# شبیه‌سازی الگوی جریان با یک مدل عددی دوبعدی در بازه‌ای از پیچان‌رود طبیعی؛ مطالعه موردی رودخانه خشکه رود فارسان، استان چهارمحال و بختیاری

محمد فتحی[۱*]، افشین هنربخش[۱]، محمد رستمی[۲] و علیرضا داودیان دهکردی[۳]

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۲/۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۲/۱۲)

## چکیده

**در این مقاله مزیت و اهمیت یک مدل عددی به منظور پیش‌بینی و پایش فرآیندهای حاکم بر جریان رودخانه‌ها مورد بحث قرار گرفته است. به همین منظور و با توجه به اهمیت سرعت جریان آب و تنش‌های برشی ناشی از آن بر فرسایش کناره‌ها و کف رودخانه، از یک مدل عددی دو بعدی تحت عنوان CCHE2D برای شبیه‌سازی الگوی جریان در بازه‌ای از یک پیچان‌رود طبیعی (خشکه رود فارسان در ۳۰ کیلومتری غرب شهرکرد) بهره گرفته شده است. در این بررسی پس از نقشه‌برداری دقیق نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس مناسب از محدوده مورد مطالعه به‌دست آمد و سپس هندسه مدل و شبکه محاسباتی با ابعاد مختلف تهیه، و در نهایت براساس مشخصات اندازه‌گیری شده جریان رودخانه، مدل هیدرودینامیک دو بعدی متوسط عمق، اجرا و نتایجی همچون توزیع عمق و سرعت جریان در خم رودخانه استخراج گردید. نتایج به‌دست آمده نشان دادند که بهره‌گیری از مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای مدل‌سازی جریان آب، ما را یک گام به پیش‌بینی‌های کلی‌تر برای فرآیندهای حاکم بر جریان در رودخانه‌های پیچان‌رودی نزدیک‌تر می‌کند. نتایج شبیه‌سازی با نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری صحرایی نشان داد، مدل CCHE2D از قابلیت خوبی جهت پیش‌بینی مشخصات جریان در رودخانه‌های پیچان‌رود برخوردار است.**

**واژه‌های کلیدی: سرعت جریان، تنش برشی، مدل عددی CCHE2D، پیچان‌رود، ضریب زبری**

۱. گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد

۲. پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری کشور

۳. گروه زمین‌شناسی، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: fathiapadana@gmail.com



[ Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2024-03-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.9.8 ]

**مقدمه**

به‌طور کلی شبیه‌سازی جریان آب و حمل رسوبات در رودخانه‌ها، موضوع مورد علاقه بسیاری از متخصصین علوم مهندسی رودخانه و هیدرولیک رسوب است. هم‌چنین مدل‌سازی فرآیندهای حمل رسوب که مبتنی بر زمان هستند و ارتباط مستقیمی با تغییرات بستر رودخانه دارند (۲ و ۳)، هنوز به‌عنوان موضوعات تحقیقاتی بسیار مهم در مهندسی و مدیریت رودخانه‌ها محسوب می‌شوند.

در دهه‌های اخیر، فرآیندهای حاکم بر جریان آب و حمل رسوب به‌صورت دقیق‌تر، مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته‌اند. هم‌چنین، با پیشرفت‌های به‌وجود آمده در توانمندی کامپیوترها و توسعه روش‌های محاسبات عددی، استفاده از مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی ( Computational Fluid Dynamics)، به‌صورت چشمگیری افزایش یافته است و امروزه کاربرد مدل‌های CFD، به‌عنوان یک ابزار مؤثر برای مهندسین هیدرولیک در بررسی کانال‌های روباز و فرآیندهای رودخانه‌ای محسوب می‌شود (۴). بدون شک، تعداد زیادی مدل عددی برای تشریح فرآیندهای جریان در کانال‌های روباز و رودخانه‌ها وجود دارند؛ این مدل‌ها به سه بخش: یک بعدی (1D)، دو بعدی (2D) و سه بعدی (3D) تقسیم می‌شوند (۴).

یکی از محققین (۵)، در مطالعات خود به شبیه‌سازی جریان و انتقال رسوب در پایین‌دست رودخانه زرد در کشور چین پرداخت. هم‌چنین با استفاده از مدل عددی دوبعدی، مدل‌های آشفتگی دو معادله‌ای $k-\varepsilon$ را با مدل‌های صفرمعادله‌ای مقایسه نمود. براساس مقایسه، این نتیجه حاصل شد که تمام مدل‌های آشفتگی، نتایجی واقعی (نزدیک) در مورد جریان‌های ساده ارائه می‌کنند؛ اما در خصوص جریان‌های پیچیده، دو مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ و RNG نتایجی واقعی‌تری را نسبت به مدل‌های صفرمعادله‌ای نشان می‌دهند. هم‌چنین براساس این تحقیق، در میان مدل‌های دو معادله‌ای، مدل $k-\varepsilon$ و مدل RNG در مورد جریان‌های چرخشی، نتایج بهتری ارایه می‌کنند.

مین دوک و همکارانش در سال ۲۰۰۴ (۶)، یک مدل دو بعدی متوسط‌گیری شده در عمق را برای جریان ناپایدار در رودخانه‌های با هندسه نامنظم توسعه دادند که از معادلات حاکم شامل پیوستگی و اندازه حرکت (گشتاور) و هم‌چنین یک معادله آشفتگی $k-\varepsilon$ در سیستم مختصات منحنی استفاده نمودند. برای حل این معادلات نیز، روش حجم محدود (FVM) به‌کار برده شد. سپس مدل عددی با استفاده از مدل هیدرولیکی رودخانه راین آزمایش شد. لازم به ذکر است که در اندازه‌گیری‌های مدل هیدرولیکی، بیشترین تمرکز بر روی حداقل تراز آب بین آب شکن‌ها (Groyne) و پشته‌های خاکی (Embankment) قرار داده شده بود. در پایان نتایج عددی نشان داد، اثر آب شکن‌ها بر توزیع سرعت، به‌خوبی توسط مدل عددی شبیه‌سازی می‌گردد.

کاسم و چاودهری در سال ۲۰۰۲ (۷)، یک مدل دوبعدی متوسط‌گیری شده در عمق برای مدل‌سازی جریان ناپایدار و تغییر شکل بستر در کانال های پیچان‌رود آبرفتی ارایه نمودند. در این مدل، تغییر شکل بستر بر پایه معادله پیوستگی رسوب بود. معادلات جریان ناپایدار همراه با معادله پیوستگی رسوب با استفاده از روش عددی تفاوت محدود (FDM) حل شدند. برای تأیید این مدل، داده‌های اندازه‌گیری شده در فلوم‌های آزمایشگاهی با قوس‌های $^{\circ}$۱۴۰ تا $^{\circ}$۱۸۰ استفاده شد. نتایج محاسبات نشان داد، توافق خوبی بین توپوگرافی بستر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده وجود دارد.

