

مطالعه آزمایشگاهی آستانه حرکت سنگدانه‌ها و نواحی مستعد خرابی آبشکن توده سنگی دافع در شرایط مستغرق

رضا صادقی دودران^۱، سید علی اکبر صالحی نیشابوری^{۲*}، سید حسین مهاجری^۳

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۳/۸ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۵/۵ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۵/۲۱)

چکیده

در این مقاله به مطالعه آزمایشگاهی اثر پارامترهای مختلف بر سرعت آستانه حرکت سنگدانه‌های تشکیل دهنده آبشکن دافع و تشخیص نواحی مستعد خرابی در این نوع آبشکن‌ها پرداخته شده است. بدین منظور، سرعت آستانه حرکت تک آبشکن توده سنگی دافع با زاویه‌های قرارگیری ۱۰۰، ۱۱۰ و ۱۲۰ درجه نسبت به راستای عمومی جریان، با اندازه قطر متوسط سنگدانه‌های ۳/۵۵، ۷/۱ و ۱۱ میلی متر و با درصد استغراق‌های ۳۱/۲، ۵۰ و ۶۸/۷ درصد مورد مطالعه قرار گرفت. در طی آزمایش از دوربین به منظور ثبت نواحی شروع خرابی استفاده شد و در نهایت مشخصات جریان به منظور بررسی علت خرابی‌ها با برداشت پارامترهای آشفتگی اطراف آبشکن بوسیله سرعت سنج سه بعدی ADV، بررسی شد. نتایج حاصل نشان داد که افزایش زاویه قرارگیری آبشکن به میزان ۱۰ درجه، باعث کاهش سرعت آستانه حرکت به میزان متوسط ۵/۳۵ درصد می‌شود. دو ناحیه، محل اتصال دماغه به شیب بالادست و محل اتصال دماغه به شیب پایین دست جزو نواحی مستعد خرابی آبشکن توده سنگی دافع بوده و اغلب خرابی‌ها از این نواحی شروع می‌شوند. تشکیل نواحی دو گانه تشدید سرعت و گستردگی آن در نواحی تاج آبشکن، ایجاد حداکثر انرژی جنبشی آشفتگی و تنش‌های رینولدز در نواحی مستعد مذکور دلیلی بر شروع خرابی می‌باشند. بیشینه مقدار مولفه $\frac{u'v'}{u_*^2}$ در محل اتصال دماغه به شیب بالادست، نوک آبشکن و در امتداد لایه برشی شکل می‌گیرد که باعث حرکت سنگدانه‌ها از این قسمت شده و با توجه به مقادیر منفی تنش‌های $\frac{u'w'}{u_*^2}$ و $\frac{v'w'}{u_*^2}$ تجمع سنگدانه‌ها در ناحیه چرخشی پشت آبشکن اتفاق می‌افتد.

واژه‌های کلیدی: آبشکن توده‌سنگی، آستانه حرکت رسوب، میدان جریان، کانال روباز، آبشکن دافع.

مقدمه

بهبود شرایط زیستی موجودات داخل رودخانه و غیره می‌باشد (Asadzadeh, 2013; Vaghefi, 2010). همه ساله با بارش نزولات آسمانی و وقوع سیل در رودخانه‌ها، خسارت‌های قابل توجهی به ساکنان حاشیه رودخانه و سرشاخه‌های آن وارد می‌شود. در ایران نیز به علت آورد رسوب قابل توجه بسیاری از رودخانه‌ها و نیاز به ساماندهی در اغلب موارد، استفاده از آبشکن رایج می‌باشد (Jafari et al., 2010). به عنوان مثال خسارات احتمالی سیلاب‌های رودخانه قزل‌اوزن تا سال ۱۴۰۰ بالغ بر ۱۹۴۵ میلیارد ریال برآورد گردیده است. (Jafari et al., 2010). احداث آبشکن در رودخانه باعث ایجاد تنگ‌شدگی در مسیر جریان و افزایش سرعت متوسط جریان و ایجاد آشفتگی و گردابه در اطراف آبشکن می‌شود. ایجاد گردابه‌ها در اطراف آبشکن و نیروی اعمالی از طرف جریان به سازه آبشکن در برخی

آبشکن توده سنگی، به طور کلی یکی از متداول‌ترین انواع آبشکن‌ها می‌باشد که اغلب از مصالح موجود در محل، در نزدیکی ساحل رودخانه‌ها با زاویه‌ای نسبی نسبت به راستای عمومی جریان احداث می‌شود. هدف از احداث آبشکن توده-سنگی، کاهش سرعت جریان در مجاورت ساحل و هدایت آن به محور اصلی رودخانه به منظور رسوب‌گذاری در محدوده بین آبشکن‌ها، ایجاد یک ساحل جدید بعد از پر شدن محدوده بین آبشکن‌ها به وسیله رسوب، جلوگیری برخورد جریان به ساحل رودخانه در محل قوس خارجی، افزایش عمق جریان و مناسب‌سازی مقطع هندسی رودخانه برای اهداف کشتیرانی،

* نویسنده مسئول: Salehi@modares.ac.ir

موارد باعث ایجاد خرابی سازه آبشکن می‌شود.

آبشکن‌ها به صورت منفرد یا به صورت یک سری متوالی در یک یا در دو سمت رودخانه ساخته می‌شوند. آبشکن‌ها از نظر مصالح و روش ساخت به انواع نفوذپذیر، نفوذناپذیر، صلب و یا انعطاف‌پذیر تقسیم‌بندی می‌شوند. این سازه‌ها با شکل و نماهای مختلف در پلان از جمله مستقیم، مستقیم با دماغه گرد، تی شکل (T)، ال شکل (L) و غیره ساخته می‌شوند. همچنین مقطع عرضی این سازه‌ها با توجه به نوع مصالح و روش ساخت به یکی از سه شکل سپری، پلکانی و یا دوزنقه‌ای ساخته می‌شوند. آبشکن‌ها از نظر طول موثر و تاثیر آن بر کارکرد جریان چرخشی، عرض رودخانه و ظرفیت انتقال جریان معمولاً به سه گروه آبشکن‌های کوتاه، متوسط و بلند تقسیم می‌شوند (Guideline for Design Construction and Maintenance of River Groynes, 2010). آبشکن‌ها ممکن است به صورت مستغرق در مواقع پرآبی و یا غیرمستغرق در مواقعی که مقدار آب در رودخانه کم است، عمل نمایند (Gisonni and Hager, 2008). آبشکن‌ها از نظر آرایش زاویه قرارگیری در رودخانه و تاثیر آن بر روی جریان رودخانه به سه نوع جاذب، عمودی و دافع تقسیم‌بندی می‌گردند. آبشکن دافع به سمت بالادست جریان رودخانه متمایل بوده و جریان اصلی را با قدرت از کناره رودخانه و میدان آبشکن دور نموده و سبب توسعه بیشتر بار رسوبی در پایین‌دست و حفاظت کناره می‌گردند. زاویه تمایل آبشکن به سمت بالادست بین ۱۱۰ تا ۱۲۰ درجه مناسب است، ولی ممکن است بین ۹۵ تا ۱۲۰ درجه نیز باشد (Guideline for Design Construction and Maintenance of River Groynes, 2010). تحقیقات روی آبشکن‌ها از اواخر دهه ۱۹۲۰ میلادی توسط افراد مختلفی مانند لسی، انگلس و لارسن شروع شده است. مرور کوتاه تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که بسیاری از محققین بر روی موضوعات مختلفی از قبیل: برآورد موقعیت و اندازه آبشکن‌ها، زاویه تمایل آبشکن‌ها و میدان جریان حول آبشکن تمرکز داشته‌اند. از قدیمی‌ترین تحقیقات آزمایشگاهی در مورد آبشکن می‌توان به تحقیقات Ahmad (1953) اشاره کرد. وی با اندازه‌گیری تغییرات سطح آب به غیریکنواختی جریان حول تک آبشکن واقع در یک کانال مستقیم اشاره کرده است (Ahmad, 1953). Richardson et al. (1975) پژوهش‌هایی را در رابطه با طراحی آبشکن‌ها انجام دادند و قوانین اولیه و کلی برای طراحی این سازه‌ها ارائه نمودند. میدان جریان در اطراف آبشکن‌ها تحت تاثیر هندسه آن‌ها (طول، نوع آبشکن، شکل مقطع، زاویه تمایل و فاصله بین آن‌ها) می‌باشند (Przedwojski, 1995). (Gisonni et al., 2005) با

