

شبیه سازی و ارزیابی جریان در رودخانه‌های با جریان دائمی با دو مدل HEC-RAS و RubarBE

مهدی یاسی^{*}، لعیان نصیری سلطان احمدی^۲

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۳/۰۵ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۱۵

^۱-دانشیار مهندسی رودخانه، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

^۲- کارشناس ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m.yasi@ut.ac.ir

چکیده

کاربرد مدل‌های ریاضی در طرح‌های مهندسی رودخانه اجتناب ناپذیر است. مدل یک‌بعدی HEC-RAS با بهره‌گیری از حداقل اطلاعات صحرائی و حجم محاسبات، کاربرد گسترده‌ای در مطالعات تعیین بستر و ساماندهی رودخانه‌های ایران دارد. هدف اصلی در تحقیق حاضر، ارزیابی کاربرد مدل HEC-RAS برای شرایط جریان پایدار و ناپایدار در یک رودخانه بزرگ و با جریان دائمی (رودخانه دانوب) بوده است. نتایج مدل همچنین با نتایج مشابه از مدل مرفودینامیکی و یک بعدی معروف اروپائی RubarBE، در شرایط یکسان هندسی و هیدرولیکی مقایسه گردیده است. در این بررسی، بازه رودخانه دانوب به طول ۴۲ کیلومتر، در ناحیه کشور اسلواکی مورد نظر قرار گرفت. دو مدل برای هفت شرایط شاهد جریان (۸۹۰ تا حدود ۹۱۰۰ متر مکعب بر ثانیه) اجرا شد. پارامترهای اصلی جریان مورد ارزیابی قرار گرفتند. تطابق پروفیل‌های سطح آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در طول بازه رودخانه برای هر دو مدل، به ویژه در در محدوده جریان‌ات مجرای اصلی رودخانه، مطلوب بود. نتایج برآورد ظرفیت مقطع پر بازه رودخانه از دو مدل نسبتاً مشابه بوده و در بیشتر طول بازه در حدود ۲۰۰۰ متر مکعب بر ثانیه است؛ که معادل بده آستانه سیلاب رودخانه به شمار می‌رود. در این بررسی، حساسیت مدل HEC-RAS به پنج عامل هندسی- هیدرولیکی ارزیابی گردید. بیشترین حساسیت مدل در انتخاب شیب بازه برای شرایط مرزی جریان نرمال می‌باشد. از میان خصوصیات هیدرولیکی مختلف، تراز سطح آب کمترین حساسیت را به تغییر عوامل پنج‌گانه نشان می‌دهد. نتایج این بررسی با نتایج مشابه در یک رودخانه با جریان دائمی در ایران (رودخانه نازلو، حوضه دریاچه ارومیه) نیز مقایسه گردید، که تطابق خوبی نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: بده مقطع پر، تحلیل حساسیت، رودخانه دانوب، مدل HEC-RAS، مدل RubarBE

Simulation and Evaluation of Perennial Rivers Flows with HEC-RAS and RubarBE Models

M Yasi^{1*}, LNasiri Soltanahmadi²

Received: 25 May 2016 Accepted: 04 January 2017

¹-Assoc. Prof. of River Engineering, Dept. of Irrigation and Reclamation Engineering, Univ. of Tehran, Iran

²- M.Sc. in Hydraulic Structures, Dept. of Water Engineering, Urmia Univ., Iran

*Corresponding Author, Email: m.yasi@ut.ac.ir

Abstract

The application of mathematical models in river engineering schemes is inevitable. The one-dimensional model of HEC-RAS is widely used in river studies in Iran, since it demands less field data with low computational capacities. The main aim of the present study was to test the simulation of steady and unsteady flows by HEC-RAS model in a large perennial river (the Danube River), and to compare the corresponding results with another well-known European model (RubarBE), under similar geometric and hydraulic conditions. A reach of 42 km of the Danube River in Slovakia was selected. The two models were run for seven different flows (ranging from 890 to 9100 m³/s), and flow principal parameters were compared. The adaptation of simulated and observed water surface profiles along the river reach was satisfactory for the two models, particularly at flows within the main channel. The bankfull discharge was about 2000 m³/s, and was considered as a threshold of flooding in most part of the river reach. This flood flow rate was consistent with the results from both the HEC-RAS and RubarBE models. Sensitivity of the HEC-RAS model was also tested for five geo-hydraulic parameters. The bed slope was the most sensitive for the normal flow boundary conditions. Among different hydraulic characteristics, the water surface levels were less affected by the variations of the five parameters. The results were compared with a similar study on an Iranian perennial river (Nazloo River, Urmia Lake Basin), and good agreement was achieved.

Keywords: Bankfull discharge, Danube River, HEC-RAS model, RubarBE model, Sensitivity analysis

مقدمه

مدل HEC-RAS در بازه‌های پیچانرودی، مقاطع عرضی باید به هم نزدیک باشند تا پلان بازه در مدل واقعی‌تر ترسیم شود و در نتیجه دقت محاسبات مدل نیز افزایش یابد. چن (۱۹۸۵) و پارادوی (۲۰۱۱)، به‌ترتیب نتایج کاربرد مدل HEC-2 را در رودخانه سالت؛ و مدل HEC-RAS را در رودخانه ریونی آمریکا مثبت ارزیابی کرده اند.

بیگی (۱۳۸۷) برای ارزیابی نتایج مدل‌های ریاضی در شرایط ساماندهی، نتایج شبیه‌سازی سه مدل ریاضی: یک‌بعدی HEC-RAS، شبه دویبعی BRI-STARS و دویبعی FAST-2D را با نتایج مدل فیزیکی بستر ثابت

تاکنون مطالعات زیادی در زمینه بررسی هیدرولیک جریان رودخانه‌ها با استفاده از مدل‌های بستر ثابت (جریان) انجام شده است. در این میان و در بین مدل‌های جریان یک بعدی، مدل HEC-RAS و نسخه قدیمی آن HEC-2 که توسط گروه مهندسی ارتش آمریکا توسعه یافته است، جایگاه ویژه‌ای دارد. تیت و میدمنت (۱۹۹۹)، مدل HEC-RAS را جهت تعیین حریم بستر^۱ رودخانه والر^۲ در نزدیک شهر اوستین^۳ در ایالت تگزاس به کار برد و نتایج حاصل از مدل را به Arcview GIS انتقال داد. این مطالعات نشان داد که جهت شبیه‌سازی با

3- Austin

1- Floodplain mapping

2- Waller creek

جریان ناپایدار، در بازه‌ای به طول ۴۲ کیلومتر از رودخانه دانوب در اسلواکی، مورد استفاده قرار داد. واسنجی مدل با استفاده از نقشه رودخانه و داده‌های عمق سنجی بازه رودخانه در سال ۲۰۰۱، و با پروفیل‌های سطح آب مشاهده شده در حد فاصل سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۹ صورت گرفت.

