

## کاربرد مدل‌های یک و دوبعدی جریان سطحی و نفوذ برای حوضه آبریز دره مارون استان فارس

فرنوش آقایی دانشور<sup>1\*</sup>، محمد جواد خانجانی<sup>2</sup>

تاریخ دریافت: 92/07/09 تاریخ پذیرش: 95/04/01

<sup>1</sup> دانشجوی دکتری عمران آب، بخش مهندسی راه، ساختمان و محیط زیست، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

<sup>2</sup> استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [Fdaneshvar@shirazu.ac.ir](mailto:Fdaneshvar@shirazu.ac.ir)

### چکیده

به منظور شبیه‌سازی جریان سطحی و برآورد عمق جریان بر روی سطح حوضه و مقدار دبی جریان خروجی، مدل هیدرولوژیکی جدید با ساختار عددی طراحی و ارائه شده است. در این مدل، معادلات سنت-وانانت حاکم بر جریان سطحی به صورت یک‌بعدی و دوبعدی، به همراه مدل نفوذ پارلانگ، با استفاده از روش عددی تفاضل محدود و تقریب موج سینماتیک، با اعمال طرح ضمنی، حل شده است. به منظور حل دستگاه معادلات غیرخطی حاصل از گسسته‌سازی معادلات جریان و نفوذ از روش نیوتن رافسون استفاده شد. الگوریتم و برنامه این مدل در حالت یک‌بعدی و دوبعدی، با استفاده از نرم‌افزار متلب تهیه و نتایج آن مورد تحلیل قرار گرفت. برای بررسی دقت و صحت مدل عددی ارائه شده، در برآورد ارتفاع و حجم جریان سطحی، این مدل بر روی حوضه آبریز دره مارون فارس اجرا شد. وضعیت توپوگرافی و شیب سطح حوضه در معادلات جریان سطحی و پارامترهای مورد نیاز معادله نفوذ با استفاده از نقشه‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل‌های ارتفاعی تهیه و در اختیار مدل عددی قرار گرفته است. مقایسه هیدروگراف‌های محاسباتی مدل عددی و مقادیر مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری خروجی حوضه و بررسی ضرایب آماری محاسبه شده از نتایج، شباهت و دقت خوبی را در شبیه‌سازی هیدروگراف‌های جریان توسط این مدل عددی نشان داد. همچنین، در این تحقیق، موج سینماتیک در پیش‌بینی مقدار و زمان دبی اوج سیلاب‌های انتخابی تقریب سازی مناسبی را دارا بود. دقت متوسط مدل عددی یک‌بعدی و دوبعدی در پیش‌بینی مقدار دبی اوج سیلاب‌های انتخابی و زمان وقوع آن به ترتیب 97/3 و 97/2 درصد و 95/45 و 98/47 درصد محاسبه شده است.

واژه‌های کلیدی: جریان سطحی، حوضه آبریز دره مارون، سیستم اطلاعات جغرافیایی، مدل عددی، مدل هیدرولوژیکی، موج سینماتیک، هیدروگراف

## Application of One- and Two-Dimensional Surface Runoff and Infiltration Models for Maroon Valley Watershed in Fars Province

F Aghaee Daneshvar<sup>1\*</sup>, MJ Khanjani<sup>2</sup>

Received: 1 October 2013

Accepted: 21 June 2016

1- Ph.D. Student Dept. of Civil and Environmental Engineering, Shiraz Univ. Iran

2- Prof., Dept. of Civil Engineering, Shahid Bahonar Univ. Iran

\* Corresponding Author, Email: [Fdaneshvar@shirazu.ac.ir](mailto:Fdaneshvar@shirazu.ac.ir)

### Abstract

In order to simulate surface runoff and depth of flow on surface area of watershed and outflow rate, a new hydrological model with numerical structure has been designed and presented. In this model, surface flow governing Saint- Venant equations in one- dimensional and two- dimensional forms along with the Parlange infiltration model parameters, have been solved using a finite difference numerical method, for the kinematic wave approximation using an implicit scheme. In order to solve the system of nonlinear equations resulting from discretization of the flow and infiltration equations, the Newton Raphson method was used. An algorithm and program of this model in one- and two-dimensional modes have been developed by using MATLAB software and their results have been analyzed. For checking the accuracy of the presented numerical model in estimation of the height and volume of the surface flow, the model was implemented for the Maroon valley watershed in Fars province. Topographic condition and slope of the basin surface used in the surface flow equations and the parameters required in infiltration equation have been prepared using the GIS maps and elevation models for feeding the numerical model. Comparison of the model computational hydrographs with the observed results at the hydrometric station in the basin outlet and also investigation of the statistical coefficients calculated from the results showed similarities and good accuracy in simulation of the flood hydrographs by the numerical model. Also, the kinematic wave had a good approximation in predicting the amount and occurrence time of the selected floods peak discharges. The average accuracies of the one- and two- dimensional models in predicting the amount and occurrence time of the selected floods peak discharge were c 97.3 and 97.2 percent and 95.45 and 98.47 percent, respectively.

**Keywords:** Geographic Information System (GIS), Hydrograph, Hydrological model, Kinematic wave, Maroon valley watershed, Numerical model, Surface runoff

### مقدمه

توسط شخصی به همین نام برای جریان یکبعدی در کانال‌های روباز و روندیابی سیلاب ارائه گردید. حرکت در سیلاب دشت با طبیعت دوبعدی است، لذا نیاز به تحلیل دوبعدی در مکان دارد (آکان و هاوتالن 2003). هندرسون و وودینگ (1964) با استفاده از تقریب موج سینماتیکی یک روش مشخصه، برای حل تحلیلی معادلات

جریان‌های غیردائمی رواناب سطحی و حرکت سیلاب با روش‌های عددی زیادی مطالعه شده است. معادلات حاکم بر جریان‌های سطحی غیرماندگار، معادلات سنت-وانانت شامل معادله پیوستگی و اندازه حرکت (مومنوم) می‌باشند که اولین بار در سال 1871

ضمنی در حالت موج سینماتیک به صورت یک‌بعدی و دو-بعدی، معادلات را به صورت هم‌زمان حل کرده و پروفیل جریان سطحی و هیدروگراف جریان خروجی را برآورد می‌نماید. هدف اصلی این مقاله شبیه‌سازی جریان رواناب سطحی و نفوذ در حوضه آبریز دره مارون فارس با استفاده از مدل عددی موج سینماتیک یک‌بعدی و دوبعدی ارائه شده و مقایسه آن با نتایج مشاهداتی در این حوضه می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

#### موج سینماتیک در حل معادلات جریان سطحی

انتقال رواناب حاصل از بارش مازاد ناشی از اختلاف شدت بارندگی و نفوذ آب در خاک، منجر به ایجاد جریان سطحی در اثر نیروی ثقل بر روی سطح زمین می‌شود که بسته به مدل فیزیکی بارش و نفوذ، متغیر است. جریان سطحی عمق خیلی کم و عدد رینولدز کوچک دارد که بر این اساس به عنوان جریان آرام، مطرح می‌شود. اما فاکتورهای دیگری همچون اثر قطرات باران، صخره‌ها و گیاهان منجر به آشفتگی جریان می‌گردد. بنابراین، جریان سطحی، به طور کلی متلاطم فرض می‌شود و معادلات حاکم بر آن، در هر دو حالت آرام و متلاطم معتبر هستند. در حل معادلات سنت-ونانت، روش‌های تحلیلی، معمولاً برای سطوح غیرنفوذپذیر و تحت بارندگی با شدت ثابت، قابل استفاده‌اند (آکان و هفتالن 2003، تیفور و همکاران 1993). ساده‌سازی‌هایی در معادله مومنتوم صورت گرفته است که سه مدل رایج موج سینماتیک، موج دیفیوژن و موج دینامیک را ایجاد کرده است. در مدل موج سینماتیک، حرکت دینامیکی موج سیل تنها مبتنی بر اصل پیوستگی جریان می‌باشد و با صرف نظر کردن از شتاب موضعی، شتاب جابجایی و فشار در معادله مومنتوم مدل شده و نیروی ثقل و اصطکاک، و به عبارتی گرادینان خط انرژی و شیب سطح زمین برابر فرض می‌شود. معادلات سنت-ونانت، با مدل موج سینماتیک، (ساده‌ترین مدل روندیابی سیلاب‌ها با