انجام تحقیقاتی روی آبشکن و بررسی میدان جریان حول آن‌ها، زاویه تمایل آبشکن نسبت به راستای عمومی جریان را بین ۶۰ الی ۱۲۰ درجه توصیه کردند (Gisonni et al., 2005). صفرزاده به بررسی هیدرودینامیک سه بعدی حول تک آبشکن با شکل‌های مختلف دماغه به صورت آزمایشگاهی پرداخت. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که ساختار جریان متوسط و آشفته حول آبشکن‌های مستقیم و غیر مستقیم کاملاً متفاوت است و توضیح تنش برشی بستر حول آبشکن مستقیم، نشانگر تشدید تنش حول دماغه آبشکن و توسعه ناحیه پرتنش به سمت پایین‌دست می‌باشد (Safarzadeh, 2011). یکی از مشکلات اساسی آبشکن‌ها که در گذشته مورد توجه محققین بوده است، آبستگي پای آبشکن و استفاده از سنگ‌چین برای محافظت از آن و پایداری آن‌ها می‌باشد. (Chiew, 1995) به بررسی پایداری سنگ‌چین‌ها در اطراف یک پایه پرداختند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که ضخامت لایه سنگ‌چین تاثیر زیادی بر روی خرابی آن‌ها دارد (Chiew, 1995). Lauchlan and Melville, (2001) مکانیزم خرابی، موقعیت و پایداری سنگ‌چین‌های اطراف پایه‌ها را بررسی کردند. نتایج حاصل از تحقیق ایشان نشان می‌دهد که پایداری سنگ‌چین‌ها با افزایش سرعت، کاهش و با افزایش عمق کارگزاری آن‌ها افزایش می‌یابد (Lauchlan and Melville, 2001). اندازه مناسب سنگدانه‌های سنگ‌چین برای مقاومت در مقابل تنش برشی جریان توسط ملویل و همکاران بررسی شده است. آن‌ها به مقایسه اندازه سنگدانه‌های حاصل از نتایج آزمایشگاهی و روابط تجربی پرداختند و نشان دادند که تنها دو معادله تجربی با ضرایب اطمینان اضافی، اندازه مناسب برای سنگ‌چین حول تکیه‌گاه‌ها را تحت شرایط بستر متحرک برآورد می‌نمایند (Melville et al., 2007). (Gisonni and Hager, 2008) به بررسی آزمایشگاهی نقش سنگ‌چین در محافظت آبستگي پای آبشکن‌ها در حالت مستغرق پرداختند. آنها سه مکانیزم غلظتی، لغزشی و زیرسطحی را برای تخریب سنگ‌چین معرفی نمودند و نشان دادند که پارامترهای هندسی آبشکن و هیدرولیک جریان تاثیر بسزایی در پایداری سنگ‌چین دارد (Gisonni and Hager, 2008). (Bakhtiyari et al., 2012) به بررسی تاثیر پارامترهای هندسی آبشکن و عمق کارگذاری سنگ‌چین بر روی پایداری سنگ‌چین‌ها در شرایط غیرمستغرق پرداختند و به این نتیجه رسیدند که کارگذاری سنگ‌چین در عمق بیشتر موجب افزایش پایداری سنگ‌چین‌ها و در نتیجه پایداری آبشکن‌ها و محافظت سواحل می‌گردد (Bakhtiyari et al., 2012). باتوجه به اهمیت آبشکن در حفاظت از سواحل و استفاده گسترده از این سازه در

دماغه آبشکن، (θ) زاویه قرارگیری آبشکن نسبت به راستای عمومی جریان، (α) زاویه اصطکاک داخلی مصالح بدنه آبشکن، (U_c) سرعت آستانه حرکت مصالح بدنه آبشکن، (γ) عمق جریان در مسیر مستقیم بالادست، (d_{50}) قطر متوسط مصالح و (σ_g) انحراف استاندارد توزیع اندازه مصالح، (ρ) جرم مخصوص آب، (ρ_s) جرم مخصوص سنگدانه‌ها، (g) شتاب ثقل و (ν) لزجت سینماتیکی سیال می‌باشد.

شکل کلی رابطه بالا را با استفاده از روش Π باکینگهام و انتخاب ρ ، g و ν به عنوان متغیرهای تکراری می‌توان به صورت رابطه‌ی (۲) نوشت:

(رابطه ۲)

$$\frac{U_c}{u_*} = f\left(\frac{B}{y}, \frac{L}{y}, \frac{H}{y}, \frac{d_{50}}{y}, Re, \frac{\rho_s}{\rho}, S_0, \nu, \alpha, \Phi, \sigma_g\right)$$

در این رابطه u_* سرعت برشی است که بر اساس رابطه خط انرژی با فرض جریان یکنواخت به صورت زیر تعریف می‌شود (Hosseini and Abrishami, 2010):

$$u_* = \sqrt{gRS_0} \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن R شعاع هیدرولیکی مقطع و S_0 شیب بستر کانال می‌باشد. لازم به ذکر است که با تنظیم درجه پایین دست حین انجام آزمایش، جریان یکنواخت شده و از شیب سطح آب به عنوان S_0 استفاده شده است.

اثر $\frac{\rho_s}{\rho}$ در مطالعات سقوط تک ذره اهمیت پیدا می‌کند

(Yalin, 1977) که متفاوت از هدف تحقیق در مطالعه حاضر می‌باشد. با عنایت به اینکه جریان در حالت کاملاً آشفته قرار دارد و پارامتر بدون بعد اصلی عدد فرود می‌باشد، از اثر عدد رینولدز صرف نظر شده است. با توجه به اینکه طول موثر، شیب کانال، شیب جانبی و دماغه آبشکن ثابت بوده و همچنین مصالح بدنه آبشکن یکنواخت می‌باشند، پارامترهای بی بعد S_0 ، Φ ، σ_g و L مقدار ثابتی داشته و حذف می‌شوند. همچنین با توجه به اینکه آبشکن مستغرق می‌باشد، به جای عمق جریان از مفهوم درصد استغراق (S)، (نسبت ارتفاع آب روی تاج آبشکن به ارتفاع تاج آبشکن تا بستر) استفاده شده است. با توجه به حذف برخی پارامترهای بی‌بعد فوق‌الذکر و با ترکیب سایر پارامترها، پارامترهای بی‌بعد زیر برای بررسی سرعت آستانه حرکت آبشکن توده سنگی دافع در نظر گرفته شد.

$$\frac{U_c}{u_*} = f\left(\frac{d_{50}}{y}, \frac{y-H}{H}, \nu\right) \quad (\text{رابطه ۴})$$

با توجه به رابطه (۴)، سرعت آستانه حرکت مصالح بدنه آبشکن به زاویه قرارگیری آبشکن نسبت به راستای عمومی جریان ربط داده شده است که در تحقیقات پیشین مورد توجه قرار نگرفته است.

ساماندهی رودخانه‌ها، در درجه اول پایداری خود سازه آبشکن در مقابل سیلاب‌ها و عملکرد آن‌ها دارای اهمیت می‌باشد. Baird and Klump (1992) عامل اصلی تخریب آبشکن‌های رودخانه سانتا کلارا^۱ مکزیک را مستغرق شدن آبشکن‌ها در اولین سیلاب و جابجایی و سر خوردن ریپ‌رها و فرسایش هسته داخلی آبشکن گزارش کردند (Baird and Klump, 1992). با وجود اینکه راهنمای طراحی، زاویه آبشکن بین ۱۱۰ الی ۱۲۰ درجه را مجاز دانسته است، بررسی‌ها نشان می‌دهد که یکی از دلایل تخریب آبشکن‌ها زاویه انحراف آبشکن می‌باشد که بیشتر از ۱۰ درجه بوده است (Abdi, 2007). Jafari et al. (2010) با بررسی میدانی و مقایسه عملکرد آبشکن‌های رودخانه قزل اوزن در استان زنجان عدم استحکام پوشش آبشکن میانی را عامل تخریب دماغه آبشکن‌های خاکی تثبیت شده با کیسه‌های ماسه سیمان گزارش کردند (Jafari et al., 2010).

با توجه به مطالعات فوق‌الذکر و با عنایت به استفاده از آبشکن‌های توده‌سنگی در رودخانه‌های داخل کشور، علیرغم زیان‌های اقتصادی و زیست محیطی ناشی از تخریب آبشکن‌ها، تاکنون مطالعاتی در مورد بررسی نواحی مستعد خرابی و اثر پارامترهای مختلف بر روی آستانه حرکت مصالح آبشکن توده سنگی انجام نشده است، بنابراین لزوم تحقیقات بیشتر بر روی پایداری سازه آبشکن‌ها، به‌خصوص در شرایط مستغرق که مستعد خرابی هستند (راهنمای طراحی و نگهداری آبشکن‌های رودخانه‌ای، ۲۰۱۰)، ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق به منظور بررسی تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل ابعاد مصالح سنگدانه، زاویه قرارگیری آبشکن دافع و درصد استغراق بر آستانه حرکت مصالح بدنه آبشکن توده سنگی دافع، بررسی آزمایشگاهی صورت گرفته است که در ادامه به توضیح این آزمایش‌ها پرداخته می‌شود.

