بررسی هیدرولیک جریان در آبگذر پیچیده با استفاده از مدل فیزیکی

محمود مشعل * و دیوید ج. بال **

چکیده

هیدرولیک جریان در آبگذرهای ساده با مقطع و شیب ثابت شناخته شده می‌باشد. رقوم سطح آب در بالادست یک آبگذر به‌وسیله‌ی نقطه‌ی کنترل تعیین می‌گردد. در یک آبگذر ساده، نقطه‌ی کنترل در مقطع ورودی یا خروجی آن است. لکن دربرخی کشورها، مانند انگلستان که بر اثر توسعه‌ی تجاری و شهری، رودخانه‌ها و جویبارها با مقاطع، شیب‌های مختلف و مصالح گوناگون در سال‌های متمادی سرپوشیده و تبدیل به آبگذر شده‌اند، فاکتورهای متعدّدی وجود دارد که هیدرولیک جریان در آبگذرها را "پیچیده" کرده است به‌طوریکه هیدرولیک جریان به‌آسانی در آنها قابل پیش‌بینی نیست. نتیجه‌ی مطالعات آزمایشگاهی از رفتار هیدرولیکی یک مدل فیزیکی از یک آبگذر، متشکّل از دو مجرای متوالی با دو شکل سطح مقطع متفاوت، نشان می‌دهد که هیدرولیک جریان بر اثر جابجایی موقعیّت مقطع کنترل و یا تغییر در محلّ نقطه‌ی "خود-هواگیری [1]" (شروع به پر شدن مجرا) تغییر خواهد کرد. پیش‌بینی این تغییرات مشکل است. در آبگذرهای پیچیده، علاوه بر قرار گرفتن نقاط کنترل در مقاطع ورودی و خروجی همانند آبگذرهای ساده، نقطه‌ی کنترل اصلی ممکن است داخل آبگذر قرار گیرد به‌طوریکه قسمت‌هایی از مجرا به‌صورت کاملاً پر و قسمت‌هایی به صورت نیمه‌پر عمل نماید. همچنین ممکن است بخش‌هایی از جریان، متغیّر تدریجی و بخش‌هایی متغیّر سریع باشند و به‌دفعات در آبگذر، جهش هیدرولیکی رخ دهد.

واژه‌های کلیدی : آبگذر ، آبگذر پیچیده ، زهکشی شهری ، مدل هیدرولیکی ، هیدرولیک

* - استادیار گروه آبیاری مجتمع آموزش عالی ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران - ایران

** - استادیار گروه عمران دانشگاه منچستر، منچستر - انگلستان

1 - Self-priming

مقدّمه

آبگذر [1]، مجرای سرپوشیده یا خط لوله‌ای است که برای ادامه‌ی جریان یک آبراهه از زیر یک مانع، مانند جادّه یا راه‌آهن یا مناطق توسعه‌یافته‌ی شهری به‌کار می‌رود (۱۵). گاهی ممکن است از آبگذر برای ارتباط مخازن و عبور ماهی استفاده کرد (۱۴). طرح هیدرولیکی آبگذرها تاحدودی پیچیده و تابع عوامل مختلفی است که به‌سادگی قابل‌تقسیم به جریان‌های تحت‌فشار یا آزاد نمی‌باشد. بلایسدل (۱) پارامترهای مؤثّر در کنترل هیدرولیک جریان را به کنترل در مقاطع ورودی، خروجی و مجرا تقسیم‌بندی نموده و در زیرمجموعه‌ی آنها استغراق ورودی یا خروجی، طول شیب مجرا، وضعیّت جریان از لحاظ کاملاً پر یا نیمه‌پر بودن و جریان مخلوط آب و هوا را برشمرده است. رقوم سطح آب در ورودی به یک آبگذر را می‌توان با داشتن موقعیّت نقطه‌ی کنترل تعیین کرد. در یک آبگذر ساده، نقطه‌ی کنترل در مقطع ورودی و یا مقطع خروجی آن می‌باشد (۲، ۱۳ و ۱۵). جریان در ورودی به آبگذر (۴) و تبدیل جریان نیمه‌پر به پر، بر اثر خود-هواگیری [2] در مجراهای آبگذر (۸) موردمطالعه قرار گرفته و تسهیلاتی در طرّاحی مقطع ورودی (۱۶) یا مقطع خروجی (۳) اندیشیده شده است تا خود-هواگیری سریع‌تر صورت بگیرد. همچنین می‌توان با جابجایی نقطه‌ی کنترل از مقطع ورودی به مقطع خروجی (۸) در هزینه ساختمانی صرفه‌جویی کرد (۱۴ و ۱۶). تعیین نقطه‌ی کنترل و اینکه آیا جریان در آبگذر ساده به صورت نیمه‌پر یا کاملاً پر عمل می‌کند، به‌آسانی قابل‌دستیابی است. نمودارها (۱۵) و برنامه‌های کامپیوتری (۵، ۶ و ۱۲) برای آبگذر ساده تهیّه شده است. برخی از آنها آبگذرهای دو یا چندقلو را که به‌صورت چند مجرای موازی هم می‌باشند آنالیز می‌کنند (۶ و ۱۲). در برخی موارد، مانند نواحی صنعتی‌شده‌ی انگلستان، در پاسخ به نیازهای توسعه‌ی تجاری و شهری، رودخانه‌ها و جویبارها به‌طور پیوسته در ۱۵۰ سال اخیر سرپوشیده شده و به آبگذر تبدیل شده‌اند (۹). بسیاری از کارهای جدید امتداد و اصلاح آبگذرهای قدیمی می‌باشد که از سنگ و آجر ساخته شده و در طول خود دارای مقاطع مختلفی است و لذا بررسی هیدرولیک جریان در آنها به‌آسانی آبگذرهای ساده نیست (۹ و ۱۰). برنامه یا نموداری که بتواند هیدرولیک جریان را در این آبگذرها تحلیل کند تاکنون طرّاحی نشده است. آبگذرهای جدید معمولاً در تمامی طول خود، مقطع یکنواخت دایره‌ای یا مستطیلی از جنس بتن مسلّح دارند، ولی آبگذرهای قدیمی‌تر که از مصالح مختلفی ساخته شده گاهی ستون‌ها یا لوله‌هایی از میان آنها عبور می‌کند. گاهی وجود رسوبات درشت‌دانه و انحراف شکل مقطع، ریزش موضعی بخشی از مصالح دیواره و تعمیر آنها به‌طور موضعی در سطح مقطع مؤثّر آبگذرها تغییراتی به‌وجود می‌آورد. این آبگذرها باتوجّه به فاکتورهای بالا پیچیده هستند یعنی ابعاد هندسی و خصوصیّات اصطکاکی آنها ممکن است در امتداد طول آبگذر تغییر کند. برآورد جریان و رقوم سرآب در ورودی به این آبگذرها به‌آسانی امکان‌پذیر نیست. بررسی این موضوع به‌وسیله‌ی مهندسین اداره‌ی محیط زیست بریتانیا [3] (EA) به مؤلّفین معرفی شده، که موضوع این تحقیق قرار گرفته است.

