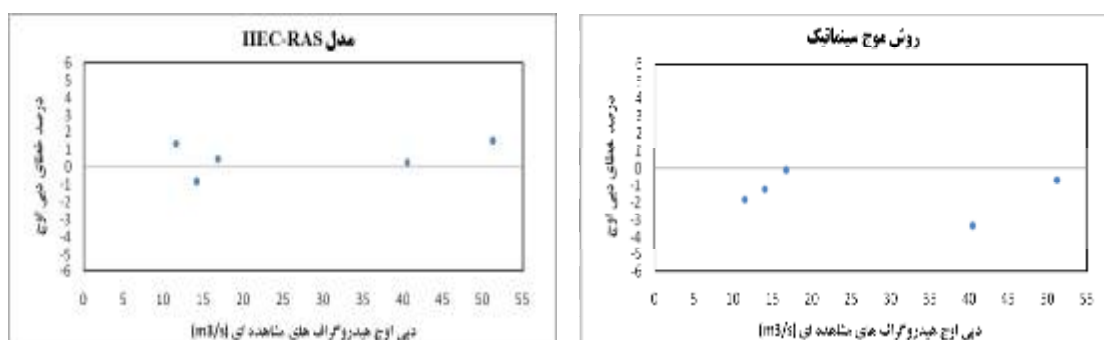




شکل 4- آب‌نگارهای ورودی و خروجی مشاهده شده به همراه آب‌نگارهای خروجی محاسبه شده از هر دو روش روندیابی برای هر کدام از 5 سیلاب مورد مطالعه.

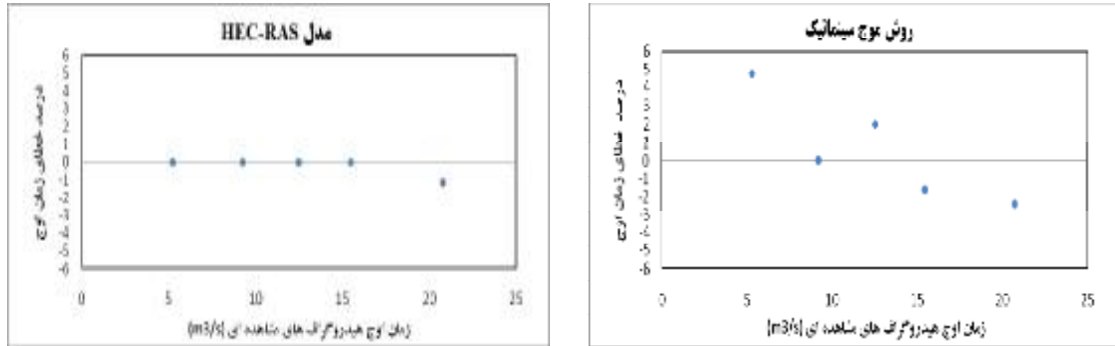
زمان تا اوج محاسبه شده از هر روش به‌طور جداگانه در مقابل مقدار واقعی در آب‌نگار مشاهده گردیده‌ی آن واقعه قرار گرفته شده و پراکنش آن نسبت به خط صفر به‌دست آمده است.

به‌منظور تعیین دقت دو روش موج جنبشی و موج پویا در برآورد مقادیر بدهی اوج و زمان تا اوج، درصد خطای محاسبه‌ی هر فراسنج نسبت به مقادیر مشاهده‌ای محاسبه گردید، که نتایج آن در اشکال (5) و (6) آورده شده‌اند. در این شکلها عامل درصد خطای بدهی اوج و



شکل 5- پراکندگی پیرامون خط صفر برای عامل درصد خطای بدهی اوج.





شکل 6- پراکندگی پیرامون خط صفر برای عامل درصد خطای زمان وقوع بدهی اوج.

## بحث

درستی محاسبه نموده، که از این حیث نیز نسبت به روش موج جنبشی دارای دقت بیشتری می‌باشد.

## نتیجه‌گیری

نتایج تحقیق در مجموع مؤید دقت بالاتر شبیه HEC-RAS در محاسبه‌های روندیابی سیل در رودخانه دوآب صمصامی است، که دلیل آن حل عددی معادلات جریان غیرماندگار و روندیابی پویا جریان می‌باشد، اما ذکر این نکته ضروری است که روش موج جنبشی با توجه به ساده بودن شکل معادله‌های مربوطه، و کمتر بودن جمله‌های درگیر در آنها، نتایج بسیار قابل قبولی را در محاسبه‌های روندیابی سیل در رودخانه دوآب صمصامی به دست آورده است. همچنین، ساده بودن شبیه‌سازی رایانه‌ای، و اطلاعات مورد نیاز کمتر روش موج جنبشی نسبت به روش موج پویا در شبیه HEC-RAS، قابلیت کاربرد این روش را در مطالعه‌های مشابه و در رودخانه‌هایی با شیب تندتر، افزایش می‌دهد.

