

مدل‌سازی عددی الگوی فرسایش و رسوب‌گذاری در رودخانه‌های آبرفتی (مطالعه موردی: رودخانه قره‌سو در استان کرمانشاه)

رسول قبادیان^{1*}، هانیه رحیمی فر²

تاریخ دریافت: 93/10/25 تاریخ پذیرش: 95/03/01

1- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی کرمانشاه

2- کارشناس ارشد منابع آب، دانشگاه رازی کرمانشاه

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

چکیده

روندیابی درازمدت رسوب و تعیین محل‌های فرسایش و رسوب‌گذاری در رودخانه‌ها اطلاعات مفیدی برای طراحی سازه‌های هیدرولیکی و مدیریت رودخانه در اختیار مهندسان قرار می‌دهد. از این‌رو در این تحقیق مدلی کامپیوتری برای روندیابی رسوب در رودخانه تهیه شد که در آن پس از محاسبه پروفیل جریان در هر گام زمانی با حل معادله پیوستگی رسوب تغییرات پروفیل بستر برای همان گام زمانی محاسبه می‌شود. پس از صحت‌سنجی مدل، تغییرات فرسایش و رسوب‌گذاری در بازه‌ای به طول 18/5 کیلومتر برای مدت زمان 5 و 10 سال با استفاده از روابط میر، پارکر و ویلسون (بار بستر) محاسبه شد. در ادامه با حل عددی معادله دیفرانسیل متوسط‌گیری شده در عمق اثر بار معلق بر پروفیل فرسایش و رسوب‌گذاری، برای مدت 5 سال بررسی گردید. نتایج نشان داد که فرآیند غالب در بازه مورد مطالعه، فرسایش است. از طرفی میزان فرسایش و رسوب‌گذاری که از رابطه ویلسون به دست می‌آید نسبت به روابط دیگر بیشتر است. همچنین با در نظر گرفتن بار معلق، تغییرات فرسایش و رسوب‌گذاری بیشتری به دست آمد و به عبارتی حذف اثر بار معلق خطای زیادی را در پیش‌بینی‌های فرسایش و رسوب‌گذاری در رودخانه مذکور ایجاد خواهد کرد.

واژه‌های کلیدی: بار بستر، بار معلق، رسوب‌گذاری، رودخانه قره‌سو، فرسایش، مدل‌سازی عددی

Numerical Modeling of Erosion and Sedimentation Patterns in Alluvial River (Case Study: Gharasoo River in Kermanshah province)

R Ghobadian^{1*}, H Rahimifar²

Received: 15 January 2015 Accepted: 21 May 2016

¹- Assoc. Prof., Dept. of Water Engineering, Razi University, Iran

²- M.Sc of Water Resource, Razi University, Iran

*Corresponding Author, Email: rsghobadian@gmail.com

Abstract

Longtime sediment routing and determining the location of sedimentation and erosion in rivers provide useful information for engineers to design hydraulic structures and river management. Therefore, in the present research a computer model was developed to simulate sediment movement in a river, in which after flow calculation at each time step, sediment continuity equation was solved numerically to predict bed change at the same time step. After model verification, using Meyer, Parker and Wilson equations for bed load prediction, bed variation of the river with 18.5 km length for 5 and 10 years was calculated. Also by numerical solution of 1-D depth average differential equation to calculate suspended load concentration the effect of suspended load on sedimentation and erosion pattern during 5-year simulation was investigated. The results showed that the erosion phenomenon was dominate pattern at the river reach. Also calculated volumes of sedimentation and erosion using the Wilson equation were more than those from the other relations. In addition the result showed with considering the effect of suspended load, variations and amounts of sedimentation and erosion were increased. Therefore, significant mistake would occur in prediction of sedimentation and erosion pattern in the mentioned river reach if the effect of suspended load was not considered.

Keywords: Bed load, Erosion, Gharasoo river, Numerical modeling, Sedimentation, Suspended load

مقدمه

بارمعلق و بارکف رودخانه‌های ورودی می‌باشد. همچنین بررسی رژیم رسوبی رودخانه‌ها تعیین کننده وضعیت فرسایشی اراضی بالادست و مشخص کننده میزان آلودگی نیز می‌باشد که خود از جنبه‌های گوناگون اجتماعی و اقتصادی حائز اهمیت است. سازه‌های موجود در مسیر رودخانه‌ها مانند پل‌ها، بندها، سدها، دیواره‌های سیل بند، سازه‌های حفاظت بستر و کناره‌ها و همچنین تأسیسات موجود در حواشی و اراضی اطراف از جمله جاده‌ها، مزارع، مناطق

رودخانه‌ها تحت تأثیر فرسایش و رسوب‌گذاری دستخوش تغییرات گوناگونی می‌شوند که از آن جمله می‌توان به تغییر مسیر، جابه‌جایی‌های عرضی و طولی، وقوع میانبرها، تغییر نوع رودخانه، تغییر تراز بستر، تغییر دانه‌بندی و دگرگونی ویژگی‌های هندسی مسیر اشاره کرد. مطالعه رژیم رسوبی رودخانه‌ها از جنبه‌های مختلف حائز اهمیت است. میزان رسوب ورودی به مخازن سدها و دریاچه‌ها تابعی از میزان

(ایکرز وایت، انگلند-هانسن، یانگ، توفالتی، وان‌راین) مقایسه شدند. با رسوب‌سنجی مخزن سد امیرکبیر میزان رسوب ته نشست یافته در مخزن سد محاسبه شد. سپس بار رسوب انتقال یافته از طریق معادلات مختلف مورد مقایسه قرار گرفت.

پیرو و همکاران (1391) در طی تحقیقاتی با کمک مدل HEC-RAS4 به بررسی وضعیت رسوب در بستر رودخانه بشار یاسوج پرداختند. نتایج نشان داد که چنانچه بستر رودخانه نسبت به عمل فرسایش مقاوم باشد، در آن‌صورت بدنه رودخانه شروع به ریزش کرده و باعث تعریض رودخانه خواهد شد. محاسبه و تعیین حجم متوسط رسوب خروجی از رودخانه در مقاطع مختلف با استفاده از این مدل قابل محاسبه می‌باشد. با توجه به بیشینه عمق مجاز برداشت مصالح و در نظرگیری عرض رودخانه، طول و محل برداشت مصالح رودخانه‌ای برای کارگاه‌های شن و ماسه، قابل تعیین می‌باشد.

