نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۲۰، مهر - آبان ۱۴۰۵، ص. ۶۸۴-۶۷۱

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.4, Vol. 20, Oct.-Nov. 2026, p. 671-684

مقاله علمی-پژوهشی

اثر ویژگی‌های هیدروگراف بر هیسترزیس در جریان‌های غیرماندگار

امین ناظری[۱]، صلاح کوچک‌زاده[۲*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۷

چکیده

پدیده هیسترزیس در جریان‌های غیرماندگار سبب ایجاد اختلاف میان دبی واقعی و دبی برآوردشده از منحنی‌های سنجه یک‌به‌یک می‌شود و بدین ترتیب دقت پایش و اندازه‌گیری جریان را کاهش می‌دهد. در این پژوهش، اثر ویژگی‌های هیدروگراف بر شدت هیسترزیس با تمرکز بر هیدروگراف‌های مثلثی متقارن بررسی شده است. برای تعمیم نتایج، پارامترهای فیزیکی مؤثر شامل دبی پایه، ارتفاع هیدروگراف و زمان پایه به سه پارامتر بی‌بعد یعنی عدد فرود جریان پایه، عدد فرود ارتفاع هیدروگراف و زمان بی‌بعد تبدیل گردید. این مطالعه بر اساس داده‌های ۱۹۲ آزمایش فیزیکی در یک فلوم طویل از نظر هیدرولیکی با طول ۶۰ متر و مقطع ذوزنقه‌ای با عرض کف ۳۰ سانتی‌متر، شیب جداره‌های ۱:۱ و ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر انجام شد. نتایج نشان داد شدت هیسترزیس به‌طور مستقیم تحت تأثیر مشخصات هیدروگراف عبوری قرار دارد. با ثابت بودن سایر پارامترها، افزایش زمان بی‌بعد موجب افزایش اولیه شدت هیسترزیس، رسیدن به یک مقدار بیشینه در بازه میانی و سپس کاهش آن می‌شود. همچنین افزایش عدد فرود ارتفاع هیدروگراف در کل دامنه زمان بی‌بعد، هیسترزیس را تشدید می‌کند؛ درحالی‌که افزایش عدد فرود جریان پایه اثر کاهنده بر آن دارد.

واژه‌های کلیدی: دبی ـ شاخص، جریان غیرماندگار، مدل آزمایشگاهی، هیدروگراف، هیسترزیس

مقدمه

نظارت و اندازه‌گیری پیوسته‌ی دبی در رودخانه‌ها و مجاری آبی، برای اهدافی همچون پیش‌بینی رفتار هیدرولوژیکی رودخانه، مدیریت بهره‌برداری از سدها و سازه‌های آبی و برنامه‌ریزی‌های مدیریت منابع آب، از اهمیت بنیادینی برخوردار است. با وجود تلاش‌های مستمر برای توسعه‌ی راهکارهای اندازه‌گیری مستقیم و پیوسته‌ی دبی در مجاری با سطح آزاد، در عمل، روش‌های غیرمستقیم همچنان تنها گزینه برای ثبت داده‌های بلندمدت دبی به شمار می‌روند. متداول‌ترین روش‌های اندازه‌گیری غیرمستقیم، روش‌های دبی ـ شاخص، سرعت شاخص و شیب ـ مساحت هستند که همگی بر روابطی استوارند که دبی جریان را به متغیرهای قابل‌اندازه‌گیری پیوسته در محل، مانند تراز سطح آب یا سرعت در یک نقطه، مرتبط می‌سازند.

اولین و قدیمی‌ترین روش نظارت مستمر بر جریان روش دبی ـ شاخص است (Herschy, 2009). مبنای نظری این روش استفاده از یک منحنی سنجه بین دبی و عمق آب است که دبی Q را به‌صورت تابعی از عمق جریان h در نظر می‌گیرد. به‌طورکلی اساس کار تمامی روش‌های اندازه‌گیری پیوسته بر این فرض استوار است که بین دبی و پارامترهای جریان یک رابطه یک‌به‌یک و منحصربه‌فرد برقرار است. چنین فرضی تنها برای جریان دائم و یکنواخت معتبر خواهد بود (Muste and Hoitink, 2017)، چراکه در جریان‌های غیرماندگار، پدیده هیسترزیس موجب می‌شود که رابطه یک‌به‌یک بین پارامترهای جریان برهم‌خورده و منحنی‌های سنجه به منحنی‌های حلقه‌ای شکل تبدیل شوند. این حلقه‌ها را در اصطلاح حلقه‌های هیسترزیس می‌نامند. پدیده‌ی هیسترزیس محدود به علم هیدرولیک و جریان در مجاری روباز نیست و درواقع یک اصطلاح عمومی است که نشان می‌دهد وضعیت یک سامانه در هر نقطه‌ی معین، به تاریخچه‌ی سامانه برای رسیدن به آن وضعیت وابسته است. این پدیده را می‌توان در حوزه‌های مختلفی مانند فیزیک، شیمی، مهندسی و اقتصاد مشاهده کرد (Muste et al., 2020).

رخداد پدیده‌ی هیسترزیس در جریان‌های غیرماندگار را می‌توان در ماهیت ذاتی و ساختار معادلات حاکم بر این نوع جریان‌های

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲- استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران کرج، صندوق پستی ۴۱۱۱-۳۱۵۸۷ ۳۱۵۸۷-۷۷۸۷۱ ایران
(* نویسنده مسئول: Email: skzadeh@ut.ac.ir)
DOI: 10.22034/idj.2026.580967.2685

جستجو کرد. معادله ۱ شکلی از معادلات سنت‌ونان است که ارتباط بین دبی جریان غیرماندگار و دبی در حالت ماندگار را با در نظر گرفتن ترم‌های شتاب محلی، شتاب جابجایی و گرادیان انرژی بیان می‌کند. (Knight, 2006):

$$Q = Q_s \sqrt{1 - \frac{1}{S_0}\frac{\partial h}{\partial x} - \frac{v}{gS_0}\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{gS_0}\frac{\partial v}{\partial t}} \quad (۱)$$

که در آن S_0 شیب کف کانال، v سرعت متوسط در سطح مقطع، t زمان، h عمق جریان، g شتاب گرانش و x بیانگر فاصله در امتداد کانال است.