گو و جین در سال ۱۹۹۹ (۸)، مدلی یک بعدی را برای شبیه‌سازی بستر در کانال‌های آبرفتی ارایه کردند که نوعی مدل جریان ناپایدار و حمل رسوب بود و برای حل معادلات حاکم بر جریان، از روش حجم کنترل استفاده شد. در پایان، مقایسه نتایج عددی به‌دست آمده از این مدل با داده‌های تجربی ارایه شده توسط برخی محققین(۸) از یک طرف و نتایج محاسباتی از مدل HEC-6 از سوی دیگر، نشان داد که قابلیت مدل پیشنهادی، خصوصاً در محاسبه غلظت رسوب و پروفیل‌های تراز بستر رودخانه بسیار مناسب است.



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.9.8 ]

منصوری، ۱۳۸۵ (۱) در قالب پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، خاصیت سه‌بعدی جریان در خم‌های رودخانه را با مدل‌های عددی سه‌بعدی شبیه‌سازی نمود. در این مطالعه، با استفاده از مدل عددی سه بعدی SSIIM، ابتدا الگوی جریان آشفته در دو قوس ۱۸۰ درجه با انحنای نسبی متفاوت که در آنها بستر کانال صلب بود، بررسی شد. نتایج نشان داد که مدل نسبتاً به انتخاب شبکه، حساس بوده ولی الگوی جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل با الگوی جریان واقعی مطابقت دارد.

همان‌طوری که ملاحظه می‌شود، در تمامی تحقیقات فوق، یک مدل فیزیکی با مدل‌های عددی مقایسه شده‌اند و مطالعات انجام شده بر روی الگوی جریان و انتقال رسوبات در یک کانال مستقیم‌الخط انجام یافته است؛ ولی در این تحقیق، در نظر است که موضوع از حالات تئوری و آزمایشگاهی فراتر بررسی شود و با انتخاب یک مدل عددی دوبعدی توانمند، قابلیت‌های آن در شبیه‌سازی الگوی جریان در طبیعت (مطالعه صحرایی یا میدانی) به آزمون گذاشته شود.

## مواد و روش‌ها

### الف) مشخصات مدل عددی CCHE2D

مدل عددی CCHE2D، یک مدل عددی برای شبیه‌سازی جریان غیردائم آشفته و انتقال رسوب در کانال‌های باز می‌باشد که در مرکز بین‌المللی علوم هیدرولیک و مهندسی محاسباتی ( National Center for Computational Hydraulic and Engineering یا NCCHE)، دانشکده فنی دانشگاه می‌سی‌سی‌پی آمریکا تهیه و توسعه یافته است. این مدل جزء مدل‌های هیدرودینامیکی دو بعدی بوده که برای ساخت هندسه و شبکه‌بندی میدان مطالعاتی از یک نرم‌افزار مجزای پیش پردازنده (Pre-Processor) تحت عنوان CCHE-MESH برخوردار است و حل میدان جریان و انتقال رسوب و هم‌چنین مشاهده نتایج در محیط گرافیکی نرم‌افزار، با عنوان CCHE-GUI، انجام می‌شود (۴).

### ب) معادلات حاکم بر جریان

مدل عددی CCHE2D، برای حل میدان جریان از معادلات رینولدز متوسط‌گیری شده در عمق (Depth-Average) استفاده می‌کند و برای شبیه‌سازی معادلات انتقال آشفتگی، از دو مدل صفر معادله‌ای گرانروی چرخابه سهمی شکل ( Parabolic Eddy Viscosity) و مدل طول اختلاط (Mixing Length) گرانروی گردابه‌ای و نیز مدل دو معادله‌ای $k-\varepsilon$ استفاده می‌کند. گسسته‌سازی معادلات میدان جریان و انتقال رسوب با استفاده از روش مبتنی بر المان محدود (FEM) صورت می‌گیرد و حل معادلات جبری میدان جریان و انتقال رسوب به‌ترتیب با استفاده از روش‌های: تصحیح سرعت و تکرار گوس- سایدل و حداکثر ضمنی یا SIP (Strongly Implicit Procedure) انجام می‌شود (۴ و ۵). در زیر معادلات پیوستگی (۱) و حرکت (۲ و ۳) آمده است.

#### الف) معادله پیوستگی

$$\frac{\partial Z}{\partial t}+\frac{\partial (hu)}{\partial x}+\frac{\partial (hv)}{\partial y}=0 \qquad [1]$$

#### ب) معادله حرکت

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+u\frac{\partial u}{\partial y}=-g\frac{\partial Z}{\partial x}+\frac{1}{h}\left[\frac{\partial (h\tau_{xx})}{\partial x}+\frac{\partial (h\tau_{xy})}{\partial y}\right]-\frac{\tau_{bx}}{\rho h}+f_{Cor}v \qquad [2]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}=-g\frac{\partial z}{\partial y}+\frac{1}{h}\left[\frac{\partial (h\tau_{xy})}{\partial x}+\frac{\partial (h\tau_{yy})}{\partial y}\right]-\frac{\tau_{by}}{\rho h}+f_{Cor}u \qquad [3]$$

که در این معادلات، u و v مولفه سرعت در عمق میانگین به‌ترتیب در جهت x و y؛ g شدت نیروی ثقل؛ z تراز سطح آب، $\rho$ چگالی آب، h عمق آب، $f_{Cor}$ پارامتر کوریولیس، $\tau_{xx}$ و $\tau_{xy}$ و $\tau_{yx}$ و $\tau_{yy}$ نیروی رینولدز انتگرال‌گیری شده از عمق و $\tau_{by}$ و $\tau_{bx}$ نیروی برشی سطح بستر، در راستای x و y هستند (۹).



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.9.8 ]

**ج) معادله آشفتگی**

برای شبیه‌سازی اثر آشفتگی بر الگوی جریان و بستن سیستم معادلات حاکم، مدل CCHE2D از مدل‌های گرانروی چرخابه سهمی شکل، طول اختلاط و $k-\varepsilon$ بهره می‌برد. در این تحقیق نیز برای شبیه‌سازی الگوی جریان آشفته، از مدل استاندارد و توانمند $k-\varepsilon$ بهره بردیم که در این مدل، معادله k برای انرژی جنبشی توربولانس (آشفته) و $\varepsilon$ برای نرخ پراکندگی انرژی توربولانس تعریف می‌شود؛ در ذیل معادلات مربوط به این مدل ترکیبی (۴ و ۵) آمده است و برای مطالعات بیشتر به منابع مراجعه شود.

$$k = \frac{1}{2}\overline{u}'_i\overline{u}'_i \qquad [۴]$$

$$\varepsilon = \mu_t \frac{\overline{\partial} u'_i}{\partial x_i}\frac{\overline{\partial} u'_i}{\partial x_j} \qquad [۵]$$