موادّ و روشها

هیدرولیک جریان در آبگذرهای پیچیده با ساختن یک مدل فیزیکی در آزمایشگاه هیدرولیک

---

1 - Culvert
2 - Self-priming
3 - Environmental Agency

دانشگاه منچستر موردبررسی قرار گرفت. از آنجا که طول بسیاری از آبگذرها در انگلستان بعد از ساخت اوّلیّه به‌منظور تأمین نیازهای روز، افزایش یافته است، این آبگذرها در طول خود مقطع‌های مختلفی را دارا می‌باشند. بنابراین تصمیم گرفته شد تا تأثیرات ناشی از تغییر شکل مقطع، که در بیشتر آبگذرهای پیچیده دیده می‌شود موردبررسی قرار گیرد. بررسی‌های صحرایی از نمونه‌های واقعی آبگذرهای موجود نشان می‌دهد که شکل مقطع طاق قوسی [1] شکل غالب مقطع می‌باشد (۹). لذا این سطح مقطع به‌عنوان نمونه‌ای از آبگذرهای قدیمی برگزیده شد و مقطع مستطیلی [2] نیز به‌عنوان نمونه‌ای از مقطع آبگذرهای جدید انتخاب گردید. از آنجا که تنوّع اندازه‌ی مقاطع فراوان است سعی گردید تا با بررسی هیدرولیک جریان در یک مدل که دارای تغییرات مقطع است به علل اساسی پیچیدگی در رفتار جریان بتوان دست یافت.

این مدل فیزیکی آبگذر شامل دو مجرای متوالی است که طول هر کدام ۲ متر و جنس آنها پلاگسی‌گلاس می‌باشد و این مجراها بر روی یک کف چوبی درست شده‌اند. یک مجرا دارای مقطع مستطیلی با عرض ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶/۹ سانتی‌متر و مجرای دوم به‌صورت طاق قوسی است، که از یک قوس نیم‌دایره‌ای برروی دیوارهای عمودی تشکیل شده است. این مجرا دارای عرض ۸/۸ سانتی‌متر و ارتفاع ۸/۸ سانتی‌متر می‌باشد. مساحت هر دو مقطع یکسان ولی مقطع طاق قوسی، بلندتر و مقطع مستطیلی عریض‌تر می‌باشد. این تغییرات یک تغییر ناگهانی در رقوم سقف به اندازه ۱/۹ سانتی‌متر و یک تغییر در عرض به اندازه ۱/۲ سانتی‌متر را به‌وجود می‌آورد.

آب موردنیاز به‌وسیله‌ی یک لوله‌ی آبرسان به قطر ۱۰ سانتی‌متر – که یک زانو در مسیر آن قرار داشت – تأمین می‌شد. با نصب یک مانومتر به شکل U به زانو، از آن به‌عنوان دبی‌سنج زانویی برای اندازه‌گیری دبی استفاده گردید. قبل از شروع آزمایش‌ها دبی‌سنج زانویی کالیبره و منحنی لازم برای تعیین دبی تهیّه شد. تغییر دبی به‌وسیله‌ی شیرفلکه‌ی لوله آبرسانی صورت می‌گرفت و با قرائت مانومتر میزان دبی از منحنی کالیبره به‌دست آمد. اندازه‌گیری دبی‌های آزمایش از ۰/۴ تا ۱۱ لیتر در ثانیه انجام گردید. اندازه‌گیری‌های عمق به‌وسیله‌ی میله‌های اندازه‌گیری که از میان سقف آبگذر عبور داده شده بود صورت گرفت. ارتفاع آب بالادست ورودی نیز با اندازه‌گیری عمق سطح آب از لبه‌ی دیواره‌ی سرآب – که ۷۵ سانتی‌متر بلندی داشت – به‌وسیله‌ی خط‌کش اندازه‌گیری شد. حدّاکثر خطا در تعیین دبی ۰/۵٪ و قرائت ارتفاع ۲/۵٪ برآورد شد. در آزمایش‌های ABM و BAM شیب ثابت ۰/۰۰۰۵ برای مجرا درنظر گرفته شد و در آزمایش‌های ABS و BAS برای مجرا شیب ثابت ۰/۰۰۳۸ انتخاب گردید.