سنت-ونانت بر روی یک سطح با مقدار بارش و نفوذ ثابت، ارائه کردند. برای روندیابی سیلاب روش مستقیم تفاضل محدود توسط ولهیزر و لیگت (1967) ارائه شد و نتایج آن با روش‌های ضمنی و مشخصه با شبکه متغیر مقایسه گردید. به دلیل پایداری روش ضمنی برای گام-های زمانی نسبتاً بزرگ، روش تفاضل محدود ضمنی 4 نقطه‌ای، اولین بار توسط امین و فنگ (1970) و روش 6 نقطه‌ای ضمنی نیز، توسط ابوت و فنگ (1967) مطرح گردید. تحقیقات پریس (1974) نشان داد که روش ضمنی دارای دقت و سرعت محاسباتی بالایی است. بررسی تأثیر فاکتور وزنی بر روی روش ضمنی نیز توسط چاودری و کنتراکتور (1973) انجام گرفت. گاوینداراجو و همکاران (1988)، معادلات کامل سنت-ونانت را برای جریان‌های غیرماندگار متغیر تدریجی در حالت بی‌بعد، با استفاده از روش اختلاف محدود ضمنی و با مدل موج سینماتیک، دیفیوژن و دینامیک حل نمودند. همچنین، چاو و بن زوی (1973) معادلات دوبعدی جریان سطحی را با طرح لاکس-واندرف مدل‌بندی کردند. معادلات سنت-ونانت دوبعدی جریان سطحی توسط کاواهارا و یوکویاما (1980) با استفاده از روش اجزاء محدود شبیه‌سازی شده است. ژانگ و کاندی (1989) پونسه و همکاران (1978 الف) نیز معادله کامل سنت-ونانت را برای جریان‌های یکنواخت با روش‌های تقریب موج سینماتیک، دیفیوژن و دینامیک، تحلیل کرده و نتایج آن‌ها را مقایسه کردند. همچنین، پونسه و همکاران (1978 ب) همگرایی این مدل‌ها را بررسی نمودند. تیفور و همکاران (1993) با استفاده از روش تفاضل محدود مرکزی، معادلات کامل جریان را بر روی یک صفحه توپوگرافی متغیر، حل نمودند.

در این مقاله با توجه به مطالعات پیشین، مدل عددی نیمه‌توزیعی هیدرولوژیکی، برای حل معادلات جریان سطحی به همراه معادلات نفوذ پارلانگ (1982) ارائه شده است. این مدل براساس روش اختلاف محدود

سطحی و شیب متغیر، یکسان می‌باشد (تيفور و همکاران 1993، تيفور و همکاران 2004).

معرفی حوضه آبریز دره مارون فارس

زیرحوضه پسکوهک، از سرشاخه‌های رودخانه خشک شیراز، با مساحت 69 کیلومتر مربع، شامل زیر-حوضه‌های گزدان، مارون و پسکوهک می‌باشد. حوضه آبریز مارون، با مساحت 7 کیلومتر مربع، شامل سرشاخه دره مارون است که در انتها به رودخانه خشک می‌ریزد. زیرحوضه دره مارون با مساحت 0/36 کیلومتر مربع، در بین طول‌های جغرافیایی  $28^{\circ}14'52''$  تا  $32^{\circ}16'$  و  $29^{\circ}45'21''$  تا  $29^{\circ}44'9''$  شرقی و عرض‌های شمالی، حوضه مورد مطالعه در این تحقیق می‌باشد (شکل 1) (بی‌نام 1381). حوضه آبریز پسکوهک که حوضه آبریز معرف مرکزی فارس است، دارای ایستگاه هواشناسی با موقعیت طول جغرافیایی  $53^{\circ}15'52''$  شرقی و عرض جغرافیایی  $10^{\circ}45'29''$  و ارتفاع 2148 متر از سطح دریا، و ایستگاه هیدرومتری مارون، با موقعیت طول جغرافیایی  $28^{\circ}16'52''$  و عرض جغرافیایی  $10^{\circ}45'29''$  شمالی و ارتفاع 2091 متر (شکل 1)، در انتهای حوضه واقع شده‌اند (طیبی‌پور 1385).

جهت تعیین مقادیر شدت بارش با توجه به طول دوره آماری کوتاه مدت باران‌سنج ثبات حوضه آبریز پسکوهک (مارون)، از آمار باران‌سنج ثبات سازمان آب منطقه‌ای شهر شیراز استفاده شد. جهت استخراج مقدار بارش‌های حوضه دره مارون، پس از بررسی توزیع تجمعی ارتفاع بارش ایستگاه سازمان آب منطقه‌ای شیراز و انتخاب رویدادهای مشترک بین این دو ایستگاه، با تقسیم مقادیر تجمعی ارتفاع بارش ایستگاه سازمان آب منطقه‌ای بر بیشینه ارتفاع هر بارندگی، روند توزیع این بارندگی‌ها استخراج شد. ارتفاع بارش یک‌روزه به‌ازای ارتفاع متوسط حوضه دره مارون، از رابطه همبستگی گرایان ارتفاع و بیشینه ریزش یک‌روزه در ایستگاه‌های موجود در اطراف حوضه، استخراج شد. با اعمال ضریب

مدت نسبتاً طولانی و در شیب‌های تند که اثر برگشت آب<sup>1</sup> ناچیز است)، قابل حل می‌باشند (چاو 1964). در این مدل تقریب موج سینماتیک برای محاسبه سیلاب در حالتی که جریان فوق‌بحرانی بوده و مقدار عدد فرود جریان ( $F_0$ ) و عدد موج سینماتیک ( $K$ ) زیاد باشد، مناسب است (موریس 1979). درمقابل، زمانی که جریان شدیداً زیر-بحرانی است و عدد فرود کوچکتر از  $0/5$  و  $KF_0^2 < 5$  است، از تقریب موج سینماتیک استفاده نمی‌شود (موریس و همکاران 1980). بر روی شیب‌های صاف و سطوح علفزار، موج دیفیوژن به‌جای مدل موج سینماتیک استفاده می‌شود (گاوینداراجو 1988). پونس و همکاران (1978) در مقایسه موج دینامیک با موج دیفیوژن، مشاهده کردند که موج دینامیک، نسبت به موج دیفیوژن، پراکندگی زیادی در مقادیر نتایج دارد. تیفور و همکاران (1993) در حل معادلات سنت-ونانت با تقریب موج سینماتیک، دیفیوژن و دینامیک، اثر شیب ثابت و توپوگرافی متغیر سطح خاک را بر روی نتایج مدل عددی ارائه شده خود و همگرایی آن، در مقایسه با نمونه آزمایشگاهی بررسی کردند. در توپوگرافی متغیر سطح خاک، به‌علت فرورفتگی و بالآمدگی‌های بستر، در بیشتر نقاط شیب منفی ایجاد می‌شود که این امر، منجر به ذخیره‌سازی جریان سطحی و برگشت آب می‌گردد. موج سینماتیک برای این حالت فیزیکی طراحی نشده و موج دیفیوژن و دینامیک نیز در این حالت نتایج همگرا ایجاد نمی‌کنند. به‌منظور ایجاد همگرایی در نتایج عددی، میکروتوپوگرافی‌های واقعی را، با یک شیب ملایم متوسط جانشین کردند که ذخیره سطحی در گره‌ها کاهش یافته و اثر برگشت آب ناچیز می‌شود. چنانچه یک شیب تند متوسط در راستای  $y$  و یک شیب ملایم در راستای  $x$  اعمال شود و فاصله تغییرات مکانی در راستای  $x$  افزایش یابد، باعث می‌شود که شیب‌های مکانی همه مثبت و تند شوند. هیدروگراف جریان خروجی حاصل، در حالت ملایم‌سازی شیب

<sup>1</sup> - Back water

ضریب رواناب محاسبه شده حوضه 0/57 برآورد شد (بی‌نام 1381).

