تعیین معادلات رژیم رودخانه بر اساس معادله توان واحد جریان

احمد طاهرشمسی*[۱] و فرهاد ایمان شعار[۲]

[۱]دانشیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

[۲]دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه تبریز

(تاریخ دریافت ۸۵/۷/۵ ، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۷/۸/۱۸، تاریخ تصویب ۸۸/۸/۱۰)

چکیده

در این مقاله، معادلات رژیم رودخانه به کمک توسعه معادله توان واحد جریان و کاربرد آن در مورد دو رودخانه سیستان و کرج به دست آمده‌اند. برای این منظور با مروری بر تحقیقات گذشته، ابتدا مبانی و مفهوم رژیم و هندسه- هیدرولیکی در رودخانه ذکر می شود و سپس روش‌ها و نتایج به دست آمده توسط محققین قبلی به صورت دسته بندی شده ارائه می‌شود. در گام بعدی معادله توان واحد جریان با در نظر گرفتن پارامترهای غلظت وزنی رسوبات و سنگینی نسبی ذرات معلق توسعه داده می‌شود. سپس با استفاده از آنالیز ابعادی، معادله توان واحد جریان بی بعد به دست می‌آید. در انتها، معادلات رژیم برای دو رودخانه سیستان و کرج به کمک معادله توان واحد جریان بی بعد استنتاج و ارائه می‌شود. در نهایت نتایج حاصل از این معادلات با مقادیر مشاهداتی و سایر معادلات رژیم مقایسه می‌شوند. نتایج به دست آمده از معادلات رژیم توسعه یافته در این تحقیق با مشاهدات صحرائی همخوانی خوبی را نشان می‌دهند.

واژه های کلیدی : معادلات رژیم، هندسه- هیدرولیکی، توان واحد جریان

مقدمه

رودخانه‌های آبرفتی، شکل دهنده هندسه ظاهری خود در پلان و مقطع هستند، به طوری که مشخصات خود را در پاسخ به هر تغییری که در محیط به وجود می‌آید تنظیم می‌کنند. این تغییرات محیطی می‌تواند به صورت طبیعی رخ دهند؛ از قبیل تغییرات آب و هوایی و یا تغییرات پوشش گیاهی. همچنین ممکن است به صورت مصنوعی و به علت فعالیت‌های انسانی از قبیل سدسازی، عملیات ساماندهی رودخانه، برداشت شن و ماسه، احداث پل و ... حاصل شوند.

در هر صورت، این تغییرات، رودخانه را از حالت تعادل خارج می کند و برای اینکه رودخانه به تعادل برسد، خود را از راه تغییر در شیب، ضریب زبری، دانه بندی ذرات بستر و به طور کلی تغییر در هندسه- هیدرولیکی با شرایط جدید وفق می‌دهد. این تطابق به گونه ای است که طی آن رودخانه بین توانایی حمل رسوب و میزان بار رسوبی ورودی از بالادست، توازن ایجاد می‌کند یا به تعبیری به حالت رژیم می‌رسد [۱]. رودخانه ها بر اساس پایداری‌شان به انواع پایدار استاتیکی، پایدار دینامیکی (رژیم) و ناپایدار تقسیم می‌شوند. اگرچه یک رودخانه در حال رژیم، پایدار فرض می‌شود ولی، لزوماً به این معنی نیست که بستر و کناره هایش در طول زمان فرسایش ناپذیر و ثابت هستند، بلکه به این معناست که متوسط ابعاد آبراهه در یک بازه زمانی حفظ می‌شوند [۲] .

رودخانه های رژیم به طور مداوم فعال هستند و آبشستگی و رسوبگذاری در کف و سواحل آنها رخ می‌دهد؛ همزمان حمل مقادیر زیاد رسوب در آنها دیده می شود. هر چند در یک دوره کوتاه ممکن است شکل آبراهه تغییر یابد، ولی این تغییرات پیش رونده نبوده و نزدیک به یک مقدار متوسط نوسان می‌کند. اگرچه هر گونه اختلالی در الگوی جریان در چنین رودخانه هایی باعث تغییرات موضعی در هندسه آبراهه می‌شود، اما بعد از یک سیکل کامل شرایط متعادل می‌شود [۳].

مبانی رژیم رودخانه

در یک آبراهه رژیم، دبی جریان، دبی رسوب، هندسه و شیب آبراهه در حال اندرکنش با یکدیگر هستند و به عبارت دیگر یک آبراهه آبرفتی در طول یک دوره زمانی مقادیر عرض، عمق و شیب خود را بر اساس مقادیر دبی جریان و دبی رسوب تنظیم می‌کند. در واقع مقادیر عرض، عمق و شیب آبراهه سه متغیر وابسته هستند که بر اساس متغیرهای مستقل دبی جریان و دبی رسوب تعیین می‌گردند. بنابراین هر آبراهه برای رسیدن به تعادل بدون اینکه در پارامترهای ورودی معلوم (دبی جریان و دبی

* نویسنده مسئول : تلفن : ۶۶۴۰۰۲۴۳ ، فاکس : ۶۶۴۱۴۲۱۳ ، Email: tshamsi@aut.ac.ir

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

رسوب) تغییری ایجاد شود، سه درجه آزادی در عرض جریان، عمق جریان و شیب بستر دارد که برای به دست آوردن این سه متغیر به سه رابطه مستقل نیاز است. معادله انتقال رسوب و معادله مقاومت جریان برای این کار مفید هستند و از آنها برای تعیین شیب و عمق آبراهه پایدار استفاده می شود. در رودخانه ها برای تحلیل کامل جریان، یک رابطه دیگر مورد نیاز است که این رابطه از طریق یکی از روش های زیر به دست می‌آید:

تئوری رژیم یا فرمول های تجربی

تئوری رژیم فراگیرترین روش برای طراحی کانال‌های آبرفتی پایدار، با در نظر گرفتن مسئله انتقال رسوبات و الزام های خاص آبراهه‌های آبرفتی می باشد. بر اساس این تئوری، یک آبراهه زمانی در حالت رژیم است که شیب و سطح مقطع آن در شرایط تعادل قرار داشته باشد و فرسایش یا رسوب‌گذاری در آن رخ ندهد، هر چند که امکان حمل رسوبات توسط جریان وجود دارد. از این روش به علت ارائه روابط تجربی متعدد توسط محققین برای تعیین ابعاد آبراهه های رژیم، با عنوان فرمول‌های تجربی، یاد می‌شود. ماهیت روابط ارائه شده در این روش به صورت توابعی نمایی هستند که در آنها متغیرهای وابسته از قبیل عرض، عمق و سرعت جریان نسبت به دبی بیان می شوند. از معادلات معروف استنتاج شده از این روش، می توان به این موارد اشاره کرد [۴و۵]:

روش نیروی مالشی یا فرمول‌های نیمه تئوری

این روش از قوانین اساسی مکانیک و بر اساس پایداری جداره و کف مجرا به صورت تابعی از مقاومت ذرات بدنه آن در مقابل نیروی فرساینده آب بهره می‌گیرد و اولین بار در سال ۱۹۴۰ توسط USBR پیشنهاد شده است. این تئوری یک آبراهه مستقیم با بستر دانه ای را در آستانه حرکت فرض می کند و هندسه مقطع عرضی آبراهه را بر اساس نیروی برشی آب بسط می دهد. در این روش برای آنالیز فرض می‌شود که بار رسوبی وجود ندارد و هیچ گونه فرسایشی در مجرای کانال صورت نمی‌گیرد. از معادلات معروف استنتاج شده از این روش می‌توان به معادلات زیر اشاره کرد [۴و۶]:

روش استدلالی یا روش حد نهایت

در دو دهه اخیر استفاده از مدل هایی که یک فرضیه حد نهایت را به عنوان بخشی از فرمول های خود برای پیش بینی مورفولوژی آبراهه به کار می برند، افزایش یافته است. در این روش از معیار بیشینه سازی یا کمینه سازی یک پارامتر کلیدی از قبیل قدرت جریان، نرخ مصرف انرژی یا غلظت رسوب به عنوان سومین معادله لازم برای تحلیل کامل شیب، عرض و عمق جریان استفاده می‌کنند. از معادلات معروف استنتاج شده از این طریق می‌توان به معادلات زیر اشاره کرد [۴] :

توان واحد جریان رودخانه

توان جریان از جمله پارامترهای مهم رودخانه‌ای است که در تجزیه و تحلیل‌ها می‌توان از آن استفاده کرد. بنا به تعریف، توان جریان عبارت است از مقدار انرژی مصرف شده در واحد زمان که برحسب ژول بر ثانیه بیان می‌شود. (Yang,1981) با استفاده از مباحث ترمودینامیک چنین بیان کرد که رودخانه های مئاندری مسیری را طی می کنند که تغییرات انرژی پتانسیل در واحد زمان در آنها به حداقل مقدار خود برسد. انرژی پتانسیل مصرف شده بر واحد وزن آب را می توان با عنوان توان جریان به صورت زیر تعریف کرد [۳و۲].

$$P = \frac{W}{t} = \frac{(\rho.Q.t).g.\Delta h}{t} = \gamma.Q.\Delta h \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، P توان جریان، W کار انجام شده در مدت زمان t، Q دبی جریان، γ وزن مخصوص آب، ρ جرم مخصوص آب، g شتاب ثقل و Δh نشانگر میزان استهلاک انرژی پتانسیل واحد وزن آب است. بر اساس رابطه قبل، در مهندسی رودخانه توان جریان در واحد طول رودخانه که به اختصار توان واحد جریان نامیده می‌شود، به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$P_L = \frac{\gamma.Q.\Delta h}{L} = \gamma.Q.S \qquad (۲)$$

در این رابطه، P_L معرف توان واحد جریان رودخانه است و سایر پارامترهای دخیل در معادله قبل از این معرفی شده اند. شایان ذکر است در رابطه فوق چون میزان $\frac{\Delta h}{L}$ را می توان معادل S شیب طولی رودخانه در نظر گرفت، بنابراین رابطه (۱) به صورت رابطه (۲) ساده شده است. همچنین بر اساس رابطه تحلیلی بالا چنین استدلال شده است که تغییرات در رودخانه های آبرفتی

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

ناشی از توان واحد جریان است.

