بررسی ترکیب معادلات انتقال رسوب و روش های محاسبه سرعت سقوط ذرات در مدل سازی تغییر فرم بستر رودخانه

غلامحسین اکبری[۱]، محمود فغفور مغربی[۲]، صابر تارم[۳]

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- مهندسی آب، دانشگاه سیستان و بلوچستان

Eng.Saber_Tarom@yahoo.com

خلاصه

پدیده فرسایش و رسوب گذاری تحت اثر سیلاب باعث تغییر فرم بستر و مقطع هندسی رودخانه و در نتیجه تهدید مناطق مجاور رودخانه در هنگام سیلاب، تبعات زیست محیطی و افزایش هزینه لایروبی می شود. از اینرو مدل های ریاضی و روابط متعددی برای بررسی انتقال رسوب در رودخانه ها ارائه شده است که به علت تاثیر تغییرات مکانی و زمانی شرایط هیدرولوژیکی حوضه آبریز و هیدرولیک رودخانه از پیچیدگی خاصی برخوردار است و به پارامتر هایی مانند دانه بندی ذرات بستر، دمای آب و سرعت سقوط ذرات بستگی دارد. در این تحقیق نتایج حاصل از مدل سازی تغییر فرم بستر در بازه ای از رودخانه فاروب رومان نیشابور، با استفاده از ترکیب معادلات مختلف انتقال رسوب و روش های محاسبه سرعت سقوط ذرات بررسی می شود. بدین منظور از مدل HEC RAS 4.1 که قابلیت مدل سازی جریان آب و رسوب در بسترهای متحرک را داراست، استفاده شده است. پس از مدل سازی هندسی، مدل سازی جریان شبه غیر ماندگار، اعمال شرایط مرزی و لحاظ کردن دانه بندی بستر در در طول رودخانه، ۴ رابطه پرکاربرد Laursen، Ackers- White، Yang و England- Hansen برای انتقال رسوبات، و ۲ روش Van Rijn و Toffaleti برای محاسبه سرعت سقوط ذرات در نظر گرفته شد. در نهایت ۸ مدل تغییر فرم ایجاد شده در بستر رودخانه توسط ترکیب معادلات انتقال رسوب و روش های محاسبه سرعت سقوط ذرات، مقایسه شده و تاثیر محدوده کاربرد معادلات مختلف انتقال رسوب و نوع دانه بندی بستر در نتایج مدل ها بررسی می شود.

کلمات کلیدی: تغییر فرم بستر، انتقال رسوب، سرعت سقوط ذرات، مدل HEC RAS

۱. مقدمه

در کشور ایران با توجه به دارا بودن اقلیم خشک و نیمه خشک مسئله بهره برداری بهینه از آب های سطحی و جلوگیری از فرسایش خاک از مسائل مهم می باشد. بسیاری ازفعالیت های بشری سبب تشدید فرایندهای فرسایش، انتقال و رسوب گذاری می شود، از جمله از بین بردن پوشش گیاهی باعث تشدید فرسایش، و وارد شدن حجم زیادی از رسوبات به رودخانه ها در زمان بارندگی و سیلاب می شود. برداشت مصالح رودخانه ای، احداث پل و فرسایش اطراف پایه ها، احداث سد و انباشت رسوبات در مخزن، فرسایش و عمیق شدن بستر در پایین دست سد، هریک از مسائلی است که با تغییر در مقطع هندسی طبیعی رودخانه باعث تشدید فرسایش، انتقال رسوبات و رسوب گذاری می شود.

تشدید فرسایش بستر در اثر سیلاب منجر به ناپایداری و ریزش توده ای خاک سواحل و پیش روی قوس رودخانه ها می شود که عاملی برای تهدید سازه های ساحلی و نیز تاسیسات مجاور رودخانه ها به شمار می رود. هم چنین انتقال بیش از حد رسوبات باعث افزایش بار بستر، بار معلق و در نهایت افزایش تراز بستر شده که خطرات سیل را برای نواحی مجاور رودخانه افزایش می دهد. علاوه بر این در صورت وجود سد بر روی رودخانه، مهم ترین عامل محدود کننده و تعیین کننده عمر مفید سدها و تاسیسات آنها مقدار رسوبات ته نشین شده می باشد. از اینرو تخمین درست آورد رسوبی رودخانه و پیش بینی محل های قابل فرسایش و رسوب گذاری بستر، از عوامل اساسی در مدیریت بهینه سیلاب به منظور کاهش اثرات مخرب سیلاب، افزایش سرویس دهی سازه های هیدرولیکی در مسیر رودخانه و جلوگیری از تحمیل هزینه های اضافی برای لایروبی می باشد. به دلیل کمبود و پراکندگی آمار آورد رسوب و تحقیقات کاربردی در زمینه انتقال رسوب رودخانه های کشورمان، استفاده از مدل های هیدرولیکی، معادلات مختلف انتقال رسوب و بررسی نتایج آنها برای انجام اقدامات اصلاحی در زمینه کاهش فرسایش و رسوب گذاری ضروری می باشد.