در این رابطه، Q_s تنها تابع عمق جریان بوده و معرف دبی در شرایط جریان ماندگار است، درحالی‌که ترم‌های مشتق زمانی و مکانی سرعت بیانگر وابستگی جریان به تاریخچه زمانی آن هستند. در طول یک رویداد سیلاب، تغییر علامت و مقدار این پارامترها در فازهای افزایشی و کاهشی جریان موجب می‌شود که برای یک عمق مشخص، مقدار دبی یکسان نباشد. این رفتار غیر یکتا در رابطه دبی ـ شاخص، منشأ بروز پدیده هیسترزیس در جریان غیرماندگار است (Bombar, 2016; Muste & Lee, 2020). مطالعات جدیدتر نیز حاکی از آن است که بروز هیسترزیس در جریان‌های غیرماندگار به تغییر توازن ترم‌های معادله مومنتوم سنت‌ونان وابسته است. هاوس همکاران با تحلیل دقیق ترم‌های مومنتوم در رخدادهای سیلابی نشان دادند که فعال شدن تدریجی ترم‌های گرادیان فشار و مؤلفه‌های دینامیکی نقش مهمی در شکل‌گیری رفتار هیسترزیسی جریان دارد (House et al., 2025).

روش دبی ـ شاخص قادر به ثبت رفتار هیسترزیس جریان نیست، زیرا در این روش رابطه بین دبی و شاخص جریان برای شاخه‌های صعودی و نزولی هیدروگراف یکسان در نظر گرفته می‌شود؛ درحالی‌که در جریان‌های غیرماندگار، این رابطه برای شاخه‌های صعودی و نزولی یکسان نبوده و منحنی دبی ـ شاخص به‌صورت یک حلقه ظاهر می‌شود. ازاین‌رو، برای ثبت صحیح حلقه‌های هیسترزیس در هنگام عبور جریان‌های غیرماندگار، اصلاح این روش ضروری است (Muste et al., 2020). فنتون و کلر نشان دادند که فرض یکتایی رابطه دبی ـ شاخص در جریان‌های غیرماندگار از نظر هیدرولیکی کامل نیست، زیرا تغییرات شیب سطح آب و ذخیره کانال می‌تواند موجب بروز هیسترزیس در این رابطه شود. این گزارش فنی همچنین بر ضرورت اصلاح منحنی‌های سنجه در شرایط جریان‌های غیرماندگار، تأکید می‌کند (Fenton and Keller., 2001). دی‌بالداسار و مونتاناری با انجام مطالعه‌ای بر روی رودخانه پو نشان دادند که عدم اصلاح منحنی‌های سنجه می‌تواند در هنگام وقوع امواج سیلاب به بروز خطاهای قابل‌توجه در برآورد دبی منجر شود، به‌طوری‌که مقدار این خطا در برخی موارد بیش از ۱۵ درصد گزارش شده است (Di Baldassarre and Montanari., 2009). از سوی دیگر، استفاده از منحنی‌های جریان ماندگار برای تحلیل جریان‌های غیرماندگار می‌تواند موجب خطا در برآورد زمان وقوع دبی اوج شود، زیرا در شرایط جریان غیرماندگار، دبی پیش از عمق جریان به مقدار بیشینه خود می‌رسد (Harshi, 2009).

بدون شک، یکی از شناخته‌شده‌ترین و پرکاربردترین روابط برای تخمین دبی در جریان‌های غیرماندگار، رابطه ارائه‌شده توسط جونز است که پایه و مرجع بسیاری از مطالعات بعدی در این زمینه به شمار می‌رود. جونز با استفاده از معادله شزی و تحلیل‌های هندسی، رابطه‌ای برای برآورد دبی در شرایط جریان غیرماندگار ارائه کرد که در آن از پارامترهایی مانند شیب سطح آب، سرعت جریان و نرخ تغییرات عمق برای تخمین دبی استفاده می‌شود (Jones, 1916). پس‌ازآن، روش‌های متعددی توسط پژوهشگران برای اصلاح منحنی‌های سنجه در جریان‌های غیرماندگار پیشنهاد شده است. برخی از این روش‌ها مبتنی بر داده‌های تجربی و نیمه تجربی هستند، مانند روش‌های ارائه‌شده توسط کندی، اشمیت و دوتوری و همکاران (Kennedy, 1984; Schmidt, 2002; Dottori et al., 2009) و برخی دیگر از مدل‌های تحلیلی استفاده می‌کنند، مانند روش‌های ارائه‌شده توسط چو، پترسن–اوورلیر و اوزبی (Chow, 1959; Petersen-Overleir, 2006; Ozbey, 2011). استفاده از روش‌های اصلاح معمولاً با پیچیده‌تر شدن عملیات اندازه‌گیری و درنتیجه افزایش هزینه‌ها همراه است. کم‌هزینه‌ترین و ساده‌ترین روش‌های اصلاح، روش‌هایی هستند که از همان منحنی سنجه در حالت ماندگار برای برآورد این منحنی در شرایط جریان غیرماندگار استفاده می‌کنند، مانند روش‌های ارائه‌شده توسط فرد و لی و ماسته (Fread, 1975; Lee and Muste, 2017).