هدف اصلی در این بررسی، شبیه‌سازی خصوصیات جریان پایدار و ناپایدار در یک بازه از یک رودخانه بزرگ و دائمی، براساس داده‌های جریان شاهد و قابل اعتماد است. در این تحقیق، کارآیی مدل یک‌بعدی RubarBE (با کاربری بسیار در اروپا) با مدل HEC-RAS (با کاربری گسترده در جهان و ایران) در یک بازه از رودخانه دانوب، اسلواکی، در شرایط اولیه و مرزی یکسان (هندسی و هیدرولیکی) بررسی گردیده و با مطالعات مشابه بر روی یک بازه از رودخانه ایران (رودخانه نازلو، حوضه دریاچه ارومیه) مقایسه کرده است.

مواد و روش‌ها

رودخانه دانوب به طول ۲۸۶۰ کیلومتر و سطح حوضه آبریز ۸۱۷۰۰۰ کیلومترمربع بعد از رود ولگا بزرگ‌ترین رودخانه اروپا است. این رودخانه از جنگل سیاه در آلمان سرچشمه گرفته، و بعد از عبور از ۱۰ کشور اروپایی در نهایت به دریای سیاه وارد می‌شود. بازه مورد مطالعه، به طول حدود ۴۲ کیلومتری رودخانه دانوب، در پایین‌دست سد HPP در اسلواکی می‌باشد. شکل ۱ بازه مورد مطالعه از رودخانه دانوب (محدوده بیضی شکل)، همراه با دو ایستگاه هیدرومتری بر روی آن را نشان می‌دهد. در طول بازه، شاخه فرعی قابل توجهی وارد یا خارج نمی‌گردد. بازه رودخانه با بستر شنی و با دانه‌بندی غیریکنواخت ($D_{50}=7.6 \text{ mm}$; $\sigma_g=3.1$) طبقه‌بندی شده است (یاسی ۱۳۹۰).

رودخانه نازلو در شرایط ساماندهی با سازه‌های ترکیبی (آبشکن‌ها در بالادست پل و دیواره ساحلی در پایین-دست پل)، مورد مقایسه و ارزیابی قرار داد. شیخ-علیشاهی و همکاران (۱۳۹۵) در مطالعه‌ای با هدف تلفیق مدل هیدرولیکی HEC-RAS با نرم‌افزار ArcGIS به ارزیابی پهنه سیل با دوره بازگشت‌های مختلف، در رودخانه حوضه آبریز منشاد یزد پرداختند. نتایج نشان داد که تلفیق سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی HEC-GeoRAS با مدل HEC-RAS باعث تسهیل محاسبات و کاهش عملیات میدانی است. رضائی‌مقدم و همکاران (۱۳۹۵) شدت خطر سیل در سیلابدشت زرينه‌رود را با مدل HEC-RAS و با کمک GIS ارزیابی کرده؛ و از توان رودخانه به عنوان شاخصی جهت بررسی اثرات مورفولوژیکی بالقوه سیلاب‌ها استفاده نمودند. نتایج نشان داد که سیلاب ۲۵ ساله می‌تواند مبنای برنامه‌ریزی و آمایش سیلابدشت باشد. بردبار و همکاران (۲۰۱۲) برای واسنجی دو مدل HEC-RAS و MIKE11 از ضریب زبری مانینگ استفاده کردند. نتایج تحلیل هیدرولیکی سیلاب نشان‌گر تفاوت مقادیر ضریب زبری در دو مدل (۰/۰۵۲ برای HEC-RAS و ۰/۰۳۹ برای MIKE11) بود. بنابراین انتخاب زبری یکسان در مدل‌های هیدرولیکی متفاوت، باعث ایجاد خطا در روند شبیه‌سازی جریان می‌شود.

مدل هیدرومرفودینامیکی یک بعدی RubarBE در مؤسسه پژوهشی آب CEMAGREF، لیون، فرانسه، توسعه یافت (یاسی ۱۳۹۰). در این مدل، روش جدیدی برای محاسبه تغییرات رقوم بستر در اثر توالی فرسایش و رسوب‌گذاری در مقطع عرضی، به‌صورت تابعی از توزیع تنش برشی مرزی، ارائه گردید. ابدالزاک و پاکیه (۲۰۰۹) قابلیت این مدل را برای شبیه‌سازی جریان ناپایدار و انتقال رسوب در مجاری روباز مورد ارزیابی قرار دادند. یاسی (۱۳۹۰) از این مدل برای شبیه‌سازی و تغییرات بستر برای دوره ۹ ساله پیوسته (۲۰۰۱-۱۹۹۲)



شکل ۱- موقعیت بازه مورد مطالعه از رودخانه دانوب و دو ایستگاه هیدرومتری آن.

از مقاطع برداشت شده است؛ که شامل موقعیت دیواره‌های چپ و راست مجرای اصلی است. بطور متوسط، عرض و عمق مجرای اصلی به ترتیب ۴۰۰ متر و ۱۱ متر است. عرض سیلاب‌دشت‌ها از ۲۲۰۰ متر در بالادست تا ۵۵۰ متر در پایین دست متفاوت است، که با عمق متوسط ۳ تا ۵ متر است. این بازه، به جز در ۳/۸ کیلومتر انتهای پایین‌دست که به شکل یک مجرا با مقطع ساده است، دارای مقطع مرکب با سیلاب‌دشت در یک یا دو طرف رودخانه، می‌باشد.