(پیرستانی و همکاران،۱۳۷۸) با این استدلال و با تکیه بر مفهوم دبی غالب، روابط رژیم را برای عرض و عمق در رودخانه سفیدرود در بازه های شریانی، پیچان و کل مسیر به دست آوردند. بر اساس تحلیل‌های انجام شده توسط آنها همه پدیده های مربوط به تغییر شکل و توسعه خم‌های رودخانه تابعی از پارامترهای زیر است [۷] .

$$P_{L\pi} = f(\rho, Q, S, \rho', D_{50}, g) \qquad (۳)$$

در رابطه (۳)، Q دبی غالب رودخانه، ρ' چگالی مستغرق ذرات رسوب و D_{50} قطر میانه ذرات رسوب (قطری از ذرات بستر است که ۵۰ درصد وزنی ذرات از آن ریزتر باشد) است. به طوری که ملاحظه می‌شود، محققان یاد شده علاوه بر پارامترهای موجود در رابطه (۲)، پارامترهای D_{50} را که نشان دهنده معیار خاصی از محیط فیزیکی رودخانه است و ρ' را که به خصوصیات فیزیکی ذرات رسوب اشاره دارد، به معادله توان واحد جریان اضافه کرده اند. همچنین آنها با فرض کروی بودن ذرات رسوب و با استفاده از تئوری $\Pi - Bukingham$ معادله ابعادی توان واحد جریان بی بعد رودخانه‌ای را به شکل معادله (۴) به دست آوردند:

$$P_{L\pi} = \frac{Q.S}{(\frac{\rho'}{\rho}).\sqrt{gD_{50}^5}} \qquad (۴)$$

در رابطه (۴)، $P_{L\pi}$ معرف توان واحد جریان بی‌بعد رودخانه است و سایر پارامترها قبل از این معرفی شده اند.

توسعه معادله توان واحد جریان رودخانه

مهم‌ترین تفاوت بین مطالعات صحرائی رودخانه و آزمایش‌های مبتنی بر شبیه سازی رودخانه با فلوم، در این است که آب رودخانه ها در حالت طبیعی همانند آب مورد استفاده در آزمایشگاه‌ها زلال نیست و حاوی مقادیر متنابهی از رسوبات است. با توجه به این مطلب، کار انجام شده در واحد زمان برای مخلوط آب و رسوب به شکل حاصلضرب عامل حرکت آب و ذرات رسوب در مقدار جا به جایی (طول کانال) فرض می‌شود. در نتیجه، سنگینی نسبی ذرات معلق و غلظت وزنی رسوبات در واحد حجم مخلوط آب و رسوب، نقش مهمی در نحوه استهلاک انرژی مصرف شده در رودخانه برای انتقال جرم خواهند داشت.

با تکیه بر مطالب ذکر شده، معادله توان واحد جریان در رودخانه با در نظر گرفتن اثر پارامترهای غلظت مواد رسوبی موجود در جریان و سنگینی نسبی ذرات معلق توسعه می یابد. بنابراین علاوه بر شش پارامتر معادله (۴)، دو پارامتر C_s غلظت مواد رسوبی و G سنگینی نسبی ذرات رسوب نیز وارد معادله توان واحد جریان می‌شود. در این صورت می توان گفت:

$$P_{L\pi} = f(\rho, Q, S, \rho', D_e, g, C_s, G) \qquad (۵)$$

در این رابطه D_e قطر مؤثر ذرات بستر است که برای رودخانه های ماسه ای به صورت $D_e = D_{50}$ و برای رودخانه های شنی به صورت $D_e = D_{84}$ منظور می شود. با به کار بردن تئوری $\Pi - Bukingham$ رابطه بی بعد زیر که مبین پدیده های ناشی از توان واحد جریان در رودخانه است، به دست می آید: [۸و۹]

$$P_{L\pi} = \frac{G.C_s.S.Q}{\rho.\sqrt{gD_e^5}} \qquad (۶)$$

حال اگر مقادیر G=2.65، $\rho = 1000 (kg/m^3)$ و $g = 9.81 (m/s^2)$ فرض شود، توان واحد جریان بی بعد توسعه یافته به صورت تابعی بر حسب غلظت وزنی رسوبات، شیب طولی رودخانه، دبی جریان و قطر مؤثر ذرات بستر به دست می آید:

$$P_{L\pi} = 8.46 \times 10^{-4} \frac{C_s.S.Q}{\sqrt{D_e^5}} \qquad (۷)$$

مطالعات موردی

در این تحقیق با استفاده از رابطه (۷)، همبستگی پارامتر $P_{L\pi}$ با مقادیر عرض و عمق جریان در دو رودخانه با شرایط متفاوت بررسی می شود. برای این منظور رودخانه سیستان به عنوان یک رودخانه توسعه یافته با بستر ریز دانه (ماسه ای) و رودخانه کرج به عنوان یک رودخانه با بستر درشت دانه (شنی) برای مطالعه انتخاب شد. وجود اطلاعات و آمار در حد قابل قبول یکی دیگر از عوامل انتخاب این دو رودخانه بود. در این تحقیق برای محاسبه دبی غالب از روش دبی مؤثر استفاده شده است. شایان ذکر است برای مطالعه هندسه- هیدرولیکی رودخانه های مورد مطالعه در این تحقیق از روش موضعی (در یک مقطع) استفاده شده است، به این نحو که داده‌های رودخانه سیستان در ایستگاه هیدرومتری کهک و داده های رودخانه کرج در ایستگاه هیدرومتری سیرا

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

اندازه‌گیری شده است.

نحوه استفاده از داده ها و روند آنالیز آنها برای مطالعه دو رودخانه سیستان و کرج به این ترتیب است که برای هر دبی اندازه گیری شده، مقدار غلظت وزنی رسوبات متناظر با آن دبی از مجموعه داده های اندازه گیری شده برداشت می‌شود. سپس به کمک منحنی دبی- اشل برای آن دبی، d عمق آبراهه نیز به دست می‌آید. مقدار w عرض آبراهه هم به کمک داده‌های برداشت شده یا سطح مقطع رودخانه و تعیین موقعیت سطح آب به ازای آن دبی به دست می‌آید. به عبارت دیگر داده های دبی جریان، غلظت مواد رسوبی، عرض و عمق آبراهه متغیر هستند و داده های شیب طولی و قطر مؤثر ذرات ثابت فرض شده اند.