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که هیسترزیس در رابطه دبی ـ شاخص در بسیاری از ایستگاه‌های هیدرومتری مشاهده می‌شود. برای مثال، هاوس و همکاران با بررسی داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری گزارش کردند که این پدیده در حدود ۶۷ درصد ایستگاه‌های موردبررسی مشاهده می‌شود و نادیده گرفتن آن می‌تواند به خطاهایی تا حدود ۶۵ درصد در برآورد دبی منجر شود (House et al., 2025). همچنین، پره و همکاران با بررسی بیش از ۲۶۰۰ ایستگاه هیدرومتری در شبکه ملی فرانسه نشان دادند که در شرایط جریان‌های سیلابی سریع و شیب‌های بستر کم، اثر هیسترزیس می‌تواند موجب خطای قابل‌توجه در برآورد دبی شود (Perret et al., 2022). تانگ و همکاران نیز با انجام آزمایش‌هایی نشان دادند که ورود جریان از شاخه‌های فرعی و همچنین دوره زمانی جریان غیرماندگار در آبراه اصلی می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی اندازه و رفتار حلقه‌های هیسترزیس را تغییر دهد (Tang et al., 2024). در برخی مطالعات آزمایشگاهی تلاش شده است رفتار هیسترزیسی منحنی سنجه در مدل‌های

فیزیکی بازتولید شود. برای مثال، در یک پژوهش آزمایشگاهی با استفاده از کانال چاپ‌شده سه‌بعدی، تشکیل منحنی‌های سنجه حلقه‌ای در پاسخ به هیدروگراف‌های غیرماندگار بررسی شد و نتایج نشان داد که رفتار مشاهده‌شده با پیش‌بینی‌های رابطه جونز تطابق مناسبی دارد (Majdalani et al., 2023).

پژوهش‌ها همچنین نشان می‌دهند که مقدار و الگوی هیسترزیس به ویژگی‌های رودخانه و مشخصات رویداد هیدرولوژیکی وابسته است. دوتوری و همکاران با انجام آزمایش‌های عددی نشان دادند که در بسترهایی با شیب بیشتر از ۵×۱۰^{-۴}، امواج هیسترزیس ایجاد نمی‌شود (Dottori et al., 2009). همچنین، دی‌بالداسار و مونتاناری نتیجه گرفتند که در رودخانه‌های با بستر ملایم و فاقد اثر جزر و مد، غیرماندگار بودن جریان می‌تواند سبب اختلاف قابل‌توجه بین دبی تخمین‌زده‌شده از روش منحنی دبی ـ شاخص و مقادیر واقعی شود (Di Baldassarre and Montanari, 2009). در مقابل، نتایج تحقیقات هولمز نشان می‌دهد که میزان هیسترزیس اندازه‌گیری‌شده در رودخانه‌های متوسط و کوچک ناچیز بوده و قابل تشخیص از عدم قطعیت ابزارهای اندازه‌گیری نیست (Holmes, 2016).

به‌طورکلی پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه شناخت پدیده هیسترزیس، عمدتاً بر بررسی اثر این پدیده بر روش‌های اندازه‌گیری جریان و شناسایی نواحی مستعد بروز آن متمرکز بوده‌اند؛ درحالی‌که برخی ابعاد مهم هیسترزیس، از جمله نقش مشخصه‌های هیدروگراف عبوری در شکل‌گیری و توسعه این رفتار، تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته و تا حد زیادی ناشناخته باقی مانده است. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر خصوصیات هیدروگراف عبوری بر میزان و شدت هیسترزیس به‌وجودآمده انجام شد. با توجه به تنوع گسترده اشکال هیدروگراف‌های جریان و محدودیت‌های موجود در بررسی جامع تمامی این الگوها، اغلب مطالعات آزمایشگاهی مرتبط با جریان‌های غیرماندگار، تمرکز خود را بر یک نوع مشخص از هیدروگراف معطوف کرده‌اند. در همین راستا، در این تحقیق نیز به‌منظور تحلیل نظام‌مند اثر ویژگی‌های هیدروگراف عبوری بر میزان هیسترزیس، هیدروگراف‌های مثلثی متقارن به‌عنوان الگوی مرجع انتخاب و مورد بررسی قرار گرفتند.

مواد و روش‌ها

سامانه آزمایشگاهی موردنیاز جهت انجام آزمایش‌های این پژوهش، در آزمایشگاه مرکزی تحقیقات آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران آماده‌سازی و مورد استفاده قرار گرفت. کانال آزمایشگاهی مورداستفاده دارای طول ۶۰ متر بود که از این لحاظ می‌توان آن را یکی از طولانی‌ترین فلوم‌های آزمایشگاهی موجود در کشور دانست. این کانال از ورق آهن گالوانیزه ساخته شده و مقطع آن ذوزنقه‌ای با عرض کف ۰/۳ متر، عمق ۰/۲۵ متر، شیب جانبی ۱:۱ و متوسط شیب کف ۰/۰۰۰۹ بود. ارتفاع کف کانال از سطح زمین برابر با ۱/۲ متر بود. در ابتدای کانال، به‌منظور کاهش تلاطم و آرام‌سازی جریان ورودی، سامانه‌ای برای کاهش تلاطم ایجاد شد.

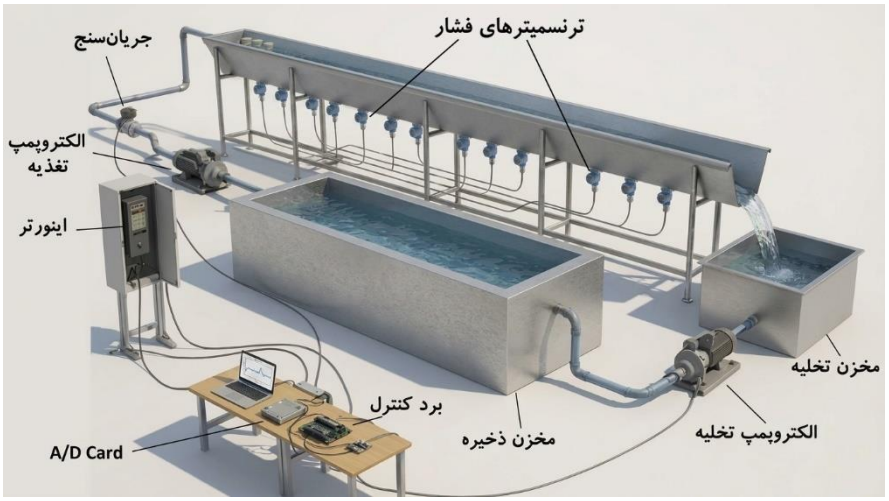
کل سازه‌ی کانال بر روی پایه‌های فلزی قابل تنظیم استقرار یافته بود. قابلیت تغییر ارتفاع این پایه‌ها، تنظیم دقیق شیب طولی کانال را در شرایط مختلف آزمایشگاهی امکان‌پذیر می‌ساخت. در محل‌های اتصال صفحات تشکیل‌دهنده‌ی بدنه‌ی کانال، عملیات آب‌بندی و صیقل‌دهی انجام شد تا ضمن جلوگیری از هرگونه نشت آب، از ایجاد تلاطم و اغتشاشات موضعی در جریان نیز پیشگیری شود. جریان خروجی از کانال به یک مخزن فلزی با ابعاد ۱×۱/۵×۲ متر منتقل می‌شد تا امکان جمع‌آوری و کنترل آب خروجی فراهم شود. برای ایجاد گردش جریان در سیستم آزمایشگاهی، از دو دستگاه الکتروپمپ حلزونی استفاده شد؛ بدین‌صورت که الکتروپمپ تغذیه، آب را از مخزن ذخیره به ابتدای کانال منتقل می‌کرد و الکتروپمپ تخلیه، جریان خروجی از کانال را از مخزن تخلیه به مخزن تغذیه بازمی‌گرداند. دبی ورودی به کانال نیز به‌وسیله یک دبی‌سنج الکترومغناطیسی اندازه‌گیری و کنترل می‌شد تا مقادیر دبی جریان با دقت مناسب ثبت گردد.