بختیاری و شهنی کرم‌زاده (1392) با استفاده از نرم افزار GSTAR3 به تعیین بازه‌های فرسایش و رسوب‌گذاری بر روی رودخانه اعلا از رودخانه‌های استان خوزستان پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه اعلا به شکل تغییر کلی در پلان و یا در مسیر رودخانه صورت نگرفته است و عمده تغییرات به‌صورت تغییر در عرض رودخانه و یا در رقوم بستر در برخی از بازه‌های رودخانه بوده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان به تعیین نقاط مستعد برای برداشت مصالح رودخانه اشاره نمود. کانفیلد و همکاران (2005) طی تحقیقاتی به بررسی رسوب در رودخانه فصلی سرو کرانده پرداختند. آنها با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS مدل‌سازی آبشستگی و تجمع رسوب در رودخانه مذکور پرداختند.

گیبسون و همکاران (2006) قابلیت مدل-HEC-RAS را برای محاسبات انتقال رسوب در رودخانه مورد

صنعتی، شهری و کشاورزی از فرآیندهای مختلف فرسایش و رسوب‌گذاری تأثیرپذیری مستقیم دارند (گارسیا 2004). با توجه به موارد اشاره شده و اهمیت موضوع تاکنون تحقیقات متعددی در خصوص فرسایش و رسوب‌گذاری و عوامل مؤثر بر آن در رودخانه‌ها با استفاده از مدل‌های فیزیکی و شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده است. استفاده از مدل‌های فیزیکی به‌خصوص در تحقیقات رسوب بسیار پر هزینه و وقت‌گیر است هرچند که رفتارهای هیدرولیکی جریان‌های سه‌بعدی پیچیده در مدل فیزیکی شباهت بیشتری با اصل دارد. مدل‌های عددی شبیه ساز جریان و رسوب در مقایسه با مدل‌های فیزیکی بسیار سریع‌تر و ارزان‌تر تمام می‌شود و بر خلاف مدل‌های فیزیکی امکان بکارگیری آنها برای پروژه‌های مختلف وجود دارد. در دهه‌های اخیر با پیشرفت رایانه‌های قدرت‌مند مدل‌های عددی در علم هیدرولیک و رسوب گسترش چشمگیری داشته‌اند. (شفاعی بجستان 1384).

شاهی نژاد و همکاران (1387) با کمک مدل GSTAR3 تغییرات تراز بستر رودخانه کارون را در محدوده شهری اهواز در طی دوره زمانی 7 ساله بررسی و با تغییرات اندازه‌گیری شده مقایسه کردند. نتایج آنها نشان داد حجم رسوب‌گذاری در بازه اهواز تا فارسیات حدود دو میلیون تن در سال برآورد شده است. علاوه بر این نتایج واسنجی مدل GSTAR3 در مقطع عرضی ایستگاه اهواز نشان داد که مقطع عرضی برآورد شده توسط روابط رسوبی آکرز-وایت و توفالتی بهترین تطابق را با مقطع عرضی اندازه‌گیری شده در این ایستگاه دارند. رابطه میر-پیتر و مولر از بین روابط رسوبی مورد بررسی، بیشترین خطا را داشته است.

سلاجقه و همکاران (1389) به بررسی و مقایسه روش‌های هیدرولیکی برآورد رسوب رودخانه کرج در حوضه سد امیرکبیر با مدل HEC-RAS در طی مدت 29 سال پرداختند. در این تحقیق 5 معادله برای بار کل

برخوردار است. در این تحقیق پس از تهیه و توسعه یک مدل کامپیوتری به بررسی فرسایش و رسوبگذاری در بازه G1 رودخانه قره‌سو (بازه وروی به شهر) پرداخته می‌شود.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

رودخانه قره‌سو یکی از پنج شاخه اصلی رودخانه کرخه است. حوضه آبخیز قره‌سو در محدوده $46^{\circ}22'12''$ تا $47^{\circ}22'12''$ طول جغرافیایی و عرض جغرافیایی $34^{\circ}11'00''$ تا $34^{\circ}55'10''$ قرار گرفته است. سرچشمه اصلی این رودخانه سراب روانسر واقع در 50 کیلومتری شمال غرب کرمانشاه می‌باشد. از شمال به حوضه آبخیز گاورد، از جنوب به حوضه اروند، از غرب به حوضه آبخیز زمکان و از شرق به حوضه آبخیز گاماسیاب محدود می‌شود. این حوضه از نظر تقسیمات کشوری در استان کرمانشاه قرار دارد. در این تحقیق بررسی روند فرسایش و رسوبگذاری در بازه‌ای از رودخانه قره‌سو به طول 18/5 کیلومتر با 60 مقطع عرضی از محل دو آب قزانچی تا پل امام حسین (ع) (ورودی شهر کرمانشاه) انجام شد. مقاطع برداشت شده مربوط به بازه G1 طرح ساماندهی رودخانه قره‌سو است که توسط شرکت آب منطقه‌ای کرمانشاه تهیه شده است. در شکل 1 محدوده مورد نظر نشان داده شده است. همچنین تعدادی از مقاطع عرضی در شکل 2 ارائه شده است. علاوه بر این در جدول 1 فاصله مقاطع عرضی برداشت شده از یکدیگر نشان داده شده است. لازم به ذکر است مقطع شمار 1 در بالادست و مقطع شماره 60 در پایین‌دست بازه مذکور قرار دارد.

بررسی قرار دادند و نتایج این مدل را با مدل Hec-6 مقایسه کردند ایشان نتیجه گرفتند مدل HEC-RAS در شبیه‌سازی‌ها به‌طورکلی به‌خوبی اجرا شده و نتایج این مدل در مقایسه با Hec-6 در شرایط خاصی، کمی متفاوت بوده که به دلیل تفاوت در هیدرولیک مدل می‌باشد.