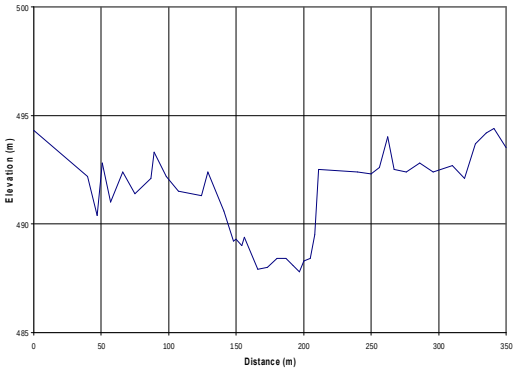
در این مرحله با تکمیل داده های مورد نیاز به ترتیب زیر محاسبات انجام می‌شود. ابتدا مقادیر $P_{L\pi}$، $\frac{w}{D_e}$ و $\frac{d}{D_e}$ به کمک اطلاعات و آمار موجود برای هر یک از رودخانه های مورد مطالعه محاسبه می شود و سپس رابطه بین $P_{L\pi}$، $\frac{w}{D_e}$ و همچنین $P_{L\pi}$، $\frac{d}{D_e}$ با برازش منحنی به داده ها در دستگاه مختصات لگاریتمی بدست می آید. در گام آخر، رابطه نهائی w با پارامترهای جریان و همچنین d با پارامترهای جریان استنتاج می‌شود [۲].

رودخانه سیستان

رود سیستان (هیرمند) رگ حیاتی منطقه سیستان و یگانه منبع تأمین آب این دشت و شهرستان زابل به شمار می‌آید. این رودخانه، آبراهه ای طبیعی با بستر و سواحل متشکل از مصالح سیلت و رس است و تکامل مورفولوژی آن در نتیجه عمل فیزیکی جریان آب از فرسایش ورقه‌ای شروع شده و با به هم پیوستن آبراهه های متعدد و بالا رفتن توان جریان به فرسایش دره ای ختم شده است. این رودخانه دائمی در دشت رسوبی جاری بوده و بار رسوبی غالب در آن، بار معلق است. شیب طولی رودخانه سیستان در محدوده رودخانه های جلگه‌ای است و از نظر زمین شناسی این رودخانه از نوع رودخانه‌های پیر و در حال ته نشینی بوده و از نظر ریخت شناسی رودخانه ای پیچان (مئاندری) به شمار می رود [۲ و۱۰].

برای مطالعه رودخانه سیستان در روش هندسه- هیدرولیکی موضعی، به اطلاعات اندازه گیری شده در ایستگاه هیدرومتری کهک مراجعه شده است. ایستگاه هیدرومتری کهک در فاصله ۱/۵ کیلومتری بالادست سد کهک قرار دارد و شیب طولی رودخانه در محل ایستگاه برابر $S = 0.00025$ است. سطح مقطع جریان در حالت لبالب در محل ایستگاه هیدرومتری کهک $A_b = 685.3$ متر مربع است. هندسه مقطع عرضی رودخانه سیستان در محل ایستگاه هیدرومتری کهک در شکل (۱) نشان داده شده است [۱۰].

رابطه دبی- اشل رودخانه سیستان در محل ایستگاه هیدرومتری کهک به صورت $d = 0.0042 * Q + 1.4534$ است. در این رابطه، d عمق جریان بر حسب متر و Q دبی جریان بر حسب متر مکعب بر ثانیه و در محدوده $89.6 < Q < 1009.6$ است. البته با توجه به شکل (۱) رودخانه سیستان به ازای دبی‌های بیشتر از ۷۰۰ متر مکعب در ثانیه از حالت تک آبراهه خارج شده و به حالت شریانی و در نتیجه پراکندگی داده‌ها تغییر الگو می‌دهد، بنابراین آنالیزهای انجام شده بر روی این رودخانه در محدوده $89.6 < Q < 700$ بوده است[۲].



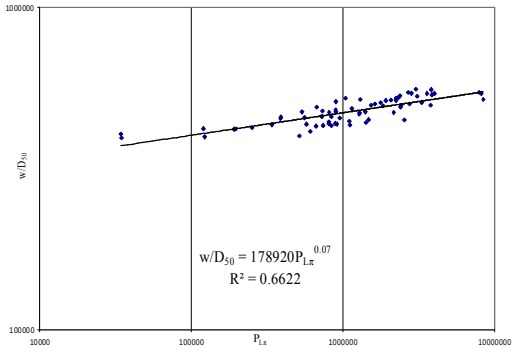
شکل ۱: شکل مقطع عرضی رودخانه سیستان در محل ایستگاه هیدرومتری کهک [۱۰].

بر اساس رابطه (۷) برای استنتاج معادلات رژیم رودخانه سیستان، با توجه به اختلاف آمار و اطلاعات موجود در ایستگاه هیدرومتری کهک در خصوص مقادیر Q، S، C_s و D_e ابتدا پارامتر توان واحد جریان بی‌بعد $(P_{L\pi})$ قابل محاسبه خواهد بود. در گام بعد، پارامترهای بی‌بعد $\frac{w}{D_e}$ و $\frac{d}{D_e}$ محاسبه می‌شود. در

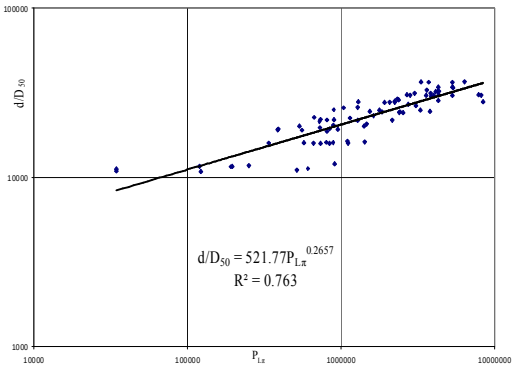
PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

نسبت‌های بالا D_e قطر مؤثر ذرات رسوب است که برای رودخانه ماسه‌ای سیستان به صورت $D_e = D_{50} = 0.00015m$ در نظر گرفته می شود [۲].