۲. مدل هیدرولیکی HEC RAS

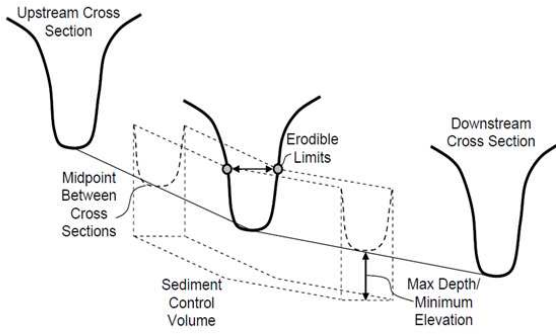
مدل های هیدرولیکی متعددی برای بررسی انتقال رسوب وتغییر فرم بستر رودخانه ها ارائه شده است، در این تحقیق از مدل HEC RAS 4.1 نسخه سال ۲۰۱۰ استفاده شده است که آخرین مدل ارائه شده از سوی مرکز مهندسی ارتش آمریکا (USACE) می باشد. از جمله مزیت های مدل HEC RAS می توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- قابلیت مدل سازی هندسی آسان و بدون محدودیت برای مقاطع عرضی رودخانه و شاخه های فرعی آن.
۲- امکان استفاده از ۷ معادله انتقال رسوب و ۴ روش محاسبه سرعت سقوط ذرات در محاسبه تغییر فرم بستر رودخانه.
۳- امکان اختصاص دانه بندی بستر تا دانه های به قطر ۲متر وشرط مرزی اختصاصی برای هر مقطع عرضی.
۴- در دسترس بودن نسخه اصلی، حل معادلات در کم ترین زمان و قابلیت گرافیکی بالا در نمایش نتایج.

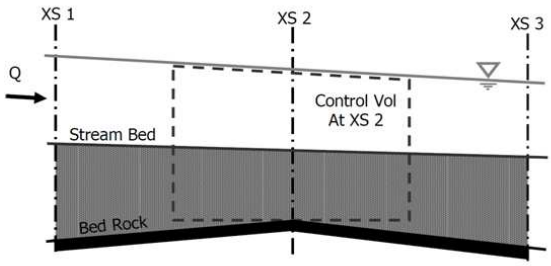
برای حل معادلات در نرم افزار HEC RAS با در نظر گرفتن حجم کنترل برای رسوب و جریان به صورت شبه غیر ماندگار، از روندیابی جریان آب و رسوب توسط معادله Exner استفاده می شود. معادله اکسنر بنا به فرض اینکه تغییرات حجم رسوبات درحالت معلق خیلی کمتر از تغییرات حجم رسوبات بستر باشد، استنتاج شد. معادله بقای جرم برای رسوب با توجه به معادله اکسنر به صورت زیر بیان می شود:

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + \varepsilon \frac{\partial A_d}{\partial t} - q_s = 0 \qquad (1)$$

که در آن ε حجم رسوبات در واحد حجم لایه بستر (ضریب تخلخل منهای یک)، A_d حجم رسوبات بستر در واحد طول، Q_S دبی حجمی رسوبات و q_s دبی جانبی رسوبات ورودی در واحد طول می باشد. در ادامه شکل شماتیک حجم کنترل رسوب دو و سه بعدی مورد استفاده در نرم افزار مشاهده می شود.



شکل ۱- حجم کنترل سه بعدی به صورت شماتیک



شکل ۲- حجم کنترل دو بعدی به صورت شماتیک

انتگرال معادله (۱) روی حجم کنترل هر مقطع عرضی، یک معادله برای عمق رسوب‌گذاری (ΔZ_b) برای یک اندازه رسوب در مقطع عرضی i می‌دهد:

$$\varepsilon_i W_i \Delta x_i = q_{s,i} \Delta x_i \Delta t + (Q_{s,(i-1)} - Q_{s,i}) \Delta t \qquad (2)$$

همان طور که در اشکال ۱ و ۲ مشاهده می شود، به منظور تحلیل رسوب یک حجم کنترل رسوب برای هر مقطع عرضی در نظر گرفته می شود که محدوده عرضی و عمق قابل فرسایش در هر مقطع توسط کاربر به نرم افزار معرفی می شود.

۳. بررسی فرآیند رسوب گذاری و فرسایش بستر

جریان سیل در رودخانه ها باعث فرسایش بستر رودخانه و انتقال رسوبات می شود. رسوبات رودخانه ای به دو صورت منتقل می شوند، یا درون جریان آب غوطه ور هستند که به آنها بار معلق (Suspension Load) گویند، یا در نزدیک بستر به صورت لغزش یا پرش حرکت می کنند که به آنها بار

بستر(Bed Load) گویند. از عوامل موثر بر فرسایش بستر رودخانه در یک حجم کنترل می توان به شیب طولی رودخانه در محل حجم کنترل، جنس مصالح و زبری بستر، دبی جریان و توزیع سرعت در محل مقطع عرضی و در نهایت مهم ترین عامل، میزان تنش برشی در بستر رودخانه اشاره کرد که بر اساس آن میزان فرسایش بستر توسط نرم افزار HEC RAS محاسبه می شود.