هندسه مقاطع عرضی: در مدل RubarBE هندسه مقاطع به صورت یک فایل Text وارد می‌شود. موقعیت مجرای اصلی جریان (G نشان‌دهنده ساحل چپ، و D نشان‌گر ساحل راست) نیز در فایل مشخص می‌شود. در این مدل داده‌ها از بالادست به سمت پایین‌دست وارد می‌شوند و مقطع شماره ۱ در بالاترین نقطه قرار دارد. در مدل HEC-RAS موقعیت مقاطع باید از ساحل چپ به ساحل راست وارد شوند. در این مدل

برای شبیه‌سازی خصوصیات جریان رودخانه دانوب، از دو مدل ریاضی یک‌بعدی، در شرایط اولیه و مرزی یکسان هندسی و هیدرولیکی استفاده شده است. مدل یک‌بعدی HEC-RAS توسط انجمن مهندسی ارتش آمریکا توسعه یافته؛ که به کاربر امکان انجام محاسبات هیدرولیک رودخانه در حالت جریان پایدار و ناپایدار را می‌دهد (بی‌نام ۲۰۱۵). مدل مرفودینامیکی و یک‌بعدی RubarBE در مؤسسه پژوهشی آب CEMAGREF، در لیون فرانسه توسعه یافته، و بطور وسیعی در اروپا استفاده می‌گردد. این مدل برای شبیه‌سازی خصوصیات جریان، انتقال رسوب و تغییرات بستر رودخانه‌ها کاربرد دارد (یاسی ۱۳۹۰).

برداشت مقاطع عرضی: بررسی‌های صحرائی رودخانه در سال ۲۰۰۱ انجام شده است. در طول ۴۲/۳ کیلومتر، تعداد ۳۹۷ مقطع ب فاصله متوسط ۱۰۰ متر از سمت چپ به راست رودخانه، و عمود بر راستای عمومی رودخانه (مسیر مجرای اصلی رودخانه) برداشت شده است. تعداد ۳۷ تا ۲۴۸ نقطه (بیشتر ۲۰۰ نقطه) در هر یک

جدول ۲- بده جریان ورودی به مدل‌ها در تحلیل جریان

شماره	بده (m^3s^{-1})	ملاحظات
۱	۸۹۱	بده شاهد و پایه
۲	۵۱۰۴	بده شاهد
۳	۵۶۳۵	بده شاهد
۴	۶۵۷۰	بده شاهد
۵	۷۳۶۰	بده شاهد
۶	۷۷۷۰	بده شاهد
۷	۹۱۲۵	بده شاهد

شرایط اولیه: برای تحلیل جریان پایدار، شرایط اولیه به صورت بده جریان معین در مقطع بالادست بازه معرفی می گردد. از داده‌های جریان در جدول ۲ برای شرایط اولیه مدل سازی استفاده گردیده است. جریان پایه رودخانه در مدت ۱۴ سال، معادل ۸۱۰ مترمکعب بر ثانیه بوده است.

شرایط مرزی: جریان در بازه رودخانه دانوب عموماً زیربحرانی است. شرایط مرزی پایین دست به صورت منحنی سنجه آب (رابطه بده- ارتفاع سطح آب) در مقطع پایین دست بازه دانوب (ایستگاه هیدرومتری کمارنا) در شکل ۲ ارائه شده است. برای شرایط مرزی بالادست، هیدروگراف جریان ورودی به مدل تحت سه سناریو معرفی گردید. در سناریوی اول، یک هیدروگراف ساده ۳۰ روزه وارد مدل گردید. در سناریوی دوم، هیدروگراف مرکب ۱۶۰ روزه به عنوان یک دوره سیلابی شاخص سالانه، وارد مدل گردید. در سناریوی سوم یک هیدروگراف مرکب طولانی مدت ۵۱۱۳ روزه (۱۴ ساله) وارد مدل شد. این هیدروگراف‌ها، به ترتیب در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ نشان داده شده است.

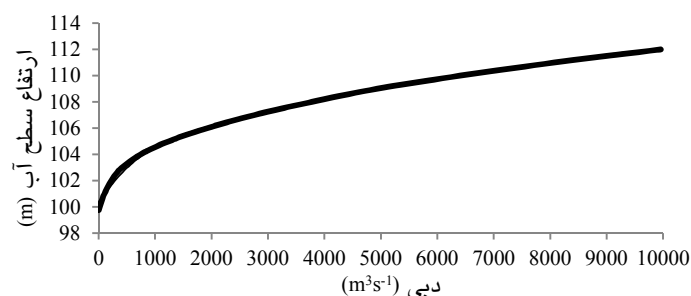
باید به پایین ترین مقطع عرضی، عدد ۱ اختصاص داده شود. معرفی مقاطع در مدل از بالا به پایین می باشد. داده‌های موجود برای بازه مورد مطالعه از رودخانه دانوب در فایل‌ها و فرمت مدل RubarBE بود. با زبان برنامه نویسی فرترن داده‌های مذکور به فرمت قابل قبول HEC-RAS تبدیل گردید و هندسه مقاطع عرضی در قالب یک فایل CSV^۵، به مدل وارد گردید. طول بازه بین دو مقطع عرضی متوالی و محدوده عرضی بستر اصلی مجرا (دیواره چپ و راست رودخانه) نیز به مدل معرفی شد.

ایستگاه‌های هیدرومتری: دو ایستگاه هیدرومتری در نزدیکی دو انتهای بازه، با فاصله ۳۸/۵ کیلومتر از یکدیگر (ایستگاه مدودا^۶ در ۳۶۱۷ متری پایین دست مقطع انتهایی بالادست و ایستگاه کمارنا^۷ در ۱۲۵ متری در بالادست مقطع انتهای پایین دست) واقع شده است (شکل ۱). جدول ۱ فاصله ایستگاه‌ها را از بالادست نشان می دهد. این دو ایستگاه، اطلاعات در مورد منحنی سنجه را برای شرایط مرزی فراهم می کنند. اشل بالادست بین مقاطع ۳۶۱ و ۳۶۲، و اشل پایین دست در نزدیکی مقطع ۲ قرار دارد.

