

بررسی آزمایشگاهی توان جریان ثانویه در پیچ رودخانه

جواد مظفری^۱، امیر صمدی^{۲*} و سید اسدالله محسنی موحد^۳

چکیده

شناخت جریان عرضی قوی ناشی از نیروی گریز از مرکز در پیچان رودها سبب شناخت مکان بیشینه فرسایش در ساحل خارجی می‌شود. از این رو با شناخت مکان‌های مناسب برای احداث دهانه آبگیر و انجام عملیات مناسب مهندسی رودخانه می‌توان از تخریب سازه‌ها و زمین‌های زراعی اطراف رودخانه جلوگیری کرد. در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی توان جریان ثانویه و تغییرات آن در پیچ رودخانه و مدل‌های پیش‌بینی مکان بیشینه فرسایش عرضی پرداخته شده است. آزمایش‌های این پژوهش در یک پیچ تند با نسبت شعاع مرکزی به عرض ۱/۳۱ در یک توپوگرافی توسعه یافته و سه دبی ۶۳، ۸۹ و ۱۰۴ لیتر بر ثانیه انجام شده است. بررسی‌ها نشان‌گر هماهنگی کامل جریان ثانویه با تغییرات شیب عرضی بستر و کاهش توان جریان ثانویه با افزایش دبی می‌باشد. به بیان واضح‌تر نسبت انرژی جنبشی عرضی به طولی از ۴۳ درصد در دبی ۶۳ لیتر بر ثانیه به ۳۵ درصد در دبی ۱۰۴ لیتر بر ثانیه کم شده است. همچنین مکان دهانه آبگیر در پیچ تند در حدود یک سوم از ورودی پیچ به دست آمده است. علاوه بر آن، بررسی مدل‌های تأخیر فاز جریان ثانویه نشان داد که آن‌ها توانایی پیش‌بینی صحیح مکان بیشینه فرسایش را ندارند. دلیل این امر عدم در نظر گرفتن تندی پیچ (نسبت شعاع مرکزی به عرض کانال) است که روی الگوی جریان عرضی تأثیر بسزایی دارد.

واژه‌های کلیدی: پروفیل سرعت، پیچ تند، جریان ثانویه، دهانه آبگیر، فرسایش عرضی.

ارجاع: مظفری ج. صمدی ا. و محسنی موحد س. ا. ۱۳۹۴. بررسی آزمایشگاهی توان جریان ثانویه در پیچ رودخانه. مجله پژوهش آب ایران. ۱۶: ۱۶۹-۱۷۶.

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اراک.

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین.

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اراک.

* نویسنده مسئول: amsamadi@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۸/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۴/۱۸

مقدمه

رودخانه‌ها به دلیل ماهیت فیزیکی‌شان مانند موجود زنده‌ای هستند که به طور دائم در مسیر جریان دچار تغییراتی شده و حرکت آن‌ها به جای یک مسیر مستقیم، به صورت پیچان‌رودی و در یک مسیر سینوسی شکل است (تورن، ۱۹۹۷). یکی از ویژگی‌های اصلی در محدوده پیچان‌رودها، وجود جریان ثانویه قوی است که با نیروی گریز از مرکز ناشی از قوس رودخانه ایجاد می‌شود. وجود جریان ثانویه قوی سبب تغییرات زیاد در پروفیل سرعت طولی می‌شود، به طوری که پروفیل سرعت طولی از حالت پروفیل لگاریتمی فاصله می‌گیرد. یکی از نکته‌های مهم اجرای سازه‌های مهندسی رودخانه و دهانه‌های آبگیر در پیچان‌رودها، شناخت محدوده عملکرد جریان ثانویه و میزان قدرت آن است. به عنوان نمونه، دهانه آبگیر در پیچ رودخانه باید در مکانی قرار بگیرد که حداکثر میزان قدرت جریان ثانویه در آنجا باشد. این مسئله سبب می‌شود که رسوبات در ساحل خارجی به سمت ساحل داخلی حرکت کرده و کمترین میزان رسوب وارد دهانه آبگیر شود. همچنین، تغییرات در پیچ رودخانه‌ها و فرسایش دیواره و کف آن‌ها، سبب حرکت و مهاجرت پیچ رودخانه به سمت قوس خارجی و تخریب تأسیسات اطراف آن و اراضی کشاورزی و ایستگاه‌های پمپاژ می‌شود که نشان دهنده نیاز به شناخت الگوی جریان و مکان بیشینه توان جریان ثانویه در پیچ رودخانه است.