**ج) موقعیت طبیعی منطقه مورد مطالعه**

محدوده مطالعه، بازه‌ای پیچان‌رود از رودخانه خشکه‌رود در حوزه آبخیز شهر فارسان در غرب شهرکرد و استان چهارمحال و بختیاری است. دو نکته قابل تامل در مورد رودخانه خشکه‌رود، پل عیسی‌آباد در بالادست است که بر روی الگوی جریان بازه تأثیر می‌گذارد و پدیده برداشت بی‌رویه شن و ماسه توسط کارخانه شن‌شویی گوجان در پایین‌دست می‌باشد که باعث تشدید حفره آبشویی در پایین‌دست قوس شده است. موقعیت جغرافیایی رودخانه، ۴۵۵۶۹۶/۵۲ طول شرقی و ۳۵۷۱۳۴۷/۳۱ عرض شمالی است. طول بازه پیچان‌رود ۴۹۴/۲m، حداکثر ارتفاع ۲۰۴۶m، حداقل ۲۰۴۱m و شیب عمومی حدود ۱٪ است. گفتنی است که محدوده بازه پیچان‌رود انتخابی، از لحاظ مورفولوژیکی فاقد عوارض مشخص در بستر رودخانه بوده، جنس رسوبات کناره‌ها از نوع آبرفتی کواترنر بوده که دارای حساسیت به فرسایش بالا می‌باشند، پدیده تراوش آب از درز و شکاف‌های موجود در کناره‌های کانال قابل مشاهده است و هم‌چنین در طول قوس انتخابی، پوشش گیاهی بارز و مشخصی دیده نمی‌شود. همان‌طور که می‌دانیم زاویه مرکزی، یکی از پارامترهای مهم است که در رودخانه‌های مئاندری، همواره مورد مطالعه قرار می‌گیرد. معادله در رابطه (۱) آمده است: (۱) $A = ۱۸۰L/R\pi$، که A اندازه زاویه مرکزی و L طول قوس و R شعاع قوس‌اند. کورنیس (Kornis_1980) برای بیان کمی میزان توسعه یا پیشرفت پیچان رودی شدن در رودخانه‌های آبرفتی و تمایز آنها از یکدیگر با استفاده از زاویه مرکزی، تقسیم‌بندی مجزایی مطابق جدول ۱ ارایه نموده است.

در شکل ۱ نمایی از موقعیت جغرافیایی رودخانه خشکه‌رود فارسان و زوایه انحنای قوس انتخابی آمده است. در شکل ۲ نیز نمایی از وضعیت موجود این رودخانه دیده می‌شود.

**د) اندازه‌گیری‌های داده‌های میدانی مورد نیاز مدل CCHE2D**

به‌طور کلی برای انجام پروسه مدل‌سازی، پارامترهایی الزامی می‌باشند که عبارت‌اند از: ۱- داده‌های مرتبط با تعریف هندسه رودخانه، مانند مختصات X، Y و Z؛ ۲- داده‌های مرتبط با تراز سطح آب رودخانه؛ ۳- داده‌های مربوط به ضریب زبری، سرعت و دبی جریان آب. بر این اساس در گام نخست و پس از بازدید میدانی از بازه پیچان‌رود انتخابی از رودخانه خشکه‌رود فارسان، ۹ مقطع عرضی با دید کارشناسی انتخاب گردید و به کمک دوربین نقشه‌برداری توتال استیشن دیجیتال نقشه‌برداری آن انجام شد. در انتهای این گام نیز، نقشه نهایی به شکلی تهیه شد تا پلان نهایی دارای مولفه ارتفاع یا Z بوده که بدین وسیله بتوان با سه مولفه X، Y و Z، فایل توپوگرافی ورودی به نرم‌افزار تولید شبکه محاسباتی را با پسوند *.mesh_xyz ساخت. شکل ۳ پلان نقشه‌برداری شده از بازه را نشان می‌دهد.

در گام بعدی، در سه مقطع عرضی، پارامتر سرعت دو بعدی جریان و عمق آب به کمک دستگاه Easy Q™ و شاخص اندازه‌گیری شد که در شکل ۴ مشاهده می‌کنید. در انتخاب مقاطع، بیشترین تأکید بر دو خم (قوس) متوالی رودخانه بود تا بتوانیم تأثیر جریان ثانویه و نیروی گریز از مرکز (کوریولیس) را

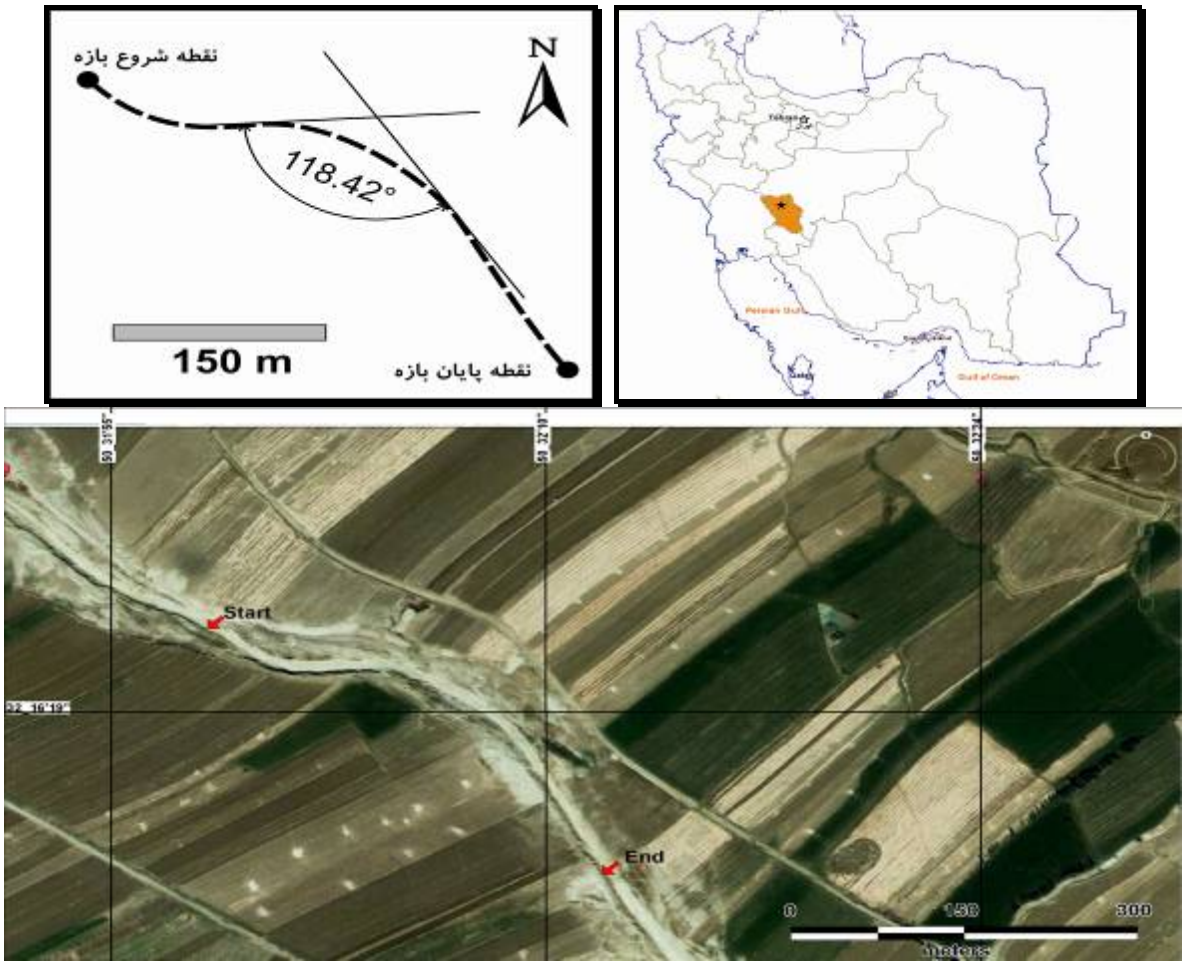


[ Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2024-03-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.9.8 ]