سپس مقادیر $P_{L\pi}$، $\frac{w}{D_e}$ (۶۸ داده) و همچنین $P_{L\pi}$، $\frac{d}{D_e}$ (۶۸ داده) در دو دستگاه مختصات با مقیاس لگاریتمی رسم می‌شود و با برازش منحنی به داده ها، معادلات رژیم به شرح زیر استنتاج می شوند؛ البته همان‌طور که ذکر شد، با توجه به شکل (۱) رودخانه سیستان به ازای دبی‌های بیشتر از ۷۰۰ متر مکعب در ثانیه از حالت تک آبراهه خارج شده و لذا آنالیزهای انجام شده بر روی این رودخانه برای دبی‌های کمتر از ۷۰۰ متر مکعب یا به عبارتی آبراهه اصلی این رودخانه بوده است. [۲]



شکل ۲: رابطه بین $P_{L\pi}$ و $\frac{w}{D_e}$ برای ایستگاه هیدرومتری کهک – سیستان.



شکل ۳: رابطه بین $P_{L\pi}$ و $\frac{d}{D_e}$ برای ایستگاه هیدرومتری کهک – سیستان.

$$w = 109037\ Q^{0.07}.S^{0.07}.C_S^{0.07}.D_e^{0.825} \quad (۸)$$

$$d = 79.63\ Q^{0.2657}.S^{0.2657}.C_S^{0.2657}.D_e^{0.335} \quad (۹)$$

در روابط قبل، Q دبی جریان بر حسب متر مکعب بر ثانیه، D_e قطر مؤثر ذرات رسوب بر حسب متر، S شیب طولی رودخانه و بی بعد و C_s نشانگر غلظت وزنی ذرات رسوب بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب است.

مقایسه روابط رژیم به دست آمده برای رودخانه سیستان با سایر روابط رژیم به ازاء دبی غالب

برای سنجش میزان دقت معادلات رژیم استنتاج شده در این تحقیق برای رودخانه سیستان با سایر معادلات رژیم، باید مقادیر عرض و عمق پایدار در رودخانه به کمک معادلات رژیم تخمین زده شود و سپس با داده های مشاهداتی صحت سنجی شود. با توجه به این مطلب و با تکیه بر مفهوم دبی غالب (به عنوان داده ای که در استنتاج معادله رژیم نقش نداشته است) به این نحو عمل شده است که ابتدا مقادیر عرض و عمق پایدار متناظر با دبی غالب در رودخانه سیستان به کمک معادلات رژیم مختلف به دست آمده است و سپس با مقادیر مشاهداتی مقایسه شده اند.

جدول ۱: مقایسه روابط رژیم به دست آمده با روابط رژیم موجود در مورد رودخانه سیستان.

معادله به کار رفته جهت تخمین	رودخانه سیستان			
	عرض (m)	درصد خطا	عمق (m)	درصد خطا
مقادیر مشاهداتی	81.4	-	4.6	-
(ایمان شعار، ۱۳۸۵)	81.26	1	4.34	5.6
(Hafez,2000)	100	22.8	4.52	1.7
(Hey et al.,1968)	88.1	8.2	-	-
(Blench,1969)	78.04	4.1	6.92	50.4
(Simons et al.,1969)	121.3	49	5.3	15.2
(Schumm,1968)	51.86	36.3	-	-
(Leopold et al.,1964)	89.94	10.5	4.44	3.5
(Yang,1981)	86.09	5.8	4.25	7.6
(Chang,1985)	88.74	9	4.38	4.8
(Hancu et al.,1988)	90.55	11.2	4.47	2.8

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

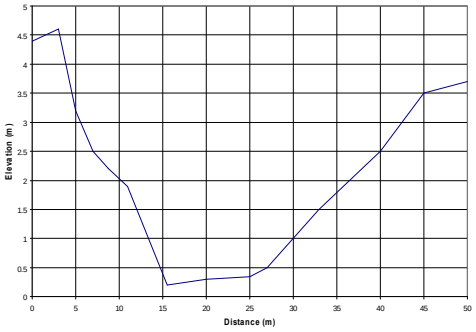
در جدول (۱) میزان دقت معادلات رژیم رودخانه سیستان (معادلات ۸ و ۹) به ازای دبی غالب برابر با ۵۵۵/۷۵ متر مکعب در ثانیه **[۲]** با سایر معادلات رژیم موجود در مورد رودخانه‌های ماسه‌ای مقایسه شده و درصد خطای هر یک نسبت به مقادیر مشاهداتی ارائه شده است.

همان طور که در جدول (۱) مشاهده می شود معادلات رژیم به دست آمده از معادله توان واحد جریان توسعه یافته برای تخمین مقادیر عرض و عمق رودخانه سیستان دقت بسیار خوبی دارند، ولی معادلات رژیم تجربی و معادلات رژیم نیمه تئوری که از آن جمله می‌توان به معادلات (Simons et al.,1969) و (Blench,1969) اشاره کرد، به علت ماهیت تجربی و همخوان نبودن با شرایط اقلیمی منطقه درصد خطای زیادی دارند در حالی که طبق نتایج ارائه شده در جدول (۱) معادلات رژیم استدلالی که با معادله به دست آمده در این تحقیق هم نوع هستند، دقت خوبی دارند که از آن جمله می توان به معادلات (Yang,1981) و (Chang,1985) اشاره کرد.