از این‌رو، بررسی مکان‌های وجود رسوب‌گذاری و فرسایش و همچنین مکان بیشترین قدرت جریان ثانویه بسیار مهم است و کمک زیادی در شناخت تغییرات ریخت‌شناسی رودخانه و در نتیجه اصلاح پیچ رودخانه و انجام عملیات مهندسی رودخانه می‌کند. در زمینه بررسی جریان ثانویه در پیچان‌رودها تاکنون پژوهش‌هایی انجام گرفته است. ورشنی و گارد (۱۹۷۵) توزیع تنش‌برشی را در پیچ رودخانه با یک مدل ریاضی ارائه دادند. مشاهدات صحرایی این نکته را تأیید می‌کند که جریان ثانویه در دبی‌های زیاد و کم، کمترین قدرت و در دبی‌های متوسط بیشترین قدرت را دارد (باتورست و همکاران، ۱۹۷۹). انور (۱۹۸۶) با بررسی جریان در پیچ رودخانه، نشان داد که توزیع سرعت از قانون لگاریتمی پیروی نمی‌کند. اودگارد و برگز (۱۹۸۸) با مطالعه جریان در یک کانال آبرفتی منحنی شکل، بیان کردند که حرکت هسته بیشینه سرعت به

سمت ساحل خارجی بوده و در حدود زاویه ۹۰ درجه به ساحل خارجی می‌رسد. توان جریان ثانویه به صورت نسبتی از انرژی جنبشی متوسط حرکت عرضی به انرژی جنبشی جریان اصلی در مقطع عرضی تعریف می‌شود و از آنجا که انرژی جنبشی جریان با توان دوم سرعت رابطه دارد، می‌توان آن را به صورت زیر نوشت (سلاجقه، ۱۳۸۲):

$$S_{YZ} = \frac{\bar{V}^2}{\bar{U}^2} \quad (1)$$

که در آن \bar{V} اندازه سرعت متوسط جریان ثانویه در مقطع عرضی و \bar{U} سرعت متوسط جریان اصلی در مقطع عرضی است. توان جریان ثانویه در پیچ به عدد رینولدز، نسبت عرض به عمق جریان، نسبت شعاع انحناء مسیر به عرض جریان، موقعیت ناحیه مورد بررسی در پیچ و زاویه مرکزی پیچ بستگی دارد. همچنین منظور از تأخیر فاز جریان ثانویه عبارت است از تفاوت فاز بین انحناء مسیر پیچان‌رود با الگوی جریان ثانویه، که در بیشتر پیچان‌رودها تأخیر فاز در حدود ۱۰ تا ۴۰ درجه است (ژو و همکاران، ۱۹۹۳). رشد و زوال جریان ثانویه در آبراهه‌های مارپیچی، ناشی از عدم تعادل موضعی^۱ بین نیروی گریز از مرکز، نیروی فشار هیدرواستاتیک ناشی از شیب عرضی در سطح آب و تنش برشی آشفتگی جریان است که دو نیروی اول به طور مستقیم به میزان انحناء موضعی آبراهه بستگی دارند. مشاهدات صحرایی موجود بیانگر وقوع حداکثر فرسایش در بعد از تاج پیچ (نقطه حداکثر انحناء مسیر) است. در نتیجه میزان دور یا نزدیکی ناحیه حداکثر فرسایش به تاج قوس، بیانگر میزان تأخیر فاز جریان است (ژو و همکاران، ۱۹۹۳).

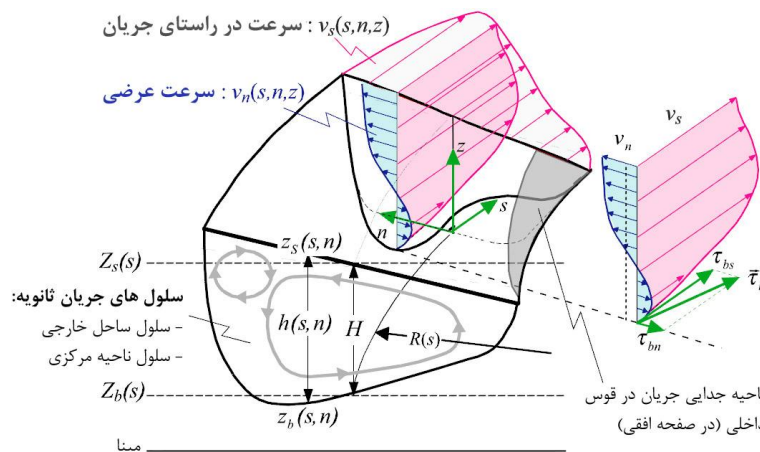
هر عاملی که به نوعی بر توزیع سرعت جریان اثرگذار باشد، بر رشد جریان ثانویه و در نتیجه بر تأخیر فاز نیز مؤثر است. چنانچه زاویه β ، میزان تأخیر فاز و یا زاویه بین خطوط جریان و مسیر آبراهه در نظر گرفته شود، می‌توان نوشت (ژو و همکاران، ۱۹۹۳):