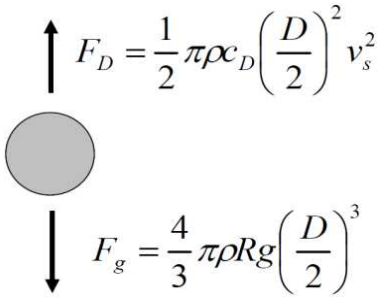
در ارتباط با فرایند رسوب گذاری تئوری های زیادی وجود دارند که توسط آنها می توان میزان ذراتی را که در یک ستون آب سقوط می کنند، تخمین زد. ازجمله رابطه ای که از آن استفاده می شود، رابطه ضریب انتقال رسوب (C_d) می باشد که تعیین می کند چه میزان از ذرات معلق می توانند درگام زمانی مشخص رسوب کنند، که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$C_d = \frac{Vs.\Delta t}{De} \qquad (3)$$

در رابطه (۳) ، Vs سرعت سقوط ذره، Δt گام زمانی مشخص و De عمق موثر ستون آب در مسیر انتقال ذره می باشد. با توجه به این رابطه چنان چه ضریب انتقال رسوب از یک کمتر باشد، مقدار ذراتی که قابلیت ته نشینی دارند به تناسب کاهش می یابد و اگر از یک بیشتر باشد کل ذرات به داخل ستون آب سقوط می نمایند.

۴. سرعت سقوط ذرات

یکی از فاکتور های اساسی که در رابطه (۳) وجود دارد، سرعت سقوط ذره می باشد. هنگامی که سرعت برشی ذره معلق رسوب به سمت سرعت سقوط میل کند، ذره به سمت تراز کف بستر حرکت می نماید. لذا تازمانی که مولفه عمودی سرعت نسبت به تراز بستر از سرعت سقوط بیشتر باشد، ذره به صورت معلق خواهد ماند زیرا در این حالت نیروی موثر عمودی رو به بالا وارد بر ذره از نیروی گرانش وارد بر ذره بیشتر می شود. در شکل (۳) دیاگرام جسم آزاد نیروهای وارد بر ذره که در بررسی سرعت سقوط مورد استفاده قرار می گیرد، مشاهده می شود.



شکل ۳ – دیاگرام جسم آزاد نیروهای وارد بر ذره

در شکل (۳) ، F_D نیروی بالا برنده ذره، F_g نیروی گرانش، ρ چگالی سیال، C_D ضریب انتقال رسوب، v_s چسبندگی سینماتیکی ذره، D قطر ذره، R شعاع ذره و g شتاب گرانش می باشد. چهار روش مختلف برای محاسبه سرعت سقوط ذرات در نرم افزار HEC RAS وجود دارد که در این تحقیق از دو روش Van Rijn (1993) و Toffaleti (1968) استفاده شده است. Toffaleti در سال ۱۹۶۸، برای دانه های شن، ماسه و لای در اندازه های مختلف و براساس ضریب شکلی برابر ۰/۹ و وزن مخصوصی برابر ۲/۶۵ در دماهای مختلف، سرعت سقوط ذرات را ارائه داده است.

هم چنین در روش Van Rijn سرعت سقوط ذرات غیر کروی با ضریب شکلی برابر ۰/۷ در آبی با دمای ۲۰ درجه سانتی گراد بر اساس چسبندگی سینماتیکی ذره، وزن مخصوص ذره و قطر ذره محاسبه می شود. در محاسبات انتقال رسوب برای انتخاب روش محاسبه سرعت سقوط ذرات، علاوه بر در نظر گرفتن شکل ذرات باید تابع انتقال رسوب متناسب با آن در نظر گرفته شود.

۵. معادلات انتقال رسوب

جهت تعیین میزان فرسایش و رسوب در بستر رودخانه توابع انتقال رسوب متعددی وجود دارد. فرضیات اعمال شده در این توابع و محدوده کاربرد آن ها سبب می گردد تا نتایج بدست آمده از این توابع، متفاوت باشد. در جدول (۱) دامنه کاربرد هریک از این توابع ذکر شده است.

