مجله علمی- پژوهشی
دوره 8، شماره 3، پاییز 1392

تأثیر زاویهٔ آبگیری بر الگوی جریان و انتقال رسوب در اطراف سردهانهٔ آبگیر در رودخانهٔ سینوسی

منصور ابوالقاسمی
استادیار، مؤسسه تحقیقات آب

تهران، صندوق پستی 16765/313
Abolghasemi.mansour@iran.ir

چکیده- جریان ثانویه در قوس موجب دورسازی رسوبات بستر از ناحیه خارجی آن می‌شود. عوامل مختلفی بر میزان رسوب ورودی به آبگیر مؤثر هستند که در این تحقیق اثر زوایهٔ آبگیری بر نسبت رسوب در دو زاویهٔ حدی 52 درجه (ملایم ترین زاویه) و 90 درجه (تندترین زاویه)، به ازای دبی‌های مختلف و نسبت‌های انحراف جریان به آبگیر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد ظرفیت آبگذری آبگیر در زاویهٔ آبگیری52 درجه نسبت به زاویهٔ 90 درجه، حدود 21 درصد در دبی‌های مختلف افزایش داشته است، لذا می‌توان عرض سردهانه را در زاویهٔ 52 درجه کاهش داد. مقایسه نتایج حاصل از نسبت رسوب انحرافی به آبگیر در این دو زاویه نشان داد تا نسبت انحرافی جریان به میزان 22 درصد، آبگیر با زاویهٔ انحراف 90 درجه، رسوب کمتری را نسبت به زاویهٔ 52 درجه وارد آبگیر نموده است، در این زاویه به دلیل چرخش تند جریان سطحی بسمت آبگیر، زاویهٔ بین جریان سطحی و عمقی زیاد شده (حدود قائمه) و قدرت جریان ثانویه در سردهانه -که تابع این زاویه نیز می‌باشد- بیشتر شده و کاهش ورود را به همراه داشته است، قدرت جریان ثانویه در سردهانه متاثر از جریان ثانویه در قوس خارجی و زاویهٔ آبگیری می‌باشد که توسط شاخص Psec تعریف شده است. با افزایش نسبت انحراف جریان در زاویهٔ آبگیری 90 درجه، میدان جریان برگشتی بسمت آبگیر در عرض قوس آبراهه توسعه بیشتری یافته و به بارهای رسوبی متحرک در قوس داخلی نزدیک شده و همانند جریان در قوس خارجی بدلیل قدرت حمل بالا، رسوبات زیادتری را از این ناحیه برداشته و وارد آبگیر می‌کند و لذا نسبت رسوب ورودی به آبگیر افزایش تصاعدی دارد. در زاویهٔ آبگیری 52 درجه، جریان در حداقل زاویهٔ چرخشی (زاویه حاده) با انحراف بخشی از جریان که در قوس خارجی می‌باشد آبگیری نموده و با توجه به زاویهٔ کم جریان با امتداد آبگیر، قدرت جریان ثانویه در سردهانه ضعیف بوده و تا نسبت 22 درصد میزان رسوب بیشتری را نسبت به زاویهٔ آبگیری 90 درجه منحرف نموده است.

کلیدواژگان: مدل فیزیکی، رودخانه سینوسی، آبگیر، نسبت انحراف، زاویهٔ آبگیری، قدرت جریان ثانویه.

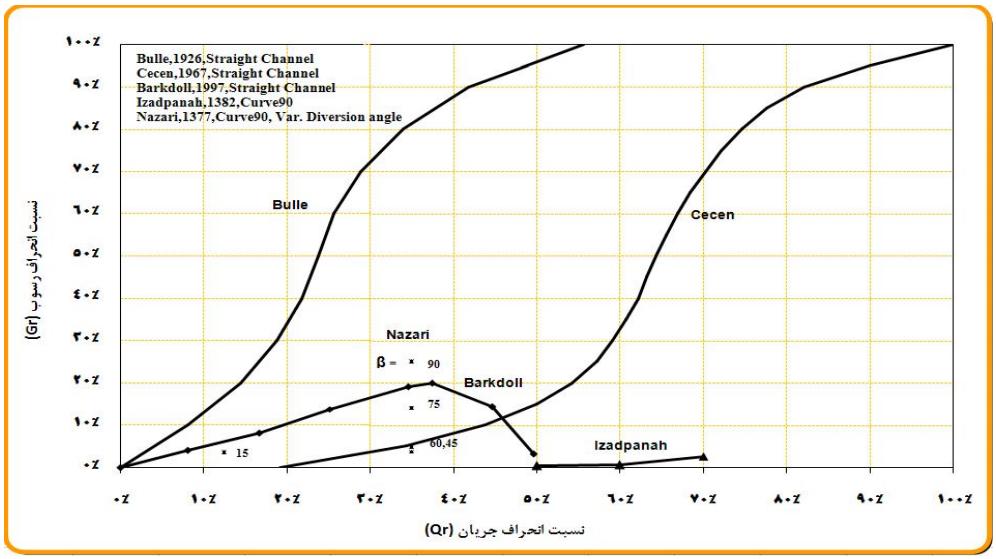
1- مقدمه

در طراحی آبگیرهای جانبی سعی می‌شود رسوبات ورودی به آبگیر را کاهش دهند. چرا که رسوبگذاری در

سردهانه و ورودی آبگیرها باعث بروز مشکلات بهره‌برداری از این تأسیسات خواهد شد و نهایتاً ممکن است منجر به قطع جریان انحرافی به آبگیر شود. از طرفی لایروبی و تخلیه رسوبات از تأسیسات آبگیر و شبکه انتقال، مشکلات اجرایی و هزینه‌های بالایی را نیز بدنبال خواهد داشت، لذا بررسی میزان تأثیر عوامل دخیل بر میزان رسوب ورودی به آبگیرها امری ضروری بوده که با شناسایی آنها، امکان انتخاب راهکارهای مناسب برای کاهش میزان رسوب ورودی به آبگیر عملی می‌شود.

عامل اصلی کاهش میزان رسوب ورودی به سردهانهٔ آبگیر در قوس، جریان ثانویه است که در مقطع عرضی قوس آبراهه شکل می‌گیرد و با تلفیق با جریان طولی آبراهه، بصورت جریانی مارپیچی در طول قوس توسعه می‌یابد. جریان ثانویه بر اثر نیروی گریز از مرکز که به ذرات سیال وارد می‌شود، به وجود می‌آید. مؤلفه شعاعی نیروی گریز از مرکز باعث افزایش تراز سطح آب در قوس خارجی نسبت به قوس داخلی می‌شود و گرادیان حاصله در عرض قوس، شرایط اولیه را برای چرخش جریان، از سمت قوس خارجی به داخل قوس در عمق فراهم می‌کند. گرادیان سرعت جریان در پلان، ناشی از مؤلفه عمودی نیروی گریز از مرکز و نیز گرادیان سرعت در عمق جریان، ناشی از اصطکاک بستر، باعث تقویت جریان چرخشی اولیه می‌شود. این جریان باعث کف کنی و انتقال رسوب‌های کف رو، از قوس خارجی به طرف قوس داخلی می‌شود. در صورتی که سطح اولیه رسوبات در بستر (در آزمایشگاه) بصورت افقی ایجاد شده باشد، در اثر تداوم جریان، مقطع عرضی در قوس از شکل مستطیلی (افقی) به مثلثی (v شکل) تبدیل می‌شود. این شرایط تا رسیدن به تعادل و تثبیت مقطع عرضی با توجه به دبی و رسوب ورودی ادامه می‌یابد. به میزانی که سرعت عرضی جریان در قوس یا قدرت جریان ثانویه افزایش یابد، توان کف کنی جریان و دورسازی رسوب‌ها از قوس خارجی بیشتر و عمق چاله (در ناحیه فرسایشی قوس خارجی) افزایش بیشتری پیدا می‌کند. در صورتی که از قوس خارجی آبگیری انجام شود، جریانی از قوس خارجی به سمت سردهانهٔ آبگیر شکل می‌گیرد و نتیجتاً باعث کاهش قدرت جریان ثانویه شده و شرایط برای ورود رسوبات به آبگیر را تسهیل می‌نماید. بطور کلی عوامل مؤثر بر نسبت انحراف رسوب به آبگیر (Gr، رسوب انحرافی به آبگیر نسبت به رسوب در بالادست و یا ورودی آبراهه) را می‌توان به نسبت انحراف جریان (Qr، نسبت دبی آبگیر به دبی آبراهه)، هندسهٔ آبراهه، هندسهٔ آبگیر شامل زاویه آبگیری، ارتفاع آستانه ورودی آبگیر، عمق آب در قوس خارجی، عدد فرود جریان ورودی به قوس و قطر ذرات رسوب وابسته دانست. از عوامل مهم بر میزان انحراف رسوب به آبگیر که در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد زاویهٔ آبگیری (β) به ازای دبی‌های مختلف و نسبت‌های انحراف جریان می‌باشد. محققان زیادی بر روی ساز و کار جریان در قوس و تأثیر انحراف جریان بر میزان رسوب ورودی به آبگیر و عوامل موثر مطالعه نموده‌اند: از جملهٔ آنها می‌توان به Bulle (1926) (به نقل از Schokitsch, 1937)، Cecen (1967) (به نقل از Raudkivi, 1993)، Razvan and Yuksel, (1998)، Neary et. al. (1994) (1989)، Agaccioglu، Dancy (1947) (به نقل از Raudkivi, 1993)، Vanoni (1977)، Fares (1993)، Habemass (1955)، Blanckaert (2002)، Scheuerlin (1984) و مؤسسه تحقیقات آبیاری ایالت اوترا پرادش (UPIRI) (به نقل از Raudkivi, 1993) اشاره کرد.