با توجه به این‌که هیدروگراف ورودی به کانال در هر آزمایش می‌بایست دارای یک سری خصوصیات هندسی خاص و تکرارپذیر باشد از راه‌انداز (درایو) تغییر دور الکتروموتور استفاده شد. درایوهای کنترل دور موتور با تغییر فرکانس جریان برق ورودی به موتور، سرعت آن را بدون کاهش محسوس گشتاور کنترل می‌کنند. در انجام آزمایش‌های این پژوهش نیز، برای کنترل دور الکتروپمپ و در نتیجه تنظیم دقیق دبی جریان، از یک دستگاه درایو مدل Micromaster 420 ساخت شرکت زیمنس (Siemens) استفاده شد. این درایو به‌وسیله یک تابلوی کنترل به رایانه متصل می‌شد.

برای اندازه‌گیری عمق جریان در کانال آزمایشگاهی، مجموعه‌ای شامل ۱۳ ترنسمیتر فشار ساخت شرکت‌های Atek و Wika با محدوده‌های اندازه‌گیری ۶۰ و ۱۶۰ میلی‌بار در طول کانال نصب شد تا تغییرات سطح آب در سرتاسر مسیر جریان ثبت شود. انتخاب محدوده فشار هر حسگر متناسب با شرایط هیدرولیکی مقاطع مختلف انجام شد تا ضمن حفظ دقت اندازه‌گیری و محدود کردن خطای ثبت تراز آب به کمتر از یک میلی‌متر، از اشباع یا کاهش حساسیت حسگرها جلوگیری شود. مقطع اصلی اندازه‌گیری عمق در نزدیک‌ترین فاصله ممکن نسبت به ورودی کانال انتخاب شد. این مقطع در موقعیتی قرار داشت که پس از عبور جریان از ناحیه توسعه اولیه، تلاطم‌های ناشی از ورود جریان به حداقل رسیده باشد. عمق ثبت‌شده در این مقطع، مبنای محاسبات پارامتر هیسترزیس قرار گرفت. با توجه به نصب اولین ترنسمیتر در فاصله حدود یک متری از ورودی و با در

نظر گرفتن ابعاد کانال آزمایشگاهی، حجم ذخیره آب در این بازه محدود بوده و تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر شکل هیدروگراف عبوری نداشت. علاوه بر این، شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در نرم‌افزار هگ‌رس (HEC-RAS) تأیید کرد که اختلاف میان هیدروگراف ورودی و هیدروگراف عبوری از این مقطع بسیار ناچیز است؛ ازاین‌رو، داده‌های این مقطع به‌عنوان نماینده مناسبی از شرایط ورودی کانال در نظر گرفته شد.

خروجی‌های الکتریکی آنالوگ دبی‌سنج الکترومغناطیسی و حسگرهای فشار به سامانه ثبت داده متصل شدند تا تغییرات دبی و سطح آب به‌صورت لحظه‌ای و پیوسته ذخیره و ثبت شوند. برای قرائت و ثبت داده‌ها سامانه‌ای طراحی و احداث شد. کنترل درایور، قرائت و ثبت داده‌ها توسط برنامه‌ای که در محیط نرم‌افزاری لب‌ویو (Labview) توسعه یافت، صورت گرفت. نمای کلی مجموعه آزمایشگاهی در شکل ۱ و بخش‌های مختلف آن در شکل ۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است که شکل ۱ نمای ساده‌شده‌ای از مدل آزمایشگاهی بوده و تناسب ابعاد در آن دقیقاً مطابق با مقیاس واقعی نیست.



شکل ۱- نمای سه‌بعدی از مجموعه آزمایشگاهی مورداستفاده در این پژوهش



ب الف

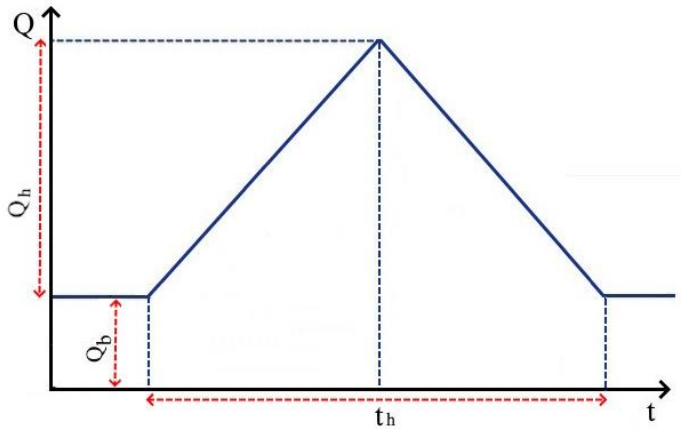
شکل ۲- بخش‌های مختلف مجموعه آزمایشگاهی مورداستفاده: الف- جت ریزشی انتهایی و مخزن تخلیه ب- مخزن بتنی ذخیره آب

روش انجام آزمایش‌ها بدین‌صورت بود که پیش از شروع هر آزمایش، مشخصات هیدروگراف موردنظر از طریق رایانه به تابلوی کنترلی درایو منتقل و در آن بارگذاری می‌شد. برای هر هیدروگراف، برنامه کنترلی به‌گونه‌ای تنظیم شده بود که در آغاز و پایان آزمایش یک بازه زمانی اولیه و انتهایی اختصاص یابد که طی آن دبی ورودی به کانال ثابت نگه داشته می‌شد.