**جدول ۱. تقسیم‌بندی کورنیس (Kornis) در سال ۱۹۸۰ میلادی**

| شکل رودخانه | میزان زاویه مرکزی (درجه) |
|---|---|
| رودخانه مستقیم | – |
| رودخانه شبه مئاندر | ۰ تا ۴۱ |
| رودخانه مئاندری توسعه نیافته | ۴۱ تا ۸۵ |
| ➢ رودخانه مئاندری توسعه یافته | ۸۵ تا ۱۵۸ |
| رودخانه مئاندری بیش از حد توسعه یافته | ۱۵۸ تا ۲۹۶ |
| رودخانه شاخ گاوی (Ox Bow) | بیش از ۲۹۶ |




**شکل ۱. نمایی از موقعیت جغرافیایی رودخانه خشکه‌رود فارسان**

در سر پیچ‌ها بر فرسایش کناره‌ها و کف بستر بررسی کنیم. برای اندازه‌گیری دقیق سرعت جریان، بایستی دستگاه Easy Q™ کاملاً داخل جریان آب قرار گیرد و برای این هدف، یک ثبات (مشابه پل تلفریک) طراحی و ساخته شده و سپس دستگاه بر روی آن نصب شد تا در هر مرحله قرائت، دستگاه کاملاً ساکن و بدون لرزش باشد و هم‌چنین قابلیت جابه‌جایی در عرض، برای برداشت داده‌های جریان از ساحل سمت چپ تا راست و هم قابلیت جابه‌جایی در عمق رودخانه را برای

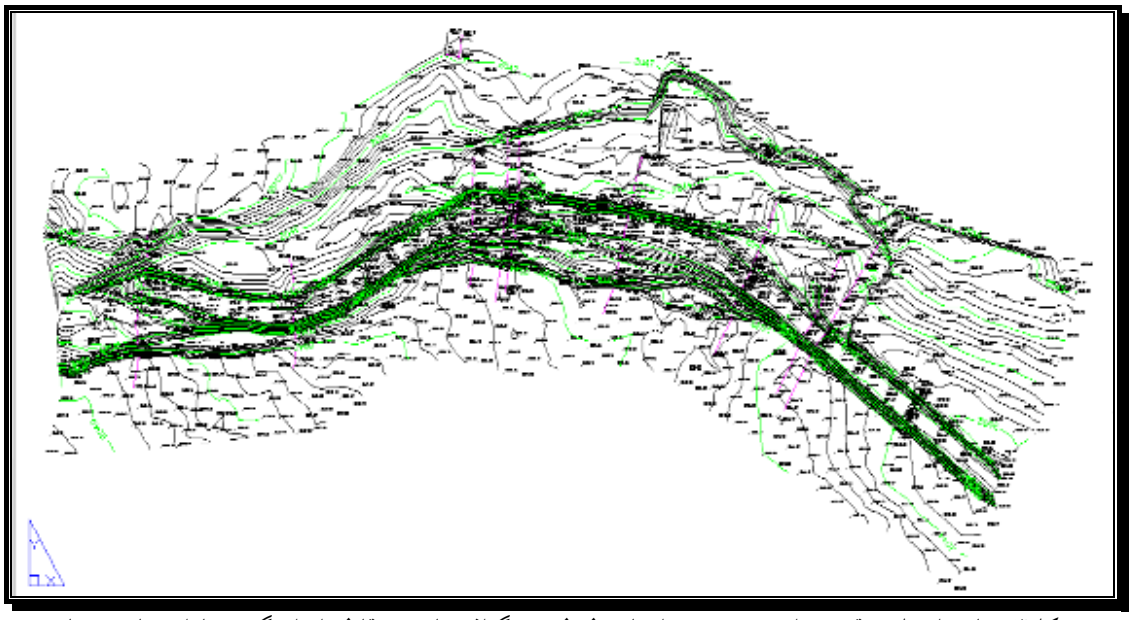


[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-29 ]

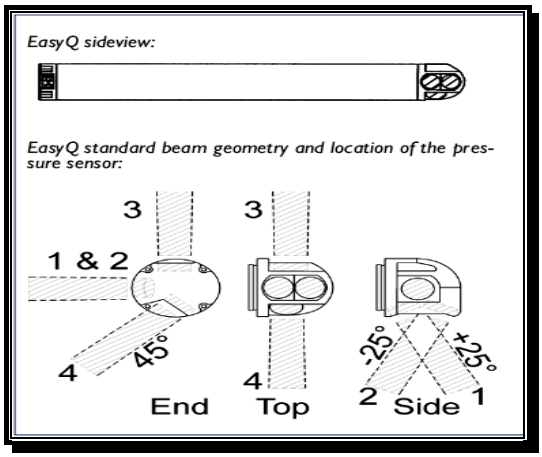
[ DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.9.8 ]




**شکل ۲. نمایی از وضعیت موجود رودخانه خشکه‌رود فارسان؛ الف) پل عیسی‌آباد، ب) پدیده تراوش آب و ج) رسوبات حساس به فرسایش**



**شکل۳. نمایی از پلان نقشه‌برداری شده، همراه با خطوط توپوگرافی بازه و مقاطع اندازه‌گیری پارامترهای جریان**






**شکل ۴. نمایی از شکل ظاهری و نقشه پلان دستگاه Easy Q™**



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.9.8 ]

برداشت داده‌های جریان از سطح آب تا کف بستر به فواصل ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ از عمق، تواماً داشته باشد.

**ه) تولید شبکه محاسباتی در مدل عددی CCHE2D**

مدل عددی CCHE2D، سه نوع مورفولوژی کلی از رودخانه‌ها را پوشش می‌دهد که عبارت‌اند از:

۱- کانال تک بلوکی (Single-Block Channel)؛ ۲- کانال تک بلوکی با جزیره (Single-Block Channel with Island) و ۳- کانال چند بلوکی با انشعاب (Multi-Block Channel with Tributaries). در مطالعه حاضر، با توجه به شکل پلان رودخانه خشکه‌رود، حالت کانال تک بلوکی برای نرم‌افزار تولید شبکه محاسباتی (CCHE-MESH) انتخاب شد. هم‌چنین مراحل تولید شبکه با استفاده از داده‌های توپوگرافی بازه پیچان‌رود انتخابی (شامل مقادیر X، Y و Z)به‌صورت خلاصه به‌ترتیب شامل موارد ذیل بود: ایجاد محیط کار؛ بارگذاری داده‌های توپوگرافی با پسوند mesh_xyz.*؛ تعریف مرزهای بلوک؛ تولید شبکه محاسباتی جبری؛ تولید شبکه محاسباتی عددی؛ ارزیابی شبکه محاسباتی؛ درون‌یابی رقوم بستر رودخانه؛ ذخیره شبکه با پسوند geo.* و نمایش شبکه. در شکل ۵، شبکه محاسباتی تولید شده را ملاحظه می‌کنید.