نتایج تحقیقات برروی آبگیری در آبراهه در مسیر مستقیم نشان می‌دهد که منحنی تغییرات نسبت رسوب به نسبت جریان منحرف شده به آبگیر به شکل S می‌باشد (شکل 1). فرم تغییرات نسبت این دو پارامتر برروی آبگیر در مسیر مستقیم در تحقیقات Barkdoll (1997) دارای حداکثری در نسبت دبی انحرافی حدود 38 درصد می‌باشد.



شکل 1 نتایج تحقیقات سایر محققان درخصوص تأثیر نسبت انحراف جریان بر نسبت رسوب ورودی به آبگیر

البته آزمایش‌های این محقق در شرایط بدون تزریق رسوب انجام شده‌اند، لذا به مرور با حمل رسوب‌های بستر و افزایش عمق، قدرت حمل جریان کاهش یافته و نسبت رسوب ورودی به آبگیر بسمت صفر میل نموده است.

عباسی (1382) در مسیر مستقیم و پیرستانی (1383) و دهقانی (1384) در خم 180 درجه نتایج مشابهی را حاصل نموده‌اند. ورود رسوب از کانال اصلی با مقطع ذوزنقه به آبگیر 30 درجه توسط Karami et al. (2010) به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد کاهش عمق، کاهش قدرت جریان ثانویه و در نتیجه کاهش ورود رسوب به آبگیر را در پی دارد. سیدیان و شفاعی در سال 1389 به صورت آزمایشگاهی بر روی جریان انحرافی از کانال اصلی با مقطع مستطیلی و ذوزنقه به آبگیر 90 درجه بررسی‌هایی انجام دادند. نتایج آنها نشان می دهد که الگوی جریان بهتری در حالت ذوزنقه نسبت به حالت مستطیلی وجود دارد. تحقیقات ایزدپناه (1382) و نظری (1377) برروی آبراهه با خم 90 درجه در سه زاویهٔ آبگیری انجام شده است. همان‌طور که مشخص گردید تحقیقات صورت گرفته در این خصوص، غالباً بر روی آبگیری در مسیر مستقیم رودخانه و خم‌های 90 و 180 درجه انجام شده و آبگیری از قوس‌های پیچانی مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مقاله در خصوص تأثیر زاویهٔ آبگیری بر نسبت رسوب ورودی به آبگیر در دو زاویه به ازای نسبت‌های مختلف انحراف جریان با گشودگی‌های مختلف دریچه کنترل در پایاب کانال آبگیر (انحراف کم جریان تا انحراف به میزان ظرفیت کامل آبگیر) و عمق‌های مختلف (ناشی از تغییر دبی آبراهه) در پیچان‌رود سینوسی تحقیقات گسترده‌ای انجام شده است. لازم به ذکر است که جریان در آبراهه، آزاد بدون هیچ‌گونه کنترل در پایاب آن بوده است.

از ویژگی‌های این تحقیق می‌توان به: تزریق پیوسته رسوب در آزمایشات، انتخاب مقیاسی بزرگ برای مدل فیزیکی جهت نزدیکی به شرایط هیدرولیکی در طبیعت و درنتیجه مواجه شدن با احجام بالای رسوب تزریقی، نحوه و مکان تزریق، روش تعیین نسبت رسوب منحرف شده به آبگیر، ابداع روش رهگیری الگوی جریان با نوارهای رنگی اشاره کرد.

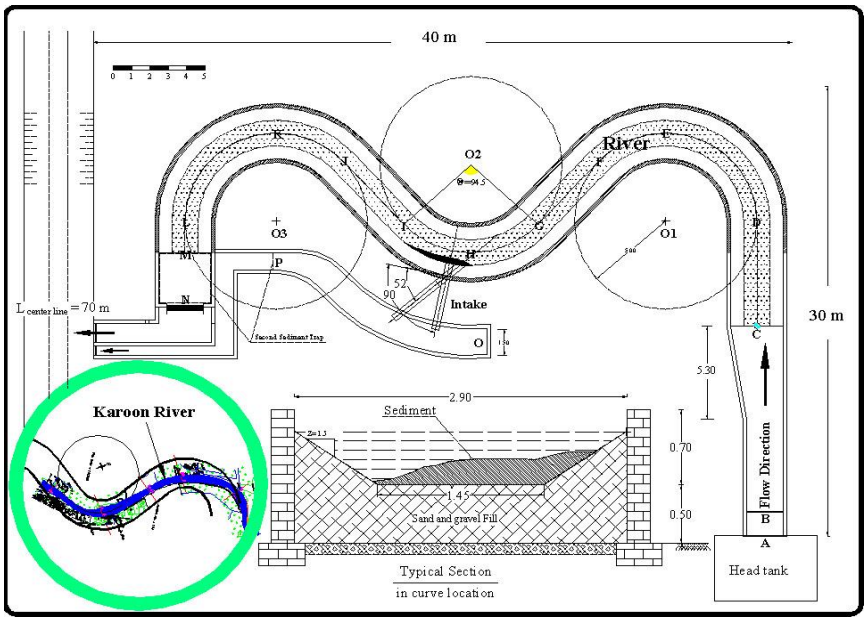
2- روش تحقیق

2-1- طراحی مدل

برای شبیه‌سازی واقعی هر پدیده و رفتار سنجی آن منطبق بر شرایط حاکم در نمونهٔ اصلی (طبیعت) لازم است نسبت ابعادی محیط جریان و نیز شرایط هیدرولیکی آن پدیده در مدل شبیه‌سازی شود. تحقیقاتی که برروی شبیه‌سازی جریان ثانویه برروی مدل‌های فیزیکی خم توسط Booij (2002) صورت گرفت، نشان داد بیشترین تحقیقات انجام شده برروی انحناهایی صورت گرفته که در آن از شرایط واقعی در طبیعت فاصله گرفته است، لذا در تحقیق حاضر ابعاد خم با توجه به روابط رژیم تعادلی رودخانه‌ها در نواحی پیچان‌رودی بدست آمده است. این مدل در فضایی به ابعاد 30×40 متر در سالن مهندسی رودخانهٔ مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو، مطابق شکل 2، اجرا شد.

جریان از ناحیه بالادست در مقطع A وارد مدل فیزیکی می‌شود. در مقطع B جریان ورودی توسط سرریز لبه تیز به عرض 2 متر اندازه‌گیری می‌شود. سطح مقطع ذوزنقه‌ای آبراهه از قسمت C شروع می‌شود. شروع قوس اول، مقطع D و انتهای این قوس و شروع بازهٔ مستقیم مقطع F، شروع قوس دوم مقطع G و انتهای آن مقطع I می‌باشد.