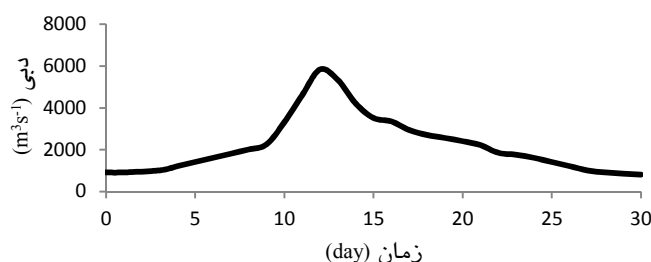
پروفیل‌های جریان شاهد: در جریان پایدار، تعداد هفت سناریو در مدل HEC-RAS و RubarBE برای جریان‌های شاهد رودخانه دانوب اجرا شد (جدول ۲).

جدول ۱- موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری در بازه

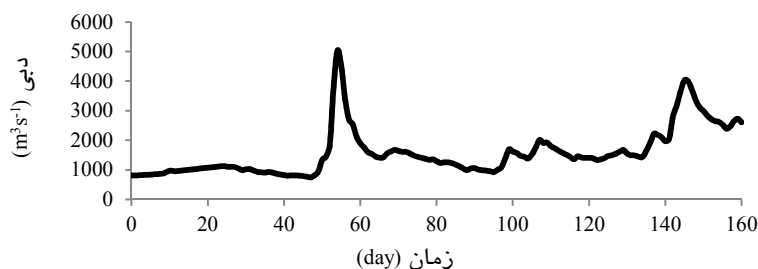
ایستگاه هیدرومتری	فاصله از بالادست (m)
ایستگاه مدودا	۳۶۱۷
ایستگاه کمارنا	۴۲۱۴۲



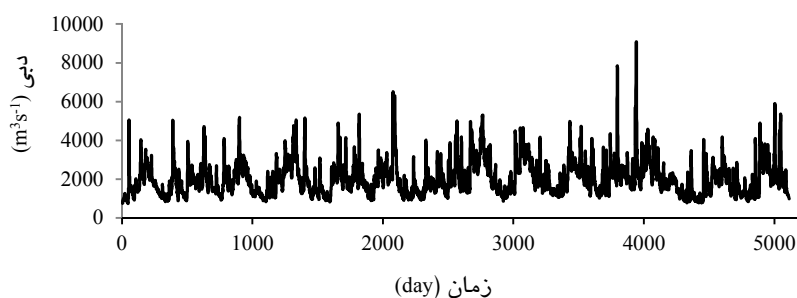
شکل ۲- منحنی سنجه آب در مقطع پایین دست بازه دانوب (ایستگاه هیدرومتری کمارنا).



شکل ۳- هیدروگراف ورودی ۳۰ روزه به بازه دانوب



شکل ۴- هیدروگراف ورودی ۱۶۰ روزه به بازه دانوب



شکل ۵- هیدروگراف ورودی ۵۱۱۳ روزه به بازه دانوب

جریان‌های مختلف، ضریب زبری مانینگ n برای مجرای اصلی و سیلاب‌دشت رودخانه دانوب در بازه ۴۲ کیلومتری به صورت جدول ۳ برآورد گردید. این اطلاعات به مدل HEC-RAS نیز وارد گردید. ضرایب افت همگرایی و واگرایی مقاطع عرضی رودخانه در مدل HEC-RAS، برابر اعداد پیش فرض مدل یعنی ۰/۱ برای

ضرایب تجربی: نتایج واسنجی مدل RubarBE در بده‌های مختلف جریان نشان داد که نسبت دادن مجموعه‌ای از مقادیر زبری مانینگ n برای زیر بازه‌های مجرای اصلی رودخانه دانوب دقیق‌تر است (یاسی ۱۳۹۰). براساس مقایسه مقادیر نظیر تراز سطح آب بین داده‌های شاهد و نتایج شبیه‌سازی مدل در

همگرابى، و ۰/۳ براى واگرابى در نظر گرفته شد.

جدول ۳- ضريب زبرى مانينگ n براى بازه رودخانه

دانوب.		
فاصله از بالادست (m)	مجرابى اصلى	سيلابدشت
۰	۰/۰۸۰	۰/۰۵۰
۲۰۰۰	۰/۰۴۰	۰/۰۵۰
۴۰۰۰	۰/۰۲۰	۰/۰۵۰
۶۰۰۰	۰/۰۲۰	۰/۰۵۰
۱۰۰۰۰	۰/۰۱۸	۰/۰۵۰
۱۲۰۰۰	۰/۰۱۶	۰/۰۵۰
۱۵۰۰۰	۰/۰۲۵	۰/۰۵۰
۲۰۰۰۰	۰/۰۲۵	۰/۰۵۰
۲۵۰۰۰	۰/۰۲۵	۰/۰۵۰
۳۰۰۰۰	۰/۰۲۵	۰/۰۵۰
۳۵۰۰۰	۰/۰۲۰	۰/۰۵۰
۳۹۰۰۰	۰/۰۲۰	۰/۰۵۰
۴۱۰۰۰	۰/۰۴۰	۰/۰۵۰
۴۲۲۶۷	۰/۰۸۰	۰/۰۵۰

بده مقطع پر رودخانه: براساس مقايسه تراز سطح

آب با ارتفاع متوسط سواحل چپ و راست مجرابى اصلى رودخانه، ظرفيت جريان مقطع پر در طول بازه رودخانه دانوب، از دو مدل ارزىابى گرديد.

بررسى حساسيت مدل: حساسيت مدل HEC-

RAS به پنج عامل هندسى- هيدرولىكى: (۱) شرايط اوليه جريان پايدار و ناپايدار در بالادست؛ (۲) نوع رژيم جريان؛ (۳) تراكم مقاطع عرضى؛ (۴) ضريب زبرى؛ و (۵) ضرائب تبديل جريان، بررسى گرديد. براى هر يك از پنج عامل، متوسط خطاى نسبى برآورد پارامترهاى مشترك جريان، نسبت به شرايط مرسوم مدل سازى مقايسه و ارزىابى گرديده است.