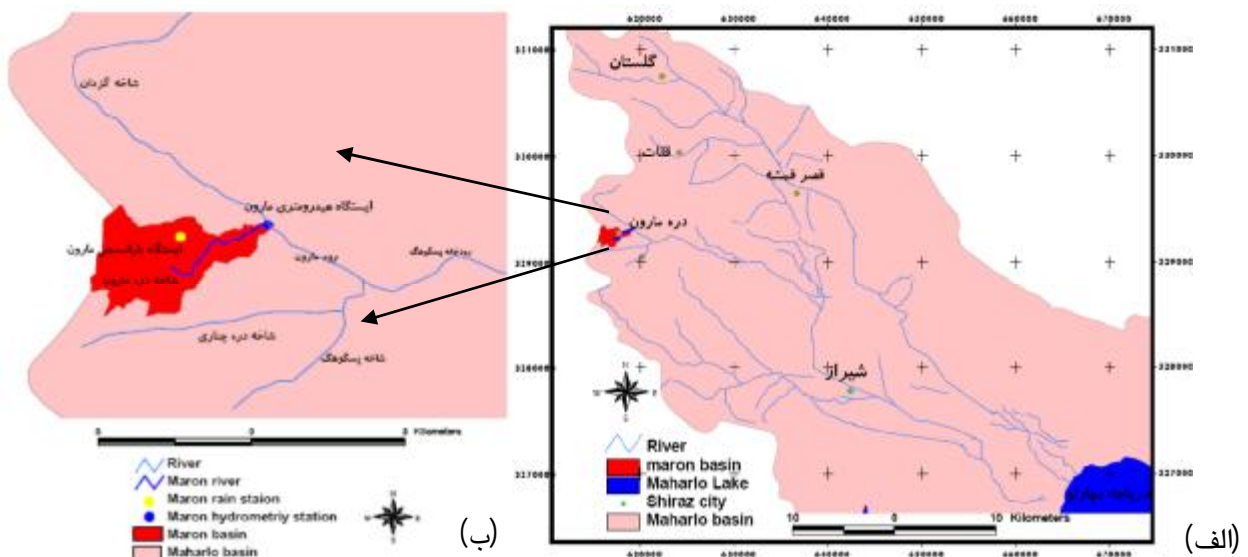
بیشینه زمانی که طول می‌کشد تا آب از دورترین نقطه حوضه مسیر هیدرولوژیکی خود را طی کرده و به نقطه خروجی برسد، زمان تمرکز نامیده می‌شود. زمان تمرکز در این مقاله با استفاده از رابطه تجربی سازمان حفاظت خاک آمریکا<sup>3</sup> محاسبه شد:

$$t_{lag} = \frac{L^{0.8}(S+1)^{0.7}}{1900y^{0.5}} \quad [1]$$

که در آن  $t_{lag}$  زمان تأخیر حوضه (ساعت)،  $L$  طول رودخانه اصلی (فوت)،  $y$  متوسط شیب حوضه (درصد) و  $S$  ضریب نگهداشت است که از رابطه  $S = \frac{1000}{CN} - 10$  محاسبه می‌شود. در این رابطه  $CN$  مقدار شماره منحنی حوضه است.  $t_c$ ، زمان تمرکز حوضه (ساعت) براساس مقدار زمان تأخیر حوضه از رابطه 2 برآورد می‌شود:

تجربی 0/87، برای تبدیل بارش نقطه‌ای به بارش بر سطح و ضریب همبستگی  $R$ ، ارتفاع بارش یک‌روزه حوضه آبریز دره مارون حاصل شد. با ضرب ارتفاع بارش یک‌روزه حوضه آبریز دره مارون، در مقدار توزیع بارش ایستگاه سازمان آب‌منطقه‌ای شیراز، توزیع بارش‌ها در حوضه دره مارون حاصل و شدت آنها از توزیع بارش‌های تجمعی محاسبه شد (آقایی دانشور 1386).

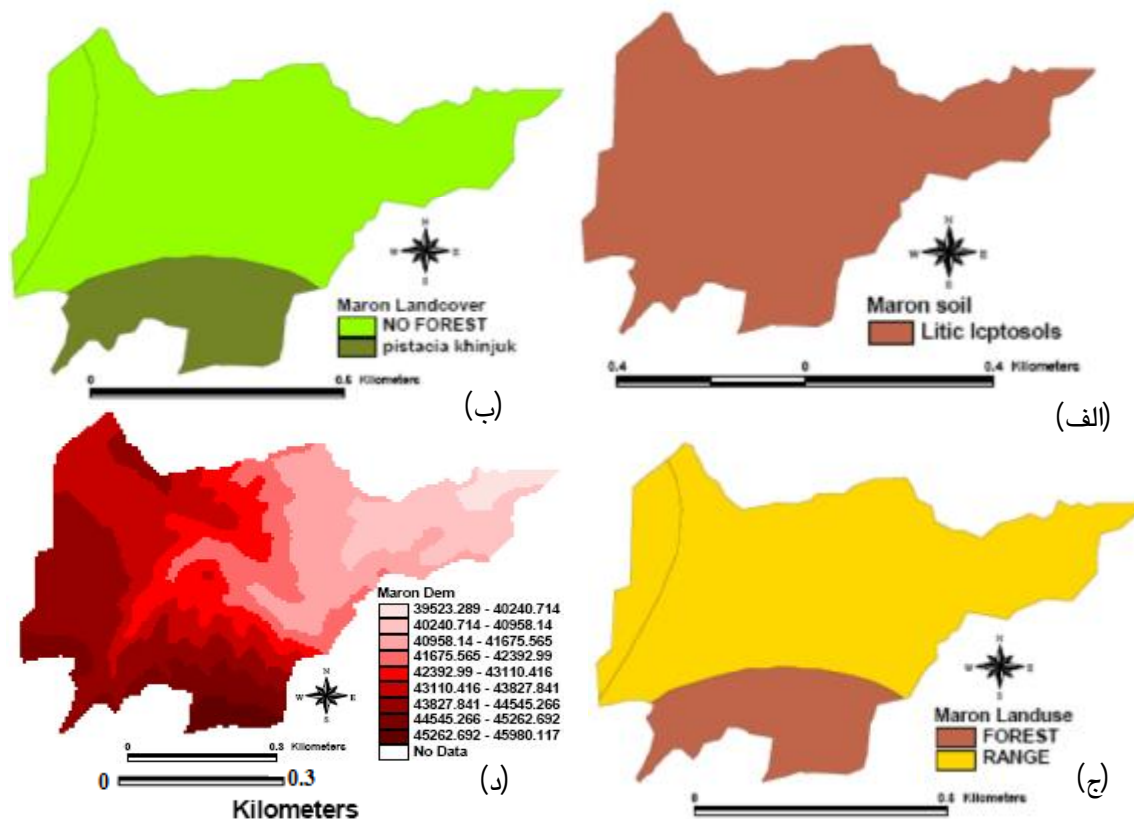
براساس مطالعات خاک‌شناسی و قابلیت اراضی، و با توجه به پروفیل‌ها و نمونه‌برداری‌های صورت گرفته، نقشه خاک و کاربری اراضی حوضه آبریز دره مارون تهیه شده است (شکل 2). حوضه آبریز دره مارون، با واحد اراضی 2.2، دارای خاک کم عمق، با بافت متوسط لومی و لومی شنی، و نفوذپذیری کم و گروه هیدرولوژیکی خاک  $C$  و  $B$  و شدت فرسایش و رسوب-دهی زیاد می‌باشد. نوع کاربری اراضی این حوضه مرتع و نوع پوشش گیاهی آن پستاسیا<sup>2</sup> می‌باشد که مقدار



شکل 1 - (الف) موقعیت شاخه‌های رودخانه خشک و حوضه آبریز و سرشاخه‌های دره مارون و دریاچه مهارلو، (ب) ایستگاه هیدرومتری و باران‌سنجی مارون.

<sup>2</sup> - Pistacia

<sup>3</sup> - SCS



شکل 2 - نقشه دیجیتالی (الف) خاک، (ب) پوشش گیاهی، (ج) کاربری اراضی و (د) مدل ارتفاعی رقومی حوضه آبریز دره مارون.