$$\beta = \tan^{-1} \left[\frac{\pi}{\kappa} \left(\frac{1}{\kappa} + \sqrt{\frac{g}{f}} \right) \frac{H}{M} \right] \quad (2)$$

در معادله بالا، H عمق جریان، M طول قوس پیچان‌رود، κ ثابت ون‌کارمن و f ضریب دارسی است. تأخیر فاز با عمق نسبت مستقیم داشته و به عبارت دیگر

دارد. بلانکارت (۲۰۱۱) سه فرآیند هیدرودینامیکی مؤثر در مهاجرت پیچان رودها در پیچ‌های تند با دیواره صلب را به صورت آزمایشگاهی و تحلیلی بررسی کرد. این فرآیندها عبارت بودند از: (۱) جریان ثانویه مؤثر در ایجاد انحنا در جریان مجاری روباز، (۲) سلول‌های اضافی جریان ثانویه در قوس خارجی و (۳) چرخش افقی جریان در قوس داخلی (تشکیل ناحیه جدایی). شکل ۱ به صورت نمونه این سه فرآیند هیدرودینامیکی را نشان می‌دهد.

با توجه به اهمیت جریان ثانویه در پیچ رودخانه، در این پژوهش به بررسی توان جریان ثانویه و میزان تأخیر فاز جریان ثانویه پرداخته خواهد شد تا از نتایج حاصله بتوان در خصوص انتخاب موقعیت بهینه احداث دهانه آبرگیر یا سازه‌های مهندسی رودخانه در محل قوس استفاده کرد.



شکل ۱- تصویر شماتیک فرآیندهای هیدرودینامیکی به وقوع پیوسته در پیچ رودخانه (برگرفته از بلانکارت، ۲۰۱۱)

نیز به طول ۵ متر نصب شده است.

برای انجام آزمایش‌ها در ابتدا دبی ۶۳ لیتر بر ثانیه در فلوم برقرار شد. کف شامل ماسه با دانه‌بندی به طور تقریبی یکنواخت در محدوده ۱/۶ تا ۲/۲ و متوسط ۲ میلی‌متر است. رسوبات با تغذیه کننده رسوب^۲ از بالادست وارد فلوم شده (منطقه شماره ۷ در شکل ۲) و جریان به مدت ۳ هفته ادامه داشت تا کف به تعادل برسد و بین رسوبات ورودی و خروجی تعادل برقرار شود و بار نقطه‌ای در بخش ساحل داخلی به طور کامل گسترش یابد. در نهایت رسوبات بستر با موادی ویژه به نام داکفیل^۳، منجمد شده تا در حضور کف ثابت و بدون حرکت، بتوان

مواد و روش‌ها

بررسی‌های آزمایشگاهی این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه EPFL در لوزان سوئیس، روی فلومی از جنس پلکسی گلاس، با شعاع انحناء ۱/۷ متر و با زاویه مرکزی ۱۹۳ درجه انجام شد. شکل ۲ نمایی از کانال آزمایشگاهی به کار رفته را نشان می‌دهد. بخش ورودی کانال، مستقیم و به طول ۹ متر است که برای تشکیل جریان توسعه یافته و توسعه کامل لایه مرزی در نظر گرفته شده است. برای اجتناب از مشکلات کانال باریک^۱، عرض فلوم ۱/۳ متر در نظر گرفته شده که با توجه به فضای آزمایشگاهی نسبت عرض به عمق حدود در آزمایش‌ها ۱۳ بوده است. در نهایت یک بخش مستقیم در خروجی قوس