آنالیز ابعادی

در نخستین مرحله، به منظور درک بهتر و شناخت عمیق‌تر پارامترهای موثر و رابطه بین آن‌ها، آنالیز ابعادی براساس روش Π باکینگهام انجام پذیرفت. با انتخاب سرعت آستانه حرکت مصالح بدنه آبشکن (U_c) به عنوان متغیر وابسته، پارامترهای موثر بر سرعت آستانه حرکت مصالح بدنه آبشکن توده سنگی را می‌توان به شکل زیر ارائه نمود:

$$U_c = f(B, S_0, L, \nu, \alpha, \Phi, H, \gamma, d_{50}, \sigma_g, \psi, \rho, \rho_s, g) \quad (\text{رابطه ۱})$$

که f نماد تابع، (B) عرض کانال، (S_0) شیب طولی مجرا، (L) طول موثر آبشکن، (H) ارتفاع آبشکن، (φ) شیب جانبی و

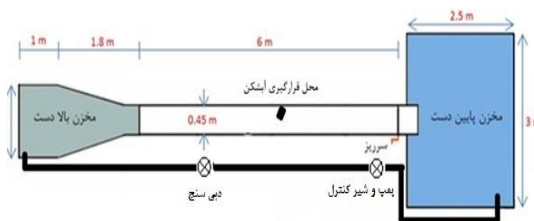
تجهیزات آزمایشگاهی

با توجه به پیچیدگی سه بعدی میدان جریان حول آبشکن و تاثیر پارامترهای مختلف، از روش‌های آزمایشگاهی برای بررسی آستانه حرکت آبشکن توده سنگی و شناسایی نقاط مستعد تخریب، استفاده شده است. آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تربیت مدرس در کانالی مستقیم با مقطع مستطیلی و به طول ۶ متر، عرض ۰/۴۵ متر و ارتفاع ۰/۴۵ متر انجام شد.

شمای شماتیک کانال در شکل (۱-الف) نمایش داده شده است. جداره‌های جانبی و کف کانال از جنس شیشه بوده و شیب بستر آن ثابت و حدود ۰/۳ درصد می‌باشد. شکل (۱-ب) شمای کلی کانال آزمایشگاهی در مطالعه حاضر را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری دبی با استفاده از دبی‌سنج آلتراسونیک با دقت $\pm 0.2 \text{ Lit/s}$ انجام پذیرفت. عمق جریان در طول آزمایش‌ها با استفاده از یک عمق‌سنج دیجیتال با دقت اسمی 0.1 mm اندازه‌گیری شد.



(ب) شمای کلی کانال



(الف) شمای شماتیک کانال

شکل ۱. تصویر پلان کانال آزمایشگاهی

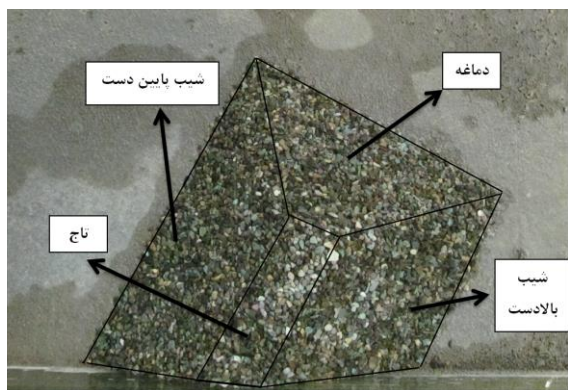
متوسط قطر مصالح مختلف ($d_{50}=3.55, 7.1, 11 \text{ mm}$) انتخاب گردید. شیب دیواره‌های جانبی آبشکن ثابت و طبق توصیه *Guideline for Design* (IV:1.25H) انتخاب گردید (Construction and Maintenance of River Groynes, 2010). ارتفاع آبشکن با توجه به شیب دیواره‌های جانبی ۸ سانتی متر در نظر گرفته شد. قابل ذکر است که طول مؤثر آبشکن در کل آزمایش‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. برای محاسبه طول مؤثر آبشکن از میانگین طول آبشکن در بستر و تاج استفاده شده است و در ادامه با توجه به زاویه قرارگیری آبشکن، طول تصویر آن در راستای عمود بر جهت جریان در کانال محاسبه شده است. شکل (۲-الف) نمایی کلی از آبشکن ساخته شده در آزمایشگاه را نمایش می‌دهد. محل قرارگیری آبشکن با تعیین طول توسعه یافتگی جریان و اطمینان از توسعه یافتگی جریان، در ۳/۵ متری از ابتدای کانال تعیین شد.

آبشکن‌های مورد آزمایش، از نوع آبشکن‌های دافع نفوذ-ناپذیر و از جنس توده سنگی با مقطع دوزنقه‌ای بودند. با توجه به اینکه از نظر قدرت انحراف جریان و شدت رسوب‌گذاری در پایین‌دست، آبشکن‌های دافع عملکرد بهتری داشته‌اند و بدنه این آبشکن در معرض حمله مستقیم جریان قرار دارد، نوع آبشکن مورد بررسی از نوع دافع انتخاب گردید. در تحقیق حاضر، ۳ آبشکن دافع با زوایای قرارگیری متفاوت ($v=100, 110, 120^\circ$) در محدوده توصیه شده ($100 \leq v \leq 120^\circ$) انتخاب گردید (Guideline for Design Construction and Maintenance of River Groynes, 2010). در جدول (۱) مشخصات ثابت هندسی آبشکن‌ها نمایش داده شده است. طول مؤثر آبشکن‌ها با توجه به زاویه قرارگیری آن‌ها نسبت به راستای عمومی جریان طوری انتخاب گردید تا طبق توصیه طراحی حداکثر ۳۰ درصد عرض کانال را پوشش دهد. جنس مصالح بدنه آبشکن از نوع توده سنگی با دانه بندی یکنواخت و با

جدول ۱. مشخصات آبشکن‌های ساخته شده در آزمایش‌ها

مدل	زاویه آبشکن	قطر سنگدانه‌ها (mm)	عرض تاج (cm)	ارتفاع آبشکن (cm)	طول آبشکن در تاج (cm)	طول آبشکن در بستر (cm)	طول مؤثر آبشکن (cm)	شیب طولی	شیب جانبی و دماغه
۱	۱۰۰	۱۱، ۷/۱، ۳/۵۵	۴	۸	۹/۱۳	۱۹/۳	۱۴	۰	۱۷:۱/۲۵H
۲	۱۱۰	۱۱، ۷/۱، ۳/۵۵	۴	۸	۹/۵۷	۲۰/۲	۱۴	۰	۱۷:۱/۲۵H
۳	۱۲۰	۱۱، ۷/۱، ۳/۵۵	۴	۸	۱۰/۴	۲۱/۹۳	۱۴	۰	۱۷:۱/۲۵H

حرکت سنگدانه‌های آبشکن دافع می‌باشد، فرض بر این بود که بستر آبشستگی نداشته و در برابر آن محافظت شده است. لذا به منظور ایجاد بستر صلب در آزمایش‌ها، از دوغاب سیمان استفاده شد. در تحقیق حاضر مجموعاً تعداد ۲۷ آزمایش برای بررسی آستانه حرکت مصالح بدنه آبشکن دافع انجام شده است.



(ب)

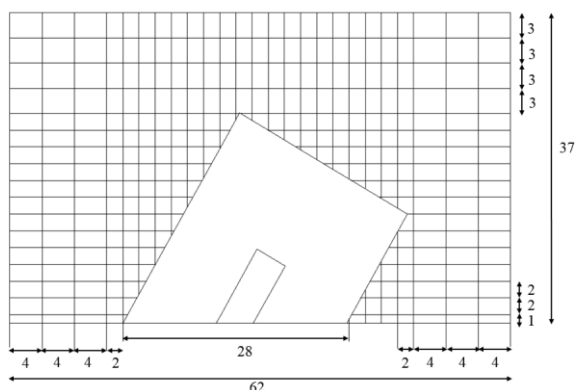
به منظور بررسی تاثیر درصد استغراق در آستانه حرکت مصالح بدنه آبشکن، با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی و به منظور صرف نظر کردن از اثر کشش سطحی در آزمایش‌ها، سه عمق مختلف ($v=10.5, 12, 13.5 \text{ cm}$) که به ترتیب نشان‌دهنده درصد استغراق ۶۸/۷۵، ۵۰ و ۳۱/۲۵ درصد می‌باشند، در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه هدف از این تحقیق بررسی آستانه



(الف)

شکل ۲. نمایی از آبشکن‌های ساخته شده در آزمایش‌ها، الف- دید از بالادست و ب- دید از پلان و تقسیم بندی ناحیه‌های مختلف بدنه آبشکن

سانتی متری (در تراز تاج آبشکن) از کف کانال انجام پذیرفت. فرکانس برداشت اطلاعات ۱۰۰ هرتز و حجم نمونه برداری ۶ میلی متر مکعب تعیین گردید. برای داشتن سری زمانی پایدار در محاسبه مقادیر مؤلفه‌های متوسط سرعت و همچنین تنش‌های رینولدز، برداشت سرعت در هر نقطه به مدت ۱۸۰ ثانیه (۳ دقیقه) در نظر گرفته شد و برای پاکسازی داده‌های پرت از نرم‌افزار Win ADV استفاده شد.