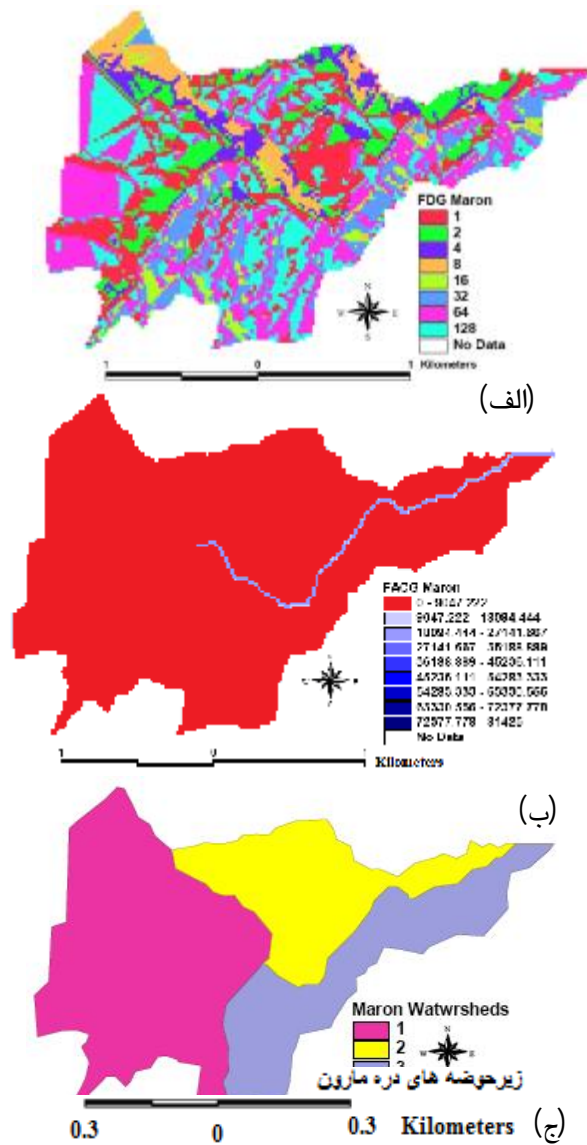
انتخابی فاکتور مساحت آستانه، در AGWA و تعداد پیکسل-ها در Hydro، حوضه دره مارون می‌تواند به تعداد متفاوتی زیرحوضه تقسیم‌بندی شود، که در نهایت سه زیرحوضه انتخاب گردید (شکل 3 ج). برای حل معادلات جریان سطحی هر یک از سه زیرحوضه را با مقادیر  $D_x$  و  $D_y$ ، شبکه‌بندی نموده و با توجه به توپوگرافی متغیر در سطح حوضه آبریز، از نتایج تیفور و همکاران (1993) در ملایم‌سازی شیب سطح حوضه استفاده کرده و هر زیرحوضه به صورت یک سطح شیبدار مستطیل شکل، با یک شیب ملایم در جهت  $x$  ( $S_x = 0/12$ ) و یک شیب تندتر در جهت  $y$  ( $S_y = 0/16$ )، به جای شیب متوسط مستطیل معادل که  $S = 0/2$  است، در نظر گرفته شد. مشخصات و ابعاد این قطعات و ضرایب و پارامترهای هیدرولیکی آنها در جدول 1 ارائه شده است.

$$t_c = 1.67(t_{lag}) \quad [2]$$

طول رودخانه اصلی حوضه دره مارون فارس 3/8 کیلومتر و مقدار شماره منحنی محاسبه شده برای این حوضه، برابر با  $CN = 84\%$  (بی نام 1381) می‌باشد. با توجه به اینکه شیب متوسط حوضه 12% است، مدت زمان تمرکز این حوضه 1/024 ساعت برآورد شد.

با توجه به انتخاب ساختار نیمه‌توزیعی برای این مدل هیدرولوژیکی در حوضه آبریز دره مارون، در ابتدا مدل ارتفاعی رقومی<sup>4</sup> (شکل 2 د)، نقشه جهات شیب و تراکم جریان از حوضه آبریز دره مارون تهیه شد (شکل 3). سپس با استفاده از فرمت، AGWA یا Hydro، حوضه آبریز دره مارون به زیرحوضه‌ها و شبکه‌های جریان، تقسیم‌بندی شد. با توجه به مقدار

<sup>4</sup> - DEM



شکل 3 - نقشه جهات شیب (الف)، تراکم جریان (ب) و مدل نیمه‌توزیعی هیدرولوژیکی و نقشه زیرحوضه‌های (ج) حوضه آبریز دره مارون.

در مدل عددی ارائه شده در این تحقیق، از مدل نفوذ پارلانگ (1982) استفاده شده که باتوجه به خصوصیات بافت لومی و لومی شنی و گزارش مطالعات پروفیل خاک حوضه دره مارون و با استفاده از نتایج مطالعات و آزمایشات راولز و همکاران (1982)، راولز و براکنسیک (1982) و سیمنز و همکاران (2004)، مقادیر ضرایب مورد نیاز این مدل نفوذ برآورد شده است. پارامترهای هدایت هیدرولیکی اشباع  $K_s = 0/541$  میلی‌متر در ساعت، تفاضل مقادیر بیشینه و اولیه رطوبت نسبی ( $q_i$  و  $q_s$ )،  $q_i - q_s = 0/35$  و مشتق کاپیلاری  $G = 108$  میلی-متر برای این حوضه محاسبه شد (آقایی دانشور، 1386).

#### حل عددی معادلات جریان سطحی و نفوذ

به‌منظور شبیه‌سازی جریان سطحی و برآورد میزان دبی جریان خروجی بر روی سطح حوضه دره مارون با مدل هیدرولوژیکی- عددی ارائه شده، معادلات جریان سطحی یک‌بعدی و دوبعدی سنت-ونانت همراه با معادلات نفوذ پارلانگ (1982) به صورت کوپل و با استفاده از روش اختلاف محدود در طرح ضمنی مرکزی حل شد. با توجه به کوهستانی بودن حوضه آبریز، تقریب موج سینماتیک جهت ساده‌سازی معادلات جریان استفاده شد و حوضه به صورت صفحه‌های شیبدار شبیه‌سازی شد.

جدول 1- برخی از مشخصات فیزیوگرافی حوضه آبریز دره مارون.

زیرحوضه آبریز	طول (m)	عرض (m)	شیب (%)	مساحت (ha)	محیط (m)	ضریب فشردگی	طول مستطیل معادل (m)	عرض مستطیل معادل (m)
1	953/93865	201/08875	18/6465	19/186	2282/25431	1/46	936/1902	204/937
2	1150/85774	116/36654	17/6446	9/454	2150/56638	1/96	978/6841	96/5991
3	816/56834	81/88756	24/2171	9/433	2093/46485	1/91	947/1376	99/5948
کل حوضه			20/1694	38/074	3521/76283	1/6	1508/482	252/3994

[7]

$$\begin{aligned} & \frac{h(i, j, k+1) - h(i, j, k)}{\Delta t} + q \frac{\partial q_x(i+1, j, k+1) - q_x(i-1, j, k+1)}{2\Delta x} \frac{\partial}{\partial x} (1-q) \\ & \frac{\partial q_x(i+1, j, k) - q_x(i-1, j, k)}{2\Delta x} \frac{\partial}{\partial x} + q \frac{\partial q_y(i, j+1, k+1) - q_y(i, j-1, k+1)}{2\Delta y} \frac{\partial}{\partial y} \\ & + (1-q) \frac{\partial q_y(i, j+1, k) - q_y(i, j-1, k)}{2\Delta y} \frac{\partial}{\partial y} = q[r(i, j, k+1) - f(i, j, k+1)] \\ & + (1-q)[r(i, j, k) - f(i, j, k)] \end{aligned}$$

در این رابطه  $i$  و  $j$  به ترتیب شماره گره‌ها در جهت  $X$  و  $Y$  و  $k$  تعداد گام زمانی است. معادلات مومنتوم در جهت  $X$  و  $Y$  نیز به فرم تفاضل محدود نوشته می‌شود و مقادیر سرعت جریان  $u$  و  $v$  از رابطه مانینگ در واحد عرض جایگزین می‌شود که منجر به سه معادله غیر خطی در هر گره از شبکه محاسباتی مدل می‌گردد. بدیهی است که معادلات یکبعدی با حذف پارامترها در راستای  $Y$  در معادلات دوبعدی حاصل می‌شود.