2- Feeder
3- Dakfill

1- Narrow channel

همکاران (۱۹۹۳) ارائه شده، کیتانیدیس و کندی (۱۹۸۴) نیز میزان تأخیر فاز را از معادله زیر محاسبه کردند:

$$\beta = \tan^{-1} \left(4.44\pi \frac{8}{f} \frac{H}{M} \right) \quad (3)$$

معادله پیشنهادی ایکدا و نیشیمورا (۱۹۸۶) نیز به صورت زیر است:

$$\beta = \tan^{-1} \left(2\pi \left[1.11 \sqrt{\frac{8}{f}} - 1.42 \right] \frac{H}{M} \right) \quad (4)$$

معادله پیشنهادی جوهانسون و پارکر (۱۹۸۹) که در حقیقت اصلاح شده معادله ایکدا و نیشیمورا (۱۹۸۶) بوده است عبارت است از:

$$\beta = \tan^{-1} \left(2\pi\alpha \frac{8}{f} \frac{H}{M} \right) \quad (5)$$

که در آن، ضریب α از معادله زیر محاسبه می‌شود:

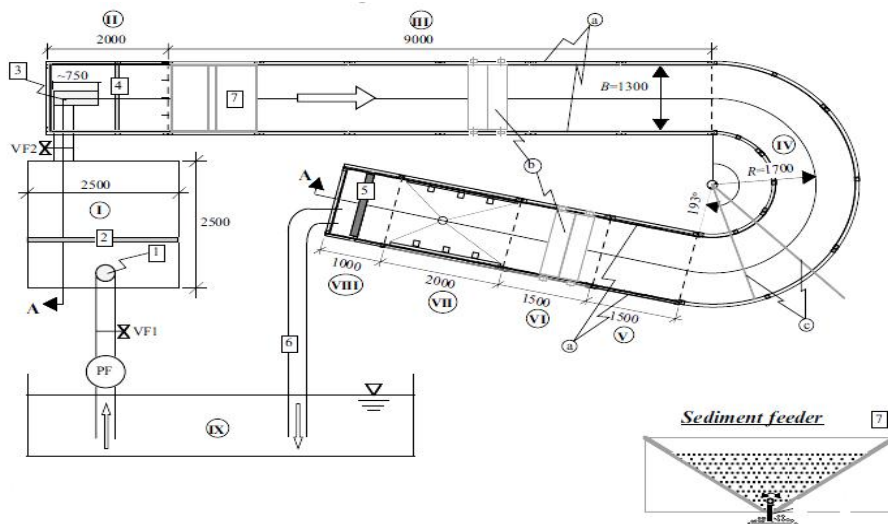
$$\alpha = \frac{\frac{1}{12} X^2 + \frac{11}{360} X + \frac{1}{504}}{\left(\frac{1}{3} + X\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{4} + X\right)} \quad (6)$$

و در این معادله:

$$X = 0.077 \left[2 + 2.5 \cdot \ln \left(\frac{H}{k_s} \right) \right] \quad (7)$$

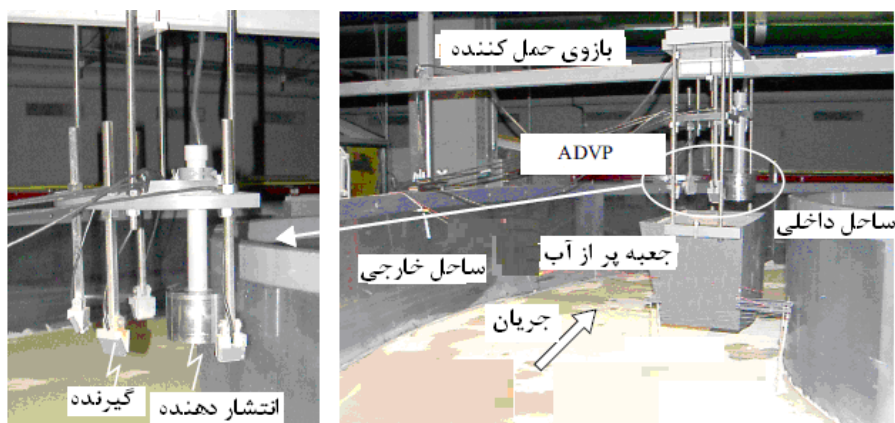
در این معادله، k_s نشان‌گر زبری دانه‌بندی کف است. نتیجه تخمین زاویه β برای داده‌های آزمایشگاهی این پژوهش با استفاده از مدل‌های بالا در بخش بعدی ارائه شده است.