شکل ۳. پلان شبکه دو بعدی برداشت داده‌ها در اطراف آبشکن به فاصله ۲ سانتی متری از کف کانال (ابعاد در شکل بر حسب سانتی متر می‌باشند)

به منظور تعیین محل آستانه تخریب و شناسایی نقاط حساس بدنه آبشکن، دوربین نیکون مدل D3300 برای فیلم برداری در طی آزمایش مورد استفاده قرار گرفت. زاویه

با توجه به اینکه شناخت ساختار جریان حول آبشکن در تحلیل فرآیند تخریب مهم می‌باشد، مولفه‌های سرعت لحظه‌ای، توسط سرعت سنج صوتی^۱ با حسگر جانب‌نگر با دقت $\pm 1 \text{ mm/s}$ برداشت گردیدند. این دستگاه سه مولفه سرعت لحظه‌ای را در سه جهت به صورت همزمان برداشت می‌کند. با توجه به محدودیت‌های دستگاه سرعت سنج صوتی، محدوده برداشت مولفه‌های سرعت در اطراف آبشکن در راستای طولی و عرضی کانال به ترتیب ۶۲ و ۳۷ سانتی متر در نظر گرفته شد. میدان سرعت برداشت شده، شامل بالادست، پایین دست و جلوی آبشکن می‌باشد. فواصل مقاطع عرضی در نزدیکی آبشکن به ۲ سانتی متر و با دور شدن از محدوده تغییرات شدید مؤلفه‌های جریان، به ۴ سانتی متر در پایین دست و بالادست آبشکن می‌رسد. در مجموع ۲۶ مقطع عرضی برداشت شد و در هر مقطع عرضی ۱۷ نقطه برداشت گردیدند. قابل ذکر است که به منظور جلوگیری از حرکت سنگدانه‌های آبشکن در حین برداشت سرعت، سطح رویی آبشکن با استفاده از دوغاب سیمان تثبیت شد. شکل (۳) پلان شبکه دو بعدی برداشت داده‌ها در اطراف آبشکن را نشان می‌دهد. برداشت‌های میدان جریان در صفحات افقی در فاصله ۲ سانتی متری (نزدیک بستر) و ۸

1. Acoustic Doppler Velocimetry (ADV)

همزمان با استفاده از دریچه پروانه‌ای عمق جریان ثابت نگه داشته می‌شد تا این که در دبی مشخصی، مصالح بدنه آبشکن با حرکت توده‌ای شروع به لغزش کنند. این دبی به عنوان دبی آستانه حرکت تعیین می‌شد. سپس سرعت متناظر با این دبی در محل مقطع آبشکن محاسبه شده و به عنوان سرعت آستانه حرکت ثبت می‌گردید.

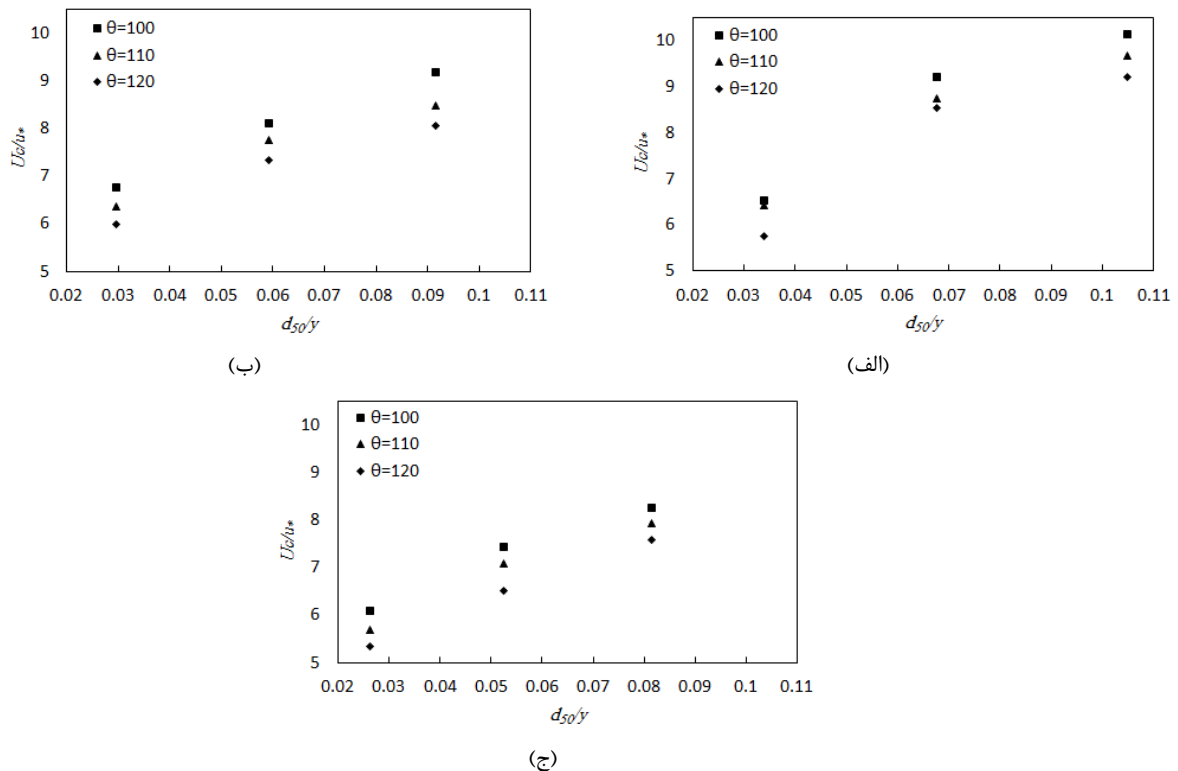
نتایج و بحث

مطالعه آستانه حرکت

منحنی‌های سرعت آستانه حرکت بی بعد شده با سرعت برشی در شکل (۴) ارائه شده است. از این شکل می‌توان دریافت که در محدوده مورد مطالعه ($0.02 \leq d_{50}/y \leq 0.1$)، سرعت آستانه حرکت بی‌بعد شده با سرعت برشی دارای روند صعودی نسبت به اندازه ذرات بدنه آبشکن می‌باشد. به بیان دقیق‌تر، همانگونه که انتظار می‌رفت با افزایش قطر میانگین مصالح آبشکن، به علت افزایش وزن دانه‌های تشکیل دهنده آبشکن، مقاومت در برابر جریان بیشتر شده و در نتیجه سرعت آستانه حرکت مصالح آبشکن نیز افزایش می‌یابد.

قرارگیری دوربین به نحوی تنظیم شد که دربرگیرنده سطح روبه‌روی آبشکن و نقاط حساس بدنه باشد. به همین منظور، مطابق شکل (۲-ب) بدنه آبشکن به چهار ناحیه تقسیم‌بندی شده است. این چهار ناحیه عبارت از دماغه، تاج، شیب بالادست و شیب پایین‌دست می‌باشند. با توجه به تعاریف بورخارت^۱ (۱۹۹۳) برای آستانه حرکت لایه آرمور موج شکن، حرکت توده‌ای از مصالح بدنه آبشکن به عنوان معیار آستانه حرکت انتخاب گردید (CEM, 2006). علت انتخاب این معیار به عنوان آستانه حرکت این بود که با حرکت توده مصالح بدنه آبشکن، تخریب پیش‌رونده‌ای در بدنه آبشکن ایجاد شده و آبشکن کارایی خودش را از دست می‌دهد (Haghnazar, 2013). روش انجام آزمایش‌ها به این صورت بود که در ابتدای آزمایش‌ها با بسته نگه داشتن دریچه پروانه‌ای انتهای کانال، ارتفاع آب در داخل کانال تا حدی بالا برده می‌شد تا آبشکن مستغرق شود، سپس با تنظیم دریچه پروانه‌ای عمق جریان به عمق مورد نظر کاهش داده می‌شد و ثابت نگه داشته می‌شد. سپس مقدار دبی جریان رفته رفته به صورت تدریجی افزایش پیدا می‌کرد و

1. Burcharth



شکل ۴. منحنی تغییرات سرعت آستانه حرکت نسبت به d_{50}/y الف - $S = 31.25\%$ ؛ ب - $S = 50\%$ ؛ ج - $S = 68.75\%$

سرعت آستانه حرکت به سرعت برشی کاهش می‌یابد. میزان کاهش سرعت آستانه حرکت با افزایش زاویه قرارگیری آبشکن

با توجه به شکل (۴) می‌توان دریافت که با افزایش زاویه قرارگیری آبشکن نسبت به راستای عمومی جریان، نسبت

دست جزو نواحی حساس و محل‌های شروع خرابی می‌باشند. همچنین شکل (۵) نشانگر این واقعیت است که سنگدانه‌های جدا شده از سطح آبشکن در ناحیه پشت آبشکن انباشته می‌شوند.