#### معادله نفوذ

ظرفیت نفوذ در مدل عددی حاضر براساس معادلات نفوذ پارلانگ (1982)، که شدت نفوذ در آن بیشتر از هدایت هیدرولیکی اشباع خاک است اینچنین محاسبه شده است:

$$f(i, j, k) = k_s \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{a}{\exp\left(\frac{a}{B} \cdot \frac{\partial h}{\partial z}\right) - 1} \right) \quad [8]$$

$$I = R(i, j, k) - H(i, j, k) \quad [9]$$

$$B = (G + h(i, j, k)) \cdot (q_s - q_i) \quad [10]$$

که  $f(i, j, k)$  ظرفیت نفوذ در هر نقطه از شبکه  $(ms^{-1})$  نفوذ تجمعی  $(m)$ ،  $k_s$  هدایت هیدرولیکی اشباع  $(ms^{-1})$ ،  $q_s$  و  $q_i$  به ترتیب مقدار بیشینه و اولیه رطوبت نسبی،  $G$  مشتق کاپیلاری ویژه (طول کاپیلاری)  $(m)$ ،  $h(i, j, k)$  عمق آب سطحی  $(m)$ ،  $R(i, j, k)$  عمق بارش تجمعی در هر نقطه از شبکه  $(m)$ ،  $H(i, j, k)$  ارتفاع رواناب سطحی تجمعی در هر نقطه از شبکه  $(m)$ ، و مقدار ضریب  $a$  برای بیشتر خاک‌ها 0/85 توصیه شده است (اسمیت و گودریچ 2000، هانتاش و کالین 2003).

#### معادلات سنت - ونانت دوبعدی در شرایط موج سینماتیک

معادله پیوستگی جریان و معادله اندازه حرکت (مومنتوم) در جهت  $X$  و  $Y$  به فرم زیر است:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial q_x}{\partial x} + v \frac{\partial q_y}{\partial y} = r - f \quad [1]$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g C S_{0x} - S_{fx} - \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial}{\partial t} \quad [2]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = g C S_{0y} - S_{fy} - \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\partial}{\partial t} \quad [3]$$

معادله مومنتوم در شرایط سینماتیک به صورت زیر می‌باشد:

$$S_{0x} = S_{fx} \text{ و } S_{0y} = S_{fy} \quad [4]$$

که در آن،  $h(x, y, t)$  عمق جریان سطحی  $(m)$ ،  $u(x, y, t)$  سرعت جریان در جهت  $X$   $(ms^{-1})$ ،  $v(x, y, t)$  سرعت جریان در جهت  $Y$   $(ms^{-1})$ ،  $r(x, y, t)$  شدت بارندگی  $(ms^{-1})$ ،  $f(x, y, t)$  شدت نفوذ در سطوح نفوذپذیر  $(ms^{-1})$ ،  $q_x$  مقدار جریان واحد در جهت  $X$   $(m^2s^{-1})$ ،  $q_y$  مقدار جریان واحد در جهت  $Y$   $(m^2s^{-1})$ ،  $S_{0x}$  و  $S_{0y}$  شیب‌های بستر به ترتیب در جهت  $X$  و  $Y$ ،  $S_{fx}$  و  $S_{fy}$  شیب‌های اصطکاک به ترتیب در جهت  $X$  و  $Y$  می‌باشد (موسی و بیکولیون 2001). رابطه مانینگ در واحد عرض رودخانه و ضرایب این معادله  $a_x$  و  $a_y$  از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$q_x = a_x h^m \quad q_y = a_y h^m \quad [5]$$

$$a_x = \frac{\sqrt{s_x}}{n} \quad a_y = \frac{\sqrt{s_y}}{n} \quad [6]$$

معادله پیوستگی در فرم تفاضل محدود دوبعدی

با طرح ضمنی مرکزی در شرایط موج سینماتیک به شرح رابطه 7 است که پارامتر وزنی  $q$  با مقادیر بین 0/5 و 1، نتایج ماندگار و همگرایی را ایجاد می‌کند (لیگت و کونج 1975). در این مطالعه مقدار ضریب وزنی  $q$ ، براساس نتایج مطالعات تیفور و همکاران (1993) و سیمنز و همکاران (2004)، 0/75 انتخاب شده است. همچنین برای جریان متلاطم مقدار  $m = 5/3$  می‌باشد (آکان و همکاران 2003).



**شرایط اولیه**

برای آغاز حل معادلات در روش‌های عددی شرایط اولیه، معلوم بودن متغیرها، در زمان صفر مورد نیاز می‌باشد. در حل معادلات جریان سطحی گاوینداراجو و همکاران (1988)، مقادیر اولیه عمق و سرعت جریان را در تمام حالات برابر با صفر تعریف کرده‌اند که شروع حل معادلات با یک سطح خشک اولیه، منجر به مشکلاتی در حل معادلات می‌شود. از این رو تیفور و همکاران (1993) یک عمق اولیه برابر با 0/0003 میلی‌متر، برای جریان سطحی بر روی سطح خاک در نظر گرفتند. البته آکان و ین (1981)، نشان دادند که چنین فرض‌های اولیه بر روی نتایج تأثیری ندارند (تیفور و همکاران 1993). بدین ترتیب شرایط اولیه اتخاذ شده در این مطالعه، برای حل معادلات جریان سرعت‌های نخستین در تمام دامنه صفر در نظر گرفته شده و عمق جریان سطحی اولیه نیز 0/0003 میلی‌متر فرض شده است.

**شرایط مرزی**

شرایط مرزی که بیان‌گر مقادیر مشخص متغیرها در مرزهای محیط می‌باشد، به نوع جریان و شیب بستر بستگی دارد. در جریان زیربحرانی، یک شرط و در جریان فوق‌بحرانی، دو شرط مرزی در بالادست لازم

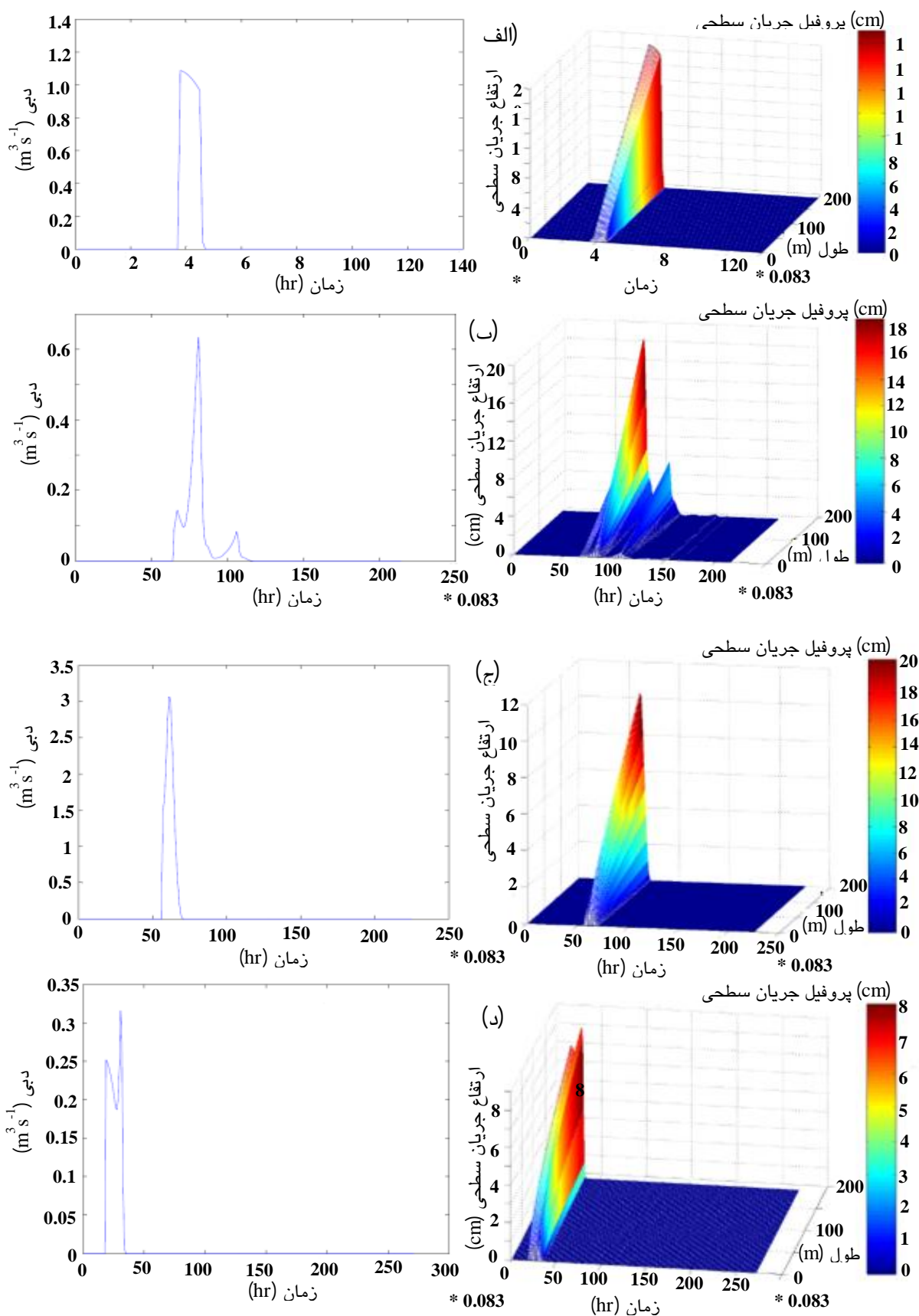
می‌باشد. برای جریان زیربحرانی در مرز پایین‌دست یک شرط مرزی و در جریان فوق‌بحرانی شرط مرزی برای پایین‌دست، مورد نیاز نمی‌باشد (موریس 1979). وولهیزر و لیگت (1967)، دو شرط مرزی بالادست را گرادیان عمق جریان و سرعت جریان برابر صفر استفاده نمودند (آکان و همکاران 2003). در این مطالعه شرایط مرزی مختلط برای حل معادلات جریان در یک و دوبعد اتخاذ شده است که در مرز بالادست عمق و سرعت جریان، و در مرز پایین‌دست گرادیان عمق جریان برابر با صفر می‌باشد که شرط جریان خروجی است.