نتايج و بحث

دو مدل HEC-RAS و RubarBE براى هفت شرايط

مختلف جريان پايدار، مطابق با جدول ۲، در بازه مورد

مطالعه اجرا شدند. از نتايج مدل سازى، پارامترهاى مشترك جريان (پروفيل طولى سطح آب، عرض سطح آب، سرعت متوسط، عدد فرود و تنش برشى متوسط) مورد ارزىابى قرار گرفتند. براى نمونه، نتايج پروفيل سطح آب و عدد فرود در جريان پايدار در شكل‌هاى ۶ و ۷ و ۸ و ۹ و ۱۰ آمده است. خلاصه نتايج به شرح زير است.

جريان پايدار

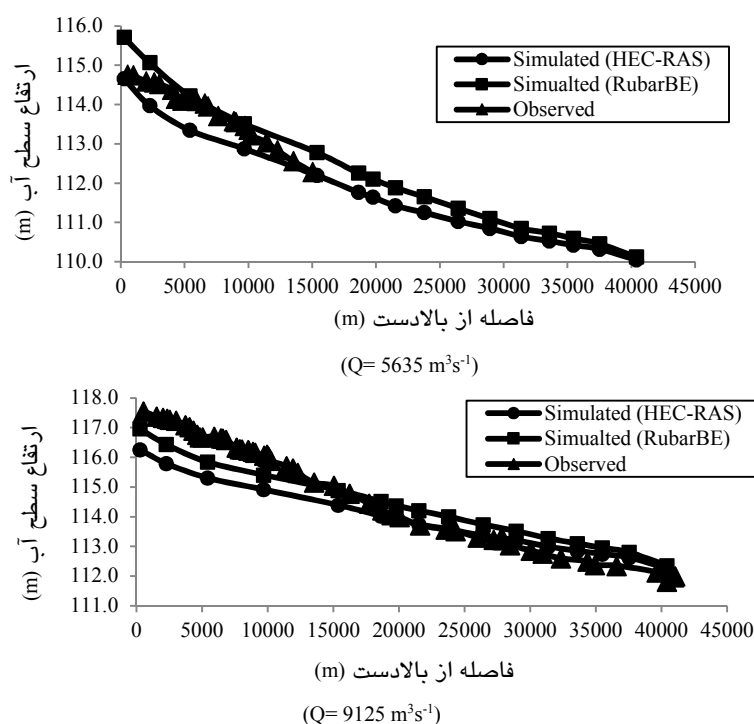
اطلاعات پروفيل طولى سطح آب براى هفت جريان شاهد (جدول ۲) در اختيار بوده است. در شكل ۶ نمونه پروفيل‌هاى سطح آب شبيه سازى شده از دو مدل HEC-RAS و RubarBE با پروفيل‌هاى نظير مشاهداتى براى جريان ۵۶۳۵ و ۹۱۲۵ مترمكعب بر ثانيه مقايسه شده است. نتايج مقايسه پروفيل سطح آب شبيه سازى شده در دو مدل با پروفيل‌هاى سطح آب مشاهداتى تطابق قابل قبولى را نشان مى‌دهد. بيشترين تطابق دو مدل با پروفيل مشاهداتى، در بده پايه ۸۹۱ مترمكعب بر ثانيه، است. در بده ۵۱۰۴ مترمكعب بر ثانيه، بيشترين اختلاف بين پروفيل شاهد و نتايج شبيه سازى شده مشاهده گرديد. در جريان ۵۶۳۵ مترمكعب بر ثانيه، پروفيل شاهد فقط براى زير بازه بالادست موجود است، و با مدل RubarBE مطابقت بهترى دارد. در بده ۶۵۷۰ مترمكعب بر ثانيه، مدل RubarBE در زير بازه بالادست، و مدل HEC-RAS در زيربازه پايين دست با پروفيل مشاهداتى مطابق است. در تمام طول بازه، در جريان ۷۳۶۰ مترمكعب بر ثانيه، مدل RubarBE با پروفيل مشاهداتى تطابق بهترى دارد. در بده ۷۷۷۰ مترمكعب بر ثانيه، در طول ۱۲ كيلومتر ابتدائى بازه مدل RubarBE با پروفيل شاهد مطابقت خوبى دارد. در بده ۹۱۲۵ مترمكعب بر ثانيه در ۱۹ تا ۲۷ كيلومترى مدل HEC-RAS با پروفيل شاهد كاملاً مطابقت دارد. بيشترين تطابق در محدوده جريان در مجرابى اصلى است.

شكل‌هاى ۷ و ۸ تغييرات عدد فرود در طول

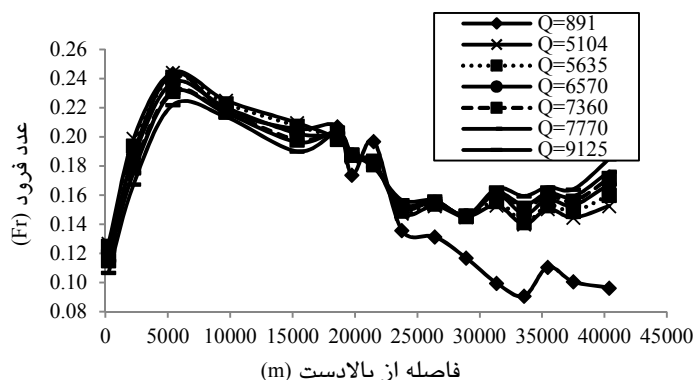
رودخانه را در جريان پايدار نشان مى‌دهد. تغييرات عدد فرود در بيشتر طول بازه از روند نرمالى تبعيت مى‌کند؛

بالادست تغییر می‌کند. در نیمه پایین دست بازه، سرعت متوسط جریان به میزان قابل توجهی کمتر از نیمه بالادست بازه می‌باشد. بیشترین تغییرات عدد فرود در بده پایه (۸۹۱ مترمکعب بر ثانیه) می‌باشد؛ که از ۰/۰۹ تا ۰/۲۴ تغییر می‌کند. در زیربازه‌های پایین و بالادست، با توجه به تغییر مقاطع عرضی از هندسه مرکب به ساده، مقادیر تنش برشی به شدت افزایش نشان می‌دهد.