**و) شبیه‌سازی الگوی جریان با مدل CCHE2D**

مراحل شبیه‌سازی الگوی جریان پایدار برای رودخانه خشکه‌رود، با نرم‌افزار CCHE-GUI، شامل موارد ذیل بود:

در ابتدا یک پروژه جدید را برای نرم‌افزار تعریف می‌شود؛ سپس فایل Geo را به محیط پروژه وارد و فراخوانی می‌شود؛ سپس شرایط اولیه جریان، شامل: تراز آب در بالادست و پایین‌دست و ضریب زبری تنظیم می‌شود؛ در مرحله بعدی، می‌بایست پارامترهای جریان آب، شامل: پارامترهای شبیه‌سازی از قبیل گام زمانی، انتخاب مدل آشفتگی، محاسبه جریان ناپایدار و انتخاب فرمول محاسبه زبری، تنظیم شود؛ در مرحله آخر نیز شرایط مرزی ورودی و خروجی رودخانه، تنظیم شود؛ پس از اتمام تنظیمات، مدل CCHE2D اجرا می‌شود؛ در انتها، می‌توان نتایج شبیه‌سازی جریان آب، برای پارامترهای مختلف را به‌صورت اشکال کاملاً گرافیکی نمایش داد؛ هم‌چنین می‌توان نتایج نهایی پارامترهای جریان آب را به‌صورت یک فایل متنی استخراج نمود؛ در انتها، می‌توان از فایل پیشینه جریان (Flow History) در قالب ویدیو با پسوند avi.*، تصویر با پسوند bmp.* و ساختاری مدل با پسوند flw.* خروجی گرفت. در شکل ۶ نمایی گرافیکی از الگوی جریان شبیه‌سازی شده با مدل عددی CCHE2D را مشاهده می‌کنید.

## بحث

**الف) پارامتر سرعت جریان آب**

با اتمام شبیه‌سازی الگوی جریان با حالت پیش فرض مدل CCHE2D (شبکه محاسباتی با ابعاد ۲۰۰*۴۸ و ضریب برآورد شده ۰/۰۳۵)، نتایج پیش‌بینی مدل برای پارامتر تغییرات سرعت در هر سه مقطع، جداگانه رسم شد. گفتنی است، فاصله طولی از ساحل سمت چپ رودخانه (Distance) با رابطه (۶) محاسبه شد:

$$D_i = \sqrt{(X_i - X_{i-1})^2 + (Y_i - Y_{i-1})^2} + D_{i-1} \quad [۶]$$

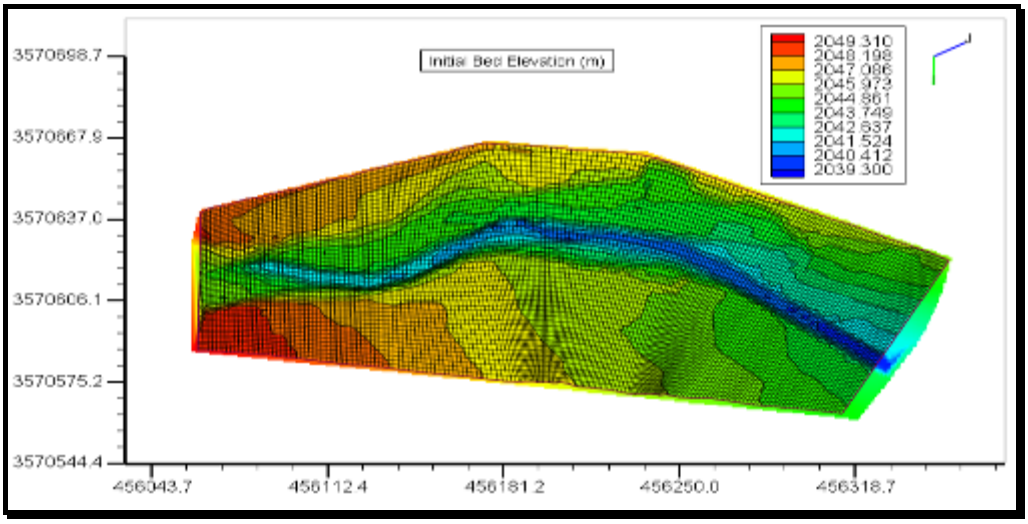
که در این معادله X و Y، به‌ترتیب مختصات طول و عرض جغرافیایی نقطه مورد نظر از مقطع عرضی و D، فاصله طولی از ساحل سمت چپ روخانه می‌باشند. شکل ۷، نمودار تغییرات سرعت آب را نشان می‌دهد که محور xها، مقادیر فاصله از ساحل سمت چپ رودخانه (D) بوده و محور yها، به‌ترتیب مقادیر سرعت در راستای طول (U)، سرعت در راستای عرض (V)، سرعت نهایی (Total) و سرعت اندازه‌گیری شده در طبیعت (Measured) می‌باشند.

همان‌طور که از نمودارها پیداست، مقدار ماکزیمم سرعت در حالت مستقیم بودن کانال، قبل از رسیدن به قوس (مقطع ۱) در وسط کانال و در محل قوس (مقطع ۲) و کمی بعد از آن (مقطع ۳) متمایل به دیواره خارجی یا مقعر تشکیل می‌شود. در ادامه، نتایج حاصل از مدل (Calculated) با داده‌های اندازه‌گیری

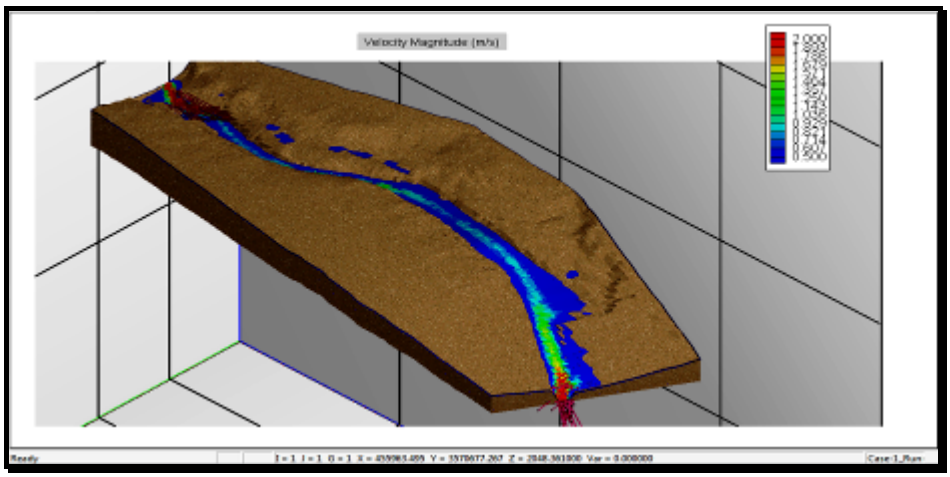


[ Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2024-03-29 ]