**شدت بارندگی**

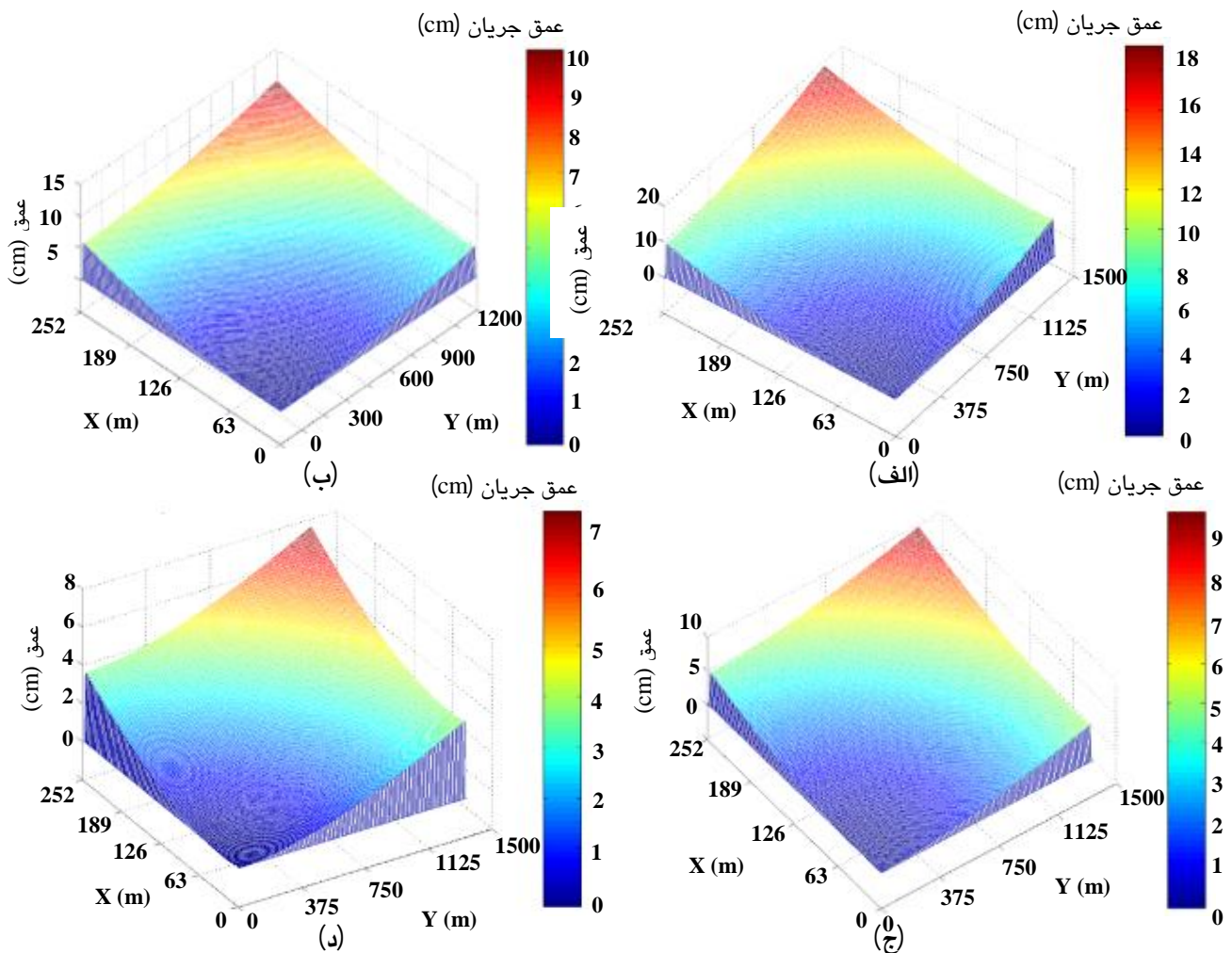
شدت بارندگی در مدل عددی ارائه شده، نسبت به زمان متغیر و نسبت به مکان در دو جهت X و Y ثابت در نظر گرفته شده است. مقادیر شدت بارندگی حوضه آبریز دره مارون با استفاده از مقادیر بارش ایستگاه ثبات سازمان آب منطقه‌ای شیراز، مطابق رویدادهای سیلاب اندازه‌گیری شده در ایستگاه هیدرومتری مارون استخراج شد (آقایی دانشور 1386). بر این اساس 4 سیلاب در تاریخ 1380/9/22، 1381/10/21، 1381/10/18 و 1383/9/23 جهت بررسی دقت مدل عددی، انتخاب گردید.

**جدول 2- درصد خطاهای مقادیر دبی‌های خروجی مشاهداتی و محاسباتی مدل یک و دوبعدی، رویدادهای منتخب حوضه دره مارون.**

مدل عددی	مدل عددی یک‌بعدی					مدل عددی دوبعدی		
	1380/9/22	1380/10/18	1380/10/21	1383/9/23	1380/9/22	1380/10/18	1380/10/21	1383/9/23
رویدادهای منتخب حوضه آبریز مارون								
$E_{qp}$ درصد خطا در اوج جریان	1/09	0	4/325	.	1/718	0/64	0	6/06
$E_{tp}$ درصد خطا در زمان اوج	7/58	0/064	6/25	4/306	0	0	1/53	0
$S_e$ خطای استاندارد	0/368	0/195	1/23	0/058	0/31	0/196	0/912	0/051
SAR مجموع باقیمانده	25/55	20/58	158/7	4/624	21/89	20/74	119/037	3/94
B میزان اریب	25/42	20/576	157/077	4/48	21/89	20/73	117/911	3/094
$R^2$ ضریب همبستگی	0/7	0/99	0/38	0/424	0/5	0/986	0/54	0/612



شکل 4 - نتایج شبیه‌سازی مدل یک‌بعدی پروفیل جریان سطحی و هیدروگراف جریان خروجی سیلاب الف) (1380/9/22، ب) (1380/10/18، ج) (1380/10/21 و د) (1383/9/23 حوضه آبریز دره مارون).



شکل 5 - پروفیل جریان سطحی مدل دوبعدی (الف) سیلاب 1380/9/22، (ب) سیلاب 1380/10/18، (ج) سیلاب 1380/10/21 و (د) سیلاب 1383/9/23 حوضه آبریز دره مارون.