به منظور بررسی‌های بیشتر و توجیه این عملکرد، با استفاده از مقادیر متوسط سری‌های زمانی سرعت اندازه‌گیری شده در هر نقطه، بردارهای سرعت و خطوط جریان در صفحه افقی به فاصله ۲ سانتی‌متری از کف کانال، حاصل از دو مولفه‌ی طولی و عرضی سرعت در کل محدوده میدان جریان برای آبشکن با زاویه قرارگیری ۱۲۰ درجه نسبت به راستای عمومی جریان با درصد استغراق ۶۸/۷۵ درصد، اندازه‌گیری شده و در شکل (۶) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که برداشت میدان جریان، در شرایط آستانه حرکت برای آبشکن با مصالح ۳/۵۵ میلی‌متری صورت گرفت. شکل (۶-الف) نشان‌دهنده بردار سرعت و توزیع برآیند سرعت حاصل از سه مولفه‌ی متوسط سرعت و شکل (۶-ب) نشان‌دهنده خطوط جریان همراه با متوسط انرژی جنبشی آشفستگی که با توان دو سرعت برشی بی‌بعد شده است، می‌باشد. با توجه به شکل (۶-الف)، مشاهده می‌شود که دو ناحیه تشدید سرعت شکل گرفته است. ناحیه اول مربوط به تشدید سرعت در هسته‌ی اصلی جریان و ناشی از کاهش عرض عبوری جریان است. ناحیه پرسرعت دیگر مربوط به تشدید موضعی سرعت در پایین‌دست آبشکن و در ناحیه بیرونی لایه برشی می‌باشد. که میزان تشدید سرعت در این ناحیه به خصوص در محل اتصال دماغه به شیب پایین‌دست شدیدتر از تشدید عمومی سرعت است. حداکثر اندازه سرعت در محل اتصال دماغه به شیب پایین‌دست (ناحیه پرسرعت دوم) به ۱/۷۷ برابر سرعت متوسط جریان در بالادست آبشکن می‌رسد. علاوه بر این‌ها، بردارهای جریان در شکل (۶-الف)، نشان‌دهنده جریان عرضی قوی در نزدیکی محل اتصال دماغه به شیب پایین‌دست می‌باشند. مشاهدات فوق‌الذکر بیانگر این واقعیت است که محل اتصال دماغه به شیب پایین‌دست که تخریب اغلب از آنجا شروع می‌گردد جزو نقاط حساس و مستعد خرابی در آبشکن دافع می‌باشد. با توجه به خطوط جریان ترسیم شده در شکل (۶-ب)، در پایین‌دست آبشکن و نزدیک دیواره‌ی سمت آبشکن یک ناحیه چرخشی شکل گرفته است که در تحقیقات پیشین نیز گزارش شده است (صفرزاده و همکاران، ۲۰۱۶). توزیع انرژی جنبشی آشفستگی در شکل (۶-ب) نشان می‌دهد که بیشینه مقدار انرژی جنبشی آشفستگی در محل اتصال دماغه به شیب بالادست، نوک آبشکن و در امتداد لایه برشی اتفاق افتاده است. افزایش انرژی جنبشی آشفستگی در نوک آبشکن در

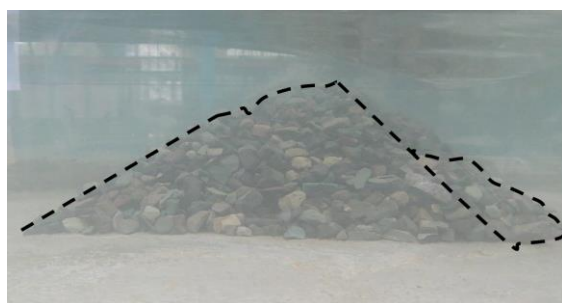
نسبت به راستای عمومی جریان، به ازای هر ۱۰ درجه افزایش، به طور میانگین ۵/۳۵ درصد می‌باشد. در توجیه این عملکرد در آبشکن‌های دافع باید یادآور شد که با توجه به یکسان بودن طول موثر آبشکن‌ها (جدول (۱))، با افزایش زاویه‌ی آبشکن، طول تاج آبشکن بزرگتر شده و سطح مقابل جریان در این آبشکن‌ها بیشتر می‌شود. با افزایش سطح مقابل جریان، نیروی درگ وارد بر بدنه آبشکن بیشتر شده و سرعت آستانه حرکت مصالح بدنه آبشکن کاهش می‌یابد.

با وجود آنکه امکان استخراج رفتار واحد از اثر استغراق نسبی بر سرعت آستانه حرکت از شکل (۴) مشکل می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که در سنگدانه‌هایی با ابعاد درشت $(0.05 \leq d_{50}/y \leq 0.1)$ نسبت سرعت آستانه حرکت به سرعت برشی با افزایش استغراق نسبی کاهش می‌یابد. در توجیه این عملکرد باید عنوان نمود که با افزایش درصد استغراق، دبی جریان و سرعت برشی جریان افزایش می‌یابد. مطالعات پیشین در زمینه آستانه حرکت رسوب نشان می‌دهد که با افزایش سرعت برشی، نیروی درگ وارده بر سنگدانه‌ها افزایش می‌یابد (Buffington and Montgomery, 1997). در چنین شرایطی سنگدانه‌های تشکیل دهنده آبشکن نیروی درگ بزرگتری را تجربه می‌نمایند و راحتتر به آستانه حرکت می‌رسند لذا نسبت سرعت آستانه حرکت به سرعت برشی کاهش می‌یابد. با وجود مشاهده رفتار واحد فوق در سنگدانه‌های درشت، چنین رفتاری در سنگدانه‌های ریزتر $(0.02 \leq d_{50}/y \leq 0.03)$ مشاهده نمی‌گردد. چنین مشاهده‌ای می‌تواند از اثر بیشتر آشفستگی بر جابه‌جایی سنگدانه‌های کوچکتر نسبت به نیروی درگ، ناشی شده باشد. به بیان دقیق‌تر افزایش نیروی درگ از یک سو و افزایش میزان آشفستگی از سوی دیگر امکان استخراج رفتار واحد را در سنگدانه‌های ریزتر با مشکل مواجه می‌سازد.

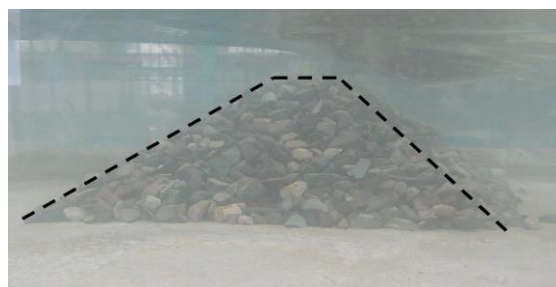
به منظور بررسی محل شروع خرابی (آستانه حرکت) و نواحی مستعد تخریب، فیلم‌برداری در حین انجام آزمایش صورت گرفت. شکل (۵) نمونه‌ای از تصاویر استخراج شده از فیلم ضبط شده آبشکن‌ها در حین خرابی را نشان می‌دهد. در تصاویر استخراج شده سطح آبشکن، محل شروع خرابی و محل انباشت سنگدانه‌ها در دو زمان مختلف قبل و بعد از آستانه حرکت، با استفاده از خطوط خط‌چین مشخص شده‌اند. بررسی حالت‌های مختلفی از برداشت‌هایی که در حین انجام آزمایش صورت گرفته است نشان‌دهنده این واقعیت می‌باشد که علیرغم قرارگیری مستقیم قسمت دماغه در معرض جریان، خرابی در هیچ یک از آزمایش‌ها از این قسمت شروع نشده و دو ناحیه اتصال دماغه به شیب بالادست و اتصال دماغه به شیب پایین

است که این گردابه‌ها به واسطه قدرت چرخشی لحظه‌ای زیاد، تنش‌های شدیدی بر سنگدانه‌های سطح آبشکن در محل اتصال دماغه به شیب بالادست، نوک آبشکن و پشت آبشکن وارد کرده و باعث جابه‌جایی آن‌ها می‌شوند. انرژی جنبشی آشفتگی در محل اتصال دماغه به شیب بالادست $1/58$ برابر انرژی جنبشی متوسط جریان نزدیک شونده است.

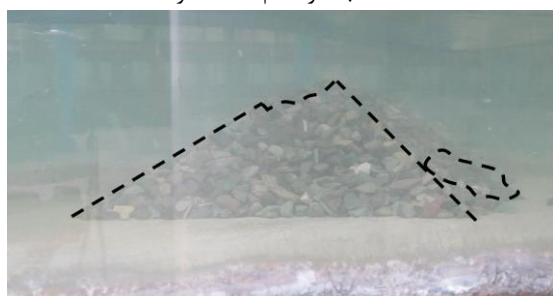
مطالعات پیشین مانند مطالعات (Safarzadeh *et al.* (2016) و (Vaghefi *et al.* (2017) نیز مشاهده شده است. با این وجود اختلاف‌هایی مابین خطوط هم‌تراز انرژی جنبشی آشفتگی در مطالعه حاضر و مطالعات پیشین مشاهده می‌شود که این تفاوت به اختلاف در شکل آبشکن، نوع آبشکن و زاویه قرارگیری آبشکن در این مطالعه و مطالعات این محققین مربوط می‌شود. انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از تشکیل گردابه‌های آشفتگی