جدول ۱- دامنه کاربرد هریک از توابع انتقال رسوب

Function	d	d_m	s	V	D	S	W	T
Ackers-White (*flume*)	0.04 - 7.0	NA	1.0 - 2.7	0.07 - 7.1	0.01 - 1.4	0.00006 - 0.037	0.23 - 4.0	46 - 89
Englund-Hansen (*flume*)	NA	0.19 - 0.93	NA	0.65 – 6.34	0.19 – 1.33	0.000055 – 0.019	NA	45 - 93
Laursen (*field*)	NA	0.08– 0.7	NA	0.068 – 7.8	0.67 – 54	0.0000021 – 0.0018	63 – 3640	32 - 93
Laursen (*flume*)	NA	0.011 - 29	NA	0.7 - 9.4	0.03 – 3.6	0.00025 – 0.025	0.25 – 6.6	46 - 83
Meyer-Peter Muller (*flume*)	0.4 – 29	NA	1.25 – 4.0	1.2 – 9.4	0.03 – 3.9	0.0004 – 0.02	0.5 – 6.6	NA
Tofaletti (*field*)	0.062 – 4.0	0.095 – 0.76	NA	0.7 - 7.8	0.07 – 56.7 (R)	0.000002 – 0.0011	63 - 3640	32 – 93
Tofaletti (*flume*)	0.062 – 4.0	0.45 – 0.91	NA	0.7 - 6.3	0.07 – 1.1 (R)	0.00014 – 0.019	0.8 – 8	40 - 93
Yang (*field-sand*)	0.15 – 1.7	NA	NA	0.8 - 6.4	0.04 – 50	0.000043 – 0.028	0.44 – 1750	32 - 94
Yang (*field-gravel*)	2.5 – 7.0	NA	NA	1.4 - 5.1	0.08 – 0.72	0.0012 – 0.029	0.44 – 1750	32 - 94

در جدول فوق d قطر ذرات رسوب (mm)، d_m قطر میانگین ذرات رسوب (mm)، s چگالی ذرات، v میانگین سرعت جریان در کانال (ft/s)، D عمق کانال (ft)، S شیب خط انرژی، W عرض مقطع کانال (ft)، T دمای آب (F)، R شعاع هیدرولیکی (ft) و NA بیانگر عدم وجود داده می باشد.

۶. مدل سازی رودخانه برای انجام محاسبات انتقال رسوب

برای انجام مدل سازی و اجرای محاسبات انتقال رسوب در نرم افزار HEC RAS اطلاعات زیر برای نرم افزار تعریف می شود:

۱- اطلاعات هندسی رودخانه شامل هندسه مدل و معرفی مقاطع عرضی در فواصل مناسب و تعیین ضریب زبری در رودخانه اصلی و سواحل.

۲- اطلاعات رسوبی شامل اختصاص دانه بندی بستر برای هر مقطع، تعیین شرط مرزی رسوب و مشخص کردن معادلات انتقال رسوب.

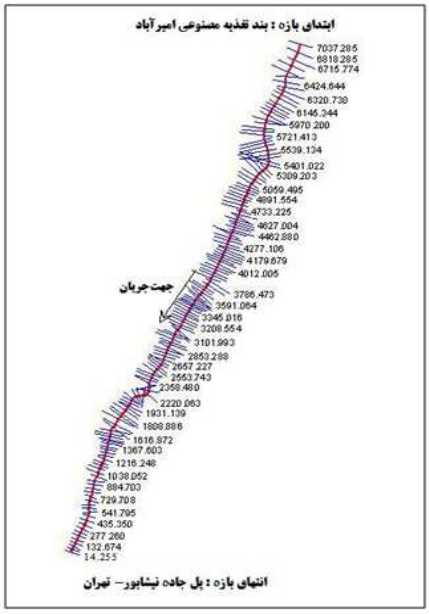
۳- تعیین محدوده های عرضی و عمقی قابل فرسایش در محدوده مقاطع عرضی برای ایجاد حجم کنترل رسوب.

۴- اطلاعات جریان شبه غیر ماندگار شامل هیدروگراف سیلاب در بالادست، شرط مرزی مناسب در پایین دست و دمای آب در زمان مدل سازی.

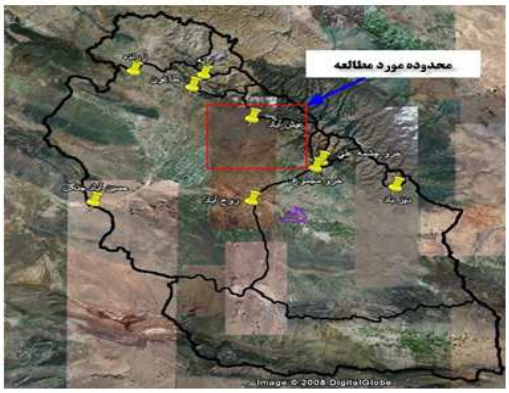
۷. اطلاعات هندسی رودخانه

در این تحقیق مدل سازی در بازه ای به طول ۷ کیلومتر از رودخانه فاروب رومان که در بخش مرکزی شهرستان نیشابور و در استان خراسان رضوی واقع شده است، انجام گرفت. این رودخانه از ارتفاعات بینالود سرچشمه گرفته و به سمت دامنه های جنوبی این رشته کوه جریان می یابد. رودخانه فاروب رومان دارای آب دائمی می باشد و تاکنون شاهد سیلاب های زیادی بوده است که بارها به شهر نیشابور و مزارع اطراف آن خسارت وارد نموده است. وجود این سیلاب های مخرب و برداشت شن وماسه برای کارهای ساختمانی از بستر رودخانه توسط اهالی منطقه، باعث تغییر فرم متوالی بستر و افزایش خسارات سیلاب شده است. در اشکال (۴) و (۵) عکس هوایی موقعیت رودخانه فاروب رومان و پلان شماتیک رودخانه در محل مدل سازی که از ابتدای بند تغذیه مصنوعی امیرآباد تا پل بتنی در مسیر جاده نیشابور – تهران می باشد، مشاهده می شود.