اندازه‌گیری‌ها را انجام داد. نسبت شعاع مرکزی به عرض کف برابر ۱/۳۱ است که نشان دهنده جریانی با انحنای زیاد است. همچنین دو دبی ۸۹ و ۱۰۴ لیتر بر ثانیه نیز روی این توپوگرافی اجرا شد. در این پژوهش برای اندازه‌گیری پروفیل سرعت، از دستگاه^۱ ADVP استفاده شد. این دستگاه شامل یک انتشار دهنده مرکزی^۲ و چهار گیرنده^۳ است که در یک جعبه پر از آب قرار می‌گیرند. انتهای جعبه پر از آب، یک لایه رزین پلی‌استر^۴ قرار دارد که با سطح آب درون کانال در تماس می‌باشد. شکل ۳ دستگاه ADVP را نشان می‌دهند. اندازه‌گیری‌ها در این دستگاه با فرکانس ۳۱/۲۵ Hz بوده و در حدود ۱۸۰ ثانیه برای هر پروفیل سرعت است. برای اندازه‌گیری توپوگرافی کف، از دستگاه لیزر مخصوص اندازه‌گیری فاصله استفاده شد. بدین منظور در طول کانال، در بخش مستقیم بالادست هر ۲۵ سانتی‌متر و در پایین‌دست هر ۱۰ سانتی‌متر و در پیچ هر ۱۰ درجه اندازه‌گیری‌ها انجام شد. یکی از هدف‌های این پژوهش، پیش‌بینی مکان بیشینه توان جریان ثانویه است که برای تعیین آن می‌توان از مدل‌های تأخیر فاز جریان ثانویه استفاده کرد. تأخیر فاز جریان ثانویه که عبارت از تفاوت فاز بین انحناء مسیر پیچ‌رود با الگوی جریان ثانویه است را می‌توان از اختلاف مکان بیشترین فرسایش با تاج انحناء به دست آورد. علاوه بر معادله ۲ برای برآورد تأخیر فاز (β) که توسط ژو و



شکل ۲- نمایی از فلوم آزمایشگاهی پژوهش تغذیه‌کننده رسوب

- 1- Acoustic Doppler Velocity Profiler
- 2- Central emitter
- 3- Receiver
- 4- Mylar



شکل ۳- دستگاه اندازه‌گیری پروفیل سرعت ADVP

نتایج و بحث

افزایش می‌یابد و به بیشترین میزان خود می‌رسد. همچنین با افزایش دبی، توان جریان ثانویه کاهش می‌یابد، یعنی انرژی متوسط جنبشی عرضی به طولی کاهش خواهد یافت. پس می‌توان گفت برای احداث دهانه آبیگر در یک پیچ تند، محل مناسب در بین زوایای ۶۰-۷۰ درجه قوس است که موقعیت دقیق آن را می‌توان بر اساس محدوده تغییرات دبی تعیین کرد. علاوه بر آن، این محدوده قوس بیان کننده ناحیه‌ای از ساحل خارجی رودخانه است که در برابر بیشترین انرژی جریان ثانویه قرار گرفته و در برابر بیشترین فرسایش ساحل خارجی خواهد بود و انجام اقدامات ساماندهی برای آن ضروری است. این در حالی است که در پیچ ملایم بهترین مکان آبیگری در سه چهارم زاویه مرکزی پیچان رود بوده که برای یک پیچ ۱۸۰ درجه، زاویه ۱۳۵ درجه است (رضوان، ۱۹۸۹). بنابراین با افزایش انحناء و تندی پیچ (نسبت R/B)، بهترین مکان آبیگری از انتهای پیچ به ابتدای آن نزدیکتر می‌شود زیرا توان بیشینه جریان ثانویه سریعتر به میزان حداکثر خود در طول پیچ می‌رسد. این پژوهش نشان می‌دهد که بهترین مکان آبیگری در پیچ تند پس از گذر جریان از یک سوم پیچ به دست خواهد آمد.