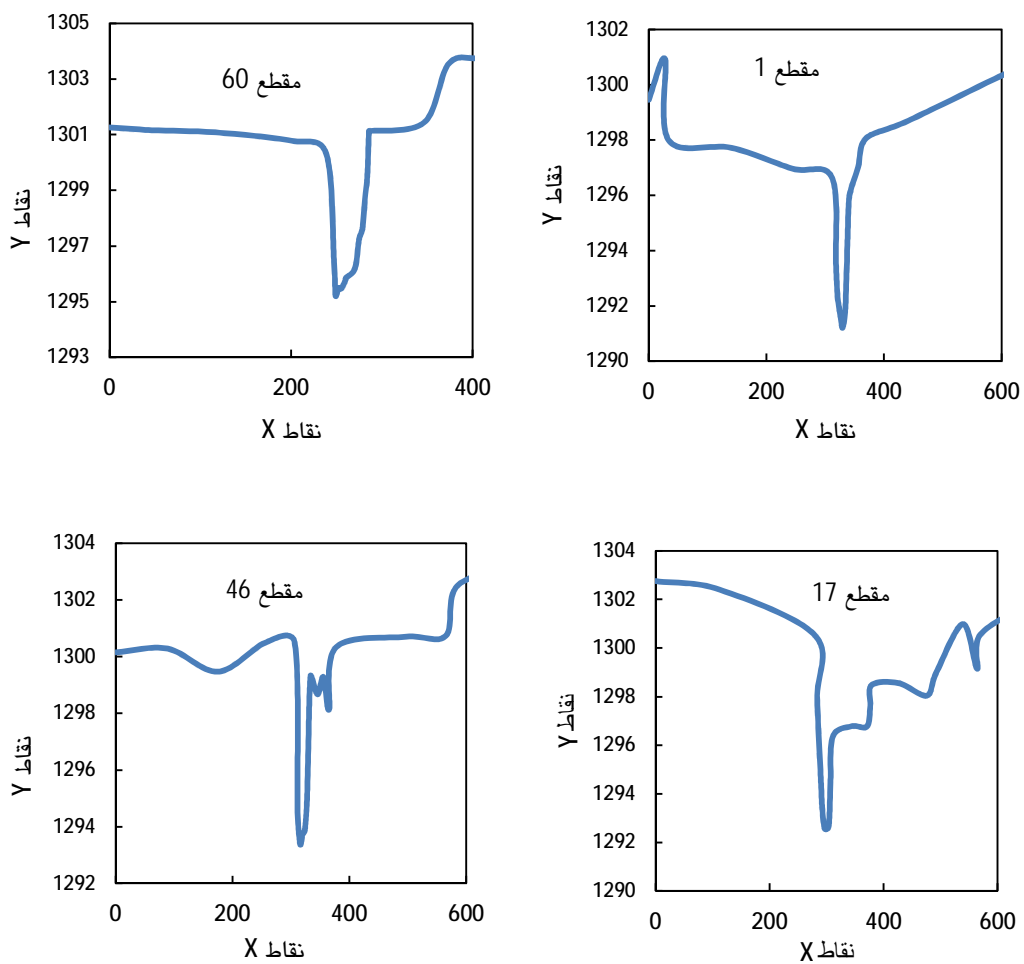
روبرتو و همکاران (2012) به بررسی بار معلق رسوب در رودخانه لو در جنوب شرق آسیا توسط مدلی در چارچوب نرم افزار GIS پرداختند، بارش ماهانه به‌عنوان ورودی مدل مورد استفاده قرار گرفت. اطلاعات بار معلق رسوب، در هشت ایستگاه در بین سالهای 1959-2007 در ویتنام اندازه‌گیری و با رسوب شبیه‌سازی شده توسط مدل مورد مقایسه قرار گرفت. با توجه به نتایج این مطالعات ضریب نش-ساتکلیف حاصل برابر با 0/45 و میانگین Bias به‌دست آمده برای هشت ایستگاه برابر با 1/4 بوده که نشان از مناسب بودن مدل بود.

زولیزیان و همکاران (2013) با ارایه مدلی به‌کمک نرم افزار GIS به بررسی فرسایش و انتقال رسوب در حوضه رودخانه مکونگ پرداختند. برای انجام این تحقیق بار رسوب را در نه ایستگاه در امتداد رودخانه مکونگ بین سالهای 1990-2000 اندازه‌گیری و با خروجی مدل مقایسه نمودند. نتایج حاصل نشان داد که از مدل مذکور می‌توان برای اقدامات مدیریتی در بررسی فرسایش و انتقال رسوب در رودخانه‌های بزرگ استفاده نمود.

رودخانه قره‌سو در مسیر خود از شهر پرجمعیت کرمانشاه عبور می‌کند و از این‌رو توجه و اهتمام به شناخت عوامل فرسایش و رسوبگذاری در بستر رودخانه در بازه قبل از شهر با توجه به ساماندهی اخیر در محدوده شهر، از اهمیت زیادی



شکل 1- نمایی از مسیر طولی رودخانه مورد مطالعه.



شکل 2- نیمرخ عرضی برخی مقاطع طبیعی رودخانه.

جدول 1- فاصله مقاطع عرضی برداشت شده از یکدیگر (مقطع شماره 1 در بالادست و مقطع شماره 60 در پایین دست بازه).

مقاطع	فواصل مقاطع (m)	مقاطع	فواصل مقاطع (m)	مقاطع	فواصل مقاطع (m)
1-2	303/69	21-22	201/7	41-42	489/35
2-3	182/06	22-23	127/78	42-43	329/88
3-4	329/23	23-24	285/41	43-44	306/55
4-5	271/75	24-25	132/53	44-45	505/02
5-6	341/07	25-26	280/91	45-46	360/95
6-7	509/42	26-27	424/87	46-47	341/48
7-8	326/15	27-28	297/96	47-48	670/15
8-9	249/3	28-29	296/27	48-49	129/7
9-10	143/32	29-30	213/95	49-50	56/11
10-11	250/91	30-31	421/19	50-51	368/57
11-12	107/51	31-32	448/26	51-52	242/64
12-13	395/46	32-33	305/53	52-53	163/89
13-14	197/24	33-34	234/47	53-54	702/99
14-15	281/64	34-35	444/6	54-55	578/77
15-16	218/49	35-36	361/04	55-56	200/05
16-17	157/78	36-37	251/5	56-57	265/86
17-18	271/46	37-38	164/75	57-58	407/02
18-19	311/13	38-39	529/31	58-59	407/51
19-20	325/27	39-40	405/77	59-60	468/67
20-21	116/54	40-41	198/4		

معادلات حاکم بر جریان

اولین مرحله در محاسبات نیمرخ بستر تعیین خصوصیات هیدرولیکی جریان از قبیل نیمرخ سطح آب، عمق و سرعت جریان در مقاطع مختلف می باشد. برای

محاسبه نیمرخ سطح آب از روش گام به گام استاندارد و حل رابطه انرژی برای مقاطع نامنظم استفاده گردید (چادری 2008).

$$y_1 + a_1 \frac{Q_1^2}{2gA_1^2} + Z_1 = y_2 + a_2 \frac{Q_2^2}{2gA_2^2} + Z_2 + sf \cdot L \quad [1]$$