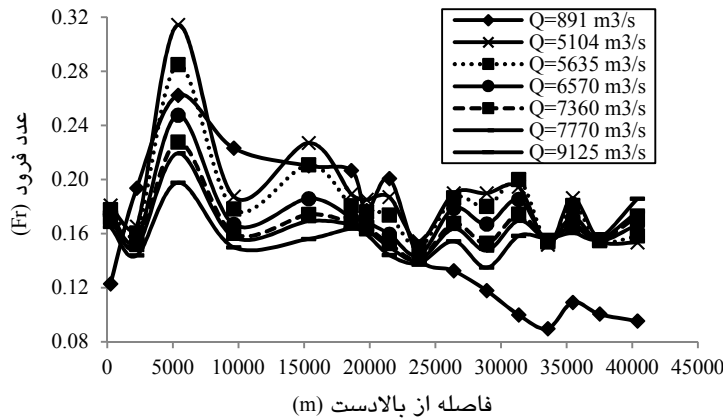
و با افزایش بده رودخانه، عدد فرود نیز افزایش می‌یابد. در مدل HEC-RAS، بیشترین تغییرات عدد فرود در بده ۸۹۱ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد؛ که از ۰/۰۹ در ۳۴ کیلومتری بالادست تا ۰/۲۴ در ۷ کیلومتری بالادست است. در مدل RubarBE، بیشترین تغییرات عدد فرود در بده ۵۱۰۴ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد؛ که از ۰/۱۵ در ۳۳/۵ کیلومتری بالادست تا ۰/۳۱ در ۵/۵ کیلومتری



شکل ۶- مقایسه پروفیل سطح آب مشاهداتی با شبیه سازی شده از دو مدل ریاضی، بازه دانوب.



شکل ۷- عدد فرود جریان در طول بازه در جریان پایدار (مدل HEC-RAS)، بازه دانوب.

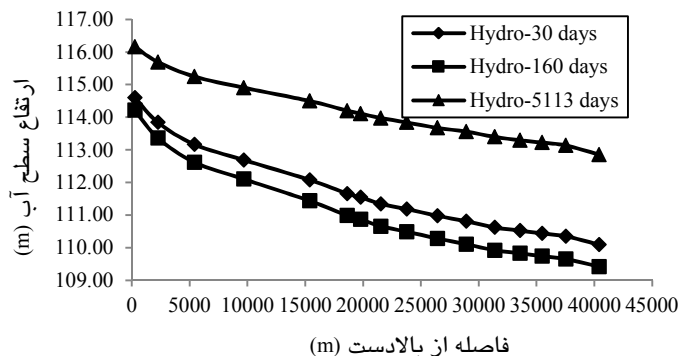


شکل ۸- عدد فرود جریان در طول بازه در جریان پایدار (مدل RubarBE)، بازه دانوب.

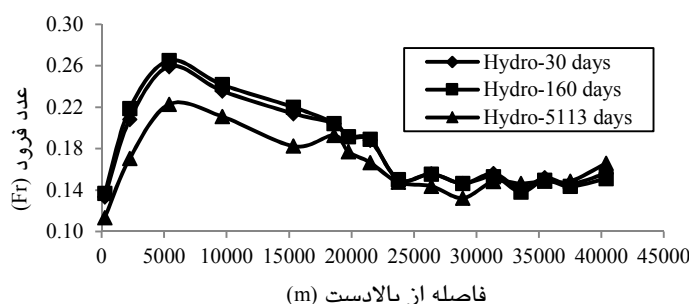
طول بازه برای دو حالت هیدروگراف ۳۰ روزه و ۱۶۰ روزه برای شرایط مرزی بالادست تقریباً یکسان است. این پارامتر در ۱۰ کیلومتر پایین دست برای هیدروگراف ۳۰ روزه بیشتر از هیدروگراف ۱۶۰ روزه است. تغییرات عرض سطح آب در ۱۰ کیلومتر بالادست بازه و حدود ۸ کیلومتر انتهای بازه برای سه شرایط مرزی مختلف بالادست تا حد زیادی تطابق دارد. سرعت متوسط جریان در ۱۷ کیلومتر بالادست بازه برای دو حالت هیدروگراف ۳۰ روزه و ۱۶۰ روزه برای شرایط مرزی بالادست تقریباً یکسان می باشد. در دو حالت انتخاب هیدروگراف ۳۰ روزه و ۱۶۰ روزه برای شرایط مرزی بالادست، تنش برشی جریان در بازه رودخانه تفاوت ناچیزی دارد.

جریان ناپایدار

برای جریان ناپایدار، تغییرات تراز سطح آب در طول رودخانه در شکل ۹ نشان داده شده است. با احتساب هیدروگراف ۱۴ ساله (۵۱۱۳ روزه) برای شرایط مرزی بالادست، ارتفاع سطح آب به میزان قابل توجهی بالاتر از دو حالت دیگر می باشد. ارتفاع سطح آب با هیدروگراف ۱۶۰ روزه پایین تر از ارتفاع سطح آب با هیدروگراف ۳۰ روزه می باشد. شکل ۱۰ تغییرات عدد فرود در طول رودخانه را در جریان ناپایدار نشان می دهد. عدد فرود در نیمه پایین دست بازه رودخانه بیشتر در محدوده ۰/۱۳ تا ۰/۱۶ و در نیمه بالادست بازه در محدوده ۰/۱۱ تا ۰/۲۶ تغییر می کند. عدد فرود در بیشتر



شکل ۹- تراز سطح آب در طول بازه در جریان ناپایدار (مدل HEC-RAS)، بازه دانوب.

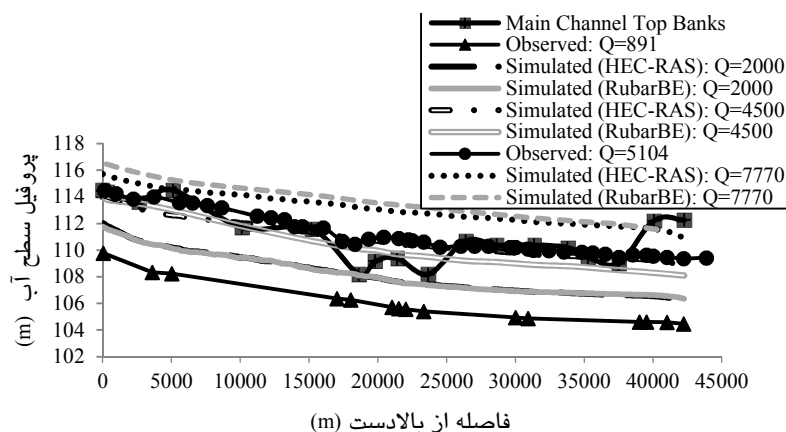


شکل ۱۰- عدد فرود جریان در طول بازه در جریان ناپایدار (مدل HEC-RAS)، بازه دانوب.