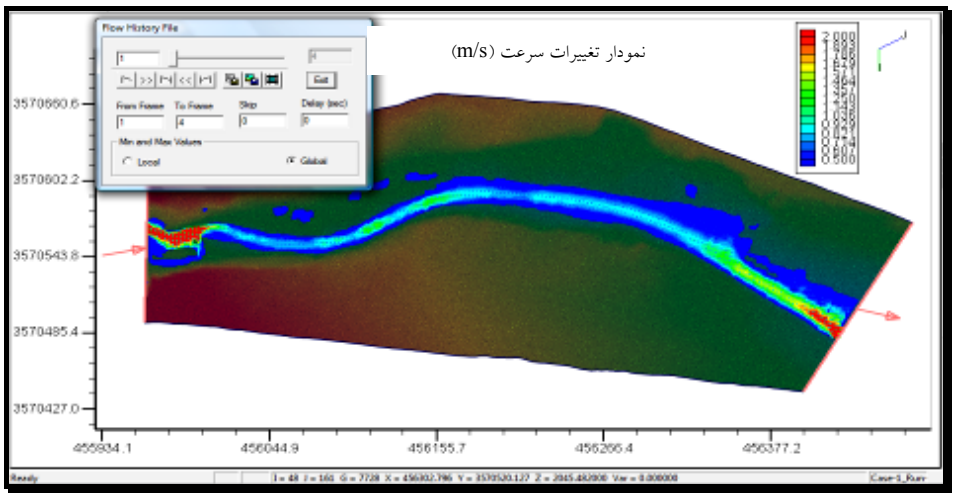
[ DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.9.8 ]




**شکل ۵. شبکه محاسباتی (Mesh) ساخته شده همراه با مقاطع عرضی و طولی رودخانه**




الف



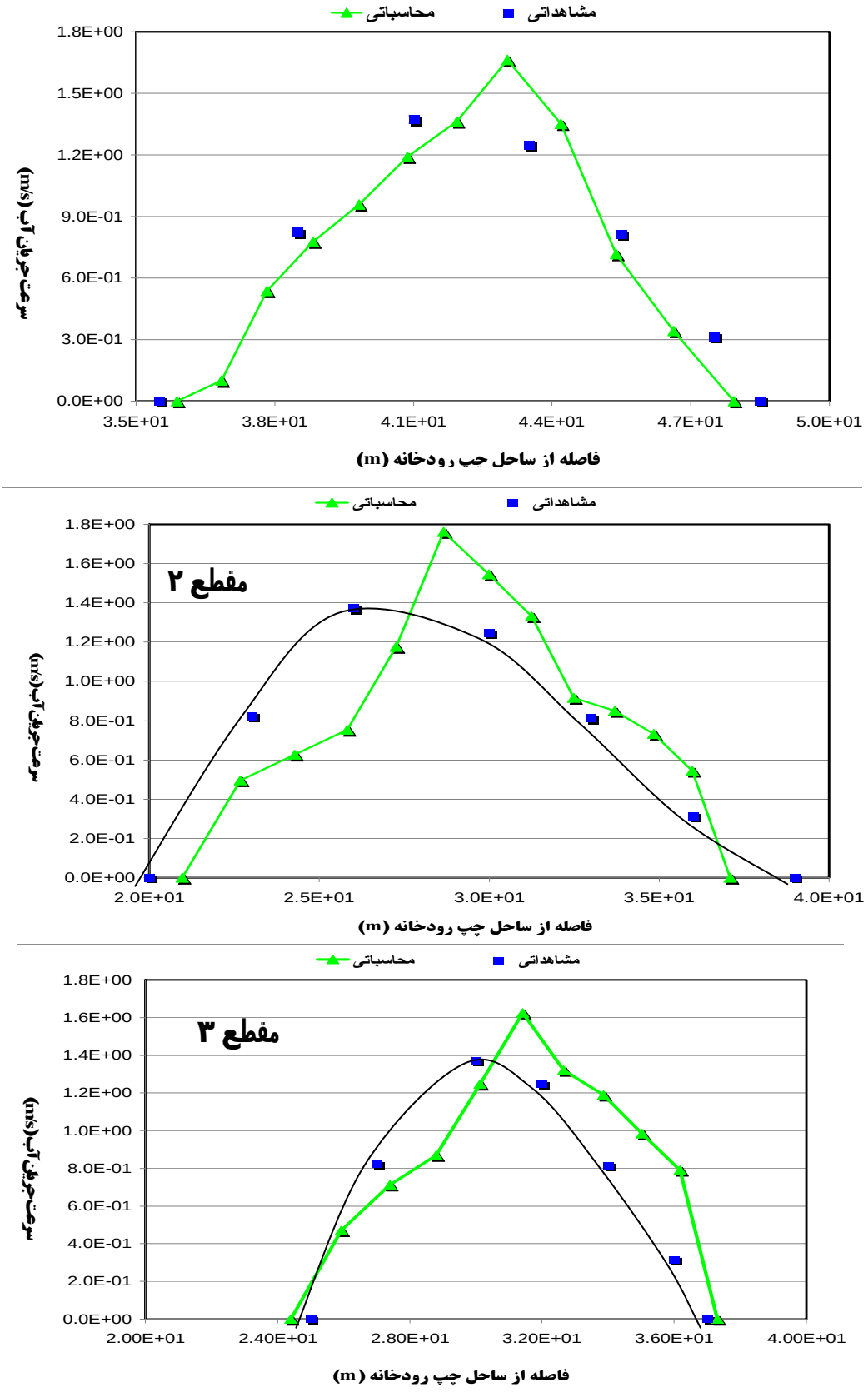

ب)

**شکل ۶. نمایش الف) نتایج شبیه‌سازی جریان آب در جهت‌های I یا J همراه با بردارهای سرعت؛ ب) گرفتن خروجی از فایل پیشینه جریان.**



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.9.8 ]




شکل ۷. نمودار تغییرات سرعت آب شبیه‌سازی شده با مدل و اندازه‌گیری شده در طبیعت در مقاطع سه‌گانه