رودخانه کرج

رودخانه کرج از مهم ترین رودخانه های حوضه آبریز مرکزی بوده و در قسمت شمال شرقی این حوضه واقع شده است و از پرآب‌ترین رودخانه های دامنه جنوبی البرز محسوب می شود. مساحت حوضه آبریز رودخانه کرج حدود ۸۵۰ کیلومتر مربع است. شیب شاخه اصلی و شاخه های فرعی این رودخانه بسیار زیاد بوده و رژیم آن برفی و بارانی است. بار رسوبی غالب در رودخانه کرج، بار معلق است. این رودخانه دائمی از نظر شیب طولی در محدوده رودخانه های کوهستانی قرار دارد و از نظر ریخت شناسی از نوع پیچان (مئاندری) به شمار می رود [۲].

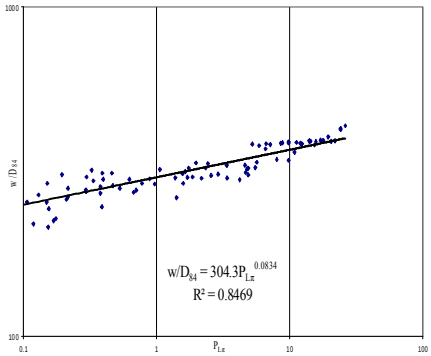
برای مطالعه رودخانه کرج در روش هندسه-هیدرولیکی موضعی به اطلاعات اندازه‌گیری شده در ایستگاه هیدرومتری سیرا مراجعه شده است. ایستگاه هیدرومتری سیرا در فاصله ۱۶ کیلومتری بالا دست سد کرج قرار دارد و شیب طولی رودخانه در محل ایستگاه برابر $S = 0.0185$ است. سطح مقطع جریان در حالت لبالب در محل ایستگاه هیدرومتری سیرا $A_b = 38$ متر مربع می باشد. هندسه مقطع عرضی رودخانه کرج در محل ایستگاه هیدرومتری سیرا در شکل (۴) نشان داده شده است [۱۱].



شکل ۴: شکل مقطع عرضی رودخانه کرج در محل ایستگاه هیدرومتری سیرا [۱۱].

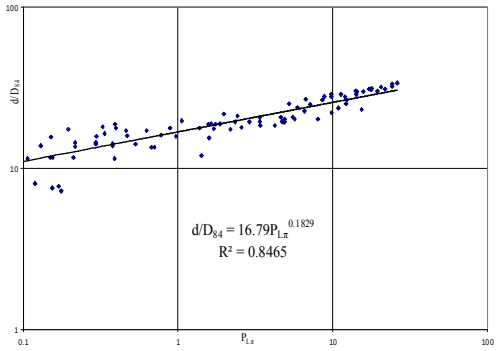
رابطه دبی- اشل رودخانه کرج در محل ایستگاه هیدرومتری سیرا به صورت $d = 0.0058 * Q + 0.6915$ است. در این رابطه d عمق جریان بر حسب متر و Q دبی جریان بر حسب متر مکعب بر ثانیه و در محدوده $8.4 < Q < 263.5$ است [۱۱].

بر اساس رابطه (۷) برای استنتاج معادلات رژیم رودخانه کرج، با توجه به اختلاف آمار و اطلاعات موجود در ایستگاه هیدرومتری سیرا درباره مقادیر Q، S، C_s و D_e ابتدا پارامتر توان واحد جریان بی بعد $(P_{L\pi})$ قابل محاسبه خواهد بود. در گام بعد، پارامترهای بی بعد $\frac{w}{D_e}$ و $\frac{d}{D_e}$ محاسبه می شود. در نسبت‌های بالا، D_e قطر مؤثر ذرات رسوب است که برای رودخانه شنی کرج به صورت $D_e = D_{84} = 0.061m$ در نظر گرفته می شود [۲].



شکل ۵: رابطه بین $P_{L\pi}$ و $\frac{w}{D_e}$ برای ایستگاه هیدرومتری سیرا – کرج.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



شکل ۶: رابطه بین $P_{L\pi}$ و $\frac{d}{D_e}$ برای ایستگاه هیدرومتری سیرا – کرج.

سپس مقادیر $P_{L\pi}$، $\frac{w}{D_e}$ (۱۰۰ داده) و همچنین $P_{L\pi}$، $\frac{d}{D_e}$ (۱۰۰ داده) در دو دستگاه مختصات با مقیاس لگاریتمی رسم می شود و با برازش منحنی به داده ها معادلات رژیم به شرح زیر استنتاج می شوند: [۲]

$$w = 168.68 Q^{0.0834} . S^{0.0834} . C_S^{0.0834} . D_e^{0.7915} \quad (۱۰)$$

$$d = 4.604 Q^{0.1829} . S^{0.1829} . C_S^{0.1829} . D_e^{0.5428} \quad (۱۱)$$

در این روابط، Q دبی جریان بر حسب متر مکعب بر ثانیه، D_e قطر مؤثر ذرات رسوب بر حسب متر، S شیب طولی رودخانه و بی بعد و C_s نشانگر غلظت وزنی ذرات رسوب بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب است.