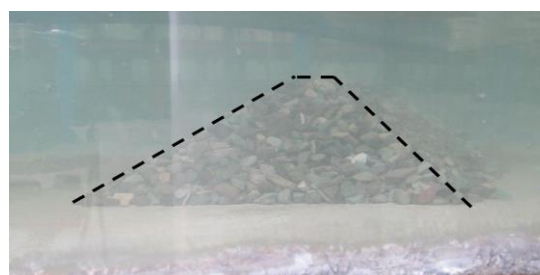
الف-۲- بعد از اتمام آستانه حرکت



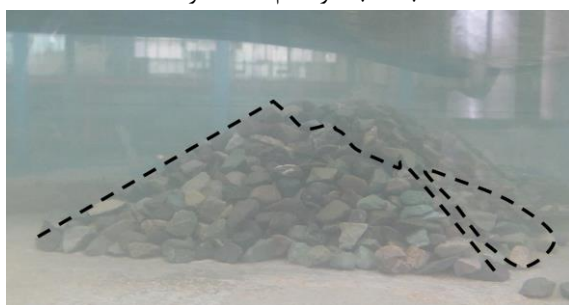
الف-۱- قبل از آستانه حرکت



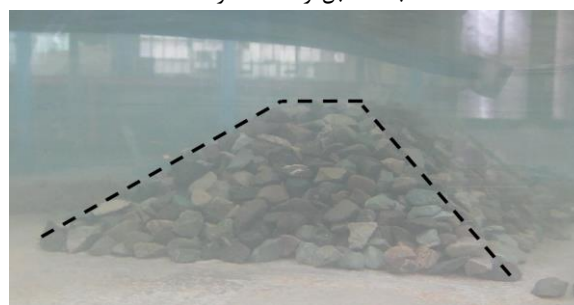
ب-۲- بعد از اتمام آستانه حرکت



ب-۱- قبل از آستانه حرکت

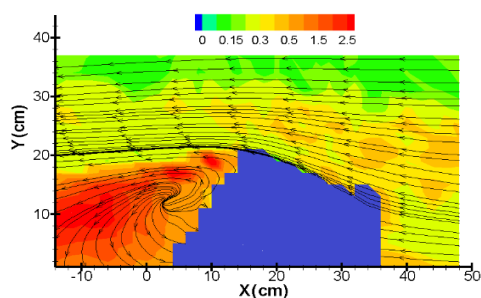


ج-۲- بعد از اتمام آستانه حرکت

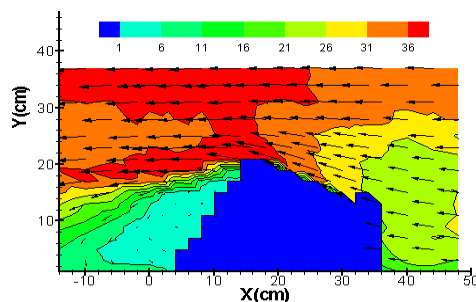


ج-۱- قبل از آستانه حرکت

شکل ۵. تصاویر برداشت شده از محل شروع خرابی: الف- آبشکن با زاویه قرارگیری ۱۰۰ درجه، ب- آبشکن با زاویه قرارگیری ۱۱۰ درجه و ج- آبشکن با زاویه قرارگیری ۱۲۰ نسبت به راستای عمومی جریان (جهت جریان از چپ به راست می‌باشد)



(ب)



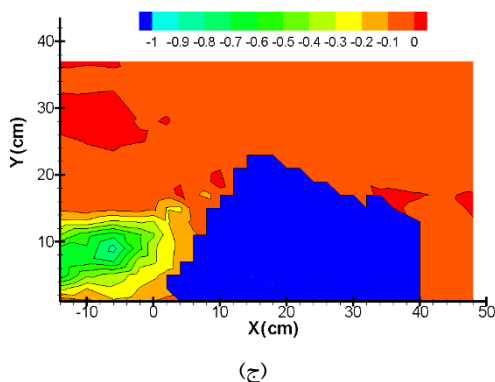
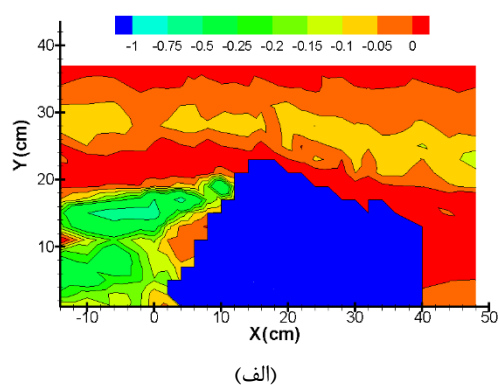
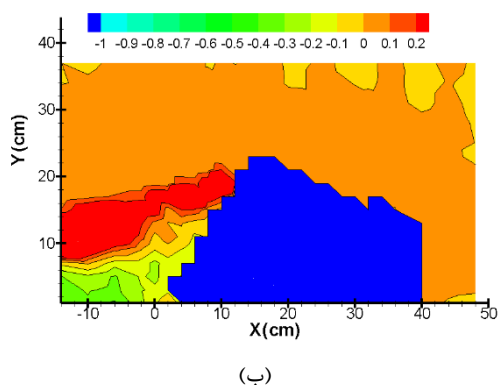
(الف)

شکل ۶. الف- بردار سرعت و توزیع برآیند سرعت بر حسب سانتی‌متر بر ثانیه، ب- خطوط جریان و توزیع انرژی جنبشی آشفتگی بی‌بعد شده با توان دو سرعت برشی (جهت جریان از راست به چپ می‌باشد)

پژوهش‌های پیشین نشان داده است که نوسانات سه مولفه‌ی سرعت در میدان جریان سه بعدی مستقل از هم نبوده و همبستگی نوسانات مزبور منجر به ایجاد تنش‌های برشی موسوم به تنش‌های رینولدز می‌شود. همبستگی نوسانات سرعت و تشکیل تنش‌های رینولدز، در بحث‌های فرسایش و انتقال رسوب مهم می‌باشند (Asadzadeh *et al.*, 2016). در شکل (۷) منحنی‌های همتراز تنش‌های رینولدز غیرقائم بی‌بعد شده با متوسط تنش برشی بستر نمایش داده شده است. با توجه به شکل (۷) میزان مثبت تنش $\frac{u'v'}{u_*'^2}$ در محل اتصال دماغه به شیب بالادست، نوک آبشکن و در امتداد لایه برشی شکل می‌گیرد. قیاس تنش‌های رینولدز نمایش داده شده در شکل (۷) با نتایج مشاهده شده در ارتباط با تخریب آبشکن نشان می‌دهد که در ناحیه اتصال دماغه به شیب بالادست برخلاف مولفه‌ی

که مقادیر بالاتری دارد (شکل ۷-الف)، مولفه‌های $\frac{u'v'}{u_*'^2}$ و $\frac{u'w'}{u_*'^2}$ مقادیر بالاتری را نشان نمی‌دهند (شکل ۷-ب و ج). مقادیر منفی دو مولفه تنش $\frac{v'w'}{u_*'^2}$ و $\frac{u'w'}{u_*'^2}$ در نواحی پشت آبشکن نشان‌دهنده محل تجمع رسوبات می‌باشند (Nelson *et al.*, 1995). پس می‌توان نتیجه گرفت که مقدار مثبت تنش رینولدز $\frac{u'v'}{u_*'^2}$ در نواحی مذکور، نشان از حرکت سنگدانه‌ها از این نواحی و جمع شدن آن‌ها در نواحی پشت آبشکن می‌باشد که این فرضیه با مشاهدات نویسندگان در شکل (۵) همخوانی دارد.

شکل (۷) خطوط همتراز تنش‌های رینولدز بی‌بعد شده با متوسط تنش برشی بستر در صفحه ۲ سانتی‌متری: الف- $\frac{u'v'}{u_*'^2}$ ب- $\frac{u'w'}{u_*'^2}$ ج- $\frac{v'w'}{u_*'^2}$

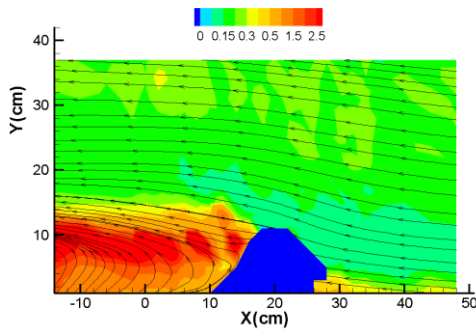


شکل ۷. خطوط همتراز تنش‌های رینولدز بی‌بعد شده با متوسط تنش برشی بستر در صفحه ۲ سانتی‌متری: الف- $\frac{u'v'}{u_*'^2}$ ب- $\frac{u'w'}{u_*'^2}$ ج- $\frac{v'w'}{u_*'^2}$

از ویژگی‌های خاص آبشکن توده سنگی، شیب‌دار بودن جداره‌های جانبی و دماغه آبشکن می‌باشد که مطالعات پیشین حاکی از تاثیرپذیری میدان جریان از این شیب‌ها می‌باشند (Kuhnle *et al.*, 2008). به منظور بررسی نحوه تغییر میدان جریان در عمق و نیز اثر شیب جانبی و دماغه آبشکن در شکل (۸-الف) بردار سرعت و توزیع برآیند سرعت حاصل از سه مولفه‌ی متوسط سرعت و در شکل (۸-ب) خطوط جریان همراه با متوسط انرژی جنبشی آشفتگی که با توان دو سرعت برشی