شکل ۵ نشان‌دهنده سرعت عرضی بالا در ناحیه بیشینه جریان ثانویه برای دبی ۶۳ لیتر بر ثانیه است که در بخش‌هایی تا ۸۰ درصد سرعت متوسط طولی کانال می‌رسد. پس از آن، توان جریان ثانویه رو به کاهش گذاشته و در مقطع عرضی ۱۳۵ درجه به میزان کمینه خود می‌رسد. از مقطع عرضی ۱۳۵ درجه به سمت خروجی خم، توان جریان ثانویه افزایش می‌یابد و در مقطع عرضی ۱۹۳ درجه به میزان بیشینه دیگر می‌رسد که در

توان جریان ثانویه بر اساس معادله ۱ نسبتی از مربع سرعت عرضی به طولی (S_{YZ}) است، اما این نسبت جواب‌های مناسبی را ارائه نخواهد داد، زیرا مقدار سرعت عرضی متوسط در یک مقطع عرضی از جمع سرعت‌های عرضی مثبت و منفی به دست می‌آید و اگر در مقطعی، جمع آن‌ها برابر و یا نزدیک صفر شود، مقدار \bar{V} نیز بسیار کوچک شده و در نتیجه با وجود اینکه جریان ثانویه قوی وجود دارد، توان جریان ثانویه بسیار کم نشان داده می‌شود. از آنجایی که توان جریان ثانویه نشان‌دهنده میزان تأثیر جریان ثانویه بر میزان فرسایش می‌باشد؛ اگر عدد کوچکی را نشان دهد، تأثیر جریان ثانویه بر روند فرسایش در پیچ را نشان نخواهد داد. برای حل این مشکل، به جای استفاده از نسبت مربعات سرعت متوسط عرضی بر طولی، از نسبت انرژی جنبشی جریان عرضی بر انرژی جنبشی جریان طولی در یک مقطع عرضی استفاده خواهد شد، به طوری که:

$$S = \frac{\bar{K}_v}{\bar{K}_u} \quad (8)$$

در این رابطه، انرژی جنبشی متوسط مقطع عرضی برای جریان عرضی، $\bar{K}_v \propto \sum v^2$ و برای جریان طولی، $\bar{K}_u \propto \sum u^2$ هستند که $\sum v^2$ متوسط جمع مربع سرعت‌های عرضی و $\sum u^2$ متوسط جمع سرعت‌های طولی در مقطع عرضی هستند.

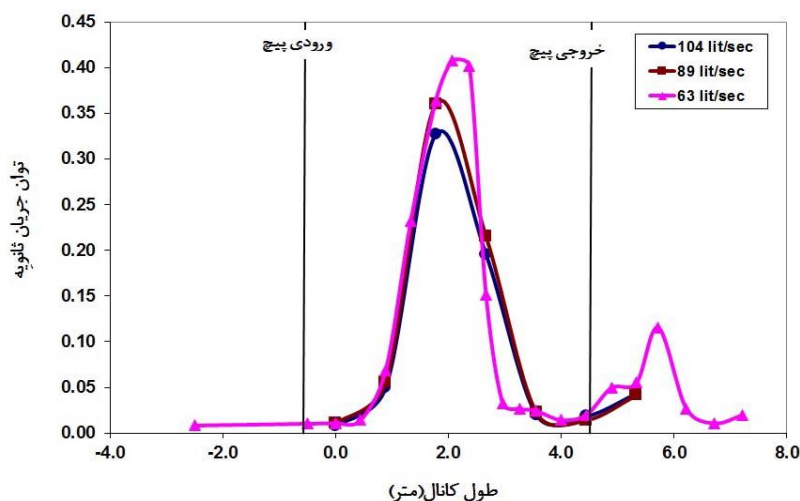
شکل ۴ توان جریان ثانویه را برای سه دبی ۶۳، ۸۹ و ۱۰۴ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که توان جریان ثانویه تا مقطع عرضی ۶۰ الی ۷۰ درجه

دبی بررسی شده، تغییراتی محسوس در مکان بیشینه توان جریان ثانویه ایجاد نشده است. بنابراین، این پارامترها تأثیری را بر مکان بیشینه توان جریان ثانویه نشان نمی‌دهند.