قوس سوم از مقطع J شروع و تا مقطع L ادامه می‌یابد. جریان عبوری از مدل در انتها به مخزن زیرزمینی سالن آزمایشگاه تخلیه و توسط پمپ، مجدداً به مدل برگردانده می‌شود، ولی رسوبات آن در حوضچه‌ای که در حد فاصل مقاطع M الی N در انتهای آبراهه و بین مقاطع O تا F در ناحیه خروجی آبگیر قرار دارد تله‌اندازی و بازیافت می‌شود. محل بهینه استقرار سردهانه آبگیر در سه چهارم زاویه مرکزی قوس توسط Razvan (1989) توصیه شده است. زاویه مرکزی قوس 94/5 درجه و براساس این توصیه زاویه استقرار آبگیر 71 درجه می‌شود. لازم به ذکر است محل بهینه برای جانمایی سردهانه آبگیر در مکانی است که جریان ثانویه به بلوغ کامل رسیده است. در این مکان بیشترین پتانسیل دورسازی رسوبات بستر از قوس خارجی وجود دارد و در نتیجه رسوب کمتری وارد آبگیر می‌شود.



شکل 2 پلان و مقطع مدل فیزیکی پیچان‌رود

موقعیت این مکان در آبراهه سینوسی در یک پیچان کامل، تابعی از عدد فرود جریان ورودی به قوس می‌باشد (ابوالقاسمی و همکاران، 1384). لذا مکان استقرار سردهانه آبگیر در زاویه مرکزی 59 درجه انتخاب شد. عرض و ارتفاع آبگیر به ترتیب 40 و 60 سانتی‌متر و عرض و عمق کانال ذوزنقه‌ای 290 و 70 سانتی‌متر (بدون رسوب در کف) می‌باشد.

در این تحقیقات دو زاویهٔ آبگیری (β) در دو شرایط حدی 52 و 90 درجه مورد بررسی قرار گرفته است. در زاویهٔ 52 درجه، آبگیر در راستای جریان ورودی به قوس قرار گرفته است، لذا جریان با کمترین اغتشاش وارد سردهانهٔ آبگیر می‌شود. تندترین زاویه آبگیری می‌تواند90 درجه باشد. در این زاویه، جریان برای ورود به سردهانه بایستی چرخش تندی بکند. در این زاویه، آبگیر عمود بر قوس و یا در امتداد شعاع قوس قرار می‌گیرد.

2-2- شرایط هیدرولیکی

برای اینکه جریان حاصل در مدل قابل انطباق با نمونه اصلی در طبیعت باشد، بایستی رژیم جریان در مدل نیز در ناحیه اغتشاش کامل قرار داشته باشد. معیار مربوطه توسط پارامتر رینولدز ذره (رابطه 1) تعیین می‌شود (Prezedwojski et. al., 1995).

$$\mathrm{Re}^{*}=\frac{U_{*}d_{65}}{\upsilon}>70\approx100 \qquad (1)$$

$$U_{*}=\sqrt{gRS} \qquad (2)$$

در این فرمول R شعاع هیدرولیکی، S شیب سطح آب، d_{65} اندازه ذره 65 درصد ریزتر و υ لزجت سینماتیکی سیال است.

2-3- بار بستر و دانه‌بندی آن

با توجه به این که ذرات رسوب در طول مدل (در مسیر انحنا و مستقیم) و در محدودهٔ دبی‌های آزمایشی، بایستی بصورت باربستری حرکت نمایند و به عبارت دیگر در حالت تعلیق باقی نمانند، لازم است آزمایش‌هایی برای تعیین محدوده‌ای از قطر مصالح که در طیف گستردهٔ دبی انتخابی 120 تا 280 لیتر در ثانیه همواره این شرایط را حفظ نمایند، صورت پذیرد. این آزمایش‌ها در مصالحی با دانه‌بندی یکنواخت انجام شدند. مصالحی را یکنواخت گویند که انحراف معیار ذرات مصالح آن (σ_g) کمتر از 1/3 (شفاعی بجستان، 1378) باشد.

$$\sigma_g=\sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}}<1.3 \qquad (3)$$

مصالح مورد نیاز برای بار بستر در حداقل یک دوره کامل آزمایش‌ها به روش الک نمودن تهیه شد. مصالح منتخب، در طبقه‌بندی شن ریز قرار می‌گیرد (جدول 1).

لازم به ذکر است بار بستری در طول آبراهه حرکت می کند و با توجه به شرایط جریان با حرکت غلطشی بروی بستر جابجا و بعضاً بصورت پرشی، بحالت تعلیق در می آید. هدف از این تحقیق بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در کاهش ورود رسوبات از این نوع، به آبگیر است.

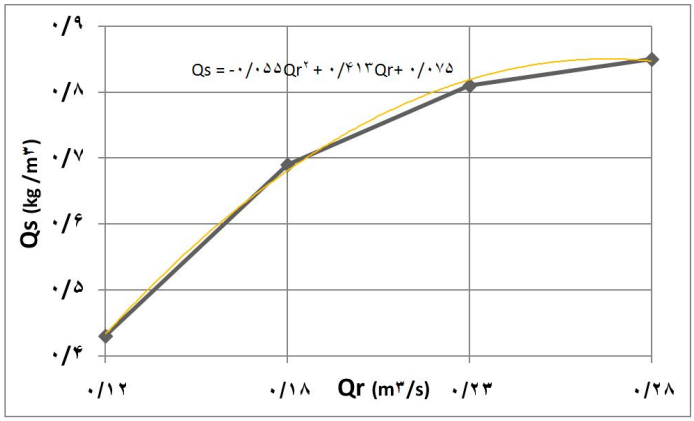
میزان تزریق رسوب بر اساس دبی‌های انتخابی جریان آبراهه (لیتر در ثانیه)، وزن رسوب (گرم در مترمکعب جریان) با معیار فراهم شدن وزن کافی و قابل توزین برای رسوبات انحرافی طی آزمایش‌های اولیه تعیین گردید (جدول 2 و شکل 3).

جدول 1 مشخصات مصالح بار بستر (به میلی‌متر) و پارامترهای هندسی آن

D10	D30	D50	D60	D90	Cu	Cz	σ_g
2/45	2/97	3/42	3/65	4/50	1/49	1/31	1/29

جدول 2 وزن رسوب تزریقی در جریان به ازای دبی‌های انتخابی در آزمایشات

Qr (m^3/s)	0/120	0/180	0/230	0/280
QS (kg/ m^3)	0/430	0/690	0/810	0/850



شکل 3 منحنی تغییرات دبی جریان انتخابی و مقدار رسوب تزریقی در مدل فیزیکی

2-4- نحوهٔ انجام آزمایش‌ها

با تخلیه رسوب‌ها در بستر و صاف نمودن آن با ضخامتی حدود 25 سانتی‌متر، دبی مورد نظر از بالادست رها می‌گردید. آزمایش‌ها در مراحل مختلف در محدوده دبی از120 لیتر در ثانیه شروع (در دبی‌های کمتر با کاهش قدرت حمل جریان، رسوب‌های منتقله به آبگیر ناچیز می‌شود که برای جمع‌آوری رسوب کافی و قابل توزین که بتواند خطای توزین با باسکول را پوشش دهد، زمان آزمایش‌ها طولانی‌تر شده و به چندین روز متوالی افزایش می یابد، لذا دبی حداقل، 120 لیتر در ثانیه انتخاب شد) و تا دبی مقطع پر[1] در مدل 280 لیتر در ثانیه در 4 دبی انجام پذیرفت. مدت زمان انجام آزمایش برای شکل‌گیری بستر بستگی به دبی و یا قدرت جریان حلزونی دارد. در مقادیر بالاتر دبی، قدرت حمل رسوب در طول بازه افزایش یافته و بستر سریع‌تر شکل مورد نظر خود را پیدا می‌نماید، لذا مدت زمان آزمایش از 8 تا 32 ساعت وابسته به دبی متغیر بود. همزمان با جریان، تزریق رسوب بصورت پیوسته صورت می‌پذیرفت. بعد از حصول نسبی تعادل در آبراهه (تثبیت شیب سطح آب)، اندازه‌گیری کمّی پارامترهای جریان و برداشت کیفی الگوی جریان صورت می‌پذیرفت. پارامترهای کمّی جریان شامل برداشت تراز سطح آب در مقاطع مختلف، خصوصاً مقطع کنترل در قوس میانی (بالادست قوس دوم) و پایین‌دست این قوس (انتهای بازه مستقیم) و نیز شیب سطح آب در مقاطع کنترل با دوره تناوب یک ساعت صورت می‌پذیرفت. روز بعد از آزمایش که بستر کاملاً زهکشی شده، امکان برداشت کمّی تغییرات بستر، موقعیت چاله و نیز جمع آوری و توزین میزان رسوبات تله‌اندازی شده در حوضچه بعد از آبگیر (برای تعیین وزن و محاسبه نسبت رسوب ورودی به آبگیر) فراهم می‌شود. اندازه‌گیری پارامترهای کیفی در حین آزمایش بعد از حصول تعادل، شامل برداشت الگوی جریان به روش‌های ردیابی رنگی با تزریق مواد رنگی و رهگیری با کاربرد نوارهای رنگی و نیز اندازه‌گیری سرعت جریان در سطح و عمق صورت می پذیرفت.