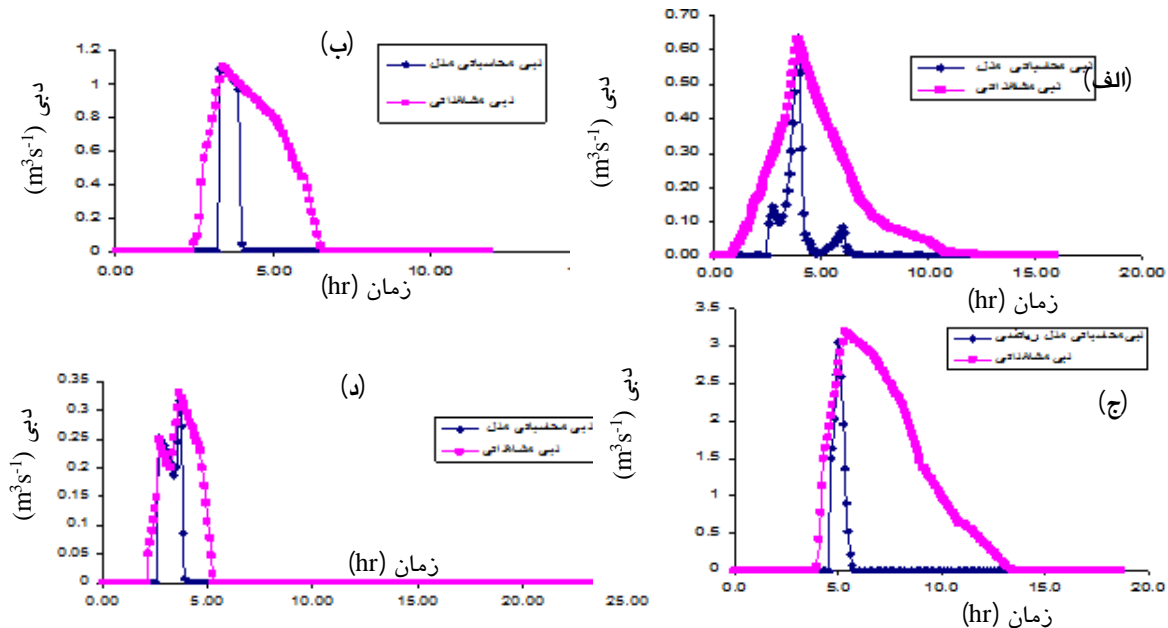
## نتایج و بحث

معادلات غیرخطی تفاضل محدود در حالت یک و دوبعد برای هر گره از شبکه جریان، با روش ضمنی، به صورت دستگاه معادلات غیرخطی  $n$  معادله و  $n$  مجهول تهیه شد و با استفاده از روش نیوتن رافسون حل گردید. الگوریتم حل و برنامه آنها در حالت یک و دوبعد، با استفاده از نرم‌افزار متلب تهیه شده و برای 4 رویداد بارندگی مذکور، بر روی حوضه آبریز دره مارون اجرا شد. عمق و پروفیل جریان سیلاب‌های وقوع یافته در هر دو حالت با استفاده از نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده و هیدروگراف‌های دبی جریان خروجی محاسبه گردید که در شکل‌های 4 و 5 نشان داده شده است. مقادیر دبی محاسباتی مدل عددی با مقادیر اندازه‌گیری شده در

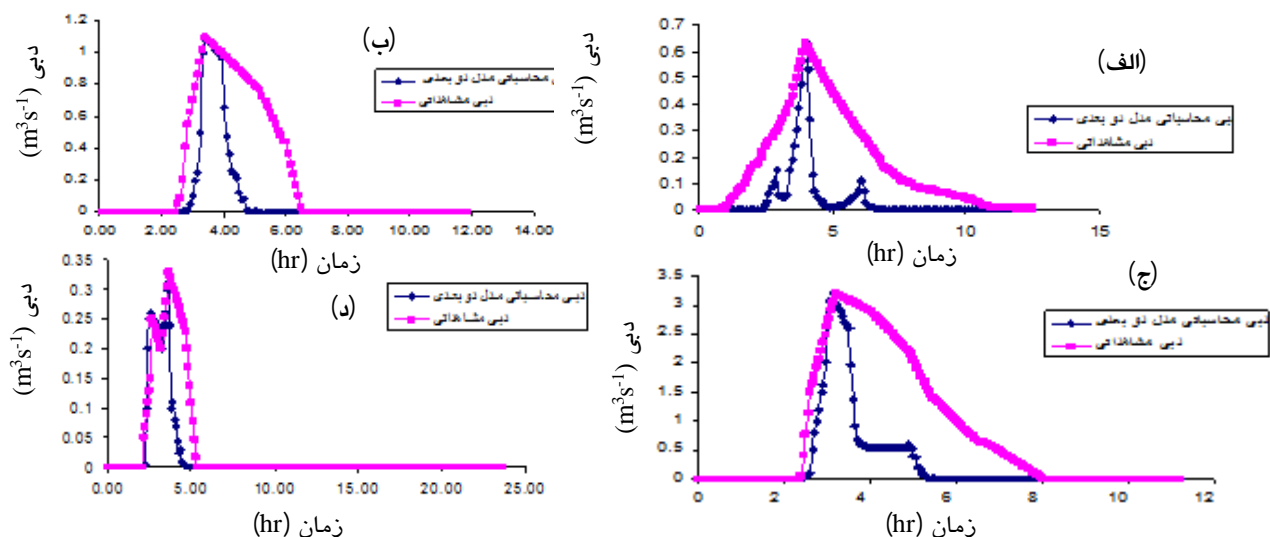
ایستگاه هیدرومتری مارون به‌منظور بررسی صحت و دقت نتایج، مقایسه گردید (شکل‌های 6 و 7). میزان دقت و کارایی مدل عددی در برآورد دبی خروجی، با استفاده از ضریب همبستگی بدون بعد نش و ساتکلیف (1970)، بین مقادیر دبی محاسباتی مدل عددی یک و دوبعدی در مقایسه با مقادیر دبی خروجی مشاهداتی از حوضه آبریز دره مارون فارس، در رویدادهای منتخب برآورد گردید (جدول 2). همچنین، معیارهای دیگر خطا شامل میزان اریب و مجموع باقی‌مانده‌های مطلق بین داده‌های محاسباتی و مشاهداتی محاسبه شد (جدول 2). ضرایب آماری خطای استاندارد، درصد خطا در مقدار و زمان وقوع دبی‌های بیشینه برآورده شده از مدل عددی برای رویدادهای منتخب مذکور محاسبه شد (جدول 2). در

در دبی اوج سیلاب‌های 1380/10/21 و 1383/9/23 به- ترتیب در مدل یک‌بعدی و دوبعدی، در سایر سیلاب‌ها مناسب است. بنابراین، موج سینماتیک تقریب مناسبی در برآورد دبی اوج سیلاب است.

تمامی سیلاب‌ها مقدار دبی اوج سیلاب محاسباتی و مشاهداتی مساوی و یا بسیار نزدیک می‌باشند. دقت مدل عددی در برآورد دبی اوج سیلاب، به‌جز مقدار اندکی خطا



شکل 6 - هیدروگراف‌های محاسباتی مدل یک‌بعدی و مشاهداتی الف) سیلاب 1383/9/23، ب) سیلاب 1380/10/18، ج) سیلاب 1380/10/21 و د) سیلاب 1383/9/2 حوضه دره مارون.



شکل 7 - هیدروگراف‌های محاسباتی مدل دوبعدی و مشاهداتی الف) سیلاب 1383/9/23، ب) سیلاب 1380/10/18، ج) سیلاب 1380/10/21 و د) سیلاب 1383/9/2 حوضه دره مارون.

سینماتیک و مدل نفوذ پارلانگ (1982) به‌صورت هم- زمان، یک مدل عددی- هیدرولوژیکی برآورد سیلاب در

نتیجه‌گیری کلی: در این مطالعه با حل معادلات یک و دوبعدی جریان سطحی سنت- ونانت با تقریب موج

حوضه آبریز تهیه گردید. به منظور ارزیابی دقت و صحت نتایج، این مدل عددی در حوضه آبریز دره مارون فارس اجرا شد و عمق جریان سطحی و هیدروگراف دبی سیلاب خروجی از این حوضه محاسبه شد. به منظور تعیین وضعیت توپوگرافی و شیب سطح حوضه مورد استفاده در معادلات مدل عددی، مدل ارتفاعی رقومی، نقشه جهات شیب و تراکم جریان از حوضه آبریز دره مارون تهیه شد و حوضه آبریز به سه زیرحوضه با شیب مشخص تقسیم شد. پارامترهای مورد نیاز معادله نفوذ پارلانگ (1982)، با توجه به نقشه‌های خاک، پوشش گیاهی و کاربری اراضی استخراج شد. پس از بررسی نتایج و ارزیابی فاکتورهای آماری مشخص شد که به-طور کلی میانگین ضریب همبستگی بدون بعد برای مدل یکبعدی در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان خروجی از حوضه دره مارون در رویدادهای منتخب مذکور،  $0/62$  و در مدل دوبعدی،  $0/65$  بوده است. همچنین میانگین خطای استاندارد مدل عددی یک و دوبعدی در برآورد دبی جریان خروجی به ترتیب  $0/46$  و  $0/36$  محاسبه شده است. بنابراین، نتایج نشان می‌دهد که استفاده از مدل دوبعدی نسبت به مدل یکبعدی در شبیه‌سازی هیدروگراف دبی جریان خروجی از حوضه دره مارون دقت بالاتری دارد. با توجه به ماهیت دوبعدی جریان در سیلاب دشت‌ها مدل دوبعدی پروفیل سیلاب حاصل از رویدادهای منتخب را بهتر برآورد کند. علاوه بر این میانگین درصد خطا در پیش‌بینی مقدار دبی اوج جریان با مدل عددی یک و دوبعدی در مقایسه با دبی اوج