مدت‌زمان اولیه هر آزمایش به‌گونه‌ای تنظیم می‌شد که تغییرات عمق جریان در کانال به صفر رسیده و پیش از آغاز هیدروگراف، شرایط جریان ماندگار در سراسر کانال برقرار شود. همچنین پس از پایان هیدروگراف، جریان ورودی برای مدت‌زمان مشخصی به‌صورت ثابت ادامه می‌یافت تا جریان دوباره در تمام طول کانال به حالت ماندگار بازگردد. پس از شروع هر آزمایش و تثبیت شرایط جریان ماندگار در طول کانال، فرآیند ثبت داده‌های دریافتی از ترنسمیترهای فشار و جریان‌سنج الکترومغناطیسی توسط نرم‌افزار آغاز می‌شد. این فرآیند تا پایان هیدروگراف و تثبیت مجدد شرایط جریان ادامه می‌یافت.

پارامترهای مورد آزمایش

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده‌شده است، مشخصه‌های هندسی یک هیدروگراف مثلثی متقارن با پارامترهای دبی پایه Q_b، دامنه تغییرات دبی هیدروگراف یا ارتفاع هیدروگراف Q_h و زمان پایه هیدروگراف t_h قابل‌تعریف است. به‌منظور بررسی تأثیر هر یک از این پارامترها بر میزان هیسترزیس ایجادشده، مقادیر متفاوتی برای هر پارامتر انتخاب و در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر این پارامترها که بر اساس آزمایش‌های اولیه و تحلیل‌های مقدماتی و با توجه به تجهیزات و امکانات موجود تعیین شدند، در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۳- پارامترهای هندسی یک هیدروگراف مثلثی متقارن در حالت کلی

جدول ۱- نام و مقادیر پارامترهای مورداستفاده در انجام آزمایش‌ها

نام پارامتر	مقادیر پارامتر										
دبی پایه Q_b (لیتر بر ثانیه)	۴		۶		۸		۱۰				
ارتفاع هیدروگراف Q_h (لیتر بر ثانیه)	۴		۶		۸		۱۰				
زمان پایه هیدروگراف t_h (ثانیه)	۴۰	۶۰	۱۰۰	۱۴۰	۱۶۰	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۶۰۰	۸۰۰	۱۰۰۰	۱۲۰۰

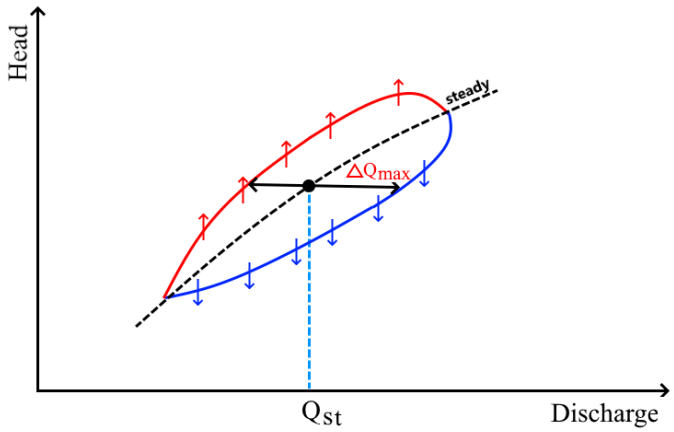
شاخص بی‌بعد شدت هیسترزیس

در پژوهش‌های مرتبط با پدیده هیسترزیس، تعریف پارامتری که بتواند به‌صورت کمی و دقیق، شدت هیسترزیس را توصیف کند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. ازآنجاکه تعمیم‌پذیری نتایج به شرایط مشابه مستلزم بی‌بعد بودن پارامترهاست، در این مطالعه شاخص نسبت بیشینه اختلاف دبی MDR (Maximum Discharge Ratio) به‌عنوان یک پارامتر بدون بعد به‌منظور کمی‌سازی و توصیف شدت هیسترزیس ایجادشده معرفی شد. این پارامتر به‌صورت نسبت بیشترین اختلاف دبی بین شاخه‌های صعودی و نزولی منحنی دبی – شاخص جریان غیرماندگار، به دبی متناظر با همان ارتفاعی که بیشینه اختلاف دبی در آن رخ می‌دهد بر روی منحنی جریان ماندگار تعریف می‌شود.

مقدار شاخص MDR با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می‌شود. شکل ۴ نیز نمای کلی پارامترهای مورداستفاده در محاسبه این شاخص را نشان می‌دهد.

$$MDR = \frac{\Delta Q_{max}}{Q_{st}} \qquad (۲)$$

در این نمودار، پارامتر ΔQ_{max} بیانگر بیشترین اختلاف دبی میان شاخه‌ی صعودی و نزولی منحنی دبی ـ شاخص در حالت جریان غیرماندگار است. همچنین مقدار Q_{st} مقدار دبی متناظر با همان مقدار شاخص ارتفاع آب است که در آن بیشینه‌ی اختلاف دبی ΔQ_{max} رخ‌داده و این مقدار از روی منحنی دبی ـ شاخص جریان ماندگار تعیین شده است.



شکل ٤- حلقه هیسترزیس و سایر پارامترهای استفاده‌شده در محاسبه شاخص MDR

با توجه به ماهیت این شاخص، MDR می‌تواند به‌عنوان ابزاری عملی برای ارزیابی میزان اعتبار تخمین دبی در جریان‌های غیرماندگار به کار رود. این شاخص بیشینه اختلاف دبی متناظر با یک تراز آب مشخص در شاخه‌های صعودی و نزولی جریان را بیان می‌کند و از این طریق بازه‌هایی را مشخص می‌سازد که استفاده از روابط ماندگار دبی ـ شاخص می‌تواند منجر به خطای قابل‌توجه شود. ازاین‌رو، MDR علاوه بر توصیف شدت هیسترزیس، می‌تواند به‌عنوان معیاری کاربردی برای بهبود تخمین دبی در شرایط غیرماندگار به کار رود.