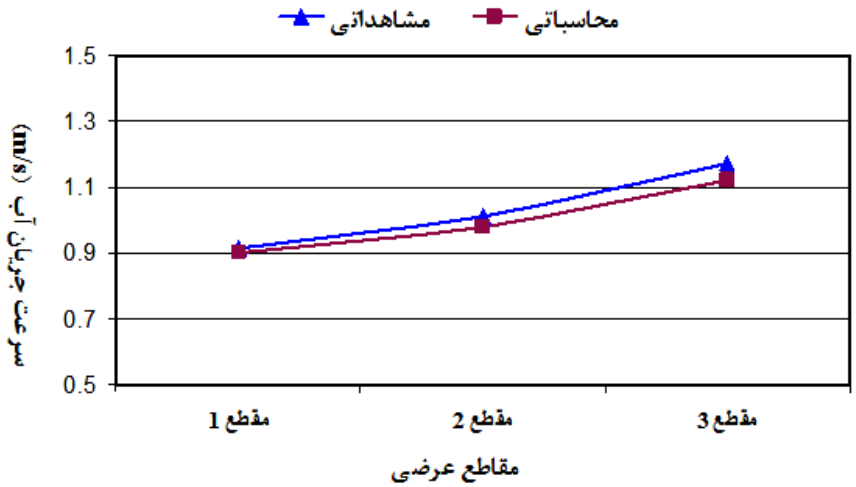


[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.9.8 ]

**جدول ۲. مقایسه سرعت جریان در حالت اندازه‌گیری شده در طبیعت و برآورد شده از مدل.**

| مقاطع اندازه‌گیری شده | اندازه پارامتر سرعت جریان (V) اندازه‌گیری شده | پارامتر سرعت جریان (V) پیش بینی شده توسط مدل با شبکه محاسباتی به ابعاد ۲۰۰*۴۸ و زبری ۰/۰۳۵ |
|---|---|---|
| مقطع ۱ | ۰/۹۲ | ۰/۹ |
| مقطع ۲ | ۱/۰۱ | ۰/۹۸ |
| مقطع ۳ | ۱/۱۷ | ۱/۰۲ |




**شکل۸. مقایسه سرعت جریان اندازه‌گیری شده و برآورد شده از مدل.**

شده در طبیعت (Measured /Observed) در حالت میانگین‌گیری شده از داده‌ها با هم مقایسه شد که نتایج نشان‌دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی الگوی واقعی جریان و پارامتر سرعت می‌باشد. این مقایسه در جدول ۴ و شکل۸ آمده است.

### ب) پارامتر عمق آب

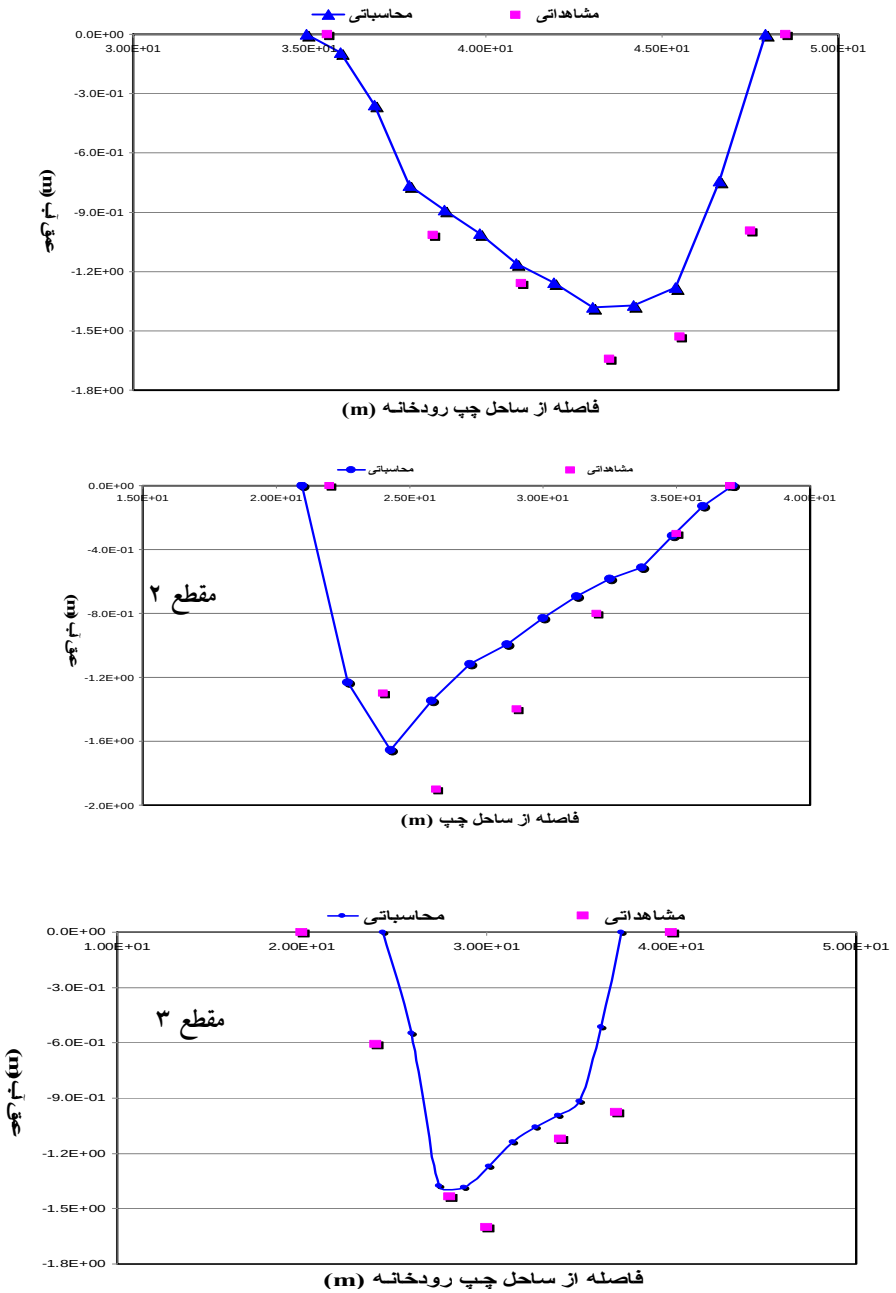
شکل۹، نمودار تغییرات عمق آب را نشان می‌دهد که در آن، محور xها، مقادیر فاصله از ساحل سمت چپ رودخانه (D) بوده و محور yها، بترتیب مقادیر عمق آب پیش بینی شده توسط مدل (Calculated) و اندازه‌گیری شده در طبیعت (Observed) می‌باشند. اگرمقدار ۰.۰۰+۰۰ معرف تراز افقی باشد، سایر مقادیر معرف عمق مقطع خواهد بود.

همچنین در جدول ۳، نتایج حاصل از مدل(Calculated) با داده‌های اندازه‌گیری شده در طبیعت (Measured Observed) در حالت میانگین‌گیری شده از داده‌ها با هم مقایسه شد که نتایج نشان‌دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی الگوی واقعی جریان و پارامتر عمق آب می‌باشد.