که در آن y عمق جریان، Z رقوم کف، Q دبی، A سطح مقطع و \overline{sf} میانگین شیب خط انرژی می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\overline{sf} = \frac{sf_1 + sf_2}{2} \quad [2]$$

$$sf = \frac{n^2 Q^2}{R^3 A^2} \quad [3]$$

$$R = \frac{A}{p} \quad [4]$$

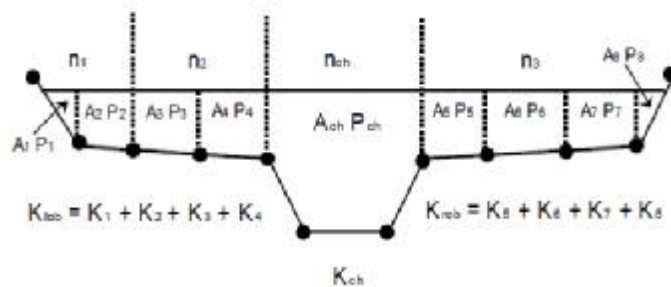
$$a = \frac{\sum \frac{k_i^3}{A_i^2} (\sum A_i)^2}{(\sum k_i)^3} \quad [5]$$

$$k_i = \frac{Q_i}{\sqrt{sf_i}} \quad [6]$$

$$k_i = \frac{1}{n_i} A_i R^{\frac{2}{3}} \quad [7]$$

همان‌گونه که در شکل 3 نیز نشان داده شده است در این روابط k_i ، Q_i ، A_i ، n_i و sf_i به ترتیب ضریب انتقال، دبی جریان، سطح جریان، ضریب زبری مانینگ و شیب خط انرژی در زیر مقطع i ام از مقطع مورد نظر می‌باشد.

که در آن n ضریب زبری مانینگ، R شعاع هیدرولیکی و p محیط خیس شده می‌باشد. زیرنویس‌های 1 و 2 اشاره به مقاطع شماره 1 در بالادست و مقطع شماره 2 در پایین دست با فاصله L از یکدیگر دارد. مقدار a در جریان آرام بیش از جریان آشفته بوده و این به دلیل یکنواخت بودن توزیع سرعت در جریان آشفته می‌باشد. در تحلیل مسائل در کانال‌های با سطح مقطع منظم



شکل 3- تقسیم‌بندی مقطع برای محاسبه a .

و حل رابطه غیرخطی زیر بر حسب y_2 مقادیر عمق جریان و در نهایت سرعت و نیم‌رخ طولی سطح آب در طول بازه محاسبه می‌شود.

پس از تغییر شکل رابطه 1 به شکل رابطه 8 با معلوم بودن مشخصات جریان در مقطع کنترل (مثلا مقطع شماره 1) با استفاده از روش نصف کردن فاصله

$$f(y_2) = (y_1 + a_1 \frac{Q^2}{2gA_1^2} + Z_1) - (y_2 + a_2 \frac{Q^2}{2gA_2^2} + Z_2 + \overline{sf} \cdot L) \quad [8]$$

که در آن q_b حجم بار بستر منتقل شده در واحد عرض (L^2/T) و D اندازه ذره است. در ادامه روابط مهم بار بستر که به شکل کلی رابطه فوق ارائه شده‌اند و در این تحقیق از آنها استفاده شده است ذکر می‌گردد:

رابطه پارکر³ (1978)

$$q_b = 11.2 \cdot q^{1.5} \cdot (1 - \frac{q_c}{q})^{4.5} \quad \text{و} \quad q_c = 0.03 \quad [12]$$

رابطه میر-پیتر-مولر⁴ (1948)

$$q_b = 8 \cdot (q - q_c)^{3/2} \quad \text{و} \quad q_c = 0.047 \quad [13]$$

رابطه ویلسون⁵ (1966)

$$q_b = 12 \cdot (q - q_c)^{3/2} \quad [14]$$

که در روابط فوق q پارامتر شیلدز و q_c پارامتر بحرانی شیلدز می‌باشد. مقدار پارامتر T در روابط فوق به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$q = \frac{R \cdot S}{(G_s - 1)D} \quad [15]$$

در این رابطه:

R شعاع هیدرولیکی جریان، S شیب کف، D قطر ذرات، G_s چگالی ذرات برابر با 2/65 در نظر گرفته شد.

معادلات حاکم بر رسوب

معادله پیوستگی رسوب (اکسنر¹)

تغییرات سرعت و عمق جریان در طول بازه باعث تغییر در حمل رسوب خواهد شد. تغییر حمل رسوب باعث تغییرات رقوم کف می‌شود. این پدیده می‌تواند از طریق رابطه پیوستگی رسوب (معادله اکسنر) محاسبه گردد (گارسیا 2004):

$$\frac{\eta_z}{\eta_t} = - \frac{1}{(1 - I_p)} \frac{\eta_x}{\eta_x} (q_b + q_s) \quad [9]$$

که در آن Z رقوم کف بستر، I_p پوکی رسوبات کف، q_b و q_s بار بستر و معلق حمل شده در عرض واحد می‌باشند.

روابط انتقال بار بستر

تعداد زیادی از روابط محاسبه بار بستر را می‌توان به شکل کلی زیر بیان نمود:

$$q^* = f(q, Re_p, R) \quad [10]$$

که در آن Re_p عدد رینولدز ذره، R چگالی مخصوص ذرات مستغرق ($G_s - 1$)، q پارامتر شیلدز برای تنش برشی و q^* نرخ انتقال بار بستر بدون بعد است که به عنوان عدد انیشتین معروف است و اولین بار آن را انیشتین² (1950) ارائه کرده است:

$$q^* = \frac{q_b}{\sqrt{RgDD}} \quad [11]$$

³ Parker

⁴ Meyer-Peter and Muller

⁵ Wilson

¹ Exner

² Einstein

روابط محاسبه بار معلق

هر چند روابط تجربی متعددی برای محاسبه بار رسوب معلق وجود دارد. در این تحقیق از حاصل ضرب غلظت متوسط رسوب و دبی جریان در واحد عرض به دست آمد:

$$q_s = q_w C \quad [16]$$

که در آن q_w ، دبی جریان در واحد عرض و C غلظت حجمی رسوب معلق است که با حل معادله دیفرانسیل زیر به دست می آید (پارکر و همکاران 1987):

$$\frac{dUhC}{dx} = q_w \frac{dC}{dx} = v_s (E_s - r_0 C) \quad [17]$$

که x هم سو با جهت حرکت جریان، $q_w = Uh$ و $r_0 C = \bar{C}_b$ برابر غلظت رسوب نزدیک کف است. عامل شکل r_0 به وسیله رابطه تقریبی زیر به دست می آید:

$$-1.46$$

$$r_0 = 1 + 31.5 \frac{C^* \bar{C}_b}{\bar{C}_b v_s} \quad [18]$$

که در آن u_* سرعت برشی و v_s سرعت سقوط ذره رسوب است. مقدار ضریب ورود رسوب E_s نیز با رابطه گارسیا-پارکر محاسبه می شود:

$$E_s = \frac{AZ_u^5}{1 + \frac{A}{0.3} Z_u^5} \quad [19]$$

$$A = 1.3 \cdot 10^{-7} \quad [20]$$

$$Z_u = \frac{u_*}{V_s} (Re_p)^{0.6} \quad [21]$$

رابطه محاسبه بار کل

برای محاسبه بار کل در تحقیق حاضر از رابطه انگلوند - هانسن (1972) استفاده گردید که این رابطه به شکل زیر است:

$$Q_t = 0.05 g_w G_s V^2 \sqrt{\frac{d_f}{g(G_s - 1)}} \frac{t_0}{\bar{C}_b} \frac{\bar{C}_b^2}{\bar{C}_b} B \quad [22]$$

$$df = \begin{cases} \bar{C}_b - 69.07 d_{si}^2 + 1.0755 d_{si} + 0.000007 \\ \bar{C}_b - 0.1086 d_{si}^{0.6462} \end{cases}$$

$$df \leq 0.00591$$

$$df > 0.00591 \quad [23]$$

در این تحقیق به منظور تعیین رقوم بستر در گام زمانی بعدی و در هر مکان مورد نظر، رابطه اکسنر با روش تفاضل محدود گسسته سازی و حل شد:

$$Z_{i,j+1} = Z_{i,j} + \frac{Dt}{Dx(1-lp)} \quad [24]$$

$$[(q_{b,i-1} + q_{s,i-1}) - (q_{b,i} + q_{s,i})]$$

که j مرحله زمانی فعلی، $j+1$ مرحله زمانی بعدی، $i-1$ نقطه بلافاصله بالادست برای نقطه در حال محاسبه

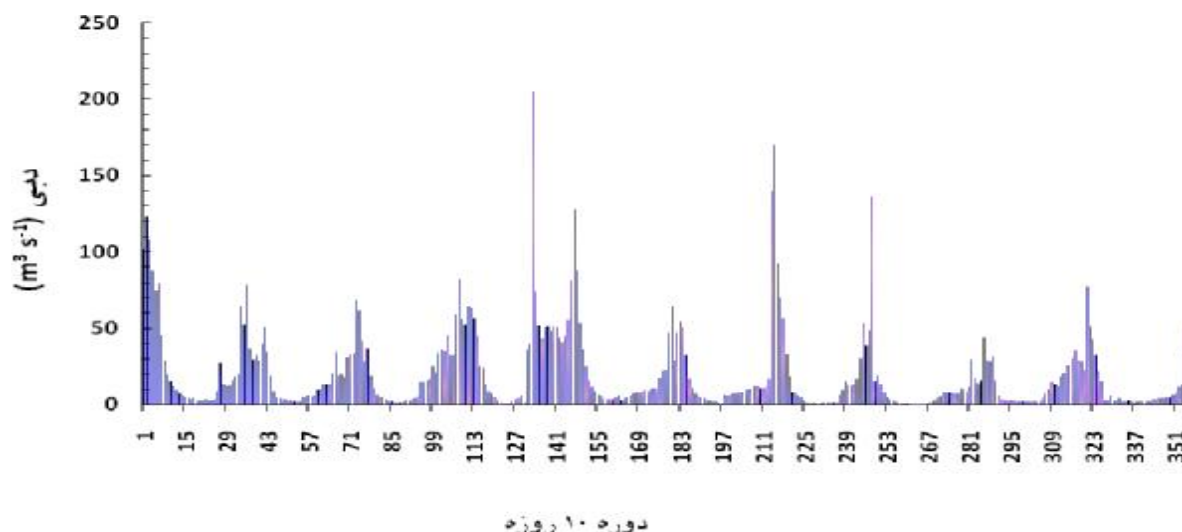
که در روابط فوق Q مقدار رسوب بر حسب کیلوگرم بر ثانیه، V سرعت جریان بر حسب متر مربع بر ثانیه، df قطر سقوط بر حسب متر، d_{si} قطر ذره رسوب بر حسب متر، B پهنای کانال بر حسب متر، g شتاب گرانش بر حسب متر بر مجذور ثانیه، G_s وزن مخصوص رسوبات برابر با $2/65$ و g_w وزن واحد حجم آب بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب و t_0 تنش برشی، می باشد.

مرزی جریان در بالادست به مدل معرفی گردید (شکل 4).

است. محاسبات از انتهای بازه به سمت بالادست ادامه می‌یابد.

شرایط مرزی

دبی روزانه به مدت 10 سال از سال 1377 تا سال 1387 با گام‌های زمانی 10 روزه به‌عنوان شرط



شکل 4- سری زمانی دبی جریان (از سال 1377 تا سال 1387).

آن مقادیر سطح مقطع، سرعت جریان و سرعت برشی در هر گام زمانی می‌باشد. اندازه میانگین ذره رسوب مواد رسوب در هر مقطع در زیر برنامه رسوب به مدل معرفی می‌شود. قبادیان و همکاران (1390) چهار تپ منحنی دانه‌بندی برای بازه مورد نظر ارائه کرده‌اند. بر اساس نتایج آنها اندازه میانگین برای مقاطع شماره یک تا 10 برابر 1/4 میلی‌متر، مقاطع 11 تا 27 برابر 0/3 میلی‌متر، مقاطع 28 تا 43 برابر 1/29 میلی‌متر و مقاطع 44 تا 60 برابر 0/425 میلی‌متر می‌باشد. پس از آن که خروجی‌های مدل جریان در هر گام زمانی به زیر-برنامه رسوب فرستاده شدند مقادیر باربستر و معلق در هر یک از مقاطع بر اساس روابط انتخاب شده توسط کاربر محاسبه می‌شوند. سپس با استفاده از رابطه 24 رقوم جدید کف در مقاطع مختلف در گام زمانی حاضر محاسبه می‌شود. مقاطع تغییر شکل یافته مجدداً به زیر برنامه جریان برای محاسبه مشخصات هیدرولیکی در

همچنین رابطه دبی-اشل استخراج شده براساس شیب متوسط بازه (0/00021) مطابق رابطه 25، به‌عنوان شرط مرزی پایین‌دست برای محاسبات جریان در نظر گرفته شده است.

$$\text{stage} = 2.204Q^{0.232} + 1291.21 \quad [25]$$

که در آن Q دبی برحسب متر مکعب بر ثانیه و stage تراز سطح آب بر حسب متر می‌باشد.