این مقاله نتایج به‌دست آمده از چهار حالت مجراها را برحسب شیب و تأثیرات تغییر در شکل مقطع بررسی می‌کند :

۱) ABM ـ آبگذر بر شیب ملایم و مقطع طاق قوسی در ابتدا ، ۲) BAM – آبگذر بر شیب ملایم و مقطع مستطیلی در ابتدا ، ۳) ABS ـ آبگذر بر شیب تند و مقطع طاق قوسی در ابتدا و ۴) BAS – آبگذر بر شیب تند و مقطع مستطیلی در ابتدا

نتایج

بعد از انجام آزمایش‌ها، منحنی‌های رفتار یعنی منحنی تغییرات رقوم سرآب در مقابل دبی عبوری آبگذر، برای هر آزمایش به‌صورت بی‌بعد ترسیم شد (شکل‌های ۴ – ۱). محورهای افقی و عمودی

1 - Arch

2 - Box

به‌ترتیب مقادیر بدون‌بعد دبی و ارتفاع را به‌صورت $Q^* = (Q/BD(gD)^{1/2})$ و H/D نشان می‌دهد (Q دبی عبوری از آبگذر، g شتاب ثقل، B و D به‌ترتیب عرض کف و ارتفاع مجرای اوّل و H ارتفاع سرآب در ورودی به آبگذر می‌باشد). چنانکه ذکر شد رقوم سطح آب در ورودی تبعیت از نقطه‌ی کنترل دارد؛ بنابراین تأثیر نقطه‌ی کنترل بر هیدرولیک جریان برای شیب ملایم و تند قابل بررسی است.

شیب ملایم

منحنی‌های رفتار هیدرولیکی جریان برای آزمایش‌های ABM و BAM به‌ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. ضمناً پروفیل‌های سطح جریان برای حالاتی‌که نقطه‌ی کنترل در مقطع تبدیل واقع شده است، در شکل ۵ ارائه شده است.

ABM (شکل ۱) مهم‌ترین جنبه‌ی منحنی این است که در Q^* کمتر از ۰/۷ ، نقطه‌ی کنترل در تبدیل مقطع واقع شده است. در جریان‌های کم، از نقطه‌ی 0 تا A در روی شکل، یک سطح آزاد در تمام طول و در مقطع تبدیل وجود دارد؛ در مقطع تبدیل افزایش عرض سبب می‌شود تا پس از آن جریان فوق‌بحرانی شود. این جریان یک جهش‌هیدرولیکی را به دنبال دارد که جریان را پس از فاصله‌ی کوتاهی به زیربحرانی برمی‌گرداند. این مقطع تبدیل یک نقطه‌ی کنترل است که پروفیل سطح آب از عمق بحرانی در محلّ تبدیل مقطع به‌طرف بالادست روندیابی می‌شود (شکل a – ۵ پروفیل سطح آب).

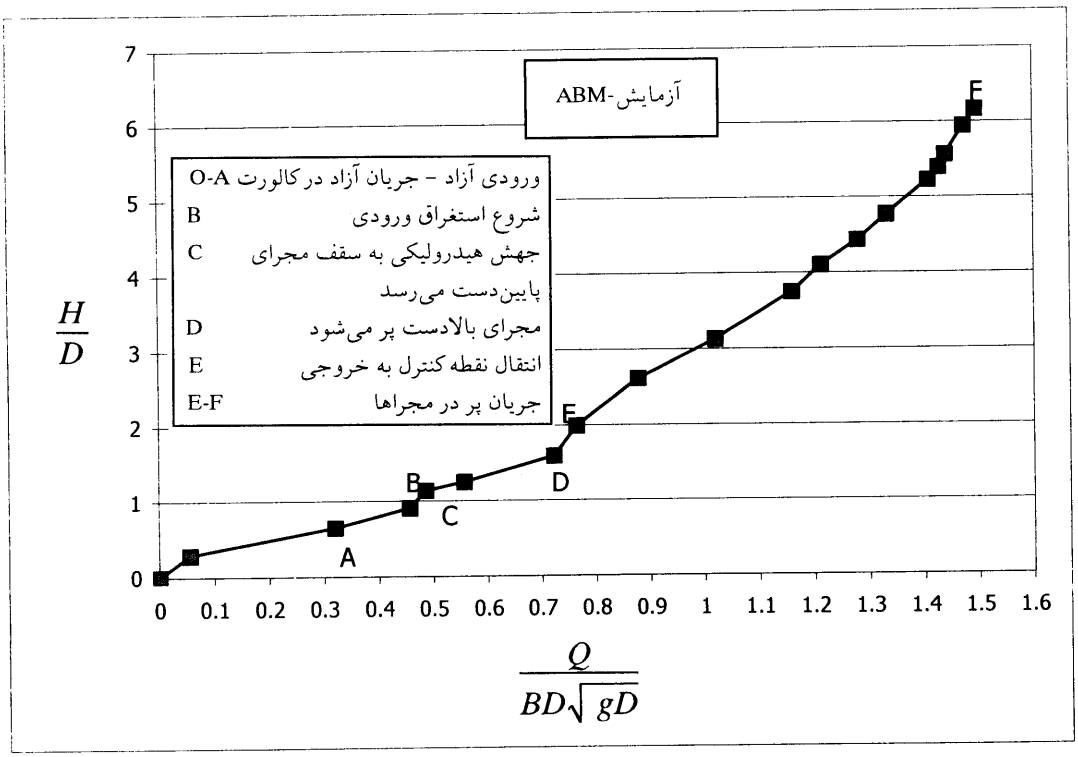
در نقطه‌ی B ، ورودی آبگذر مستغرق می‌شود (شکل b – ۵). در این حالت هنوز کنترل در مقطع تبدیل قرار دارد، امّا یک افزایش موضعی در رقوم سطح آب بالادست مشاهده می‌شود. بین نقطه‌ی B و C قسمت ابتدای مجرای بالادست به حالت پر عمل می‌کند و در بقیّه‌ی مجرای آبگذر یک جریان با سطح آزاد وجود دارد.