بده آستانه سیلاب

آستانه سیلاب رودخانه در نظر گرفته می‌شود. نتایج کاربرد دو مدل HEC-RAS و RubarBE، نیز بده جریان ۲۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه را تأیید می‌نماید. نتایج در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

براساس مقایسه تراز سطح آب با ارتفاع سواحل مجرای اصلی رودخانه، جریان مقطع پر در طول بازه رودخانه دانوب در اسلواکی، معادل بده ۲۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه ارزیابی گردیده؛ که به‌عنوان بده مقطع پر یا



شکل ۱۱- ارزیابی بده جریان مقطع پر در بازه رودخانه دانوب.

بررسی حساسیت مدل

مدل HEC-RAS برای تحلیل حساسیت هفت عامل (۱) تأثیر شرایط اولیه؛ جریان ناپایدار در برابر سه گزینه معادل جریان پایدار؛ ۲. تأثیر شرایط مرزی پایین دست؛ جریان یکنواخت در مقابل منحنی سنجه؛ ۳. تأثیر حذف و یا تراکم مقاطع عرضی؛ ۴. بررسی حساسیت ضریب زبری n ؛ ۵. تأثیر ضرایب تبدیل هندسه جریان، برای بده جریان غالب بازه رودخانه دانوب (بده مقطع پر ۲۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه) اجرا شد. خلاصه نتایج سنجش پنج پارامتر مهم جریان (شامل: ۱. ارتفاع سطح آب؛ ۲. عرض متوسط آب؛ ۳. سرعت متوسط آب؛ ۴. عدد فرود؛ ۵.

متوسط تنش برشی) برای این بازه در جدول ۴ ارائه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که، بیشترین حساسیت مدل در انتخاب شیب زیربازه مرزی (بالا و یا پایین دست) برای گزینه "شرایط مرزی جریان یکنواخت" است. نتایج مدل حساسیت زیادی به افزایش تعداد مقاطع عرضی نشان نمی‌دهد. کمترین حساسیت مربوط به تراز سطح آب؛ و بیشترین آن برای تنش برشی بستر است. معرفی ضرایب زبری مانینگ حاصل از واسنجی مدل RubarBE به مدل HEC-RAS، نقش مهمی در تطابق نتایج دو مدل، به‌خصوص در تراز سطح آب و بده جریان مقطع پر داشته است.

جدول ۴- ارزیابی درصد خطای نسبی برآورد پارامترهای جریان از مدل یک بعدی HEC-RAS، بازه دانوب.

ردیف	عوامل مورد بررسی	درصد خطای پارامترهای مؤثر			
		ارتفاع سطح آب	عرض سطح آب	سرعت متوسط	عدد فرود
۱	تأثیر شرایط اولیه: جریان ناپایدار در برابر سه گزینه معادل جریان پایدار	(-۰/۳:۳/۱)	(-۳/۴:۷۶/۱)	(-۳/۲:۳۶/۸)	۰/۰
۲	تأثیر شرایط مرزی پایین دست: جریان یکنواخت در مقابل منحنی سنج	(-۱/۴:۴/۳)	(-۲۱۳/۳:۱۵/۸)	(-۳۶/۲:۵۰/۹)	(-۵۴/۸:۶۳/۵)
۳	تأثیر حذف یا تراکم مقاطع عرضی	(-۰/۱:۰/۱)	(-۳/۴:۴/۲)	(-۲/۸:۱/۷)	(-۴/۵:۲/۴)
۴	بررسی حساسیت ضریب زبری n	(-۰/۲:۰/۲)	(-۱۴/۶:۱۱/۰)	(-۷/۰:۷/۹)	(-۸/۹:۱۰/۱)
۵	تأثیر ضرایب تبدیل هندسه جریان	۰/۰	(۰/۰۰:۴/۰)	(-۰/۰۱:۰/۰)	۰/۰

حساسیت مدل HEC-RAS برای بازه نازلو نشان داد که: از میان پارامترهای جریان، بهترین تطابق در ارتفاع سطح آب است؛ و روند تغییرات آن از بالادست تا پائین دست نسبت به پارامترهای دیگر کمتر و در حد قابل قبول است. استفاده از بده بیشینه هیدروگراف سیل، مقادیر بیشتری از پارامترهای جریان (نظیر تراز و عرض سطح آب) را به دست می‌دهد. در شرایط جریان زیر بحرانی در طول بازه، نتایج جریان با احتساب شرایط مرزی پائین دست و مختلط تفاوت قابل ملاحظه‌ای ندارد. برای فرض جریان یکنواخت در شرایط مرزی، شیب متوسط زیر بازه در مرز مورد نظر (بالا/پائین دست) باید جایگزین شیب متوسط کل بازه باشد. با رعایت هندسه تغییرات تدریجی در انتخاب مقاطع عرضی، میان‌یابی بین مقاطع عرضی تأثیر قابل توجهی ندارد. تغییر ضریب زبری و ضرایب تبدیل هندسه جریان تا ۱۰٪ قابل قبول است (حاتمی ۱۳۹۲).