1. Bank Full

این آزمایش‌ها به ازای دبی‌های مختلف و نسبت های انحراف جریان به آبگیر در دو زوایهٔ آبگیری تکرار شدند. لازم به ذکر است که معیار تعادل نسبی، تثبیت شیب سطح‌آب در آزمایشات روزهای متوالی می‌باشد.

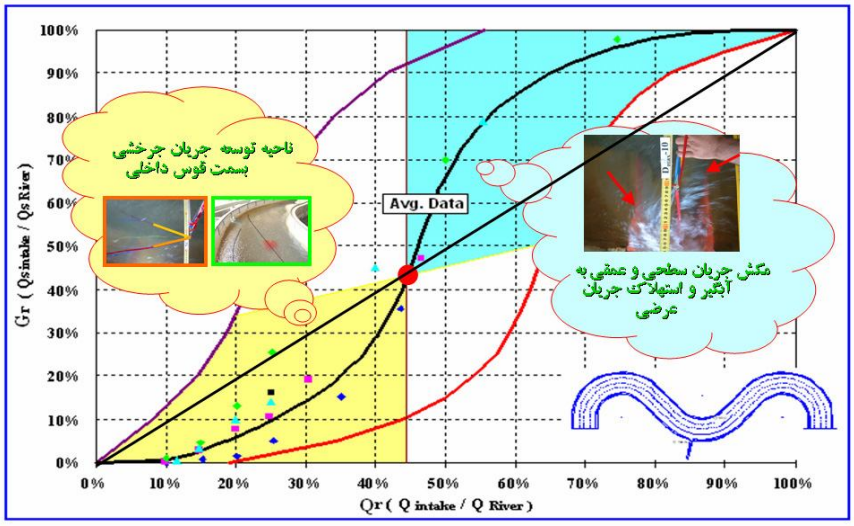
محدودهٔ عدد فرود (بدون بعد) حاصل در مقطع کنترل ورودی به قوس مرکزی (دوم) در دبی‌های آزمایشی از 0/31 تا 0/74 بدست آمد. برای عدد رینولدز ذره در این مقطع (رابطه 1)، حداقل مقدار 144 حاصل شده است.

مهمترین تجهیزات مورد استفاده دراندازه‌گیری‌های کمّی شامل: بسترنگار، اندازه‌گیر نقطه‌ای سطح آب، سرعت‌سنج ADV، باسکول برای توزین رسوبات و تجهیزات اندازه‌گیر کیفی جریان شامل: نوارهای رنگی، مواد رنگی، دوربین دیجیتال عکس‌برداری و فیلم‌برداری بوده است.

3- بررسی کیفی نتایج

به ازای دبی‌های 120، 180، 230 و280 (دبی مقطع پر آبراهه) لیتر در ثانیه، تأثیر انحراف جریان به ازای درصدهای مختلف انحراف جریان تا بازشدگی کامل دریچهٔ آبگیر (شرایط بدون اعمال کنترل بر خروجی جریان از کانال آبگیر= ظرفیت آبگذری سردهانه و کانال آبگیر) مقدار رسوب ورودی به آبگیر اندازه‌گیری شده است. حداقل نسبت انحراف جریان 10 درصد انتخاب گردید. علت این انتخاب ورود ناچیز رسوب به آبگیر در درصدهای پایین‌تر بوده است. البته با استخراج منحنی برازش بر بقیه نتایج می‌توان برای درصدهای کمتر، میزان رسوب ورودی به آبگیر را برآورد نمود.

تأثیر انحراف جریان بر ورود رسوب به آبگیر در شکل 4 ارائه شده است. تا نسبت‌هایی از انحراف جریان، الگوی حاکم در قوس خارجی آبراهه، جریان ثانویه می‌باشد و این جریان باعث دورسازی رسوبات از قوس خارجی (محل استقرار سردهانه آبگیر) می‌شود، لذا نسبت رسوب ورودی به آبگیر کمتر از نسبت انحراف جریان می‌شود. با افزایش نسبت انحراف، قدرت جریان ثانویه به مرورکاهش می‌یابد تا این که در نسبتی از انحراف جریان (نقطهٔ عطف منحنی، ناحیهٔ اول منحنی شکل 4) الگوی جریان در قوس ناگهانی تغییر نموده و نسبت انحراف رسوب با افزایش انحراف جریان رشد بیشتری می‌کند. از این نقطه به بعد جریان ثانویه کاملاً مضمحل شده است و جریانی یک‌سویه به سمت آبگیر شکل گرفته است (ناحیهٔ دوم منحنی شکل 4).



شکل 4 تأثیر انحراف جریان بر نسبت رسوب ورودی به آبگیر و شرایط جریان در سردهانه

از عوامل مهم تأثیرگذار بر قدرت جریان ثانویه عمق آب در قوس می‌باشد. در اثر افزایش دبی آبراهه، سرعت جریان سطحی افزایش می‌یابد و باعث تشدید گرادیان سرعت در قوس و نتیجتاً افزایش قدرت جریان ثانویه می‌شود و لذا شرایط را برای کاهش ورود رسوب به آبگیر در درصدهای انحراف بالاتر نسبت به عمق کمتر آب فراهم می‌کند. از دیگر عوامل مؤثر بر ورود رسوب به آبگیر زاویهٔ آبگیری می‌باشد که در ادامه بررسی شده است.

3-1- زاویهٔ آبگیری 52 درجه

الگوی جریان ورودی به سردهانه به دلیل هم‌راستا بودن آبگیر با جریان ورودی به قوس، دارای تقارن نسبی در عرض آبگیر بوده و تقریباً بصورت یکنواخت وارد آبگیر می‌شود و لذا در این زاویه، از ظرفیت کامل سردهانه برای آبگذری استفاده شده است. شرایط جریان در سردهانه نشان می‌دهد در 10 درصد انحراف دبی، جریان ثانویه در لبهٔ بالادستی سردهانهٔ آبگیر به قوت وجود دارد و نوار رنگی در سطح، جریان را بسمت قوس خارجی و نوار رنگی در کف جریان را به سمت داخلی قوس متمایل نشان می‌دهد، (شکل 5- الف). از این ناحیه به دلیل غلبهٔ جریان ثانویه بر جریان ورودی به آبگیر که معکوس یکدیگر می‌باشند، رسوبی وارد سردهانهٔ آبگیر نمی‌شود، ولی در حوالی لبهٔ پایینی آبگیر، قدرت جریان ثانویه کاهش یافته و امکان ورود رسوب به آبگیر به همراه جریان ورودی بصورت محدود فراهم شده است (شکل 5- ب). رسوبات ورودی از لبهٔ پایینی سردهانه به آبگیر تحت جریان چرخشی که از ابتدای آن شکل گرفته بصورت اریب به سمت وجه مقابل (لبهٔ بالایی) آبگیر منتقل می‌شود. البته در بقیه نسبت‌های انحراف جریان، این الگو نیز تکرار شده است.

با افزایش درصد انحراف، مولفهٔ سرعت جریان ورودی به آبگیر بر جریان ثانویه غالب شده و امکان ورود رسوب از قسمت‌های پایینی سردهانهٔ آبگیر را به بالادست توسعه می‌دهد. در نسبت انحراف حداکثر (باز شدگی کامل دریچهٔ آبگیر) هنوز هم منطقهٔ ورود رسوب به لبه بالائی سردهانه نمی‌رسد (ابوالقاسمی و همکاران، 1390).