همان طور که در شکل (۵) مشاهده می شود، باتوجه به نقشه برداری انجام شده در سال ۸۴، هندسه رودخانه و تعداد ۱۶۴ مقطع عرضی با فواصل کمتر از ۵۰ متر در طول حدود ۷ کیلومتری رودخانه برای مدل تعریف گردید. هم چنین بر اساس روش کوان مقدار ضریب زبری مانینگ در مقاطع عریض ۰/۰۳۲، برای نقاط دارای انسداد به صورت موضعی ۰/۰۳۵ و برای نقاط دارای مقاطع V شکل در پایین دست ۰/۰۳۸ در نظر گرفته شد.



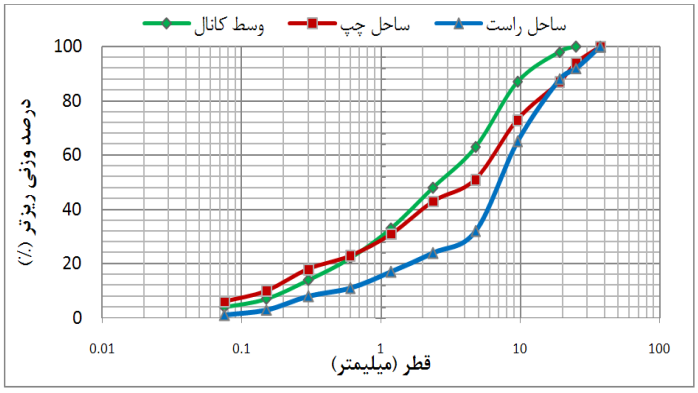
شکل ۵- پلان شماتیک رودخانه در مدل HEC RAS



شکل ۴- عکس هوایی محدوده رودخانه فاروب رومان

۸. اطلاعات رسوبی رودخانه

با توجه به گزارش مطالعات تعیین حریم و بستر رودخانه فاروب ـ رومان نیشابور، ۱۴منحنی دانه بندی در محدوده مطالعات به فواصل ۵۰۰ متری استخراج شده است که به مدل معرفی می شود. در سایر مقاطع عرضی نرم افزار با درون یابی دانه بندی را در نظر می گیرد. در شکل (۶) به عنوان نمونه منحنی دانه بندی در مقطع شماره ۶۹ مشاهده می شود.

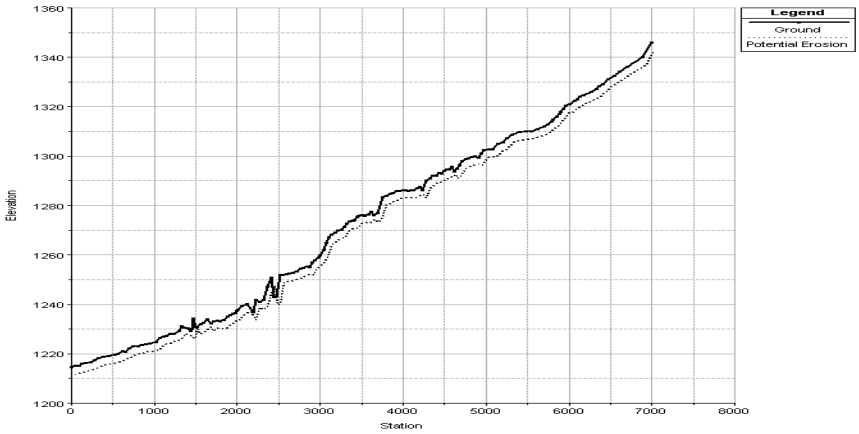


شکل ۶- منحنی دانه بندی در مقطع عرضی شماره ۶۹

از منحنی سنجه رسوب به عنوان شرط مرزی رسوب استفاده می کنیم. بدین منظور از آمار رسوب سنجی ایستگاه هیدرومتری عیش آباد در بالادست مدل استفاده می کنیم. بر اساس تحلیل نتایج نمونه برداری های ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری عیش‌آباد رابطه (۴) بین دبی بار معلق و دبی جریان بدست آمد که در این رابطه Q بر حسب مترمکعب در ثانیه و Q_S بر حسب تن در روز است. ضریب همبستگی این رابطه ۰/۸۶۸ می باشد.

$$Q_S = 28.82\ Q^{2.146} \qquad (4)$$

در این مدل سازی سواحل چپ و راست رودخانه قابل فرسایش در نظر گرفته می شود، هم چنین عمق قابل فرسایش را با توجه به اطلاعات محیطی بستر رودخانه ۳ متر در نظر می گیریم که بدین وسیله حجم کنترل رسوب و محدوده های قابل فرسایش در مقاطع عرضی تعیین می شود. در شکل (۷) محدوده قابل فرسایش پروفیل طولی رودخانه در مدل HEC RAS مشاهده می شود.