مقایسه روابط رژیم به دست آمده برای رودخانه کرج با سایر روابط رژیم به ازای دبی غالب

همانند قبل، برای سنجش میزان دقت معادلات رژیم استنتاج شده در این تحقیق، برای رودخانه کرج با سایر معادلات رژیم، باید مقادیر عرض و عمق پایدار در این رودخانه به کمک معادلات رژیم تخمین زده شود و سپس با داده های مشاهداتی صحت سنجی می‌شود.

در این راستا با تکیه بر مفهوم دبی غالب (به عنوان داده‌ای که در استنتاج معادله رژیم نقش نداشته است)، در جدول (۲) میزان دقت معادلات رژیم رودخانه کرج (معادلات ۱۰ و ۱۱) به ازای دبی غالب برابر با ۳۲/۵۵ متر مکعب در ثانیه [۲] با سایر معادلات رژیم موجود در مورد رودخانه های شنی مقایسه شده و درصد خطای هر یک نسبت به مقادیر مشاهداتی ارائه شده است.

همان طور که در جدول (۲) مشاهده می شود، معادلات رژیم به دست آمده از معادله توان واحد جریان توسعه یافته برای تخمین مقادیر عرض و عمق رودخانه کرج از دقت خوبی بهره‌مند هستند، ولی معادلات رژیم تجربی و معادلات رژیم نیمه تئوری که از آن جمله می‌توان به معادلاتی از قبیل (Kellerhals,1967)، (Simons et al.,1969) و (Charlton et al.,1978) اشاره کرد، به علت ماهیت تجربی و همخوان نبودن با شرایط اقلیمی منطقه درصد خطای زیادی دارند، در حالی که معادلات رژیم استدلالی دقت خوبی دارند که از آن جمله می‌توان به معادلات (Yang,1981) و (Chang,1985) اشاره کرد.

جدول ۲: مقایسه روابط رژیم بدست آمده با روابط رژیم موجود در مورد رودخانه کرج.

معادله به کار رفته جهت تخمین	رودخانه کرج			
	عرض (m)	درصد خطا	عمق (m)	درصد خطا
مقادیر مشاهداتی	25.9	-	2.02	-
(ایمان شعار، ۱۳۸۵)	24.32	6.1	1.85	7.9
(Hafez,2000)	31.14	20.2	2.14	5.9
(Hey et al.,1968)	44	69.9	-	-
(Simons et al.,1969)	49.2	89.9	2.24	10.9
(Kellerhals,1967)	52.5	102.7	3.1	53.4
(USBR,1940)	24.27	6.3	-	-
(Charlton et al,1978)	38.13	47.2	3.48	72.3
(Hey et al.,1982)	31.04	19.8	1.48	26.7
(Schumm,1968)	29.2	12.7	-	-
(Leopold et al.,1964)	28.46	9.9	2.11	4.4
(Yang, 1981)	27.5	6.2	2.04	1
(Chang,1985)	28.16	8.7	2.09	3.5
(Hancu et al.,1988)	28.61	10.5	2.12	5

نتیجه گیری

در این تحقیق با توجه به این نکته که آب در حالت طبیعی در رودخانه‌ها زلال نیست و مخلوط آب و رسوب در آبراهه جریان دارد، معادله توان واحد جریان با

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

در نظر گرفتن اثر پارامترهای غلظت مواد رسوبی موجود در جریان و سنگینی نسبی ذرات معلق توسعه یافت. با توجه به این معادله، توان واحد جریان رودخانه تابعی از چگالی آب، چگالی مستغرق ذرات رسوب، سنگینی نسبی ذرات رسوب، غلظت وزنی ذرات رسوب معلق، دبی جریان آب، شیب طولی آبراهه، شتاب ثقل و قطر مؤثر ذرات رسوب خواهد بود.

از آن جا که معادلات رژیم رودخانه‌های سیستان و کرج از روش برازش منحنی بر داده‌های صحرائی هر یک از این رودخانه ها محاسبه شده اند، بنابراین برای کنترل میزان دقت این معادلات از دبی غالب به عنوان داده ای که در استنتاج معادله رژیم نقش نداشته است، استفاده شده است. بر این اساس و با توجه به شکل‌های (۲) و (۳) معادله رژیم به دست آمده جهت پیش بینی عرض در رودخانه سیستان (معادله ۸) دارای ضریب همبستگی $R=81.36\%$ و معادله رژیم به دست آمده برای پیش بینی عمق در رودخانه سیستان (معادله ۹) دارای ضریب همبستگی $R=87.35\%$ هستند. با توجه به مقادیر تخمین زده شده، دقت محاسبات برای پیش بینی عرض در رودخانه سیستان (البته در محدوده ذکر شده برای تک آبراهه اصلی) دارای متوسط خطای $e=11.96\%$ و جذر میانگین مربع های خطایی برابر با $RMSE=3.754$ است. همین مطلب در مورد پیش بینی عمق در رودخانه سیستان به صورت متوسط خطای $e=4.40\%$ و $RMSE=0.395$ به دست می‌آید.

به همین ترتیب، با توجه به شکل های (۵) و (۶) معادله رژیم به دست آمده برای پیش بینی عرض در رودخانه کرج (معادله ۱۰) دارای ضریب همبستگی $R=92.03\%$ و معادله رژیم به دست آمده برای پیش بینی عمق در رودخانه کرج (معادله ۱۱) دارای ضریب همبستگی $R=92\%$ است. با توجه به مقادیر تخمین زده شده، دقت محاسبات برای پیش بینی عرض در رودخانه کرج دارای متوسط خطای $e=6.34\%$ و $RMSE=1.199$ است. همین مطلب در مورد پیش بینی عمق در رودخانه کرج به صورت $e=16.53\%$ و $RMSE=0.204$ به دست می آید.