3-2- زاویهٔ آبگیری 90 درجه

الگوی عمومی جریان ورودی به آبگیر در سردهانه شامل دو ناحیه می‌شود.

الف- الگوی جریان ب- الگوی رسوب

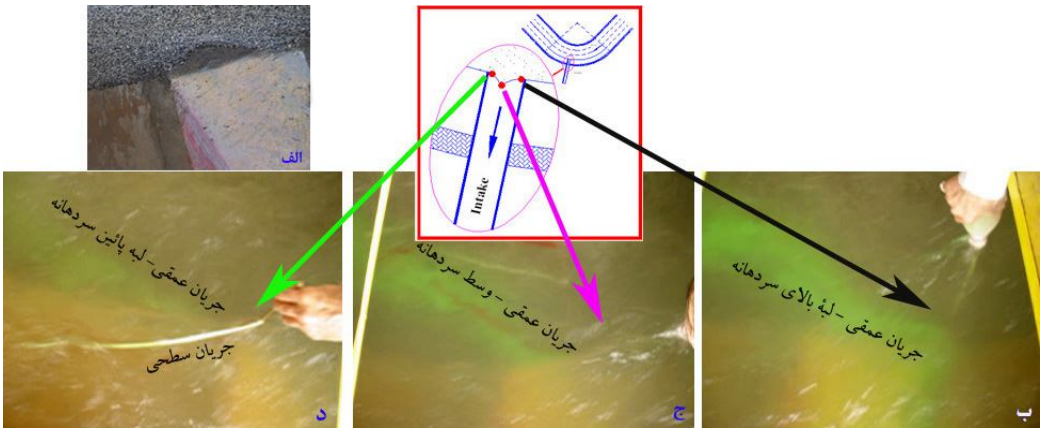
شکل 5 الگوی جریان و رسوب در سردهانهٔ آبگیر در زاویهٔ انحراف 52 درجه به ازای 10 درصد انحراف جریان

ناحیهٔ اول شامل جریان چرخشی است که بصورت مخروطی در داخل آبگیر از پشت لبه بالادست سردهانه شروع و به داخل آبگیر توسعه می‌یابد. ناحیه دوم شامل جریان طولی است که در محدودهٔ لبهٔ پایین‌دست سردهانه آبگیر از سطح جریان در نسبت‌های کم انحراف، به عمق در نسبت‌های انحراف زیاد بسمت آبگیر توسعه می‌یابد. رسوبات ورودی به سردهانه تحت تأثیر این دو جریان وارد آبگیر می‌شوند. جریان چرخشی لبهٔ بالادست آبگیر، رسوبات را از کنار لبهٔ بالادست سردهانه در عمق به داخل آبگیر منتقل می‌کند و جریان دوم، رسوب‌ها را متأثر از دو جریان انحرافی و جریان ثانویه که جهتی معکوس با یکدیگر دارند، وارد آبگیر می‌کند. هرچه درصد انحراف جریان بیشتر باشد، مؤلفه طولی سرعت به سمت آبگیر افزایش یافته و نیز مشارکت جریان ورودی به آن در عمق توسعه بیشتری می‌یابد و متقابلاً قدرت جریان ثانویه در اطراف سردهانه استهلاک بیشتری پیدا می‌کند، لذا حجم رسوب‌های بیشتری را از این ناحیه وارد آبگیر می‌کند. در این حالت ابعاد زبانهٔ رسوب ورودی (بصورت مثلثی شکل) به داخل سردهانه رشد نموده و به داخل آبگیر و بسمت وجه پایین‌دست سردهانه پیشروی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که در درصدهای کم انحراف، جریان ثانویه در قوس خارجی و حتی در عرض سردهانه در عمق، باعث دورسازی رسوب‌ها از آبگیر شده و توسعهٔ طولی و عرضی زبانهٔ رسوبی به داخل سردهانه را کاهش می‌دهد. به ازای 10 درصد انحراف، جریان ورودی به آبگیر نمی‌تواند پیش آمدگی ماسه‌ای را به داخل سردهانه توسعه دهد (شکل 6- الف) و تا کمتر از یک‌سوم عرض سردهانهٔ آبگیر (در ناحیهٔ بالادست) سطح رسوب ترفیع یافته و شرایط ورود رسوب به آبگیر را در این قسمت فراهم می‌کند. با توجه به وجود جریان حلزونی قوی در قوس، از این قسمت مقدار جزئی از رسوب از پشت لبهٔ بالادست سردهانه اجازه ورود به آبگیر را پیدا نموده است. پخشیدگی رنگ در شکل 6- ب،ج ود، نشان دهنده الگوی جریان در لبهٔ بالادست سردهانهٔ آبگیر و میانه و نیز پایین‌دست سردهانهٔ آبگیر می‌باشد، بخشی از رنگ به داخل آبگیر و بخش دیگر تحت تأثیر جریان ثانویه از سردهانه دور شده است. در اثر افزایش انحراف جریان، زبانهٔ رسوب به داخل آبگیر کشیده می‌شود و نیز عرض محدودهٔ ورود رسوب در وجه بالادست زبانهٔ رسوب افزایش می‌یابد.

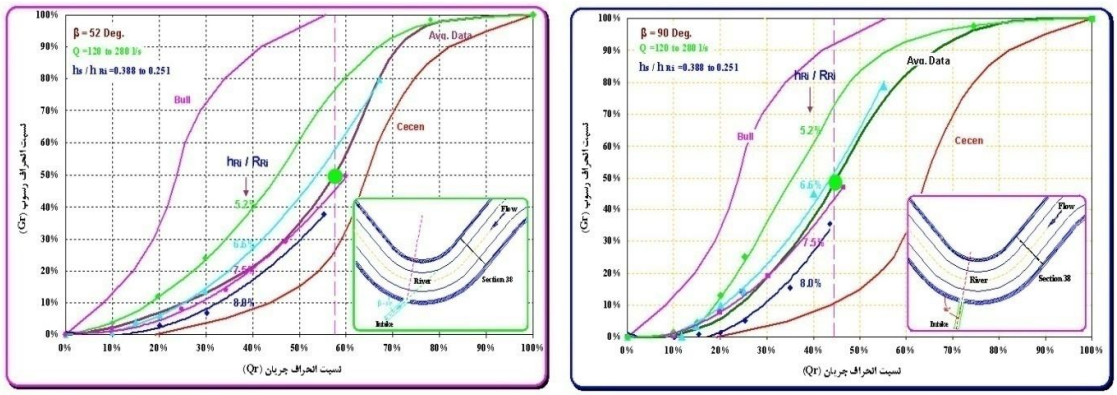
4- بررسی کمّی نتایج

4-1- انحراف رسوب و زاویهٔ آبگیری

درصورتی که نتایج مربوط به نسبت رسوب در اثر انحراف جریان در تمام دبی‌ها (120، 180، 230 و 280 لیتر درثانیه) برای دو زاویهٔ انحراف 90 و 52 درجه ترسیم شده (شکل 7) و سپس منحنی برازش بر نتایج هر زاویه استخراج شود، برای هر زاویه یک منحنی به شکل S (شکل 8) بدست می‌آید. نقطه انتهایی منحنی معرف این است که با انحراف کل جریان به آبگیر، کل رسوب‌ها وارد آبگیر می‌شود و نقطه ابتدایی به این معناست که در شرایط عدم انحراف جریان، رسوبی وارد آبگیر نخواهد شد. در هر یک از این منحنی‌ها یک نقطه عطف وجود دارد (دایره توپر در اشکال) که جهت انحنای قوس، در این مکان عوض می‌شود. لذا از این نقطه به بعد با افزایش نسبت انحراف جریان، نسبت رسوب ورودی به آبگیر افزایش بیشتری نسبت به قبل پیدا می‌کند. قبل از این نقطه با افزایش درصد انحراف جریان، میزان رشد نسبت انحراف رسوب کمتر از نسبت جریان می‌باشد، این نقاط معرف تغییر رژیم جریان در خم در اثر افزایش نسبت انحراف می‌باشد. همان‌طور که بیان شد عوامل تأثیرگذار بر این پدیده عبارتند از جریان ثانویه، نسبت انحراف و زاویه آبگیری، که تأثیر این سه عامل باعث این شکل از تغییرات شده است.