در نقطه‌ی C ، جهش هیدرولیکی به سقف اصابت می‌کند و مجرای آبگذر در پایین‌دست آن نقطه به‌صورت پر عمل می‌کند. در نقطه‌ی D، پروفیل سطح آب در مقطع تبدیل بالا می‌آید تا به رقوم سقف مجرای پایین‌دست برسد و سپس در مجرای بالادست عمل خود – هواگیری (پر شدن مجرا) رخ می‌دهد (شکل c – ۵). گرچه اکنون یک جریان پر در مقطع تبدیل وجود دارد ولی به‌علّت کاهش رقوم سقف، مقطع تبدیل مانند یک دریچه عمل می‌کند. در پایین‌دست آن یک جریان فوق‌بحرانی به‌وجود می‌آید و درنتیجه کنترل هنوز در نقطه‌ی مقطع تبدیل قرار دارد (شکل d – ۵). بین نقاط C و D جهش هیدرولیکی به بالادست حرکت می‌کند.

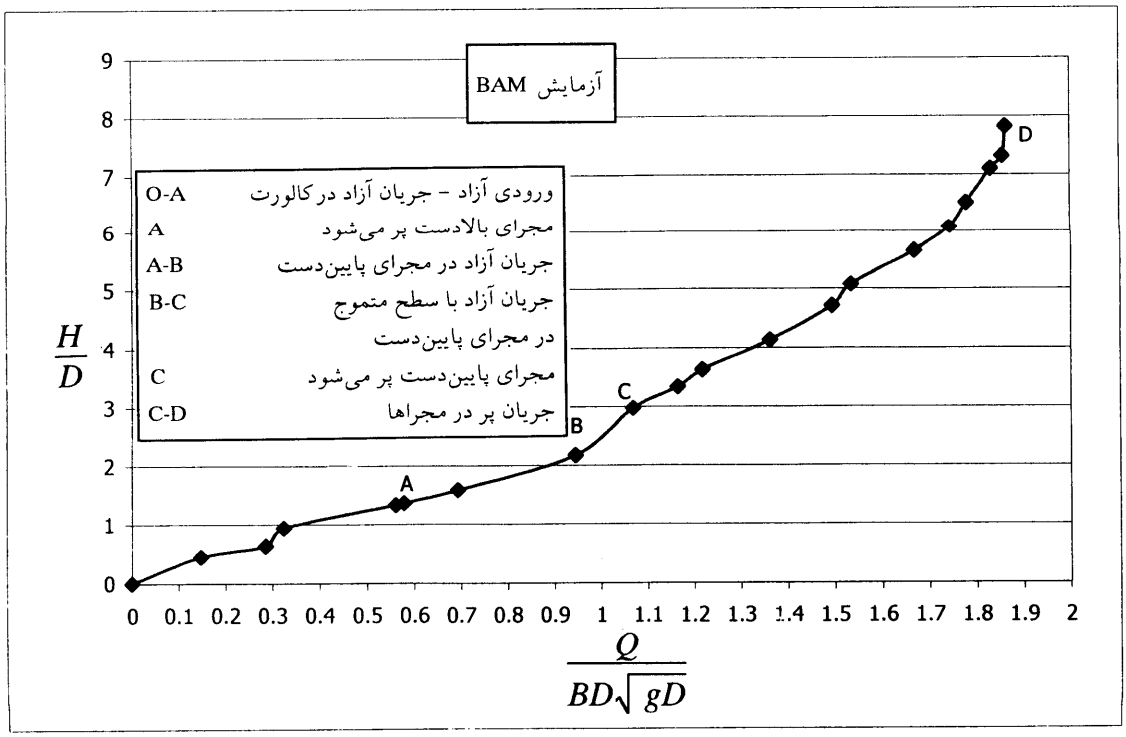
در نقطه‌ی E ، خط عمق بحرانی برای مقطع طاق قوسی به رقوم سقف مقطع مستطیلی پایین‌دست می‌رسد. در نقطه‌ی E جریان فوق‌بحرانی ناپدید می‌گردد و نقطه‌ی کنترل به مقطع خروجی آبگذر منتقل می‌شود. از نقطه‌ی E به بعد، نقطه‌ی کنترل در مقطع خروجی قرار می‌گیرد.

BAM (شکل ۲) برای حالتی است که همیشه مقطع کنترل در خروجی قرار می‌گیرد. در شرایط جریان آزاد، جریان زیربحرانی و سطح آب – پس از مقطع تبدیل که با کاهش عرض کف همراه است – پایین می‌افتد. حدّاکثر تأثیر این کاهش تا عمق‌بحرانی است. در این آزمایش سقف آبگذر در مقطع تبدیل، افزایش یافته و در مجرای بالادست عمل خود – هواگیری رخ می‌دهد و مجرا کاملاً پر می‌شود. جریان عبوری همانند آزمایش قبل، جریان از زیر دریچه نمی‌باشد. باتوجّه به مشاهدات به‌دست آمده از مدل، نکات ذیل بر روی منحنی رفتار (۲) قابل‌ذکر می‌باشد :

در نقطه‌ی A ، پروفیل برگشت آب از مقطع خروجی به سقف مجرای اوّل برخورد کرده و عمل



شکل ۱ - منحنی رفتار برای مدل آبگذر پیچیده در آزمایش ABM



شکل ۲ - منحنی رفتار برای مدل آبگذر پیچیده در آزمایش BAM

خود – هواگیری در آن صورت می‌گیرد.