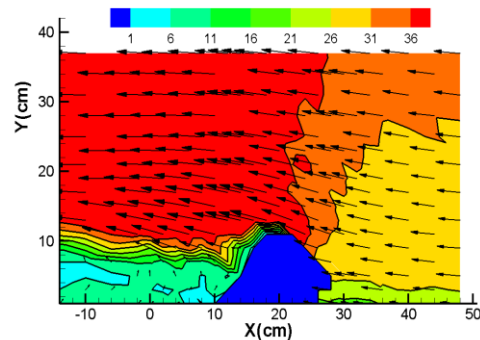
جریان در عمق و نیز اثر شیب جانبی و دماغه آبشکن در شکل (۸-الف) بردار سرعت و توزیع برآیند سرعت حاصل از سه مولفه‌ی متوسط سرعت و در شکل (۸-ب) خطوط جریان همراه با متوسط انرژی جنبشی آشفتگی که با توان دو سرعت برشی

می‌باشد. در شکل (۸-ب) تشکیل یک ناحیه چرخشی همانند شکل (۶-ب) مشهود می‌باشد. با این وجود به نظر می‌رسد که عرض ناحیه چرخشی در لایه نزدیک سطح بستر بیشتر از لایه فوقانی می‌باشد. همچنین به نظر می‌رسد که مرکز ناحیه چرخشی با دور شدن از سطح بستر به سمت پایین دست جابه‌جا می‌شود. بررسی مقادیر انرژی جنبشی آشفتگی در شکل (۸-ب) مانند شکل (۶-ب) نشان از وقوع حداکثر انرژی جنبشی آشفتگی در ناحیه چرخشی پشت آبشکن می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود گسترگی ناحیه دارای انرژی جنبشی آشفتگی زیاد در لایه فوقانی بیشتر از لایه نزدیک بستر بوده و به سمت پایین دست کشیده شده است.



(ب)

بی‌بعد شده است، نمایش داده شده است. مقایسه شکل (۸-الف) با شکل (۶-الف) بیان‌گر این واقعیت است که دو ناحیه پرسرعت تشکیل شده در سطح نزدیک بستر به یک ناحیه پرسرعت در سطح نزدیک تاج آبشکن تبدیل شده است. همچنین گسترده‌گی این ناحیه پرسرعت در صفحه فوقانی بیشتر از نواحی نزدیک بستر می‌باشد. چنین مشاهده‌ای در مطالعات محققین قبلی هم گزارش شده است (اسدزاده و همکاران، ۲۰۱۶). حداکثر اندازه سرعت در صفحه فوقانی در محل ناحیه پرسرعت به ۱/۴۹ برابر سرعت متوسط جریان در بالادست آبشکن می‌رسد. این مقدار تشدید سرعت در مقایسه با مقدار مشاهده شده در صفحه نزدیک بستر کاهش پیدا کرده است. دلیل این رفتار زاویه‌دار بودن دماغه آبشکن و تغییر تنگ‌شدگی مقطع عرضی در ارتفاع



(الف)

شکل ۸. الف- بردار سرعت و توزیع برآیند سرعت بر حسب سانتی‌متر بر ثانیه، ب- خطوط جریان و توزیع انرژی جنبشی آشفتگی بی‌بعد شده با توان دو سرعت برشی (صفحه برداشت در فاصله ۸ سانتی‌متری از بستر قرار داشته و جهت جریان از راست به چپ می‌باشد)

دارای علامت مثبت در پشت آبشکن بوده اما مولفه $\frac{v w'}{u_*'^2}$

دارای علامت منفی می‌باشد. مقایسه مقادیر مولفه $\frac{u w'}{u_*'^2}$

تنش‌های رینولدز در شکل‌های (۹-الف، ب و ج) نشان می‌دهد که مولفه $\frac{u w'}{u_*'^2}$ از دو مولفه دیگر بزرگتر است. مقایسه مقادیر

تنش‌های رینولدز در دو سطح ۲ و ۸ سانتی‌متری از بستر نشان می‌دهد که محدوده تغییرات مقادیر سه مولفه تنش در نزدیکی بستر (شکل (۷)) یکسان بوده که نشان از اهمیت هر سه مولفه در این سطح می‌باشد. این درحالی است که محدوده تغییرات

مولفه $\frac{u w'}{u_*'^2}$ در سطح ۸ سانتی‌متری (شکل (۹)) که نزدیک

تاج آبشکن است، نسبت به دو مولفه دیگر بزرگتر بوده و نشان از اهمیت این مولفه در این سطح می‌باشد.

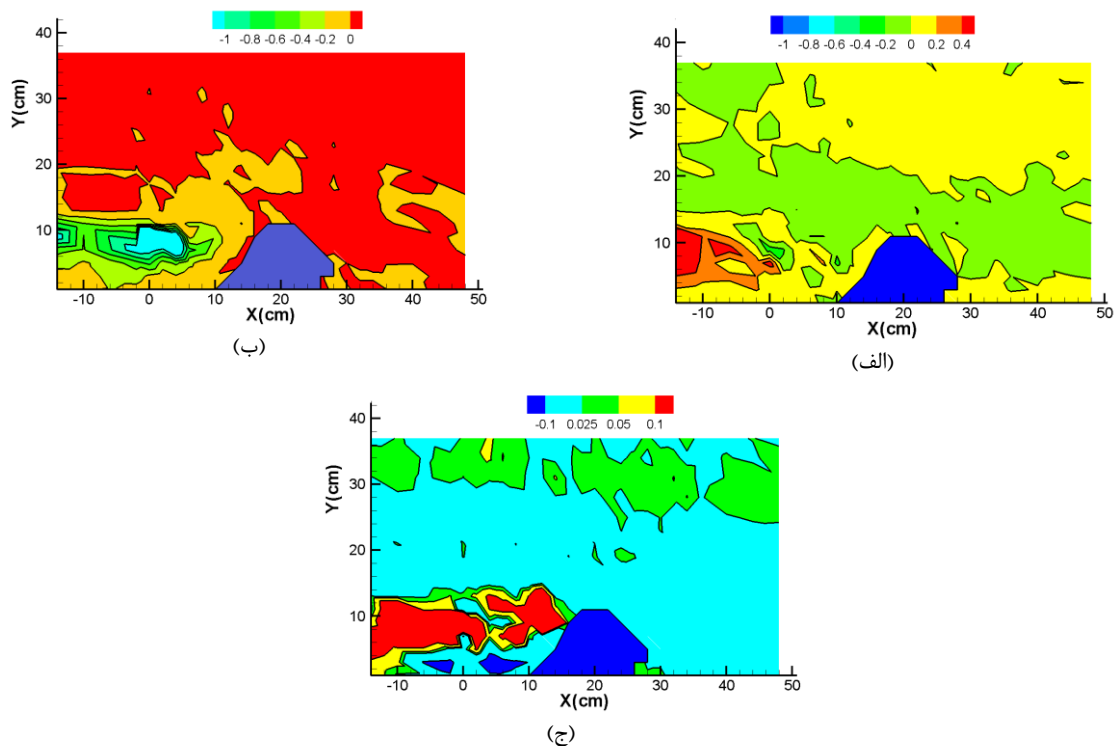
در انتها به منظور بررسی همبستگی نوسانات سرعت در نواحی فوقانی جریان و نزدیک به تاج آبشکن، در شکل (۹) منحنی‌های همتراز تنش‌های رینولدز غیرقائم بی‌بعد شده با متوسط تنش برشی بستر نمایش داده شده است. در شکل (۹-الف)

که نشان‌دهنده توزیع $\frac{u v'}{u_*'^2}$ می‌باشد، دو ناحیه پر تنش

قابل تشخیص می‌باشد. ناحیه اول نشان‌دهنده مقادیر منفی این مولفه از تنش بوده و در نزدیکی آبشکن تشکیل شده و تا محدوده وسیعی از بالادست و پایین دست آبشکن گسترش پیدا کرده است. ناحیه پرتنش دوم با مقادیر مثبت برای این مولفه در پشت آبشکن قرار گرفته است. بررسی‌های صورت گرفته در

شکل (۹-ب) نشان می‌دهد که مقدار این تنش $(\frac{u w'}{u_*'^2})$ در

تمامی نواحی به جز پشت آبشکن ناچیز می‌باشد. چنین مشاهده‌ای در توزیع $\frac{v w'}{u_*'^2}$ نیز مشهود است، با این تفاوت که



شکل ۹. خطوط همتراز تنش‌های رینولدز بی بعد شده با متوسط تنش برشی بستر در صفحه ۸ سانتی متری از بستر: الف- $\frac{u'v'}{u_*^2}$ - ب- $\frac{uv'}{u_*^2}$ - ج- $\frac{v'w'}{u_*^2}$

ناحیه پرسرعت تبدیل می‌شود که گستردگی آن نسبت به ناحیه نزدیک بستر بیشتر بوده ولی مقدار تشدید سرعت در آن کمتر می‌باشد. مقدار تشدید سرعت در سطح فوقانی ۱/۴۹ برابر سرعت متوسط جریان نزدیک شونده می‌باشد. تشکیل یک ناحیه چرخشی در نواحی نزدیک بستر و تاج آبشکن مشهود می‌باشد. همچنین عرض ناحیه چرخشی در لایه نزدیک بستر بیشتر از لایه فوقانی می‌باشد. حداکثر انرژی جنبشی آشفتگی در سطح نزدیک بستر در نواحی محل اتصال دماغه به شیب بالادست، نوک آبشکن و در امتداد لایه برشی اتفاق افتاده است که با دور شدن از بستر، ناحیه حداکثر انرژی جنبشی آشفتگی به پشت آبشکن و به سمت پایین دست منتقل و گسترده تر شده است. میزان مثبت تنش $\frac{u'v'}{u_*^2}$ در لایه نزدیک بستر در محل