آنالیز ابعادی

علاوه بر خصوصیات هیدروگراف عبوری، مقدار و شدت هیسترزیس ایجادشده در یک مقطع به پارامترهای دیگری نیز بستگی دارد. این پارامترها عبارت‌اند از شیب طولی S_0، عرض کف B، شیب جانبی m و ضریب زبری مانینگ n که خصوصیات هندسی کانال عبوری جریان را تعریف می‌کنند و همچنین پارامترهای لزجت دینامیکی μ و چگالی ρ که بیانگر خصوصیات فیزیکی آب هستند.

با توجه به پارامترهای مؤثر بر میزان هیسترزیس، می‌توان رابطه ۳ را برای هیسترزیس ایجادشده ناشی از یک هیدروگراف مثلثی متقارن در یک مقطع تعریف نمود:

$$f_1(MDR, y_b, v_b, y_h, v_h, t_h, B, m, S_0, n, \mu, \rho, g) = 0 \qquad (۳)$$

در این رابطه، پارامتر g نشان‌دهنده شتاب گرانش است. همچنین، پارامترهای y_b و v_b به ترتیب عمق جریان و سرعت متوسط متناظر با دبی پایه Q_b را مشخص می‌کنند. به‌طور مشابه، پارامترهای y_h و v_h به عنوان عمق و سرعت متوسط جریان متناظر با دبی Q_h تعریف می‌شوند. این مقادیر بیانگر شرایط جریان یکنواخت و ماندگار متناظر با دبی Q_h در کانال هستند؛ به‌بیان‌دیگر، اگر دبی Q_h به‌صورت یکنواخت و ماندگار در کانال برقرار شود، عمق و سرعت متوسط جریان به ترتیب برابر با y_h و v_h خواهند بود.

با انتخاب سه پارامتر ρ، g و y_b به‌عنوان پارامترهای تکرارشونده و با استفاده از روش π-باکینگهام، پارامترهای رابطه ۳ در قالب رابطه ۴ به پارامترهای بی‌بعد تبدیل شدند:

$$f_2\left(MDR, \frac{v_b}{\sqrt{gy_b}}, \frac{y_h}{y_b}, \frac{v_h}{\sqrt{gy_b}}, t_h\sqrt{\frac{g}{y_b}}, \frac{B}{y_b}, m, S_0, \frac{n\sqrt{g}}{y_b^{1/6}}, \frac{\rho v_b y_b}{\mu}\right) \qquad (۴)$$

که پس از حذف پارامترهایی که در این پژوهش ثابت بودند و همچنین با ترکیب برخی پارامترهای بدون بعد به‌صورت ضرب و تقسیم، رابطه ۵ به دست آمد:

$$f_2\left(MDR, \frac{v_b}{\sqrt{gD_b}}, \frac{v_h}{\sqrt{gD_h}}, t_h\sqrt{\frac{g}{D_b}}, \frac{\rho v_b y_b}{\mu}\right) = f_2(MDR, Fr_b, Fr_h, t_h\sqrt{\frac{g}{D_b}}, Re_b) = 0 \qquad (۵)$$

که پارامترهای D_b و D_h به ترتیب بیانگر عمق هیدرولیکی جریان پایه و عمق هیدرولیکی متناظر با ارتفاع هیدروگراف هستند. همچنین، پارامترهای Fr_b و Re_b به ترتیب پارامترهای نظیر عدد فرود و عدد رینولدز جریان به ازای دبی پایه هیدروگراف تعریف می‌شوند. به علت آشفته بودن شرایط جریان از پارامتر Re_b در رابطه هیسترزیس صرف‌نظر شد. پارامتر Fr_h را نیز می‌توان به‌عنوان عدد فرود متناظر با دامنه تغییرات دبی هیدروگراف، یا به‌اختصار عدد فرود ارتفاع هیدروگراف، تعریف کرد.

با در نظر گرفتن پارامتر MDR به‌عنوان متغیر وابسته درنهایت رابطه میزان هیسترزیس به‌صورت رابطه ۶ به دست آمد:

$$MDR = F(Fr_b, Fr_h, t_h\sqrt{\frac{g}{D_b}}) \qquad (۶)$$

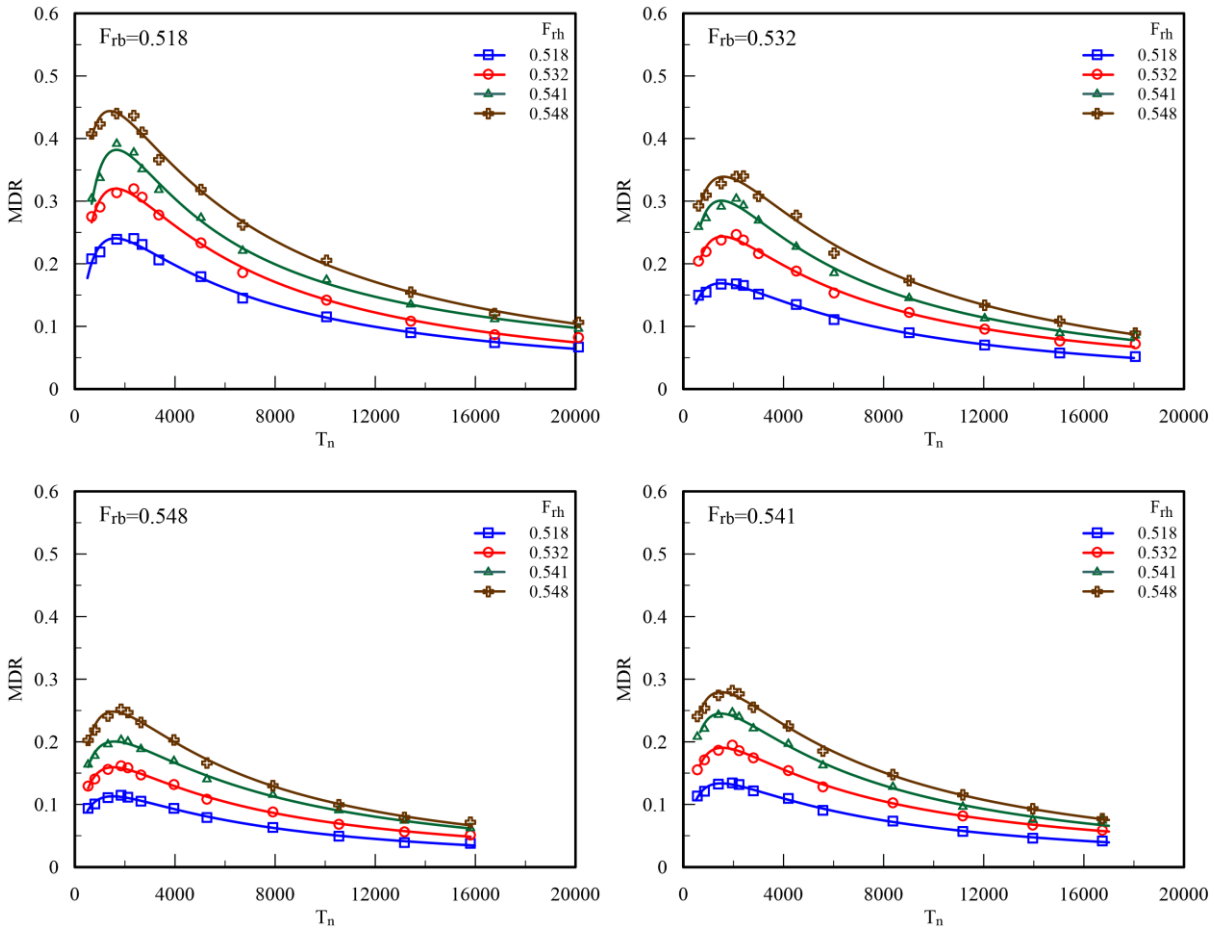
در ادامه این پژوهش پارامتر $t_h\sqrt{\frac{g}{D_b}}$ زمان بی‌بعد پایه هیدروگراف نامیده شده و با T_n نشان داده می‌شود.

با توجه به تعداد و دامنه مقادیر پارامترهای موردبررسی در مجموع ۱۹۲ آزمایش انجام شد. برای ارائه منسجم‌تر نتایج، آزمایش‌ها بر اساس یک معیار مشخص گروه‌بندی شدند. در این تقسیم‌بندی، آزمایش‌هایی که مقادیر پارامترهای عدد فرود جریان پایه Fr_b و عدد فرود ارتفاع Fr_h آن‌ها یکسان است، اما در مقدار پارامتر زمان بدون‌بعد T_n با یکدیگر تفاوت دارند، در یک گروه زمانی قرار داده شدند. بر این اساس، هر گروه زمانی شامل ۱۲ آزمایش مستقل است.

نتایج و بحث

تأثیر پارامتر زمان بی‌بعد پایه هیدروگراف T_n بر میزان هیسترزیس

ترسیم نمودارهای تغییرات پارامتر MDR به ازای تغییرات پارامتر زمان بدون‌بعد T_n در مقادیر مختلف پارامترهای Fr_h و Fr_b، امکان ارائه تصویری کلی از تأثیر پارامتر T_n بر شاخص هیسترزیس MDR را فراهم می‌کند. این نمودارها در شکل ۵ ارائه شده‌اند.



شکل ۵- تغییر مقدار شاخص هیسترزیس MDR در برابر زمان نسبی برای مقادیر مختلف Fr_b و Fr_h

نمودارهای شکل ۵ نشان می‌دهد که زمان بی‌بعد پایه هیدروگراف یکی از پارامترهای تأثیرگذار در مقدار شاخص بی‌بعد هیسترزیس است و اثر آن به‌صورت یک رفتار غیرخطی و منسجم در تمامی حالات مشاهده می‌شود. در تمامی ترکیب‌های عدد فرود جریان پایه و عدد فرود ارتفاع، با افزایش زمان بی‌بعد، مقدار MDR ابتدا افزایش یافته، در یک بازه میانی به مقدار بیشینه رسیده و سپس با افزایش بیشتر زمان بی‌بعد کاهش یافته است. به‌عنوان نمونه، در حالت Fr_b = ۰/۵۱۸ و Fr_h = ۰/۵۱۸، مقدار MDR از ۰/۲۰۸ در T_n = ۶۷۱ به مقدار ۰/۲۴ در T_n≈۲۳۰۰ افزایش می‌یابد که بیانگر افزایشی برابر با ۱۵ درصد است. با افزایش زمان بی‌بعد تا T_n≈۲۰۰۰۰، مقدار این شاخص به ۰/۰۶۷ کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهشی در حدود ۷۲ درصد نسبت به مقدار بیشینه است. در واقع، با ثابت بودن پارامترهای Fr_b و Fr_h، شاخص MDR در یک مقدار مشخص از پارامتر زمانِ بی‌بعد T_n به بیشترین مقدار خود می‌رسد. این مقدار

مشخص از T_n در این پژوهش به‌صورت قراردادی به‌عنوان زمان بحرانی T_{nc} تعریف شده است.