در نقطه‌ی B ، عمق بحرانی در مجرای اوّل به رقوم سقف می‌رسد، درحالی‌که در مجرای دوم رقوم بالاتری دارد. جریان پس از تبدیل بسیار نزدیک به بحرانی می‌شود و سطح آب موج‌دار می‌گردد.

در نقطه‌ی C ، عمل خود – هواگیری در مجرای دوم رخ می‌دهد که این عمل درنتیجه‌ی تموّج سطح آب و قبل از اینکه پروفیل سطح آب به سقف برسد روی می‌دهد. پس از نقطه‌ی C در تمام آبگذر جریان پر وجود دارد.

شیب تند

منحنی‌های رفتار برای آزمایش‌های ABS و BAS در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. به نظر می‌رسد که رفتار هیدرولیکی بر روی یک شیب تند بسیار پیچیده‌تر از رفتار هیدرولیکی بر روی شیب ملایم باشد. جابجایی نقطه‌ی کنترل در هر دو آزمایش بر روی شیب تند یکسان است. در ذیل، هر دو آزمایش به همراه هم تشریح می‌شود و درصورت وجود تفاوت ذکر خواهد گردید.

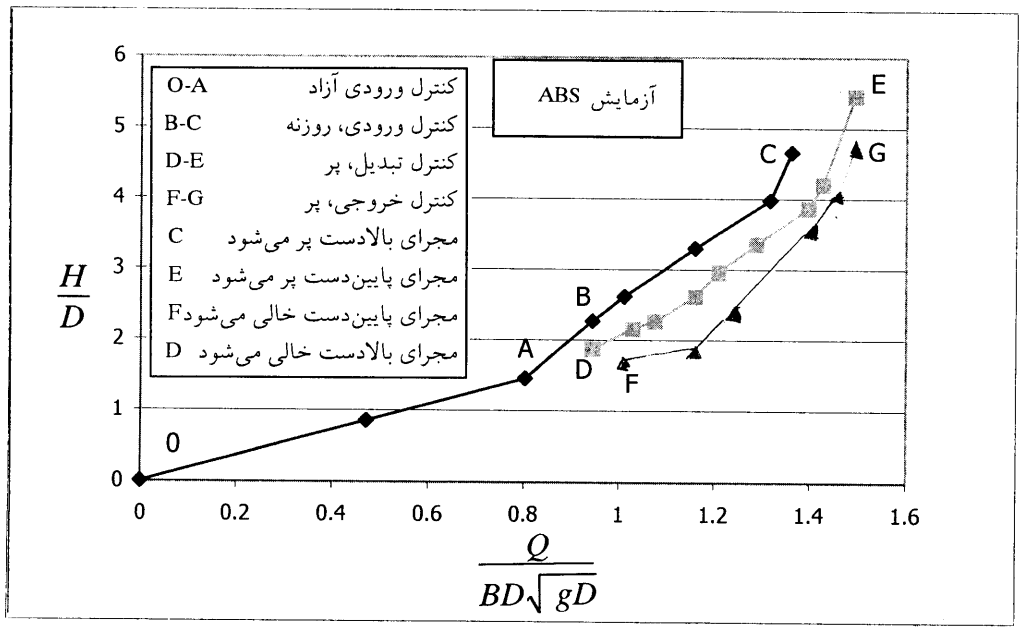
منحنی C - 0 (کنترل در ورودی) – از نقطه‌ی 0 تا A یک جریان فوق‌بحرانی درون آبگذر موجود است و کنترل در مقطع ورودی قرار دارد. در ABS جریان فوق‌بحرانی در عبور از مقطع تبدیل با گشاد شدن عرض همراه می‌شود و سطح آب فروکش می‌کند. در BAS تنگ شدن عرض نمودار می‌گردد و سطح آب افزایش می‌یابد.

در نقطه‌ی A ، ورودی مستغرق می‌گردد و خصوصیّت افت انرژی ورودی تغییر می‌کند، امّا جریان به سوی داخل هنوز فوق‌بحرانی است و میان نقاط A و B تا نقطه‌ی C کنترل در مقطع ورودی قرار می‌گیرد.