مشاهداتی به ترتیب  $2/7$  و  $2/8$  درصد و میانگین درصد خطا در پیش‌بینی مقدار زمان دبی اوج جریان با مدل عددی یک و دوبعدی به ترتیب  $4/55$  و  $1/53$  درصد برآورد شده است. در نتیجه، دقت مدل عددی در برآورد دبی اوج سیلاب، مناسب بوده و تقریب موج سینماتیک تقریب مناسبی در برآورد دبی اوج سیلاب می‌باشد. همچنین مدل عددی یکبعدی مقدار دبی اوج جریان را بهتر از مدل عددی دوبعدی پیش‌بینی کرده است. اما مدل عددی دوبعدی عملکرد بهتر و دقیق‌تری در پیش‌بینی زمان لازم برای رسیدن به دبی اوج جریان داشته است. محاسبه مقدار میانگین ضریب اریب بین دبی‌های محاسباتی و مشاهداتی حوضه آبریز دره مارون که در مدل یکبعدی  $51/8$  و در مدل دوبعدی  $40/9$  بوده است، نشان می‌دهد که مدل دوبعدی روند بهتری برای هیدروگراف جریان خروجی برآورد کرده است. مقدار اریب زیاد بین هیدروگراف‌های محاسباتی و مشاهداتی در رویدادهای منتخب مذکور به جهت استفاده از تقریب موج سینماتیک در مدل عددی و ایجاد موج و دبی اوج ناگهانی در هیدروگراف سیلاب و افت سریع در بازوی کاهنده هیدروگراف است. هرچند روند تقریباً مشابهی بین بازوی بالارونده هیدروگراف‌های محاسباتی و مشاهداتی تمام سیلاب‌ها مشاهده می‌شود، اما روند بازوی فروکش هیدروگراف‌ها، به سبب استفاده از موج سینماتیک در مدل عددی شباهت کمتری دارد. بنابراین استفاده از موج دیفیوژن در شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب با شکل طبیعی‌تر پیشنهاد می‌گردد.

#### منابع مورد استفاده

- آقایی دانشور ف، 1386. تخمین مقدار بده جریان سطحی و بار رسوب با دو مدل SWAT و KINEROS2 در حوضه آبریز بافت و چشمه عروس کرمان و ارائه مدل عددی حل معادلات هیدرودینامیکی جریان و نفوذ در حوضه آبریز دره مارون فارس. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی بخش مهندسی آبیاری دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- بی نام، 1381. خلاصه‌ای از گزارش ارزیابی سیمای حوضه آبخیز رودخانه خشک شیراز. اداره ارزیابی و اطلاعات جغرافیایی، وزارت جهاد کشاورزی، سازمان جهاد کشاورزی و مدیریت آبخیزداری، فارس.

طیبه پور ف، 1385. گزارش آماری حوضه معرف پسکوهک سال آبی 84 - 1383. دفتر آب‌های سطحی معاونت مطالعات منابع آب، شرکت سهامی آب منطقه‌ای، فارس.

- Abbott MB and Fang CS, 1967. On the numerical computation of nearly horizontal flows. *Journal of Hydraulic Research* 5(2): 97-117.
- Akan AO and Houghtalen RJ, 2003. *Urban Hydrology, Hydraulics, Storm Water Quality Engineering Applications and Computer Modeling*. John Wiley & sons INC.
- Amein M and Fang CS, 1970. Implicit flood routing in natural channels. *Journal of the Hydraulics Division (ASCE)* 96(12): 2481-2500.
- Chaudhry YM and Contractor DN, 1973. Application of the implicit method to surges in open channels: *Water Resources Research* 9(6): 1605-1612.
- Chow VT, 1964. *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw-Hill Book Co, New York.
- Chow VT and Ben-Zvi A, 1973. Hydrodynamic modeling of two-dimensional watershed flow. *Journal of Hydraulics Division ASCE* 99(11): 2023-2039.
- Govindaraju RS, Jones SE and Kavvas ML, 1988. On the diffusion wave model for overland flow 1. Solution for steep slopes. *Water Resources Research* 24(5): 734-744.
- Hantush MM, Kalin L, 2003. Modeling uncertainty of runoff and sediment yield using a distributed hydrologic model. Pp. 325-331. 1st Interagency Conference on Research in the Watersheds (ICRW).
- Henderson FM and Wooding RA, 1964. Overland flow and ground-water flow from a steady rainfall of finite duration. *Geophysical Research* 69(8): 1531-1540.
- Kawahara M and Yokoyama T, 1980. Finite element method for direct runoff flow. *Journal of Hydraulic Engineering* 106 (4): 519-534.
- Liggett JA and Cunge JA, 1975. Numerical methods of solution of the unsteady flow equations. Pp. 89-180. In: Mahmood K and Yevjevich V (eds) *Unsteady Flow in Open Channels*. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, USA.
- Morris EM, 1979. The effect of the small slope approximation and lower boundary conditions on solutions of the Saint-Venant equations. *Journal of Hydrology* 40: 31-47.
- Morris EM and Woolhiser DA, 1980. Unsteady one-dimensional flow over a plane: partial equilibrium and recession hydrographs. *Water Resources Research* 16(2): 355-360.
- Moussa R and Boequillon C, 2001. Fractional step method solution of diffusive wave equation. *Journal of Hydrologic Engineering* 6(1): 11-19.
- Nash JE and Sutcliffe TE, 1970. River flow forecasting through conceptual models part I, a discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3): 282-290.
- Parlange JY, Lise I, Braddock RD and Smith RE, 1982. The three parameter infiltration equation. *Soil Science* 133(6): 337-341.
- Ponce VM, Simons DB, and Li RM, 1978a. Applicability of kinematic and diffusion models. *Journal of Hydraulics Division ASCE* 104(3): 353-360.
- Ponce VM, Simons DB, and Indlekofer H, 1978b. Convergence of four-point implicit water wave models. *Journal of the Hydraulics Division (ASCE)* 104(7): 947-958.
- Price RK. 1974. Compression of four numerical methods for flood routing. *Journal of the Hydraulics Division (ASCE)* 100(7): 879-899.
- Rawls WJ, Brakensiek DL and Saxton KE, 1982. Estimation of soil water properties. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 25(5): 1316-1328.
- Rawls, WJ and Brakensiek DL, 1982. Estimating soil water retention from soil properties. *Journal of Irrigation and Drainage engineering* 108(2): 166-171.
- Semmens DJ, Goodrich DC, Unkrich CL and Smith RE, 2004. *KINEROS 2 Modeling Framework*. Agricultural Research Service ARS, U.S. Dept. of Agriculture, Tucson, Ariz.
- Smith RE and Goodrich DC, 2000. Model for rainfall excess patterns on randomly heterogeneous areas. *Journal of Hydrologic Engineering* 5(4): 355-362.
- Tayfur G, Kavvas ML, Govindaraju RS, and Storm DE, 1993. Applicability of st-venant equations for two-dimensional overland flows over rough infiltrating surfaces. *Journal of Hydraulic Engineering* 119(1): 51-63.
- Tayfur G and Singh VP, 2004. Numerical model for sediment transport over nonplanar, nonhomogeneous surfaces. *Journal of Hydrologic Engineering* 9(1): 35-42.
- Woolhiser DA and Liggett JA, 1967. Unsteady, one-dimensional flow over a plane the rising hydrograph. *Water Resources Research* 3(3): 753-763.
- Zhang W and Cundy TW, 1989. Modeling of two-dimensional overland flow. *Water Resources Research* 25(9): 2019-2035.