## منابع

1. حقیقی ع. و م. اشرفی. 1385. بررسی مقایسه ای موج پویا و جنبشی در روندیابی سیل در مطالعات مهندسی رودخانه. هفتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، 24 الی 26 بهمن‌ماه، دانشگاه شهید چمران اهواز.
2. رحیمی دهاقانی، ن.، ر. فضل اولی، م. نبویان پور، و م. ضیاء تبار احمدی. 1388. مقایسه نتایج شبیه‌های HEC-RAS و MIKE11 در شبیه‌سازی پروفیل سطح آب در رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه لردگان). هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، 21 تا 23 اردیبهشت ماه، دانشگاه شیراز.

با توجه به عامل RMSE محاسبه شده برای مجموع پنج آبنگار سیل حاصل از سه روش روندیابی، مشاهده می‌گردد که نتایج شبیه HEC-RAS دارای کمترین مقدار RMSE بوده و روش موج جنبشی با اختلاف جزئی نسبت به این شبیه در رتبه دوم قرار دارد. همچنین، به منظور واپایش نتایج قبل، مقدار فراسنج RMSE بطور جداگانه برای هر کدام از آبنگارهای پنج‌گانه محاسبه گردید. با توجه به نتایج حاصل، شبیه HEC-RAS از لحاظ دقت در تخمین آبنگار خروجی سه واقعه در رتبه‌ی اول قرار دارد و در دو واقعه‌ی دیگر، روش موج جنبشی نتایج صحیحتری را ارائه داده است که البته مقدار فراسنج RMSE این دو واقعه در روشهای موج جنبشی و شبیه HEC-RAS اختلاف ناچیزی دارد. در تحقیقی که سونترنو در سال 1991 با هدف مقایسه روشهای مختلف روندیابی سیل انجام داد نیز روش موج پویا دارای بهترین نتایج بود؛ البته، نتایج سایر روشها نیز چندان دور از واقعیت نبودند.

روش موج جنبشی در برآورد مقدار بدهی اوج در کلیه سیلابها مقدار بده اوج را کمتر از مقدار مشاهده‌ای به دست آورده و در شبیه HEC-RAS در سه واقعه مقدار بدهی اوج بیشتر از مقدار مشاهده‌ای به دست آمده است که با نتایج تحقیق رحیمی و همکاران (1388) به منظور شبیه‌سازی آب‌پویایی جریان در بازه‌ای از رودخانه لردگان تطابق دارد. در تحقیق فوق نتایج نشان دادند که در شرایط یکسان، شبیه HEC-RAS سطح آب را بالاتر از شبیه MIKE 11 برآورد می‌نماید. همچنین، شبیه HEC-RAS در چهار واقعه زمان وقوع بدهی اوج را به

8. Sholtes, J. 2009. Hydraulic analysis of stream restoration on flood wave propagation. A thesis submitted to the faculty of the University of North Carolina at Chapel Hill.
9. Shultz, M.J., E.C. Crosby, and J.A. McEnery. 2008. Kinematic Wave technique applied to hydrologic distributed modeling using stationary storm events: an application to synthetic rectangular basins and an actual watershed. 28<sup>nd</sup> Annual American Geophysical Union Hydrology Days, March 26 – March 28, Colorado State University.
10. Soentoro, E.A. 1991. Comparison of flood routing methods. Master of Applied Science. Department of Civil Engineering, The University of British Columbia. 106, P.
11. US Army Corps of Engineers. 2010. User's Manual of HEC-RAS. Gary W. Brunner, CEIWR-HEC
3. قبادیان، ر. 1387. شبیه ریاضی روندیابی هیدرولیکی سیلاب در رودخانه قره سو با استفاده از حل عددی معادلات جریان غیرماندگار. هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، 21 الی 23 آبان، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور).
4. Chow, V.T. 1982. Open channel hydraulics. McGraw-Hill Pub. Co., New York, USA.
5. Chow, V.T., D.R. Maidment, and L.W. Mays. 1988. Applied hydrology. McGraw-Hill International Edition.
6. Hicks F.E. 1996. Hydraulic flood routing with minimal channel data: Peace River, Canada. Can. J. Civil Eng. 23:524-535
7. Knebl, M.R., Z.L. Yang, K. Hutchison, and D.R. Maidment. 2005. Regional scale flood modeling using NEXRAD, rainfall, GIS, and HEC-HMS\RAS: A Case Study for the San Antonio River Basin, summer 2002 storm event. J. Environ. Manage. 75: 325-336