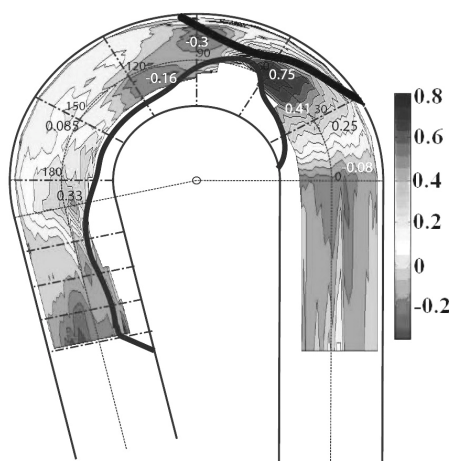
جدول ۱ نشان می‌دهد که هیچ‌کدام از مدل‌های موجود برای تعیین تأخیر فاز پیچان‌رود، نمی‌توانند میزان تأخیر فاز بین جریان ثانویه (نقطه بیشینه فرسایش یا حداکثر توان جریان) با تاج خم را با دقت کافی نشان دهند. زیرا بر اساس آزمایش‌های انجام شده، این تأخیر فاز بین مقاطع ۷۰ درجه تا ۹۰ درجه است که معادل با ۲۰ درجه است، ولی مدل‌های بالا تأخیر فاز را بیش از ۴۰ درجه نشان می‌دهند. پس نتیجه می‌شود که نمی‌توان به نتایج مدل‌های موجود تأخیر فاز اعتماد کرد و بر مبنای آن‌ها نسبت به تعیین موقعیت مناسب دهانه آبگیر و نیز انجام عملیات ساماندهی در قوس خارجی رودخانه اقدام کرد.

حدود ۳۰ درصد میزان بیشینه اول است. طبق شکل ۴، توان جریان ثانویه برای دبی ۶۳ لیتر بر ثانیه از خروجی خم شروع به کاهش دیگر کرده و در یک متری خروجی خم به میزان حداقل رسیده و پس از آن افزایشی دیگر را به همراه دارد. بنابراین، توان جریان ثانویه نیز با تغییرات بستر هماهنگ بوده (شکل ۶)، به طوری که در مقطعی که بیشترین شیب عرضی کف وجود دارد، بیشترین توان جریان ثانویه نیز وجود خواهد داشت. به هر حال، توان جریان ثانویه مانند شیب عرضی کف (شکل ۶) دارای تغییرات نوسانی بوده که این نوسان رو به کاهش و در حال رسیدن به یک تعادل است.

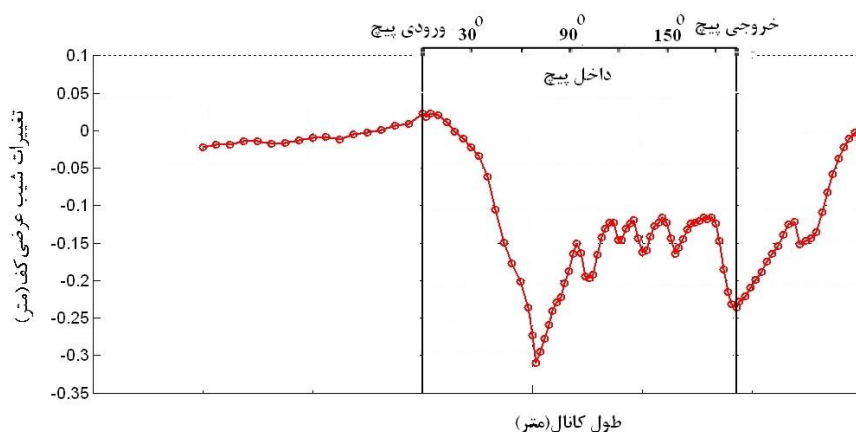
با توجه به شکل ۴، بیشینه توان جریان ثانویه با افزایش دبی کاهش یافته است و افزایش دبی و سرعت جریان، توان جریان ثانویه را افزایش نمی‌دهد. به هر حال، با تغییرات عدد رینولدز و نسبت عمق به شعاع انحناء در سه



شکل ۴- تغییرات توان جریان ثانویه در طول کانال



شکل ۵- سرعت عرضی متوسط‌گیری شده در عمق \bar{V}/U برای دبی ۶۳ لیتر بر ثانیه



شکل ۶- تغییرات متوسط شیب عرضی کف در طول کانال برای دبی ۶۳ لیتر بر ثانیه

جدول ۱- تأخیر فاز جریان ثانویه در مدل‌های مختلف (دبی ۶۳ لیتر در ثانیه)

مدل	میزان تأخیر فاز (β) (درجه)
ژو و همکاران (۱۹۹۳)	۶۴
کیتانیدیس و کندی (۱۹۸۴)	۸۸
ایکدا و نیشیمورا (۱۹۸۶)	۵۴
جوهانسون و پارکر (۱۹۸۹)*	۴۵

* مقادیر سایر ضرایب: $k_s = 0.002$.