همان‌طور که از نمودارها پیداست، مقدار ماکزیمم تراز آب، متمایل به دیواره خارجی (مقعر) تشکیل می‌شود؛ با افزایش ارتفاع آب به‌دلیل ایجاد نیروی گریز از مرکز و ایجاد شیب جانبی در سطح آب و در قوس خارجی، حالت مثلثی شکل در سطح آب در مقطع عرضی پدید می‌آید که به تبع آن، آب از قوس خارجی (مقعر) به سمت قوس داخلی (محدب) رانده شده و در نتیجه، فرسایش در قوس خارجی و رسوب‌گذاری در قوس داخلی ایجاد می‌شود. علاوه بر این نتایج حاصل از زبری ۰/۰۳۵ به مراتب منطقی‌تر از زبری ۰/۰۳ است. در ادامه تحقیق، نتایج به‌دست آمده از مدل (Calculated) را با داده‌های اندازه‌گیری شده



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-29 ]
[ DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.9.8 ]




**شکل ۹. نمودار تغییرات عمق آب شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده با مدل در سه مقطع اندازه‌گیری شده**

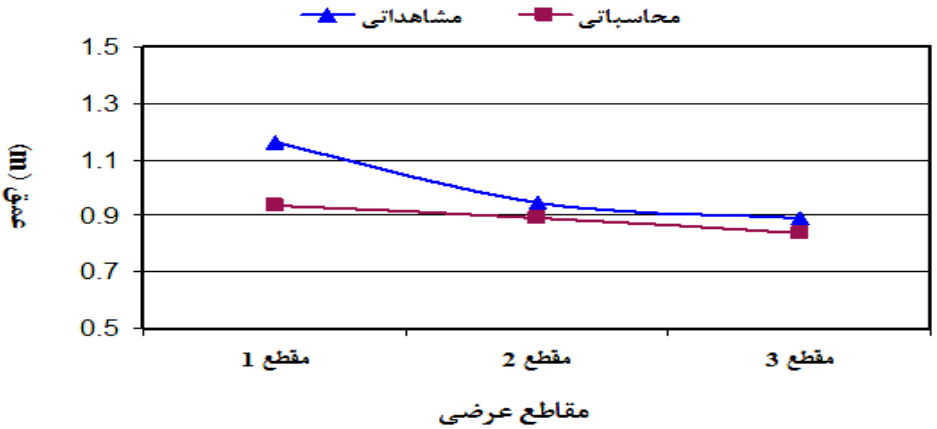
**جدول ۳. مقایسه عمق آب در حالت اندازه‌گیری شده در طبیعت و برآورد شده از مدل**

| پارامتر عمق آب (P) پیش‌بینی شده توسط مدل با شبکه محاسباتی به ابعاد ۲۰۰ *۴۸ و زبری ۰/۰۳۵ | اندازه پارامتر عمق آب (P) اندازه‌گیری شده | مقاطع اندازه‌گیری شده |
|---|---|---|
| ۰/۹۴ | ۱/۱۶ | مقطع ۱ |
| ۰/۸۹ | ۰/۹۵ | مقطع ۲ |
| ۰/۸۴ | ۰/۸۹ | مقطع ۳ |



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.9.8 ]




**شکل ۱۰ مقایسه عمق آب اندازه‌گیری شده و برآورد شده از مدل**

**جدول ۴. مقایسه سرعت جریان با دو روش R.M.S.E و M.A.P.E**

| پارامتر سرعت جریان آب | نوع روش آماری |
|---|---|
| ۰/۰۳۴ | R.M.S.E |
| ٪۲/۸۷ | M.A.P.E |

در طبیعت (Measured /Observed) در حالت میانگین‌گیری شده از داده‌ها با هم مقایسه شد که نتایج نشان‌دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی الگوی واقعی جریان و پارامتر سرعت می باشد. این مقایسه در جدول ۲ و شکل ۱۰، آمده است.

## نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج مدل عددی CCHE2D، می‌توان گفت:

۱. با توجه به شکل و جدول آورده شده، رودخانه خشکه‌رود فارسان در زمره رودخانه‌های مئاندری توسعه یافته با اندازه زاویه مرکزی $A=118/42^{\circ}$ است.

۲. مدل مذکور در پیش‌بینی مقادیر سرعت جریان، کمترین خطای ممکن را داشته و نتایج حاصل از مدل اختلاف ناچیزی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد. لذا نتایج تحقیق، توانمندی بالای مدل در پیش‌بینی دقیق پارامتر سرعت جریان را تأیید نمود.

۳. با چندبار تغییر ضریب زبری، نتایج به‌دست آمده نشان داد که مدل به تغییرات زبری حساس است و زبری اپتیمم مقداری معادل با ۰/۰۳۵ دارد.

۴. بایستی علاوه بر بازه انتخابی، پلان رقومی بالادست و پایین دست را به طول حداقل ۵۰۰ متر داشته باشیم تا از یک طرف، اثر خصوصیات هندسی کانال رودخانه را بر الگوی جریان آب بررسی نماییم و از طرف دیگر نیز اثر طول مرز (بلوک) بندی و به تبع آن شبکه محاسباتی تولید شده توسط مدل را بر دقت پیش‌بینی‌های مدل ارزیابی کنیم.

۵. برای ارزیابی دقیق‌تر مدل، می‌بایست اندازه‌گیری مقادیر دبی و سرعت در مقاطع بیشتر و با شدت‌های مختلف، به‌خصوص با دبی‌های سیلابی انجام شود.

## سپاسگزاری

در پایان، از شرکت آب منطقه‌ای استان چهارمحال و بختیاری که بخشی از هزینه‌های این تحقیق را تأمین کرده‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود.



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.9.8 ]

## منابع مورد استفاده


۱. منصوری، ا.ر.، صالحی نیشابوری، ع.ا. و ا. هنربخش. ۱۳۸۵. شبیه‌سازی عددی سه بعدی تغییرات بستر در قوس ۱۸۰ درجه. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه تربیت مدرس. ۱۲۰ صفحه.

2. Ikeda, S., G. Parker. and K. Sawai. 1981. Bend theory of river meanders, linear development. J. Fluid Mech. 112: 363–377.
3. Leopold, L. B. and M. G. Wolman. 1994. River channel patterns: braided، meandering and straight. U.S. Government Printing Office, Washington DC. USA. P:12.
4. Zhang, Y., Y. Jia and S.Y. Wang. 2007. A Conservative Multi-block Algorithm for Two-dimensional Numerical Model. J. Math. Sci. 1(2)13.
5. Wu, W. 2009. CCHE2D Sediment Transport Model (Version 2.1). Tech Report No. NCCHE- TR- 2001-3. NCCHE, University of Mississippi.
6. Minh-Duc, B., T. Wenka and W. Rodi. 2004. Numerical modeling of bed deformation in laboratory channels. J. Hydraul. Eng. 130(9): 894–904.
7. Kassem, A. A. and M. H. Chaudhry. 2002. Numerical Modeling of Bed Elevation in Channel Bends. J. Hydraul. Eng. ASCE. 128(5): 507-514.
8. Guo, Q. C. and Y. C. Jin. 1999. Modeling sediment transport using depth-averaged and moment equations. J. Hydraul. Eng. 125(12): 1262–1269.
9. Rodi, W. 1976. A new algebraic relation of calculating the Reynolds stresses. ZAMM. 56, pp. 1219–1221.
10. Wu, W. 2007. Computational River Dynamics. CRC Press, USA. 508 pp.


[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2024-03-29 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.9.8 ]