مدل کامپیوتری تهیه شده برای انجام این تحقیق در محیط نرم افزار MATLAB برنامه‌نویسی شده است. ورودی‌های مدل از قبیل مختصات طبیعی مقاطع عرضی رودخانه، فاصله مقاطع عرضی، دبی‌های ورودی و رابطه دبی-اشل به‌عنوان ورودی‌های زیر-برنامه جریان به مدل معرفی می‌شوند. خروجی زیر-برنامه جریان همان‌گونه که در رابطه 8 نشان داده شده است عبارت است از عمق جریان در مقاطع مختلف و به تبع

هانسن (1972) برای محاسبه بار کل رسوب در رابطه اکسیر استفاده شده است.

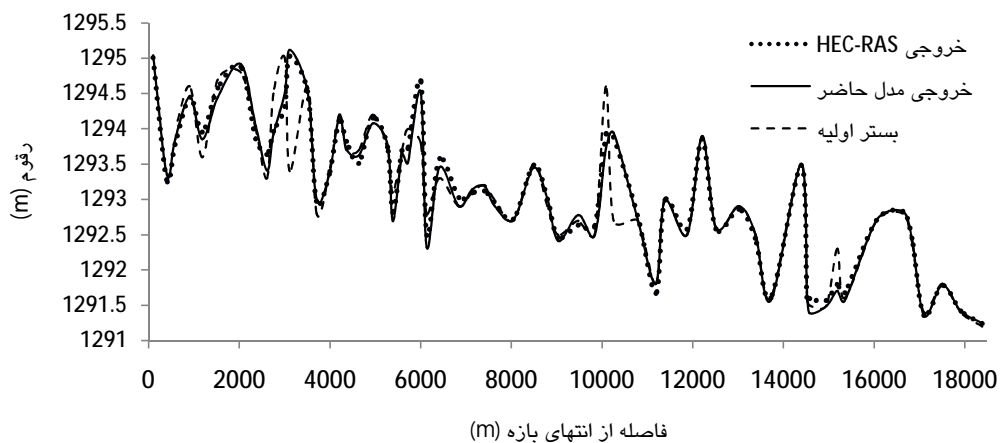
در شکل 5 نیم‌رخ طولی بستر رودخانه (خط‌القدر) محاسبه شده با مدل حاضر و نرم افزار HEC-RAS نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود پروفیل‌های بستر محاسبه شده تقریباً بر هم منطبق هستند. برای مثال هر دو مدل در کیلومترهای 10000 و 15200 فرسایش و در کیلومترهای 1400 و 3200 رسوب‌گذاری را پیش‌بینی می‌کنند. به‌منظور مقایسه دقیق‌تر رقوم خط‌القدر محاسبه شده در مقاطع عرضی مختلف با هر دو مدل در شکل 6 در مقابل هم ترسیم شده‌اند. ضریب همبستگی بالای 99 درصد نشان از دقت مدل حاضر از نقطه‌نظر برنامه‌نویسی دارد و می‌توان به نتایج آن برای ادامه تحقیق اطمینان نمود.

گام زمانی بعدی فرستاده می‌شوند. این روند تا انتهای زمان محاسبات تکرار می‌شود.

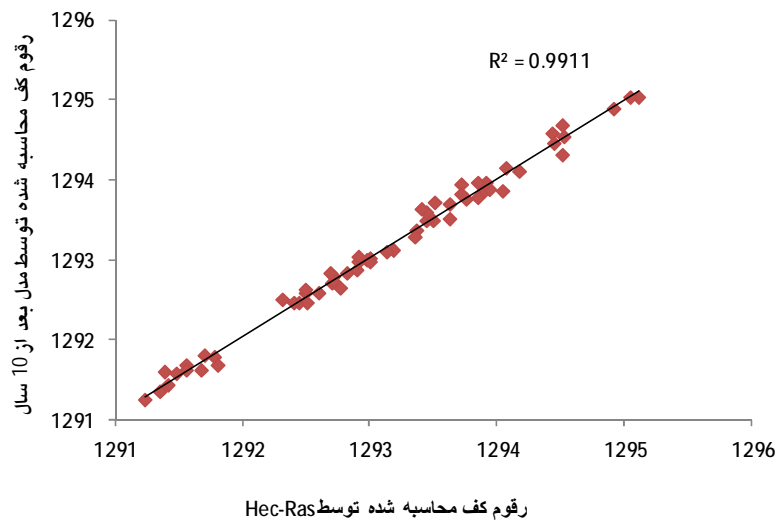
نتایج و بحث

صحت‌سنجی مدل

به منظور صحت‌سنجی مدل از نقطه‌نظر برنامه‌نویسی و اعتماد به نتایج مدل حاضر لازم است حداقل دو بار مقاطع عرضی رودخانه قره‌سو در بازه مورد مطالعه اندازه‌گیری شود، با توجه به عدم اندازه‌گیری نتایج مدل حاضر به‌ازای یک معادله بار رسوب مشترک با نتایج مدل HEC-RAS مقایسه شد. بدین منظور مشخصات 60 مقطع عرضی و شرایط مرزی بالادست و پایین‌دست برای هر دو مدل معرفی شد. با فرض ضریب زبری مانینگ 0/032 برای تمام مقاطع در هر دو مدل تغییرات طولی بستر بعد از مدت زمان 10 سال محاسبه شد. لازم به ذکر است که رابطه انگلوند -



شکل 5- نیم‌رخ بستر محاسبه شده بعد از 10 سال توسط مدل حاضر و نرم افزار HEC-RAS.