طبق صحت سنجی و مقایسه انجام شده در جداول (۱) و (۲) چنین نتیجه گیری می شود که معادلات رژیم تجربی و معادلات رژیم نیمه تئوری برای تخمین عرض و عمق پایدار در رودخانه های واقع در اقلیم ایران دقت کمی دارند. علت اصلی این خطای زیاد، ماهیت تجربی معادلات است زیرا این معادلات برای اقلیم‌های خاصی تهیه شده اند که با شرایط حاکم در ایران همخوانی خوبی ندارند. علت دیگر دقت کم این معادلات مبانی علمی آنها است، زیرا بر اساس فرضیه ها این معادلات، یک آبراهه زمانی در حالت رژیم است که شیب و سطح مقطع آن در شرایط تعادل قرار داشته باشد و فرسایش یا رسوب‌گذاری در آن رخ ندهد. بنابراین این معادلات در مدل‌سازی فرآیند رسوبی و چرخه رسوب‌گذاری و فرسایش در آبراهه های رسوبی ضعف دارند.

از طرف دیگر، با توجه به مقایسه انجام شده ملاحظه می شود که معادلات رژیم استدلالی دقت خوبی دارند. دلیل موفقیت این مدل ها در این است که تئوری های ارائه شده برای این معادلات دارای ریشه های قوی و مستدل است و به علت مدل‌سازی فرآیند رسوبی- هیدرولیکی رودخانه بر اساس شاخص های جریان از جامعیت بیشتری بهره مند هستند و به علت دخیل نبودن پارامترهای اقلیمی، محدود به یک منطقه خاص نیستند. به طور مثال (Yang,1981) نظریه حداقل توان واحد جریان در واحد وزن آب را با این مضمون که زمانی یک کانال پایدار است که کار انجام شده در واحد زمان برای واحد وزن آب مینیمم شود، مطرح کرده است. بنابراین رابطه ارائه شده توسط این محقق به خوبی توان جریان رودخانه و اندرکنش نیروی برشی آب با مقاومت بستر و در نهایت تعادل شکل آبراهه را مدل کرده است. از آن جا که ابعاد آبراهه به حجم دبی بالادست و انرژی مصرفی به وسیله جریان آب بستگی دارد، این نظریه به خوبی روند توسعه مورفولوژی رودخانه ها را توضیح می دهد و در نتیجه مقادیر به دست آمده از آن برای تخمین ابعاد رژیم رودخانه از دقت خوبی بهره مند هستند.

فهرست علائم

A_b : سطح مقطع لبالب رودخانه (L^2)

D_X : قطر ذره رسوبی که x % مصالح از نظر وزنی، از آن ریزتر باشد (L)

D_e : قطر مؤثر ذرات رسوب (L)

d : عمق جریان (L)

G : سنگینی نسبی (-)

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

g : شتاب ثقل (LT^{-2})
Δh: میزان استهلاک انرژی پتانسیل واحد وزن آب (L)
L : طول آبراهه (L)
P: توان جریان (MLT^{-3})
P_L: توان واحد جریان (MT^{-3})
$P_{L\pi}$: توان واحد جریان بی بعد (-)
Q : دبی جریان (L^3T^{-1})
Q_s : دبی رسوب (MT^{-1})
Q_w : دبی جریان آب (L^3T^{-1})
S : متوسط شیب طولی آبراهه (-)
W : کار انجام شده ($ML^2\ T^{-2}$)
w : عرض سطح آزاد جریان (L)
γ : وزن مخصوص آ ب ($ML^{-2}T^{-2}$)
ρ': چگالی مستغرق ذرات رسوب (ML^{-3})
ρ: چگالی سیال (ML^{-3})
ρ_s: چگالی ذرات رسوب (ML^{-3})

مراجع

1 - Hafez, Y. I. (2000). "*Response theory for alluvial river adjustment to environmental and man-made changes." Journal of Environmental Hydrology*, Vol. 8, No. 14.

2 - Imanshoar, F. (2006). *Investigation on regime equation validity in Sistan and Karaj rivers*, M. Sc. Thesis, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran. (in Persian).

3 - Chang, H. H. (1988). *Fluvial processes in river engineering*. John Wiely & Sons Ltd, New York.

4 - Farias, H. D., Pilian, M. T., Matter, M. T. and Pece, F. J. (1998). "*Regime width of alluvial channels."* ICHE, Cottbus, PP. 1-21.

5 - Henderson, F. M. (1966). *Open channel flow*. Chapter 10, McMillan-Collier Pub. Co., New York.

6 - Chow, V. T. (1959). *Open channel hydraulic*. Chapter 5, McGraw-Hill Pub. Co., New York.

7 - Pirestani, M., Rezaee, N. and Tabatabai, M. (1999) *"Determination of river regime equation in alluvial basins of Sephid-rood River," Proc., 3rd Conf. of Hydraulic,* Iran. (in Persian)

8 - Raudkivi, A. J. (1998). *Loose boundary hydraulics*. A. A. Balkema Pub. Co., PP. 182-202, Netherlands.

9 - Streeter, V. L., Wylie, E. B. and Bedford, K. W. (1998). *Fluid mechanics*. 9th. Ed. Chapter 5, McGraw-Hill Pub. Co., London.

10 - Sharghara, B. (1995). *Mathematical model for geometry analysis of Sistan rivers' meanders*, M. Sc. Thesis, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran. (in Persian).

11 - Mohammadi, M. (1992). *The mechanism of erosion and sediment transport in Karaj river*, M. Sc. Thesis, Khajenasir University of Technology, Tehran, Iran. (in Persian).

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com