نتیجه گیری کلی

کاربرد مدل ریاضی HEC-RAS در طرح‌های تعیین حد بستر و ساماندهی رودخانه ایران گسترده

برای ارزیابی کارایی نتایج این مطالعات در یک بازه رودخانه‌ای ایران (رودخانه نازلو، رودخانه فرامرزی ترکیه - ایران در حوضه دریاچه ارومیه)، شرایط جریان در حالت پایدار و ناپایدار بررسی و مقایسه گردید. در جریان پایدار، سه جریان از یک هیدروگراف سیل ۲۰ ساله شامل: بده ماکزیمم (Q_p) هیدروگراف، $2/3Q_p$ و بده متوسط هیدروگراف (Q_m به ترتیب برابر با ۲۷۵، ۱۸۱ و ۱۱۸ متر مکعب بر ثانیه) مورد نظر قرار گرفت. مدل همچنین برای بده جریان شاهد $28/8$ مترمکعب بر ثانیه و بده مقطع پیر در بازه، اجرا گردید. در جریان ناپایدار، مدل برای ۳ سناریو (هیدروگراف ساده ۵۷ ساعته، هیدروگراف‌های مرکب کوتاه مدت ۷/۵ روزه و ۲۵ روزه، هیدروگراف‌های مرکب طولانی مدت ۱۷ روزه و ۱۷۶۴ روزه) اجرا گردید (حاتمی ۱۳۹۲). در بازه رودخانه نازلو نیز، پروفیل سطح آب برای جریان‌های مختلفی، با ارتفاع متوسط دیواره‌های راست و چپ مجرای اصلی رودخانه در دو مدل HEC-RAS و RubarBE مقایسه شد؛ که تطابق دو مدل را برای محدوده جریان در مجرای اصلی رودخانه تأیید می نماید. در نهایت بده ۳۹۰ مترمکعب بر ثانیه به عنوان آستانه سیلاب بازه نازلو انتخاب گردید. نتایج بررسی

در زیر بازه بالادست (با مقطع مرکب)، و مدل HEC-RAS در زیربازه پایین دست (با مقطع ساده) بهتر بوده است. نتایج برآورد بده جریان مقطع پر رودخانه از دو مدل نسبتاً مشابه بوده؛ و با شواهد منطقه برای آستانه سیلاب مطابقت دارد. استفاده از بده بیشینه هیدروگراف سیلاب، مقادیر بیشتری از پارامترهای جریان (نظیر تراز و عرض سطح آب) را بدست می‌دهد؛ که برای اهداف طرح های تعیین حد بستر، محافظه کارانه تر است. نتایج تحلیل حساسیت مدل HEC-RAS به پنج عامل: (۱) شرایط اولیه جریان پایدار و ناپایدار در بالادست؛ (۲) نوع رژیم جریان؛ (۳) تراکم مقاطع عرضی؛ (۴) ضریب زبری؛ و (۵) ضرایب تبدیل جریان، در جدول (۴) خلاصه گردیده است. بیشترین حساسیت مدل در انتخاب شیب زیربازه مرزی (بالا و یا پائین دست) برای گزینه "شرایط مرزی جریان یکنواخت" می‌باشد، که در ایران عموماً اهمیت داده نشده و گاهاً شیب متوسط کل بازه را به مدل معرفی می‌کنند.

بوده، و مورد تأیید وزارت نیرو است. در مقابل، مدل یک-بعدی RubarBE در کشورهای اروپائی کاربرد گسترده دارد. به همین دلیل در این بررسی، نتایج کاربرد این دو مدل در یک بازه بلند (۴۲ کیلومتری) از یک رودخانه بزرگ (نظیر رودخانه دانوب)، و همچنین در رودخانه نازلو (ایران)، در شرایط اولیه و مرزی یکسان (هندسی و هیدرولیکی) مقایسه گردیده است. دو مدلی برای هفت شرایط مختلف جریان پایدار، و برای سه سناریو جریان ناپایدار سیلابی ورودی به بازه اجرا گردید. با توجه به معرفی ضرایب زبری مانینگ حاصل از واسنجی مدل RubarBE به مدل HEC-RAS، بیشترین تطابق در بخش تراز سطح آب در طول بازه بوده است. همچنین تطابق در محدوده جریانات در مجرای اصلی رودخانه (تا بده مقطع پر) بیشتر بوده، که اهمیت ارزیابی ضریب n را برای تراز های مختلف جریان در رودخانه نشان می‌دهد. برای جریانات مختلف در پهنه سیلابدشت، نتایج مدل RubarBE

منابع مورد استفاده

- بیگی ح، ۱۳۸۷. مقایسه نتایج شبیه‌سازی خصوصیات جریان پایدار از مدل‌های ریاضی با نتایج مدل فیزیکی در یک بازه رودخانه‌ای در شرایط ساماندهی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه.
- حاتمی ل، ۱۳۹۲. شبیه‌سازی جریان یک بعدی پایدار و ناپایدار در رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه نازلو). پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه.
- رضایی مقدم م، رجبی م، دانشفراز ر و خیری زاده م، ۱۳۹۵. پهنه‌بندی بررسی اثرات مورفولوژیکی سیلاب‌های رودخانه زربینه رود (از ساری قمیش تا سد نوروزلو). نشریه جغرافیا و مخاطرات طبیعی، شماره ۱۷، صفحه‌های ۱ تا ۲۰.
- شیخ علیشاهی ن، جمالی ع و حسن زاده م، ۱۳۹۵. پهنه‌بندی سیل با استفاده از مدل هیدرولیکی تحلیل رودخانه (مطالعه موردی: حوضه آبریز منشاد- استان یزد). نشریه فضای جغرافیایی، شماره ۵۳، صفحه‌های ۷۷ تا ۹۶.
- یاسی م، ۱۳۹۰. مدل‌سازی بستر ثابت و بستر متحرک رودخانه دانوب در بازه اسلوآکیا. گزارش فنی، موسسه پژوهشی آب CEMEGREF، لیون، فرانسه.

Abderrezzak K and Paquier A, 2009. One-dimensional numerical modeling of sediment transport and bed deformation in open channels. *Journal of Water Resources Research* 45:1-20.

Anonymous, 2015. HEC-RAS River Analysis System, Version 5.0. User Manual, USACE, USA.

Bordbar A, Heidarnajad M, Gholami A and Lack Sh, 2012. Calibration of Manning's roughness coefficient in the rivers. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences* 4:1562-1564.

Chen YH, 1985. Salt River channelization project: Model study. *Journal of Hydraulic Engineering* 2:267-283.

Parodi G, 2011. Rioni River Georgia: Study case in HEC-RAS. ITC-WRS Department.

Tate E and Maidment D, 1999. Floodplain Mapping Using HEC-RAS and ArcView GIS. CRWR Online Report 99-1.