شکل ۷ – محدوده قابل فرسایش در پروفیل طولی رودخانه

۹. اطلاعات جریان رودخانه

برای انجام محاسبات انتقال رسوب در نرم افزار HEC RAS نیاز به مشخص کردن هیدروگراف جریان سیلاب شبه غیر ماندگار (Quasi Un Steady) در بالادست رودخانه می باشد، بدین منظور ابتدا با توجه به آمار ثبت شده حداکثر دبی لحظه ای رودخانه و استفاده از توزیع لوگ پیرسون نوع ۳ حداکثر دبی لحظه ای با دوره بازگشت های مختلف بدست آمد. سپس با توجه به زمان تمرکز و زمان تاخیر حوضه آبریز رودخانه فاروب رومان و استفاده از حداکثر دبی لحظه ای، هیدروگراف مصنوعی سیلاب با دوره بازگشت ۵۰ سال با استفاده از روش اینمن بدست آمد که در محاسبات مدنظر قرار دارد. هم چنین دمای آب در طی زمان ۶ ساعت وقوع سیلاب به صورت ثابت در طول رودخانه ۱۳/۵ درجه سانتی گراد در نظر گرفته می شود.

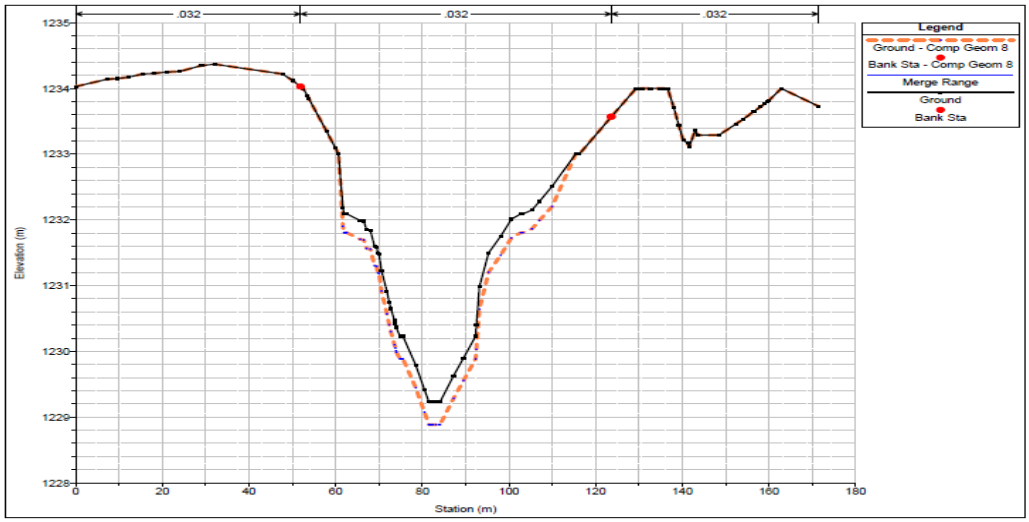
۱۰. اجرای مدل و بررسی نتایج

پس از مدل سازی هندسی رودخانه و مشخص کردن محل و فواصل مقاطع عرضی، اختصاص دانه بندی و ضریب زبری به مقاطع، تعیین محدوده های قابل فرسایش و مشخص کردن شرایط مرزی جریان آب و رسوب، قبل از اجرای مدل لازم است تا معادله مورد استفاده برای انتقال رسوب و روش محاسبه سرعت سقوط ذرات مشخص گردد. به منظور بررسی ترکیب معادلات انتقال رسوب و روش های محاسبه سرعت سقوط ذرات از ۴ رابطه پرکاربرد Laursen، Ackers- White، Yang و England- Hansen برای محاسبه انتقال رسوب و ۲ روش Van Rijn و Toffaleti برای محاسبه سرعت سقوط ذرات در نرم افزار HEC RAS استفاده شده است که در نهایت ۸ مدل ساخته شده در جدول (۲) مشاهده می شود.