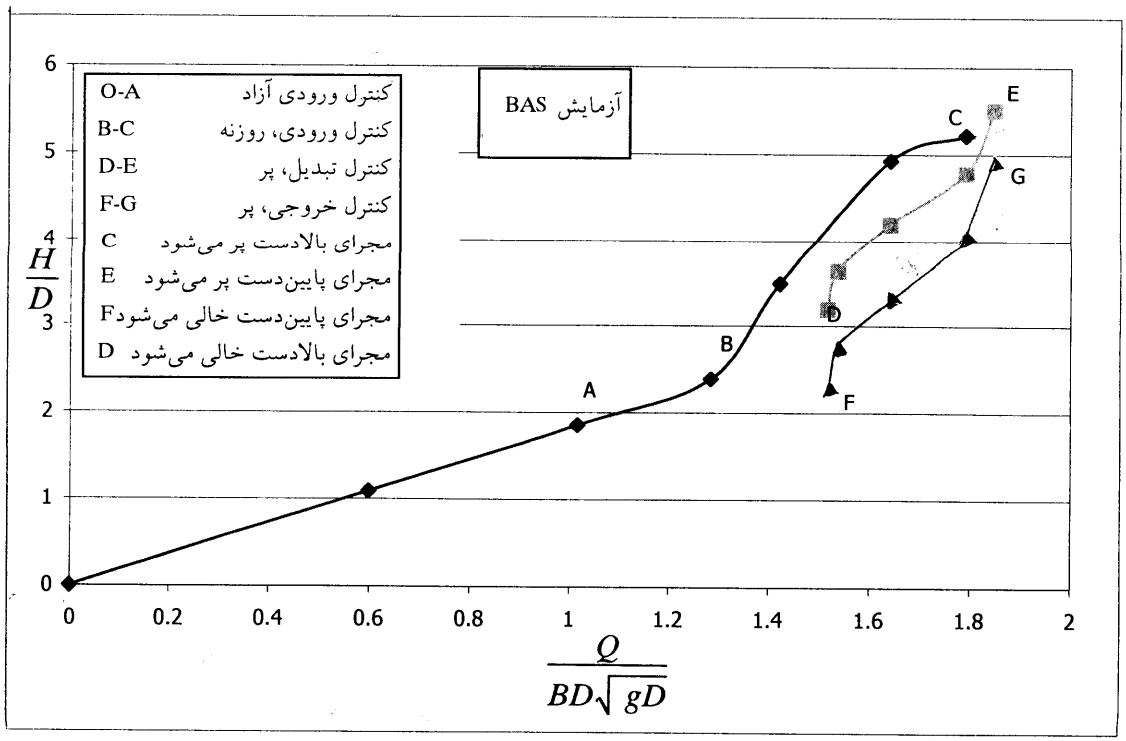
در یک دبی خاص (نقطه‌ی C)، عمل خود – هواگیری رخ داده و مجرای بالادست پر می‌گردد. با پر شدن مجرای بالادست، کنترل از مقطع ورودی به مقطع تبدیل منتقل می‌شود و بخش دیگری را از منحنی رفتار تولید می‌کند (انتقال به شاخه D - E).

منحنی D - E (کنترل در مقطع تبدیل) – در این شرایط مقطع کنترل برای هر دو آزمایش مقطع تبدیل می‌باشد، امّا تفاوت‌های ظریفی در بین رفتار آنها مشاهده می‌شود. در ABS عمق نرمال در مجرای مقطع طاق قوسی بیشتر از عمق نرمال در مقطع مستطیلی پایین‌دست است و چون در مقطع تبدیل رقوم سقف پایین می‌افتد، عمق نرمال مجرای بالادست به سقف مجرای پایین‌دست می‌رسد؛ دراین صورت عمل خود – هواگیری در مجرای بالادست رخ می‌دهد. با پر شدن مجرای بالادست، کاهش رقوم سقف مانند یک دریچه عمل می‌کند و باعث پر ماندن مجرای بالادست می‌شود (شکل d – ۵). مجرای پایین‌دست هنگامی پر می‌شود که جریان افزایش یابد و عمق نرمال آن به رقوم سقف نزدیک شود. در BAS مجرای بالادست هنگامی پر می‌شود که عمق نرمال به سقف برسد. در مقطع تبدیل رقوم سقف افزایش می‌یابد. اگرچه عمق نرمال در مجرای دوم بالاتر می‌باشد اما هنوز پایین‌تر از سقف و جریان در مجرای پایین‌دست به‌صورت نیمه‌پر است (شکل e – ۵). در هر دو حالت مجرای پایین‌دست هنگامی پر می‌شود که افزایش جریان به‌حدّی باشد که عمق نرمال به رقوم سقف نزدیک شود.

منحنی F - G (کنترل در خروجی) – مجموعاً برروی شیب‌های تند در جریان‌های کم، نقطه‌ی کنترل در ورودی است، سپس با افزایش جریان کنترل به‌ترتیب از مقطع ورودی به مقطع تبدیل و سپس به مقطع خروجی جابجا می‌شود. با کاهش جریان نقطه‌ی کنترل دوباره به مقطع تبدیل و بعد به مقطع ورودی برمی‌گردد. در هر دو حالت



شکل ۳ – منحنی رفتار برای مدل آبگذر پیچیده در آزمایش ABS



شکل ۴ – منحنی رفتار برای مدل آبگذر پیچیده در آزمایش BAS

میزان جریانی که در آن مقطع کنترل از یک نقطه به نقطه‌ی دیگر جابجا می‌شود به این موضوع بستگی دارد که آیا دبی در حال افزایش است یا کاهش. این تأثیر به موقعیّت نقطه‌ی شروع عمل خود - هواگیری (پر شدن) و شروع خود - هوادهی (تخلیه) مربوطه می‌باشد. در یک دبی ثابت، عمل خود - هواگیری و خود - هوادهی صورت نمی‌گیرد. به عبارت دیگر برای یک دبی ثابت - باتوجّه به شرایط موجود، اگر خود - هواگیری یا خود - هوادهی - وجود داشته باشد عمق بالادست متفاوت خواهد بود.

تغییر ناگهانی رقوم سرآب

در این آزمایش‌ها که با شیب تند انجام گردید، ملاحظه شد، هنگامی‌که بر اثر خود - هواگیری یک مجرا پر می‌گردد، کاهش قابل‌توجّهی در رقوم سطح آب بالادست پدید می‌آید و زمانی‌که یک مجرا از حالت پر خارج می‌گردد (عمل خود - هوادهی) افزایش سریعی در رقوم سطح آب بالادست نمایان می‌گردد.