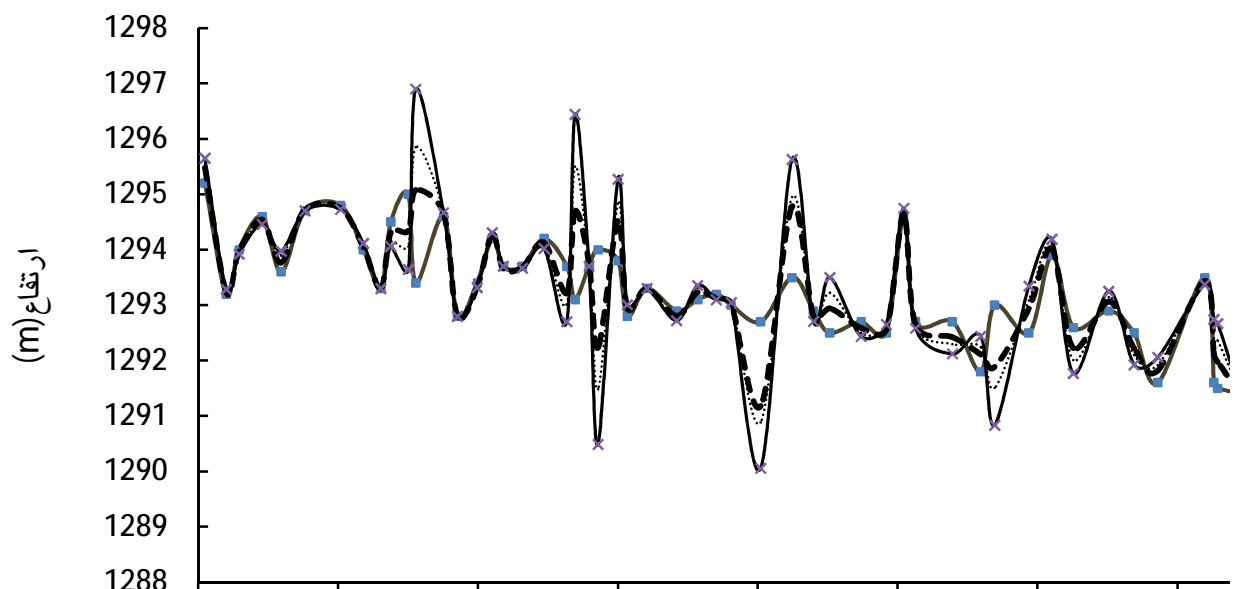


شکل 6- نتایج صحت‌سنجی بار بستر محاسبه شده توسط مدل.

تأثیر روش برآورد بار بستر بر تغییرات بستر

پس از صحت‌سنجی مدل تأثیر روش‌های مختلف برآورد بار بستر بر تغییرات نیم‌رخ بستر و احجام فرسایش و رسوب‌گذاری در بازه مورد مطالعه بررسی

شد. در این مرحله اثر بار معلق در نظر گرفته نشده است. اثر روش‌های تعیین بار بستر از قبیل پارکر، میر-پیتر-مولر و ویلسون بر نیم‌رخ طولی بستر در شکل 7 نشان داده شده است.



شکل 7- نیم‌رخ بستر محاسبه شده بعد از 5 سال با استفاده از روابط مختلف بار بستر.

همان‌گونه که در شکل 7 نشان داده شده است در قسمت عمده‌ای از بازه مورد مطالعه (رودخانه قره‌سو)

فرآیند غالب رسوب‌گذاری بوده است. همچنین میزان فرسایش و رسوب‌گذاری که از رابطه ویلسون حاصل

با دوبار اندازه‌گیری مقاطع عرضی در دوبازه زمانی متفاوت این امر امکان پذیر است، هرچند که برای بازه مورد مطالعه این تحقیق تنها یک مرتبه اندازه‌گیری شده است و انتخاب روش مناسب میسر نبود.

شد نسبت به روابط دیگر بیشتر است. در جدول 2 احجام فرسایش و رسوب‌گذاری برای هر یک از سه روش بار بستر مورد نظر این تحقیق ارایه شده است. این ارقام نشان می‌دهند که انتخاب روش مناسب محاسبه بار بستر بسیار مهم است و در کمترین حالت

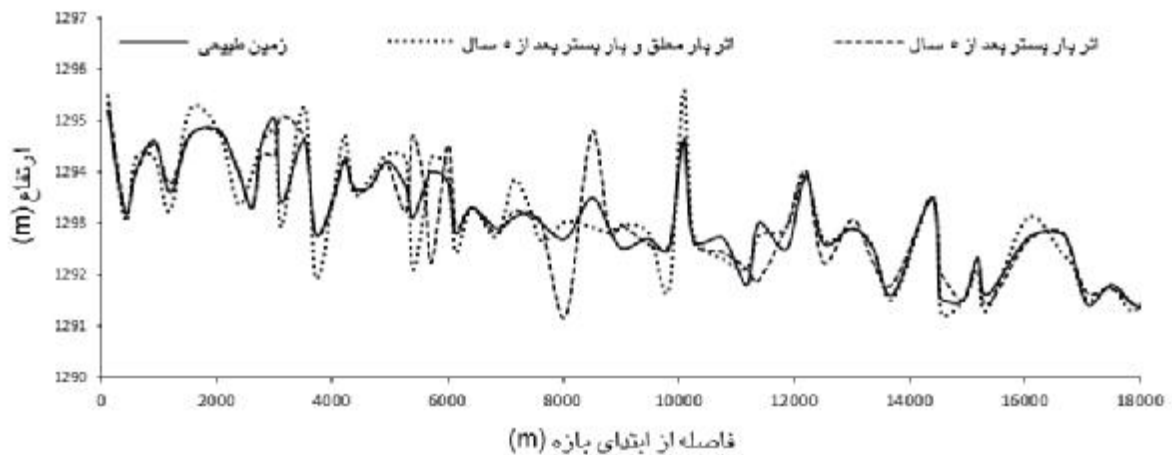
جدول 2- محاسبه حجم فرسایش و رسوب‌گذاری با روش‌های مختلف بار بستر.

روش محاسبه رسوب	حجم فرسایش بعد از گذشت 5 سال (m^3)	حجم رسوبگذاری بعد از گذشت 5 سال (m^3)
پارکر	985160	1137015
میر- پیتر- مولر	1313442	1458167
ویلسون	1694894	1874100

بستر رودخانه محاسبه گردید و با حالتی که فقط بار بستر در نظر گرفته شد مقایسه گردید. تغییرات بستر برای این حالت در شکل 8 قابل مشاهده است.

تأثیر بار معلق بر تغییرات بستر

در این مرحله در رابطه پیوستگی رسوب از روش بار بستر پارکر و همچنین بار معلق محاسبه شده توسط رابطه پارکر (رابطه 17) استفاده شده و تغییرات



شکل 8- نیمرخ بستر محاسبه شده با توجه به بار بستر و معلق پارکر پس از 5 سال.

بستر لحاظ گردید. لذا مشهود است که در نظر نگرفتن بار معلق در محاسبات می‌تواند باعث ایجاد خطای زیادی گردد. در این مورد خاص حجم فرسایش بعد از گذشت 5 سال حدود 46/5 درصد و حجم رسوب‌گذاری حدود 7/1 درصد افزایش یافته است.

نمودارهای نشان داده شده در شکل 8 و همچنین احجام فرسایش و رسوب‌گذاری بازه مذکور که در جدول 3 ارایه شده است نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن بار معلق و بار بستر تغییرات بستر شدیدتر شده است. در اثر در نظر گرفتن بار معلق و بستر، تغییرات نیمرخ طولی رودخانه متفاوت با حالتی است که فقط بار

جدول 3- مقایسه حجم فرسایش و رسوبگذاری با در نظر گرفتن اثر بار معلق.