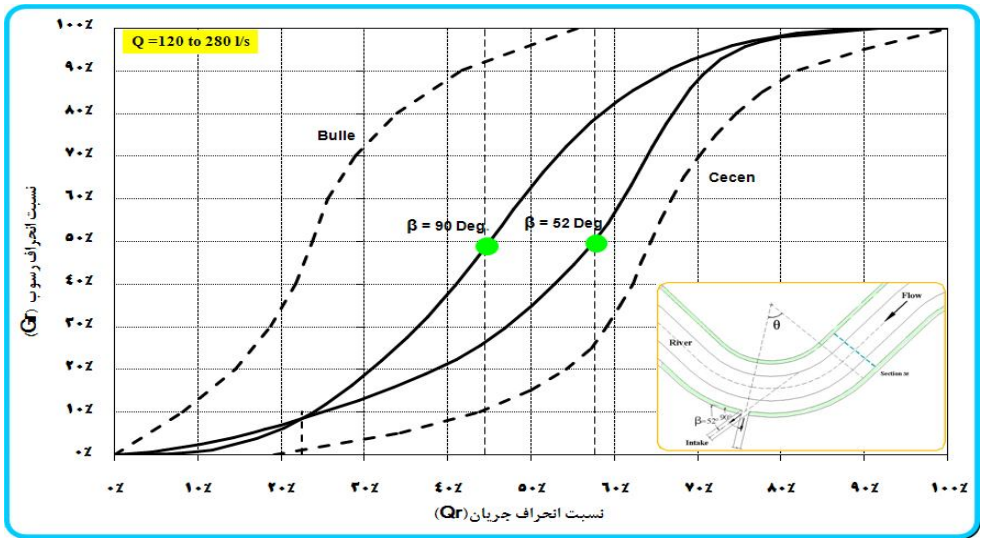


شکل 6 الف- الگوی رسوب و جریان در سردهانهٔ آبگیر (ب- لبهٔ بالا، ج- محور و د-لبهٔ پائین) در زاویهٔ انحراف 90 درجه به ازای 10 درصد انحراف جریان



ب- 52 درجه الف- 90 درجه

شکل 7 نسبت انحراف جریان به نسبت رسوب ورودی به آبگیر در دو زاویهٔ آبگیری به ازای دبی‌های مختلف آبراهه



شکل 8 نسبت انحراف جریان به نسبت رسوب ورودی به آبگیر در دو زاویهٔ آبگیری 90 و 52 درجه

در بالای نقطهٔ عطف، به دلیل انحراف زیاد جریان به آبگیر تأثیر جریان ثانویه در سردهانه کاملاً مستهلک شده و جریانی تقریباً یک‌سویه به سمت آبگیر شکل گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تا 22 درصد انحراف جریان، زاویهٔ آبگیری 90 درجه نسبت به 52 درجه میزان رسوب کمتری را وارد آبگیر می‌کند، به این علت که زاویهٔ آبگیری 90 درجه باعث تحمیل چرخشی تند به جریان سطحی می‌شود و قدرت جریان ثانویه که تابعی از زاویه بین جریان سطحی و عمقی (زاویه حدود 90 درجه- شکل 6) است، افزایش یافته و لذا رسوب ورودی به آبگیر کمتر می‌گردد. در نسبت‌های بالاتر، این روال برعکس می‌شود. علت این است که ناحیهٔ برگشتی جریان سطحی در این زاویه، به سمت بارهای ماسه‌ای در قوس داخلی نزدیک می‌شود و این جریان، مشابه با جریان ثانویه در خم که قدرت حمل رسوب بالایی دارد، رسوب‌های بیشتری را از این ناحیه برداشته و با رسوبات جریان وارد آبگیر می‌کند. در زاویهٔ 52 درجه به دلیل هم‌راستایی جریان ورودی به قوس با آبگیر، زاویهٔ بین جریان سطحی و عمقی در تمام نسبت‌های انحراف، حاده می‌باشد و لذا آهنگ تغییرات نسبت انحراف رسوب به انحراف جریان ملایم می‌باشد.

با توجه به نمودارهای حاصل، مشخص شد که شکل عمومی رابطهٔ ریاضی نسبت رسوب به نسبت جریان به شکل S می‌باشد، با توجه به اینکه در ابتدا و انتهای منحنی، جهت انحنا عوض می‌شود، S نمی‌تواند برازش خوبی بر نتایج در درصدهای کم و زیاد انحراف جریان داشته باشد. برای اصلاح از معادلهٔ درجه 3 بصورت تلفیقی با معادلهٔ S به روش سعی و خطا، بهترین شکل برازشی بر نتایج بدست آمد. درصورتی که در نظر باشد، رابطه‌ای تا نقطهٔ عطف منحنی S استخراج شود، معادله درجه 3 می‌تواند نتایج بهتری را در این محدوده ارائه نماید. رابطهٔ 4-1 معادلهٔ ریاضی برای زاویهٔ آبگیری 90 درجه و رابطهٔ 4-2 برای زاویه آبگیری 52 درجه بهمراه ضریب همبستگی (R^2) مربوطه در ذیل ارائه شده است. رابطهٔ 4-3 معرف نسبت رسوب به جریان با لحاظ زاویه آبگیری می‌باشد. برای برازش بر اطلاعات از نرم‌افزار SPSS استفاده شده است.

- زاویهٔ آبگیری 90 درجه

$$G_r = Exp\left(1.47397 - 0.9090 / Q_r\right) - 0.773 * Q_r^{\,3}$$
$$\rightarrow \quad R^2 = 0.997 \qquad (1\text{-}4)$$

- زاویهٔ آبگیری 52 درجه

$$G_r = Exp\left(2.82327 - 1.7876 / Q_r\right) - 2.2366 * Q_r^{\,3} + 0.38926 * Q_r$$
$$\rightarrow \quad R^2 = 0.992 \qquad (2\text{-}4)$$

- رابطهٔ کلی (تلفیقی- دو زاویه)

$$G_r = 0.02114 * Q_r^{\,1.88571} * \beta^{1.137936} - 0.00032 * Q_r^{\,3} * \beta^2$$
$$\rightarrow \quad R^2 = 0.956 \qquad (3\text{-}4)$$

آبگیری از رودخانه، بدون بند انحرافی تا 25 درصد توصیه شده است (Razvan, 1989)، لذا نتایج انحراف بیشتر از این درصد، جنبه کاربردی ندارد. بدین منظور روابط ریاضی فوق‌الذکر برای محدوده کمتر از 25 درصد انحراف جریان با دقت بالاتر به شرح ذیل تولید شده است (شکل 9).

- زاویهٔ آبگیری 90 درجه

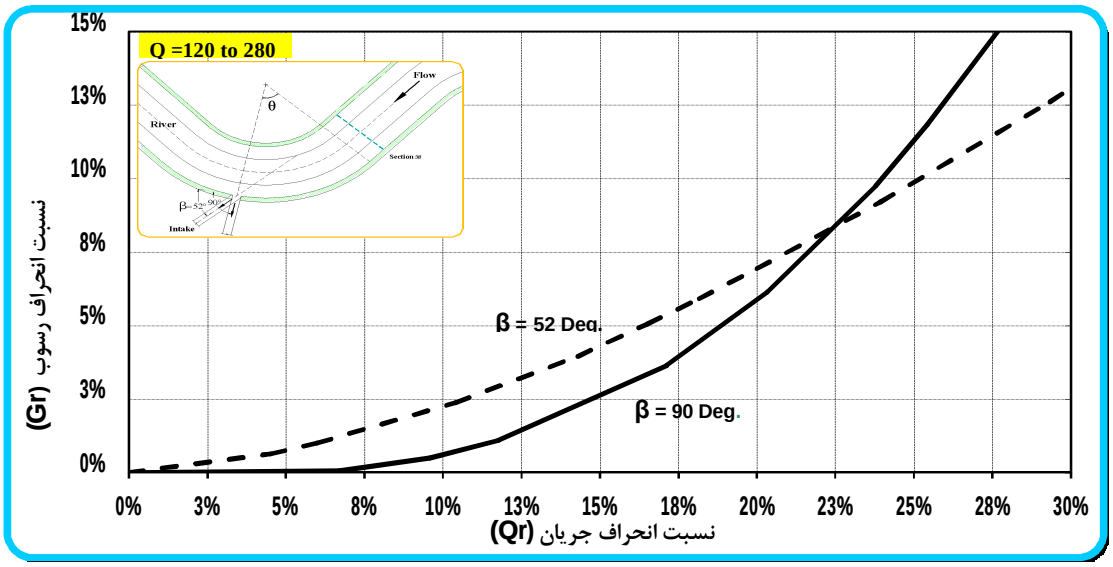
$$G_r = 5.930 * Q_r^{\,3} + 0.542 * Q_r^{\,2} - 0.054 * Q_r$$
$$\rightarrow \quad R^2 = 0.991 \qquad (4\text{-}4)$$