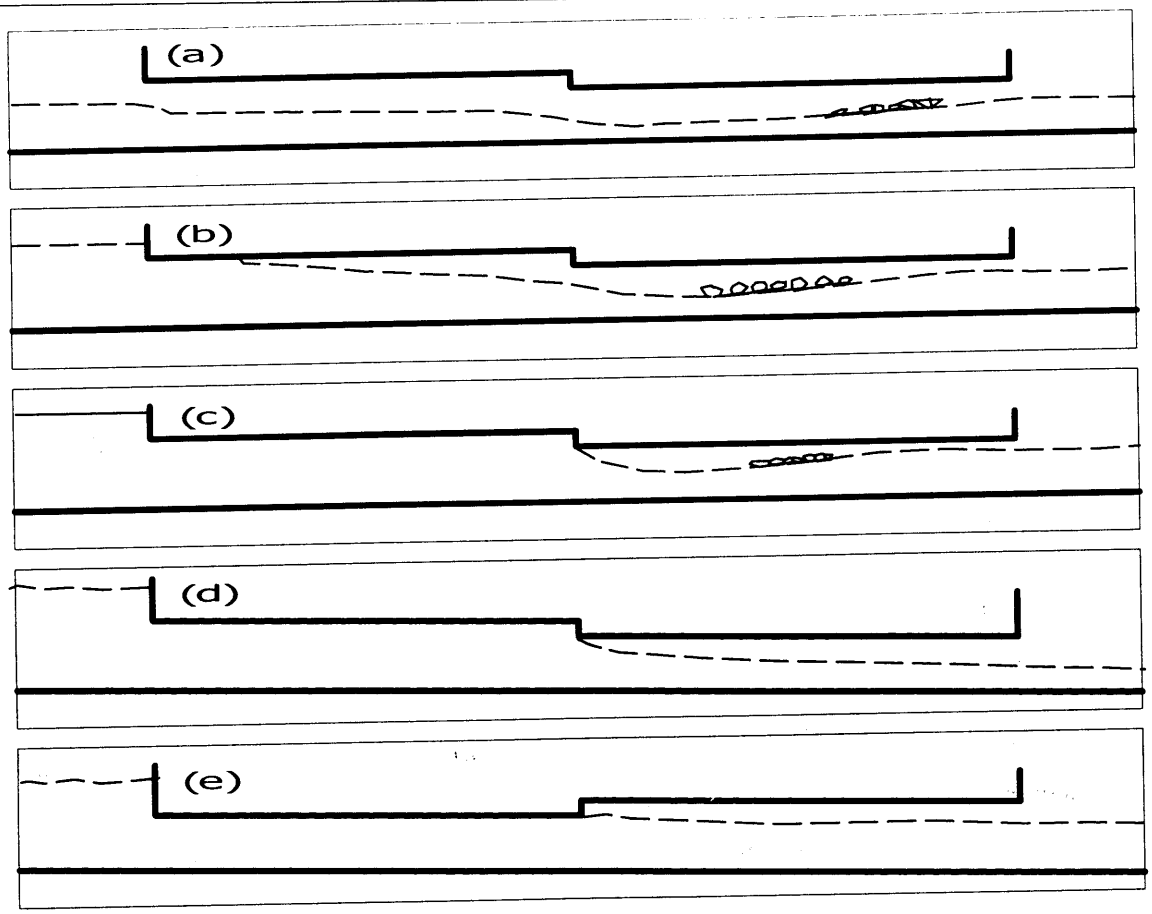
بحث

همانطوری‌که مهندسین اداره‌ی محیط زیست بریتانیا تصوّر می‌کردند، ابعاد هندسی پیچیده، بر خصوصیّات هیدرولیکی آبگذرها تأثیر برجسته‌ای دارد. نقطه‌ی کنترل ممکن است در نقطه‌ای درون آبگذر قرار گیرد، نقطه‌ای به‌غیر از مقطع ورودی یا خروجی. محاسبه‌ی پروفیل‌های سطحی نیز بستگی به موقعیّت نقطه‌ی کنترل دارد. آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که یک تغییر مقطع می‌تواند بر نقطه‌ی شروع خود - هواگیری (پر شدن مجرا) و درنتیجه موقعیّت نقطه‌ی کنترل تأثیر بگذارد.

در یک آبگذر با شیب ملایم، در دبی‌های کم، مقطع کنترل در پایین‌دست است (۲، ۱۳ و ۱۵). که در این حالت یک منحنی برگشت آب به تعیین رقوم سطح آب در بالادست منتهی می‌شود و در دبی‌های زیاد، معمولاً مقطع کنترل به مقطع ورودی منتقل می‌شود. بین این دو حد، مقطع کنترل می‌تواند به‌دلایلی مانند تغییر شکل مقطع، در هر نقطه‌ی میانی درون آبگذر قرار گیرد (۱۰). برای چنین رخدادی، می‌باید تبدیل یک جریان فوق‌بحرانی در پایین‌دست ایجاد کند. در جریان با سطح آزاد این امر می‌تواند به‌وسیله‌ی تنگ شدن یا گشاد شدن در عرض، یا وجود یک پلّه درکف ایجاد شود (تأثیری از سقف آبگذر وجود ندارد). اگر مجرای بالادست پر گردد، در این صورت وجود یک کاهش به اندازه‌ی کافی در مساحت سطح مقطع آبگذر ضروری است.

در یک آبگذر با شیب تند و در جریان‌های کم، نقطه‌ی کنترل در مقطع ورودی می‌باشد. مقطع کنترل فقط وقتی به مقاطع تبدیل میانی منتقل می‌شود که مجرای بالادست این مقطع تبدیل پر شده باشد. دراین صورت وجود یک کاهش به‌اندازه‌ی کافی در سطح مقطع کلّی جریان لازم است تا باعث انسداد نسبی جریان شود و مجرای بالادست را پر نگه دارد. دراین صورت جریان پایین‌دست باتوجّه به شیب تند، فوق‌بحرانی خواهد بود.