از آن‌ها توانایی پیش‌بینی صحیح مکان حداکثر توان جریان ثانویه را ندارند. در بین این مدل‌ها، مدل جوهانسون و پارکر (۱۹۸۹) دارای جواب بهتری از دیگر مدل‌ها است. در نظر گرفتن نسبت انحنا (R/B) در این مدل‌ها که نشان‌دهنده میزان تنیدی انحنا می‌باشد و تأثیر به‌سزایی در مکان بیشینه سرعت عرضی دارد، می‌تواند سبب پاسخ‌های صحیح‌تری شود. به هر حال، برای پیش‌بینی مکان بیشترین فرسایش عرضی، هنوز مدل‌های مناسبی ارائه نشده است.

سپاس‌گزاری

پژوهش‌گران از مسئولین آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه EPFL سوئیس به خاطر موافقت با انجام آزمایش‌ها و استفاده از ابزار پیشرفته و منحصر به فرد اندازه‌گیری پروفیل سرعت ADVP تشکر و قدردانی می‌کنند.

منابع

۱. سلاجقه ع. ۱۳۸۲. مطالعه آزمایشگاهی الگوی سه بعدی جریان حول ای‌های واقع در قوس رودخانه، رساله دکتری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ۲۳۱ ص.

نتیجه‌گیری

جریان ثانویه در پیچ رودخانه‌ها به دلیل تأثیر بر توسعه پیچ‌ها و تخریب سازه‌های اطراف مهم هستند. در این مقاله به بررسی تغییرات توان جریان ثانویه در پیچ رودخانه پرداخته شده است. بررسی‌ها نشان داد که با افزایش دبی جریان و در نتیجه افزایش سرعت در مقطع پیچ، توان جریان ثانویه کاهش می‌یابد. بدین معنی که با افزایش سرعت‌های طولی، سرعت‌های عرضی با افزایش کمتری همراه هستند. البته این مسئله نمی‌تواند به معنی کاهش برداشت رسوب در ساحل خارجی و رسوب‌گذاری در ساحل داخلی باشد. از طرفی با توجه به شیب متوسط عرضی کف مشخص شد که توان جریان ثانویه با تغییرات بستر هماهنگ است. بنابراین مانند شیب عرضی بستر دارای تغییرات نوسانی بوده که این نوسان رو به کاهش و رسیدن به یک تعادل است.

برای تعیین میزان بیشینه قدرت جریان ثانویه از چهار مدل تعیین اختلاف فاز بین تاج انحنا و نقطه بیشینه فرسایش استفاده شد. اگرچه نتایج آزمایش‌ها مبین محدوده حدفاصل زوایای ۶۰-۷۰ درجه به‌عنوان محل مناسب احداث دهانه آبگیر (ناحیه بیشترین توان جریان ثانویه) است، اما بررسی این مدل‌ها نشان داد که هیچ‌کدام

2. Anwar H. O. 1986. Turbulent structure in a river bend. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*. 112(8): 657-669.
3. Bathurst J. C. Thorne C. R. and Hey R. D. 1979. Secondary flow and shear stress at river bends. *Journal of Hydraulic Division ASCE*. 105(10): 1277-1295.
4. Blanckaert K. 2002. Flow and Turbulence in Sharp Open channel Bends. Ph.D. Thesis, number 2545, Ecole Polytech. Fed. Lausanne, Lausanne, Switzerland. 286 p.
5. Blanckaert K. 2011. Hydrodynamic processes in sharp meander bends and their morphological implications. *Journal of Geophysical Research*. 116(F01003): 1-22.
6. Ikeda S. and Nishimura T. 1986. Flow and bed profile in meandering sand-silt rivers. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 112(7): 562-579.
7. Johannesson H. and Parker G. 1989. Velocity redistribution in meandering rivers. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*. 115(8): 1019-1039.
8. Kitanidis P. K. and Kennedy J. F. 1984. Secondary current and river-meander formation. *Journal of Fluid Mechanics*. 144: 217-229.
9. Odgaard A. J. and Bergs M. A. 1988. Flow processes in a curved alluvial channel. *Water Resources Research*. 24(1): 45-56.
10. Razvan E. 1989. River intakes and diversion dams, Amsterdam, Elsevier. 508 p.
11. Thorne C. R. 1997. Channel types and morphological classification. *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*, Thorne C. R. Hey R. D. and Newson M. D. (eds.), John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, UK. 175-222.
12. Varshney V. D. and Garde J. R. 1975. Shear distribution in rectangular channels. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*. 101(8): 1053-1066.
13. Zhou J. Chang H. and Stow D. 1993. A model for phase lag of secondary flow in river meanders. *Journal of Hydrology*. 146: 73-88.