- زاویهٔ آبگیری 52 درجه

$$G_r = -1.724 * Q_r^{\,3} + 1.745 * Q_r^{\,2} + 0.065 * Q_r$$
$$\rightarrow \quad R^2 = 0.991 \qquad (5\text{-}4)$$

- رابطهٔ کلی

$$G_r = 7.192 * Q_r^{\,1.0222} * \beta^{-0.0885} + 0.00000787 * Q_r^{\,3} * \beta^3 - 4.592 * Q_r$$
$$\rightarrow R^2 = 0.99 \qquad (6\text{-}4)$$



شکل 9 نسبت انحراف جریان به نسبت رسوب ورودی به آبگیر در دو زاویهٔ آبگیری 90 و 52 درجه در نسبت‌های پایین انحراف

2-4- ظرفیت آبگذری آبگیر

مهم‌ترین عوامل تأثیر گذار بر ظرفیت آبگذری یا راندمان آبگیری، زاویهٔ چرخش جریان در جلوی سردهانهٔ آبگیر و الگوی جریان در سردهانه و نیز در طول کانال آبگیر می‌باشد. شکستگی خطوط جریان در زوایه‌های تند همانند 90 درجه باعث می‌شود بخشی از سطح مقطع ورودی سردهانهٔ آبگیر در ناحیهٔ بالادست، به دلیل افت جریان ناشی از چرخش تند خطوط سرعت، مشارکت متقارن و یکسانی در آبگذری با وجه مقابل سردهانه نداشته باشند. در زاویه‌های ملایم آبگیری همانند 52 درجه، جریان با توزیع سرعت تقریباً یکنواخت در عرض، وارد آبگیر شده و کل عرض سردهانه در عبور جریان مشارکت می‌نمایند. وجود جریان‌های دو جهته در جریان عمقی سردهانه باعث کاهش ظرفیت آبگذری سردهانه می‌شود. در زاویه آبگیری 90 درجه در غالب نسبت‌های انحراف این شرایط مشاهده می‌شود. الگوی جریان در طول آبگیر که متأثر از شرایط سردهانه می‌باشد، نیز عامل تأثیر گذار دیگر بر ظرفیت آبگذری آبگیر می‌باشد. چرخش عرضی جریان در طول کانال آبگیر می‌تواند باعث کم نمودن سطح مؤثر جریان و افت جریان عبوری شود. نتایج نشان می‌دهد که ظرفیت آبگذری آبگیر در زاویه 90 درجه نسبت به 52 درجه در شرایط مختلف، حدوداً 21 درصد کاهش داشته است.

5- شاخص قدرت جریان ثانویه

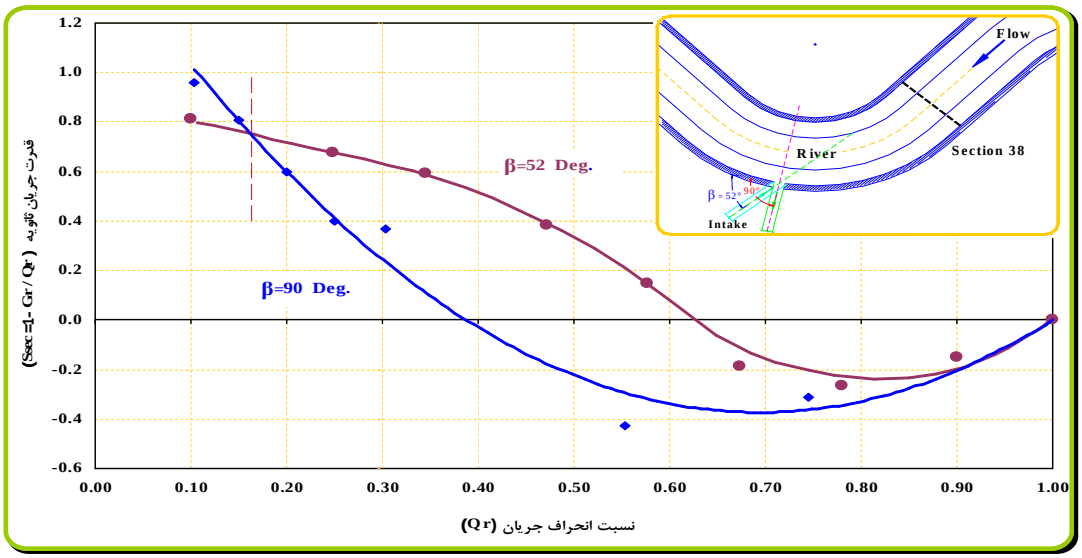
مشخص گردید جریان ثانویه در قوس خارجی آبراهه، نقش اصلی در کاهش ورود رسوب به آبگیر را ایفا می‌کند. این جریان در ورودی آبگیر (سردهانه) تحت تأثیر زاویهٔ آبگیری، شرایط متمایزی را بوجود می‌آورد و به عبارت دیگر رسوب ورودی به آبگیر را متأثر از زاویهٔ آبگیری می‌نماید که این تأثیر در نسبت‌های مختلف انحراف متفاوت است. اگر شاخص قدرت جریان ثانویه در سردهانه آبگیر توسط رابطهٔ (5) تعریف شود.

$$P_{Sec} = 1 - \frac{Gr}{Qr} \qquad (5)$$

مشخص است هر چقدر مقدار این پارامتر به عدد 1 نزدیک‌تر شود، قدرت جریان ثانویه در قوس در مجاورت سردهانهٔ آبگیر افزایش یافته است. حداکثر آن، وقتی حاصل می‌شود که نسبت رسوب منحرف شده به مقدار صفر نزدیک شده و یا نسبت دبی انحرافی به عدد بزرگی درمقایسه با نسبت رسوب، متمایل گردیده باشد. با نزدیک

شدن این پارامتر بـه مقـدار صـفر، یعنـی نسـبت رسـوب منحرف شده برابر نسبت انحراف جریان می‌باشد و لذا به میزانی که دبی منحرف گردیده، همان میزان رسـوب وارد آبگیر شده است و جریان ثانویه دخالتی در کاهش رسوب به آبگیر نداشته است. در این حالت جریان ثانویـه کـاملاً مستهلک شده اسـت. منحنـی تغییـرات شـاخص قـدرت جریان ثانویه به ازای درصدهای مختلف انحراف جریـان برای دو زاویهٔ آبگیری 90 و 52 درجه در شکل 10 ترسیم شده است.

منحنی‌ها در دو نقطه با محور طـول‌هـا (نسـبت انحـراف جریان) تلاقی دارد. نقطـهٔ اول محلـی اسـت کـه نسـبت رسوب ورودی به آبگیر با نسبت جریان انحرافی مسـاوی شده اسـت. ایـن مکـان حـوالی نقطـهٔ عطـف منحنـی S می‌باشد. قبل از این نقطه اثر جریان ثانویه وجـود داشـته، ولی بعـد از آن جریـان ثانویـه مسـتهلک شـده و الگـوی جریان در سردهانه، متأثر از زاویـهٔ آبگیـری شـکل گرفتـه است. در زاویه انحراف 90 درجه، کاهش شاخص قدرت جریان ثانویه، سریع‌تر از زاویهٔ آبگیـری 52 درجـه اتفـاق افتاده است. علت این امر چرخش جریان ورودی به آبگیر در زاویهٔ 90 درجه به سمت قوس داخلی آبراهه و نزدیک شدن به بارهای رسوبی متحرک در قـوس داخلـی آبراهـه می‌باشد، لذا رسوب بیشتری را وارد آبگیـر نمـوده اسـت. کاهش تنزلی این شاخص با افزایش نسبت انحراف جریان به شرایط حداقلی می‌رسد و بعد از آن تا انحـراف کامـل جریان روند افزایشی پیدا می‌کند تـا در نقطـهٔ تلاقـی دوم منحنی با محور طول‌ها، مسیر آبگیر تبـدیل بـه آبراهـه در محل سردهانه شده و تمام رسوب بـا جریـان وارد آبگیـر شده است. از حدود 90% انحراف جریان، تـأثیر زاویـه در انحراف رسوب کاملاً از بین رفته و رفتار دو زاویه یکسان می‌باشد. قبل از محـل تلاقـی دو منحنـی (16/3 درصـد) شاخص قدرت جریان ثانویه در زاویه 90 درجه بیشـتر از 52 درجه و برای بقیه درصدهای انحراف جریان، قـدرت جریان ثانویه در زاویه آبگیری 52 درجه بیشتر شده است. این ساز و کار مؤید نتایج قبل می‌باشد که تا درصـدی از جریان منحرف شده، میزان رسـوب ورودی بـه آبگیـر در زاویهٔ آبگیری 90 درجه کمتر از 52 درجه بدست آمد کـه اثر جریان ثانویه در قوس خارجی و زاویهٔ آبگیری باعـث آن شده است.