اتصال دماغه به شیب بالادست، نوک آبشکن و در امتداد لایه برشی اتفاق افتاده که نشانگر جابه‌جایی سنگدانه‌ها از این قسمت بوده و مقادیر منفی دو مولفه تنش $\frac{uv'}{u_*^2}$ و $\frac{v'w'}{u_*^2}$

در نواحی پشت آبشکن نشان‌دهنده محل تجمع سنگدانه‌ها می‌باشند. با دور شدن از بستر آبشکن از مقدار مولفه‌های تنش رینولدز $\frac{u'v'}{u_*^2}$ و $\frac{v'w'}{u_*^2}$ کاسته شده و مولفه $\frac{uv'}{u_*^2}$ حایز

جمع‌بندی

مطالعه حاضر به بررسی آزمایشگاهی سرعت آستانه حرکت سنگدانه‌های تشکیل‌دهنده آبشکن‌های توده سنگی دافع و تشخیص نواحی مستعد خرابی در شرایط مستغرق تحت زاویه‌های مختلف در کانال مستقیم می‌پردازد. تحقیقات صورت گرفته بر روی اثر پارامترهای مختلف بر سرعت آستانه حرکت نشان دادند که همانطور که انتظار می‌رفت با افزایش نسبت d_{50}/y ، سرعت آستانه حرکت افزایش می‌یابد. این در حالی است که افزایش زاویه قرارگیری آبشکن نسبت به راستای عمومی جریان باعث کاهش سرعت آستانه حرکت می‌شود. که این کاهش به دلیل بزرگتر بودن سطح مقابل جریان و قرار گرفتن در معرض حمله مستقیم جریان نزدیک شونده در آبشکن‌هایی با زاویه قرارگیری بزرگتر می‌باشد. دو ناحیه تشدید سرعت در نزدیکی بستر، یک ناحیه مربوط به تشدید سرعت در هسته اصلی جریان و ناشی از کاهش عرض عبوری جریان و ناحیه پرسرعت دیگر مربوط به تشدید موضعی سرعت در پایین دست آبشکن و در ناحیه بیرونی لایه برشی، تشکیل می‌شود. حداکثر اندازه سرعت در محل اتصال دماغه به شیب پایین دست (ناحیه پرسرعت دوم) به ۱/۷۷ برابر سرعت متوسط جریان نزدیک شونده می‌باشد. نواحی تشدید سرعت در سطح فوقانی به یک

اهمیت می‌شود. دو ناحیه، محل اتصال دماغه به شیب بالادست و محل اتصال دماغه به شیب پایین دست جزو نواحی مستعد خرابی آبشکن توده سنگی دافع بوده و اغلب خرابی‌ها از این نواحی شروع می‌شوند. بالا بودن مقادیر اندازه سرعت، انرژی جنبشی آشفتنگی و تنش‌های رینولدز غیر قائم در این نواحی دلیلی بر شروع خرابی از این نواحی می‌باشند.

جدول ۵. نمادهای استفاده شده در متن

عنوان	علامت اختصاری	عنوان	علامت اختصاری
ثابت تجربی	a	سرعت برشی	u_*
عرض کانال	B	سرعت آستانه حرکت مصالح بدنه آبشکن	U_c
قطر متوسط سنگدانه‌ها	d_{50}	عمق جریان در بالادست آبشکن	y
شتاب ثقل	g	زاویه اصطکاک داخلی مصالح بدنه آبشکن	α
ارتفاع آبشکن	H	زاویه قرارگیری آبشکن نسبت به راستای جریان	θ
طول موثر آبشکن	L	لزجت سینماتیک	ν
عدد رینولدز	Re	چگالی سیال	ρ
درصد استغراق	S	چگالی سنگدانه‌ها	ρ_s
شیب طولی مجرا	S_0	انحراف معیار مصالح بستر	σ_g
سرعت متوسط جریان	U	شیب جانبی و دماغه آبشکن	ϕ

REFERENCES

- Abdi, Parviz. (2007). Evaluate the performance of the groins constructed on the river in the zanzan province. *7th International River Engineering Conference*, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (In Farsi)
- Ahmad, M. (1953). Experiments on design and behavior of spur-dikes. *Minnesota International Hydraulic Convention, Minneapolis*. 145-59.
- Asadzadeh, f. (2013). Experimental study of flow patterns and the structure of local scour around spur dike with side slope. Msc. dissertation, Tarbiat modares University, Tehran, Iran. (In Farsi)
- Asadzadeh, f., Safarzadeh, A. and Salehi Neyshabouri, S. A., (2016). Experimental Study of flow around a spur dike with side slope. *Modares Civil Engineering Journal*, v. 16(1), p. 249-260.
- Buffington, J.M., and Montgomery, D.R., (1997). A systematic analysis of eight decades of incipient motion studies, with special reference to gravel-bedded rivers. *Water Resources Research*, v. 33, p. 1993-2029.
- Baird, D. Klump, C. (1992). Study of Groins on the Middle Rio Grande, *U.S. Bureau of Land Management Papers*. Paper 35.
- Bakhtiyari, M., kashefipour SM, Ghomshi M and Zahiri J, (2012). Effects of geometric parameters of spur dike and depthplaced riprap on its failure threshold in a 90° flume bend. *Ecology, Environment and Conservation* (4): 479-484.
- CEM. *Coastal engineering manual*. Coastal engineering reaserch center, Department of army corps of engineers, US, Chapter VI-5-53, (2006).
- Chiew, Y.M., (1995). Mechanics of riprap failure at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 134(8): 1052-1063.
- Gisonni, C., Hager, W. H., and Unger, J. (2005). Spurs in river engineering- A preliminary review. 31st IAHR Congress, Seoul, Korea, 1894-1901.
- Gisonni, C., and Hager, W. (2008). Spur Failure in River Engineering. *Journal of hydraulic engineering*, ASCE 134(2):135-145.
- Guideline for Design Construction and Maintenance of River Groynes. (2010). *Vice presidency for Strategic Planning and Supervision*. (In Farsi)
- Haghnazar, H. (2013). *Experimental study on failure process of rubble mound spur-dike under submerged conditions*. Msc. dissertation, Tarbiat modares University, Tehran, Iran. (In Farsi)
- Hosseini, S M., Abrishami, J. (2010) *Open channel hydraulics* (5th ed.). Iran: Ferdowsi University of Mashhad. (In Farsi)
- Jafari, G., Norouzi, S., Danandehmehr, A., Sharifimanesh, H. (2010). Field Investigation and comparing of performance Ghezel ozan river constructed groins in Zanzan province. *8th International River Engineering Conference*, Shahid Chamran University, Ahwaz, Iran. (In

- Farsi)
- Kuhnle, R., Jia, Y. and Alonso, C. (2008). Measured and Simulated flow near a submerged spur dike. *Journal of hydraulic engineering*, ASCE 134: 916-924.
- Lagasse, P., Schall, J. Johnson, F., Richardson, E., and Chang, F. (1995). Stream stability at highway structures. *Hydraulic Engineering Circular HEC-20, Rep. No FHWA-IP-90-014*, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C.
- Lauchlan, C., and Melville, B. (2001). Riprap protection at bridge piers. *Journal of hydraulic engineering*, ASCE 137(5):412-418.
- Melville, B., Van Ballegooy, S., Coleman, S. and Barkdoll, B. (2007). Riprap size selection at wing-wall abutments. *Journal of hydraulic engineering*, ASCE 133(11):1265-1269.
- Nelson, J., Shreve, R., McLean, S. and Drake, T. (1995). Roll of near-bed turbulent structure on bed load transport and bed form mechanics. *Water Resource Research*, 31(8):2071-2086.
- Przedwojski B. (1995). Bed topography and local scour in rivers with banks protected by groynes. *Journal of Hydraulic Research*, 33(2), 257-273.
- Richardson, E. V., Stevens, M. A., and Simons, D. B. (1975). *The design of spurs for river training*. 16 IAHR Congress, San Paolo, Brazil, Vol. B(47), 382-388.
- Safarzadeh, A. (2011). *Experimental study of turbulent flow pattern around a groyne with various head shapes*. Ph.d. dissertation, Tarbiat modares University, Tehran, Iran. (In Farsi)
- Safarzadeh, A., Salehi Neyshabouri, S.A.A., Zarrati, A.R., (2016). Experimental investigation on 3D turbulent flow around straight and T-shaped groynes in a flat bed channel. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 142(8).
- Vaghefi, f. (2010). *Experimental and numerical investigation on flow pattern and scouring at T-shaped spur dike*. Ph.d. dissertation, Tarbiat modares University, Tehran, Iran. (In Farsi)
- Yalin, M. S. (1977). *Mechanics of sediment transport*, pergamon press, Elmsford, N. Y.
- Vaghefi, M., Safarpour, Y. Akbari, M., (2017). Numerical comparison of the parameters influencing the turbulent flow using a T-shaped spur dike in a 90° bend. *Journal of Applied Fluid Mechanics* .10(1): 231-241.