روش محاسبه رسوب	حجم فرسایش بعد از گذشت 5 سال (m^3)	حجم رسوبگذاری بعد از گذشت 5 سال (m^3)
بار بستر	985160	1137015
بار بستر و معلق	1443220	1217986

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق مدلی کامپیوتری تهیه شد که قادر است تغییرات رقوم بستر وابسته به زمان و مکان را در رودخانه‌های آبرفتی محاسبه نماید. در این مدل با استفاده از روش گام‌به‌گام استاندارد برای مقاطع نامنظم رودخانه‌ای مقادیر عمق و سرعت جریان در مقاطع مختلف در طول بازه محاسبه می‌شود. سپس با حل عددی معادله پیوستگی رسوب تغییرات بستر مقاطع مختلف محاسبه می‌شود. مقاطع تغییر شکل یافته مجدداً برای محاسبه عمق و سرعت جریان به زیر برنامه جریان فرستاده می‌شوند. در زیر برنامه رسوب روابط مختلفی برای محاسبه بار بستر و بار کل گنجانده شده است. ولی بار معلق به‌روش پارکر با حل معادله دیفرانسیل غلظت رسوب محاسبه می‌شود. برای

صحت‌سنجی مدل از نقطه‌نظر بر نامه‌نویسی نتایج مدل مذکور با مدل HEC-RAS مقایسه شد که حاکی از تطابق خیلی خوب نتایج دو مدل بود. نتایج این تحقیق نشان داد بدون در نظر گرفتن بار معلق حجم فرسایش محاسبه شده بعد از 5 سال شبیه‌سازی به‌روش ویلسون به‌ترتیب 72 و 29 درصد بیشتر از روش‌های پارکر و میر-پیتر-مولر است. همچنین حجم رسوب-گذاری در روش ویلسون به‌ترتیب 65 و 28 درصد بیشتر از روش‌های پارکر و میر-پیتر-مولر است. در نظر گرفتن اثر بار معلق باعث شدیدتر شدن تغییرات فرسایش و رسوبگذاری می‌شود به‌گونه‌ای که برای روش پارکر حجم فرسایش بعد از گذشت 5 سال حدود 46/5 درصد و حجم رسوبگذاری حدود 7/1 درصد افزایش یافته است.

منابع مورد استفاده

- بختیاری م و شهنی کرم‌زاده ن، 1392. استفاده از نرم افزار GSTAR3 در تعیین بازه‌های فرسایشی و رسوبگذاری رودخانه. 10 صفحه، مجموعه مقالات، پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران، 29-30 بهمن، دانشگاه شهید بهشتی تهران.
- پیرو م، قمشی م، نوحانی ا و روانسالار م، 1391. بررسی وضعیت رسوب بستر رودخانه با مدل عددی HEC-RAS4، مطالعه موردی رودخانه بشار یاسوج. 8 صفحه، مجموعه مقالات، همایش ملی انتقال آب بین حوضه‌ای (چالش‌ها و فرصت‌ها)، 3 خرداد، دانشگاه آزاد اسلامی شهرکرد.
- سلاجقه ع و رحمانی ا، فتح آبادی ا، 1389. بررسی توان انتقال رسوب در رودخانه کرج. 8 صفحه، مجموعه مقالات، ششمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری و چهارمین همایش ملی فرسایش و رسوب، 8-9 اردیبهشت، دانشگاه تربیت مدرس، نور.
- شاهی‌نژاد ب، ظهیری ع و رستمی س، 1387. پیش‌بینی روند فرسایش رسوبگذاری در رودخانه کارون در محدوده شهر اهواز با استفاده از مدل ریاضی GSTAR3. 7 صفحه، مجموعه مقالات، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، 17-19 اردیبهشت، دانشگاه تهران.
- شفاعی‌بجستان م، 1384. مبانی و کاربرد مدل‌های فیزیکی-هیدرولیکی. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز.

قبادیان ر، زارع م، مراتی ا، 1390. شبیه‌سازی فرسایش و رسوبگذاری بلند مدت رودخانه قره سو و تاثیر ساماندهی بر میزان حمل رسوب با استفاده از مدل GSTAR3. 12 صفحه، مجموعه مقالات، چهارمین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، 13-14 اردیبهشت، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران.

- Canfield HE, Wilson CJ, Lane LJ, Crowell KJ and Thomas WA. 2005. Modeling scour and deposition in ephemeral channels after wildfire. *Catena* 61(2-3): 273–291.
- Chaudhry H, 2008. *Open Channel Flow* Second edition. Department of Civil and Environmental Engineering, University of South Carolina.
- Einstein HA, 1950. *The Bed Load Function for Bed Load Transportation in Open Channel Flows*. Technical Bulletin No. 1026, United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service.
- Engelund F and Hansen E, 1972. *A Monograph on Sediment Transport*, Teknisk Forlag, Copenhagen, Denmark.
- Garcia MH, 2004, *Sedimentation and Erosion Hydraulics*. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Gibson SG, Brunner S, and Jensen M, 2006. Sediment transport computations with HEC-RAS. Pp. 57-64. In: *Proceedings of the Eighth Federal Interagency Sedimentation Conference*, April 2-6, Reno, Nevada, United States of America.
- Meyer-Peter E and Muller R, 1948. Formulas for bed load transport. Pp. 39–64. In: *Proceedings of the 2nd Congress of the International Association for Hydraulic Research*, Stockholm.
- Parker G, 1978. Self-formed straight rivers with equilibrium banks and mobile bed, Part 2. *The Gravel River*. *Fluid Mechanics* 89(1):127–146.
- Parker G, Garcia M, Fukushima Y and Yu W, 1987. Experiments on turbidity current over an erodible bed. *Journal of Hydraulic Research* 25(1):123-147.
- Roberto R, Thanh H and Maria C, 2012. A RUSLE approach to model suspended sediment load in the Lo river (Vietnam): effects of reservoirs and land use changes. *Journal of Hydrology* 422-423: 17-29.
- Wilson KC, 1966. Bed-Load transport at high shear stress. *Journal of the Hydraulics Division*, 92(HY6): 49-59.
- Zuliziana S, Chihiro y, Oliver C and Hul S, 2013. Spatially distributed model for soil erosion and sediment transport in the Mekong river basin. In: *17th International Water Technology Conference*, 5-7 November, Istanbul, turkey.