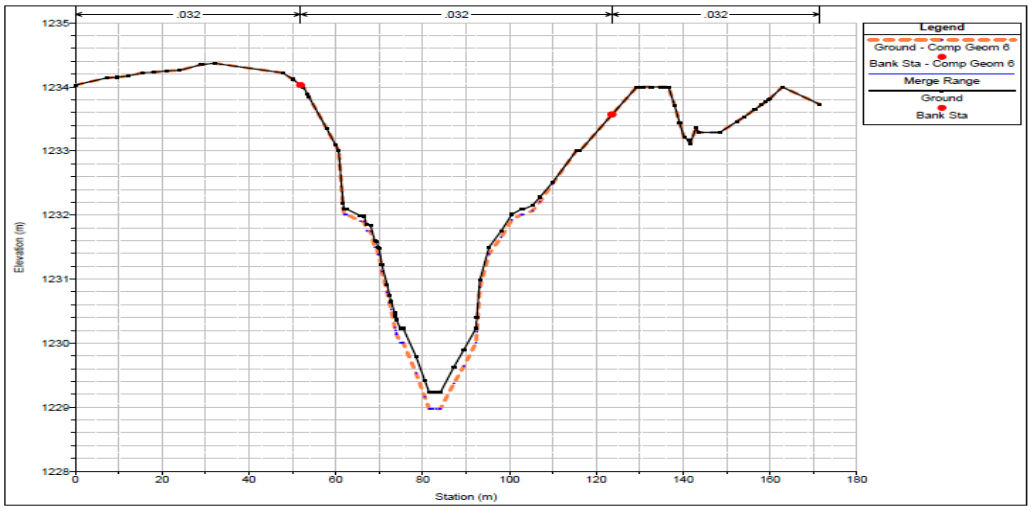
جدول ۲- مدل های ساخته شده ومعادلات به کار رفته در آن ها

شماره مدل	1	2	3	4	5	6	7	8
معادله انتقال رسوب	Ackers-White	Ackers-White	England-Hansen	England-Hansen	Laursen	Laursen	Yang	Yang
روش محاسبه سرعت سقوط ذرات	Van Rijn	Toffaleti	Van Rijn	Toffaleti	Van Rijn	Toffaleti	Van Rijn	Toffaleti

در این تحقیق به منظور بررسی تفاوت در نتایج مدل های ساخته شده، از معیار تغییر فرم بستر در محل مقاطع عرضی استفاده می نماییم. به عنوان نمونه ۲ مدل تغییر فرم بستر رودخانه در مقطع عرضی شماره ۱۴۰ به فاصله ۵۵۷۹ متری از ابتدای بازه رودخانه تحت اثر سیلاب با دوره بازگشت ۵۰ سال در اشکال (۸) و (۹) مشاهده می شود.



شکل ۸- تغییر فرم مقطع عرضی شماره ۱۴۰ در مدل شماره ۳



شکل ۹- تغییر فرم مقطع عرضی شماره ۱۴۰ در مدل شماره۸

همان طور که در اشکال (۹) تا (۱۲) مشاهده می شود نتایج تغییر فرم بستر حاصل از مدل ها در مقاطع متفاوت است که دلیل عمده آن با توجه به جدول شماره (۱) محدوده کاربرد معالات به کار رفته، نوع دانه بندی بستر رودخانه و شرایط هیدرولیکی جریان سیلاب است. در ادامه برای بررسی دقیق تر تفاوت نتایج مدل ها مقادیر مجموع ارتفاع رسوب گذاری و فرسایش در محل مقاطع عرضی برای هر مدل در جدول شماره (۳) مشاهده می شود.

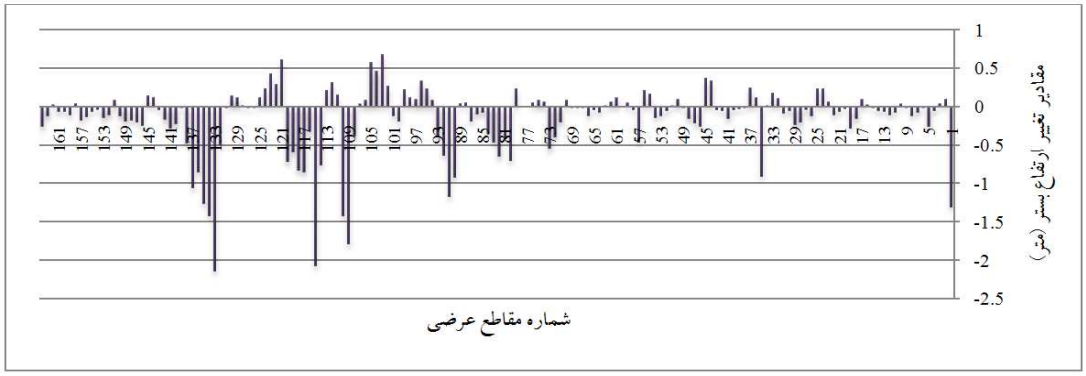
جدول ۳- میزان رسوب و گذاری و فرسایش برآورد شده توسط هر مدل

شماره مدل	1	2	3	4	5	6	7	8
مجموع میزان رسوب گذاری در مقاطع عرضی (cm)	139	99	1577	1568	986	951	199	194
مجموع میزان فرسایش در مقاطع عرضی (cm)	1093	1059	3409	3452	3522	3229	671	610

باتوجه به ترکیب مدل ها همان طور که در جدول (۳) مشاهده می شود، تغییر در روش محاسبه سرعت سقوط ذرات تغییر چندانی در میزان مجموع رسوب گذاری و فرسایش رودخانه ندارد، بنابراین معادلات انتقال رسوب حساسیت چندانی به روش محاسبه سرعت سقوط ذرات در مدل سازی تغییر فرم بستر رودخانه ندارد. هم چنین در بررسی نتایج مشاهده می شود تفاوت عمده نتایج بستگی به انتخاب نوع معادله انتقال رسوب دارد.