علّت تغییر سریع رقوم سرآب در هنگام عمل خود - هواگیری نسبتاً ساده است و میزان این تغییر به عوامل مختلفی از جمله فاصله‌ای که نقطه‌ی کنترل روی آن جابجا می‌شود، جهت جابجایی نقطه‌ی کنترل، شیب آبگذر و شیب خط هیدرولیکی بستگی دارد. برای محاسبه‌ی رقوم سرآب بایستی روندیابی را از نقطه‌ی کنترل آغاز کرد و موقعیّت خط گرادیان هیدرولیکی را در آن نقطه از فشار اتمسفریک (یعنی نقطه‌ی فشار برای مجرای پر که تخلیه‌ی آزاد دارد (۸) و یا سطح آزاد آب درصورتی‌که بالاتر از آن نقطه فشار باشد)



شکل ۵ - پروفیل جریان برای حالات کنترل در مقطع تبدیل

درنظر گرفت. اگر نقطه‌ی کنترل در یک آبگذر با شیب تند به پایین‌دست منتقل گردد، نقطه‌ی شروع در محاسبه‌ی خطّ گرادیان هیدرولیکی، تقریباً به‌اندازه‌ی اختلاف رقوم کف در ابتدا و انتهای آبگذر (حاصل ضرب شیب در طول آبگذر) پایین می‌افتد و اگر شیب خطّ گرادیان هیدرولیکی، به‌طور مشخّص، از شیب آبگذر کمتر باشد رقوم خط گرادیان هیدرولیکی در انتهای بالادست آبگذر به همان میزان افت خواهد کرد. از این‌رو در آزمایش‌های انجام شده کاهش سریعی در رقوم سرآب دیده می‌شود.

سخن آخر این‌که : برای محاسبه‌ی پروفیل‌های سطح آب و ترسیم منحنی‌های رفتار (PC) در شرایط مشخّص، باید بتوانیم موقعیّت نقطه‌ی کنترل را تعیین کنیم. این امر برای آبگذرهای با شیب ملایم در درجه‌ی اوّل اهمّیّت است، ولی در آبگذرهای با شیب تند به‌علّت عدم‌اطمینان در تخمین پارامترها (۷، ۱۱ و ۱۷)، تعیین نقطه‌ی خود - هواگیری (شروع پر شدن) در مرحله‌ی افزایش دبی (۸) و همچنین تعیین نقطه‌ی خود - هوادهی (شروع به تخلیه) در مرحله‌ی کاهش دبی، تعیین موقعیّت نقطه‌ی کنترل برای یک دبی خاص به‌سادگی میسّر نیست (۹). بنابراین تعیین شرایطی که سبب جابجایی نقطه‌ی کنترل می‌شود مشکل می‌باشد. این موضوع به مطالعات و بررسی‌های بیشتری نیاز دارد.

References

1. Blaisdell FR (1966) Flow in culverts and related philosophies, Proceedings of the

American Society of Civil Engineers, Vol. 92, No. HY2 : 19-31.

2. Bodhaine GL (1968) Measurement of peak discharge at culverts by indirect methods, Technical Water Research,Investigation Book No. 3, Chapter A3, U.S. Geological Survey. 60 PP.
3. Dasika B (1995) New approach to design of culverts, technical note, ASCE, Journal of the Irrigation and Drainage Engineering: 261-267.
4. Day RA (1997) Preliminary observations of turbulent flow at culvert Inlets, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of Hydraulic Engineering, 123: 116-124.
5. Fulford JM (1993) A culvert analysis program for indirect measurement of discharge, Hydraulic Engineering 93, Proceedings of the 1993 Conference, Edited by Hsieh Wen Shen, S. T. Su, and Feng Wen. 2213-2218.
6. GKY and Associates, Inc (1992) Hydrain -Integrated drainage computer system Volume VI. HY8-Culverts, February 1, 1992, Structure Division, HNR-10 Federal Highway Administration. 33 PP.
7. Johnson P (1996) Uncertainty of hydraulic parameters, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 122, No. 2, ASCE. 112-114.
8. Li WH and Patterson CC (1956) Free outlets and self-priming action of culverts, Journal of Hydraulic division, ASCE., 82: 1009-22.
9. Mashal M and Ball DJ (1998) A model for complex culverts in urban drainage, International Conference on Urban Drainage Modelling, 21-24 September 1998, London, UK.
10. Mashal M and Ball DJ (1998) The hydraulic performance of a model complex culvert.; the First International Conference on Integrated Water Resources Management " Concepts, Application and Implementation " (Towards the 21st Century), 11-14 October 1998. Alexandria-Egypt.
11. Mays LW (1979) Optimal design of culvert under uncertainties, Journal of the Hydraulic Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 105: 443-460.
12. Meados ME and Walski TM (1997) Computer applications in hydraulic engineering, chap. 5, culvert hydraulics, Heastad press, June 1997 : 75-91.
13. Normann JM, Houghtalen RJ and Johnston WJ (1985) Hydraulic design of highway culverts, HDS No.5, Hydraulic Branch, Bridge Division, Office of Engineering. Federal Highway Administration, Washington D.C. 253 PP.
14. Rajaratnam N, Katopodis C and Lodewyle S (1990) Hydrulic of culvert fishways V: Alberta fish weir and baffles, Canadian Journal of civil engineering, 17: 1015-1021.
15. Ramsbottom D, Day R and Rickard C (1996) Hydraulic design of culverts, Construction Industry Research and Information Association, Funders Report/CP/40, CIRIA. 189 PP.
16. Smith CD and Oak AG (1995) Culvert inlet efficiency, Canadian Journal of Civil Engineering, 22: 611-616.
17. Tung YK, Mays LW (1981) Risk analysis for hydraulic design, Journal of the Hydraulic Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 106: 893-913.