شکل 10 رابطه نسبت انحراف جریان به شاخص قدرت جریان ثانویه برای زوایای آبگیری 90 و 52 درجه

6- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر میزان انحراف جریان به آبگیر در میزان رسوب ورودی به آبگیر در یک مدل آزمایشگاهی آبراهه سینوسی، به ازای دبی‌های مختلف و آبگیر با زاویهٔ انحراف 90 و 52 درجه (دو زاویهٔ حدی) مورد بررسی قرار گرفته و نتایج زیر حاصل شده است:

- با افزایش درصد انحراف جریان، سرعت جریان بسمت آبگیر افزایش یافته و باعث استهلاک بیشتر قدرت جریان ثانویه جلوی سردهانهٔ آبگیر و ورود بیشتر رسوبات به آبگیر می‌شود. استهلاک قدرت جریان ثانویه از لبهٔ پائینی سردهانهٔ آبگیر شروع و به بالادست آن در انحراف‌های بیشتر جریان توسعه پیدا می‌کند.

- منحنی نسبت انحراف جریان به نسبت رسوب ورودی به آبگیر به ازای تمامی دبی‌ها و زوایای آبگیری به شکل S می‌باشد. در نسبت‌های انحراف کم جریان (قبل از نقطه عطف)، تأثیر انحراف بخشی از جریان باعث استهلاک کامل جریان ثانویه در قوس نشده و همچنان این جریان، باعث دورسازی رسوبات از قوس خارجی می‌شود. تا این نقطه، با افزایش درصد انحراف جریان، میزان رشد نسبت انحراف رسوب کمتر از نسبت انحراف جریان است. در بالای نقطهٔ عطف، به دلیل انحراف زیاد جریان به آبگیر، الگوی جریان در خم تأثیر بیشتری از شرایط آبگیری پیدا می‌کند و جریان عرضی قوی‌تری به سمت قوس خارجی، در جهت مخالف جریان ثانویه که کاملاً مستهلک شده شکل می‌گیرد. به عبارت دیگر در سردهانه جریانی تقریباً یک‌سویه بسمت آبگیر بوجود می‌آید.

- تا نسبت انحراف 22 درصد، نسبت رسوب ورودی به آبگیر 90 درجه کمتر از 52 درجه می‌باشد و بیشتر از این میزان انحراف، شرایط معکوس می‌شود.

- ظرفیت آبگذری سردهانهٔ آبگیر متأثر از زاویه آبگیری است. در زاویه 90 درجه، ظرفیت آبگذری در شرایط مختلف حدود 21 درصد نسبت به 52 درجه کاهش ظرفیت داشته است.

- شدت کاهش شاخص قدرت جریان ثانویه در زاویهٔ آبگیری 90 درجه تا نسبت انحراف 16/3 درصد، نسبت به زاویهٔ آبگیری 52 درجه، بیشتر است و در بقیه نسبت‌های انحراف جریان این روند معکوس می‌شود و میزان رسوب ورودی به آبگیر 90 درجه، افزایش تصاعدی پیدا می‌کند. لذا تا نسبت‌های کم انحراف جریان تا حدود 22 درصد، زاویهٔ آبگیری 90 درجه، از نظر کاهش رسوب ورودی به آبگیر، مطلوب‌تر است.

- با توجه به نتایج این تحقیق، رابطه ریاضی نسبت رسوب به نسبت جریان در آبگیر با زاویه انحراف 52 و 90 درجه، بصورت معادلهٔ درجه 3 (در ابتدا و انتها) با تلفیق با معادلهٔ S حاصل شده است.

7- فهرست علایم

اندازه ذره 65 درصد ریزتر	d_{65}
نسبت رسوب انحرافی به آبگیر	Gr
قدرت جریان ثانویه در سردهانهٔ آبگیری	Psec
نسبت انحراف جریان به آبگیر	Qr
شعاع هیدرولیکی	R
ضریب همبستگی	R^2
شیب سطح آب	S
انحراف معیار ذرات مصالح	σ_g
زاویهٔ آبگیری	β
لزجت سینماتیکی سیال	υ

8- منابع

ابوالقاسمی، م. قدسیان، م. ایوب‌زاده، س ع. و شفاعی بجستان، م. (1384). تعیین مکان شکل‌گیری چاله در آبراه سینوسی. مجله هیدرولیک، جلد 1 شماره 1، ص. 13.

ابوالقاسمی، م. قدسیان، م. و سنگین‌آبادی، ح. (1390). تأثیر انحراف جریان بر رسوب ورودی به آبگیر با زاویه انحراف 52 درجه در رودخانه سینوسی. مجله هیدرولیک، دوره ششم، شماره اول، ص. 41.

پیرستانی، م.ر. (1383). بررسی الگوی جریان و آبشستگی در دهانه ورودی آبگیر کانال‌های دارای انحنا. رساله دکتری رشته مهندسی آبیاری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات.

سیدیان، م. و شفاعی بجستان، م. (1389). مقایسه رسوب معلق ورودی به آبگیر با تغییر زاویه دیواره کانال اصلی از قائم به 45 درجه. نشریه آب و خاک، جلد 24، شماره 5، ص. 994 .

شفاعی بجستان، م. (1378). هیدرولیک رسوب، انتشارات دانشگاه شهید چمران.

نظری، س. (1377). بررسی آزمایشگاهی تأثیر زاویه انحراف، ارتفاع آبپایه آبگیرها در قوس‌های رودخانه‌ای بر میزان رسوبات. پایان‌نامه کارشناسی ارشد تأسیسات آبیاری دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز.

دهقانی، ا. ا. (1384). مطالعه آزمایشگاهی کنترل رسوب به آبگیر جانبی در قوس 180 درجه. رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس. عباسی، ع. ا. (1382). مطالعه آزمایشگاهی کنترل رسوب در آبگیرهای جانبی در مسیرهای مستقیم. رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.

ایزدپناه، ز. (1382)، تأثیر انحراف جریان در خم 90 درجه، رساله دکتری، تأسیسات آبیاری دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز.

Barkdoll, B. (1977). Sediment control at lateral diversion. Ph.D. dissertation, Civil and Environmental Engineering, University of Iowa.

Booij R. (2002). Modeling of secondary flow structure in river bends, River Flow 2002, pp. 127-133.

Karami Moghadam M., Shafai Bajestan M. and Sedghi H. (2010). Sediment entry investigation at the 30 degree water intake installed at a trapezoidal channel, World Applied Sciences Journal 11 (1): 82-88, 2010

Prezedwojski B., Blazejewski R. and Pilarczyk K.W. (1995). *River training techniques*, A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, pp 70 - 90.

Razvan, E. (1989). *River intake and diversion*. Elsevier Science Publishing Company Inc. New York, NY. 10010, U.S.A.

Raudkivi, A. (1993), *Sedimentation, exclusion and removal of sediment from diverted water*, IAHR, Hydraulic Structures Design Manual, pp. 63-87.

Schoklitsch, A. (1937). *Hydraulic structures*, Vol. 2, Translated by S. Shulits, American Society of Mechanical Engineers, New York, N.Y., pp. 722-751.