هدف از این تحقیق بررسی میزان تفاوت در نوع انتخاب معادلات انتقال رسوب در پیش بینی تغییر فرم بستر است زیرا با توجه به متفاوت بودن شرایط فیزیکی در رودخانه ها و عدم اطلاع از چگونگی تغییر فرم بستر به صورت واقعی بعد از سیلاب های با دوره بازگشت مختلف برای این رودخانه، نمی توان به صورت قطعی یکی از ترکیبات را به عنوان بهترین مدل در تخمین تغییر فرم بستر معرفی نمود. بنابراین با توجه به نتایج که حاکی از عدم حساسیت نتایج معادلات انتقال رسوب به روش محاسبه سرعت سقوط ذرات است، تنها راه برای انتخاب بهترین معادله انتقال رسوب که سازگاری مناسبی با شرایط رودخانه در زمان سیلاب داشته باشد، بررسی معیارها و محدودیت های هر معادله باتوجه به جدول شماره (۱) می باشد.

پس از بررسی نتایج مدل سازی با معیارهای جدول (۱) مشاهده گردید پارامتر های چگالی ذرات، میانگین سرعت جریان در کانال، عمق کانال، شیب خط انرژی، دمای آب و شعاع هیدرولیکی در تمام معادلات با شرایط هیدرولیکی رودخانه مطابقت دارد.تنها در معادله Ackers- White محدوده عرض کانال کمتر از میانگین عرض فرسایش شده و رسوب گذاری شده در مقاطع رودخانه است، بنابراین نتایج مدل های (۱) و (۲) نمی تواند قابل اعتماد باشد. برای بررسی تاثیر نوع دانه بندی بستر رودخانه در نتایج معادلات با توجه به جدول(۱) پارامتر های قطر ذرات رسوب و قطر میانگین ذرات رسوب موجود در روخانه را با محدوده کاربرد هر معادله مقایسه می کنیم. پس از بررسی منحنی های دانه بندی بستر و همان طور که در شکل (۶) هم مشاهده می شود، بستر رودخانه فاروب رومان تقریبا شنی می باشد بنابراین با توجه به پایین بودن محدوه قطر ذرات رسوبی در معادلات Ackers- White و Yang نتایج مدل های (۱)، (۲)، (۷) و (۸) برای این رودخانه در درجه پایین تری از سطح اطمینان قرار دارد و همان طور که مشاهده می شود این معادلات فرسایش و رسوب گذاری کمتری نسبت به سایر مدل ها پیش بینی کرده اند. شایان ذکر است که بدون داشتن اطلاعات تغییر فرم بستر بلافاصله پس از قوع سیلاب، نمی توان هیچ کدام از مدل ها را به صورت قطعی به عنوان بهترین مدل معرفی نمود، ولی نتایج مدل های (۳) تا (۶) به علت تطابق بیشتر شرایط آزمایش شده مدل با شرایط فیزیکی رودخانه فاروب-رومان، در درجه بالاتری از سطح اطمینان قرار می گیرد. در ادامه مقادیر تغییر ارتفاع در محل مقاطع عرضی تحت اثر سیلاب با دوره بازگشت ۵۰ سال، برآورد شده توسط مدل (۶) مشاهده می شود که می تواند به عنوان معیاری جهت انجام طرح های لایروبی، پایدار سازی بستر و تعیین محل های مناسب برای برداشت مصالح رودخانه ای در نظر گرفته شود.



شکل ۱۰- مقادیر تغییر ارتفاع بستر در محل مقاطع عرضی

۱۱. مراجع

1. U.S.Army Corps of Engineers, "User's Manual, Version 4.1, January 2010".

2. U.S.Army Corps of Engineers, "Reference Manual, Version 4.1, January 2010".

3. . Pierre Y, J., (2002), "River Mechanics", Cambridge University Press.

4. Takebayashi, H. and Nakamoto, N., (2010), "*Sediment Transport and Bed Deformation Characteristics on Layers Composed of Rocks or Cohesive Material*," 17th Congress of the Asia and Pacific Division of the International Association of Hydraulic Engineering and Research.

۵. عسکری، مهدی، (۱۳۸۸)، "*تاثیر برداشت شن و ماسه و مصالح رودخانه ای بر روی سواحل و عرض رودخانه ها و مسیل ها و اثرات زیست محیطی آنها* ،" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی، مشهد.

۶. احمدیان، م. و ناصری قلقاچی، ر.، (۱۳۸۹)، "تعیین مناسب ترین معادله برآورد بار رسوبی رودخانه (مطالعه موردی: رودخانه آجی چای) ،" نهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، آبان ۱۳۸۹.