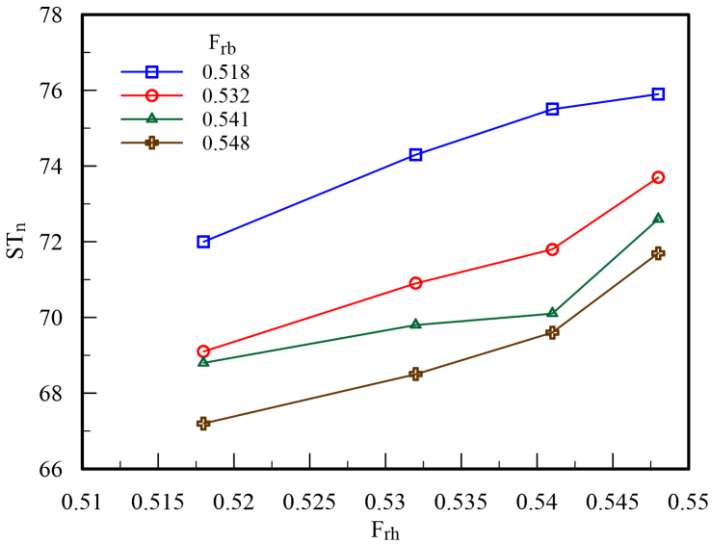
رفتار غیرخطی شاخص بی‌بعد هیسترزیس نسبت به زمان بی‌بعد پایه هیدروگراف را می‌توان به ارتباط و تعامل متقابل پارامترهای مختلف معادله ۱ نسبت داد. با ثابت بودن خصوصیات جریان پایه و ارتفاع هیدروگراف، در مقادیر کوچک زمان‌های بی‌بعد، پارامتر شتاب موضعی بزرگ است و تغییرات دبی بسیار سریع رخ می‌دهد، اما جریان فرصت کافی برای انتشار و تعدیل نیروهای اینرسی، اصطکاکی و گرادیان سطح آب ندارد. در نتیجه، اختلاف بین شاخه‌های صعود و نزول به‌طور کامل توسعه نیافته و در نتیجه مقدار شاخص MDR نیز محدود باقی می‌ماند. با افزایش زمان بی‌بعد به مقدار T_{nc}، نرخ تغییرات دبی با زمان پاسخ جریان هم‌مرتبه شده و اختلاف بین دبی مؤثر شاخه‌های صعود و نزول به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسد این امر باعث می‌شود شاخص هیسترزیس نیز به بیشینه مقدار خود برسد. در زمان‌های بی‌بعد بزرگ‌تر، شتاب موضعی جریان تضعیف شده و سامانه به حالت شبه‌ماندگار نزدیک می‌شود؛ ازاین‌رو اختلاف میان شاخه‌ها کمتر شده و مقدار شاخص MDR نیز روند کاهشی پیدا می‌کند.

به‌منظور تحلیل نحوه تغییر حساسیت MDR نسبت به T_n در مقادیر مختلف پارامترهای Fr_b و Fr_h، در این تحقیق شاخص جدیدی به نام شاخص حساسیت زمانی نرمال‌شده هیسترزیس ST_n تعریف شد که مطابق رابطه ۷ برحسب درصد محاسبه می‌گردد.

$$ST_n = \frac{MDR_{max} - MDR_{min}}{MDR_{max}} \times 100 \qquad (۷)$$

پارامترهای MDR_{max} و MDR_{min} به ترتیب بیشینه و کمینه مقدار شاخص هیسترزیس MDR را در بازه تغییرات پارامتر T_n، برای مقادیر ثابت Fr_b و Fr_h نشان می‌دهند.

تغییرات پارامتر ST_n به ازای ترکیب‌های مختلف پارامترهای Fr_b و Fr_h در نمودارهای شکل ۶ ارائه شده است.



شکل ٦- مقادیر پارامتر ST_n در ترکیب‌های مختلف Fr_b و Fr_h

نمودارهای شکل ۶ نشان می‌دهد که با افزایش پارامتر عدد فرود ارتفاع Fr_h، شاخص ST_n افزایش می‌یابد. این روند در تمامی عددهای فرود پایه Fr_b موردبررسی مشاهده می‌شود و بیانگر آن است که در شرایطی که هیدروگراف عبوری دامنه تغییرات دبی بیشتر و درنتیجه عدد فرود ارتفاع Fr_h بزرگ‌تری دارد، شدت شاخص هیسترزیس MDR نسبت به تغییرات زمان بدون‌بعد هیدروگراف T_n حساس‌تر می‌شود. در چنین شرایطی، تغییر در زمان بدون‌بعد هیدروگراف T_n تأثیر مؤثرتری بر رفتار هیسترزیسی جریان اعمال می‌کند.

در مقابل، افزایش عدد فرود پایه Fr_b با کاهش مقادیر ST_n همراه است. این روند بیانگر تقویت نقش جریان پایه و درنتیجه کاهش حساسیت شدت مقدار شاخص هیسترزیس MDR نسبت به پارامتر زمانی هیدروگراف است. با افزایش سهم جریان پایه، رفتار هیسترزیسی جریان بیشتر تحت کنترل شرایط زمینه‌ای قرار می‌گیرد و وابستگی آن به کشیدگی یا فشردگی زمانی هیدروگراف تضعیف می‌شود؛ به‌طوری‌که اثر پارامتر زمانی به شکل محدودتر و تعدیل‌شده ظاهر می‌شود.

به‌منظور تعیین دقیق پارامتر زمان بحرانی T_{nc} و با توجه به اینکه اندازه‌گیری مستقیم آن از طریق آزمایش‌های فیزیکی مستلزم اجرای تعداد زیادی آزمایش بود، این پارامتر از طریق تحلیل داده‌های گسسته اندازه‌گیری‌شده برآورد شد. در این فرآیند، از درون‌یابی

سهموی موضعی بر روی هر سه نقطه متوالی از داده‌های (T_n, MDR) استفاده شد. به این صورت که یک چندجمله‌ای درجه دو بر مجموعه‌های متوالی داده‌ها برازش داده شده و از این طریق مقدار اکسترمم نسبی (بیشینه) پارامتر MDR و زمان متناظر با آن برای هر بازه محاسبه گردید. در نهایت برای هر گروه زمانی مقداری از پارامتر زمان بدون‌بعد که بیشترین مقدار MDR را در میان تمامی بازه‌های درونیابی‌شده به خود اختصاص می‌داد به‌عنوان مقدار زمان بدون‌بعد بحرانی T_{nc} در نظر گرفته شد.

مقادیر پارامتر T_{nc} و مقدار بیشینه MDR برای گروه‌های زمانی مختلف در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۲- مقادیر زمان بحرانی T_{nc} در ترکیب‌های مختلف Fr_b و Fr_h

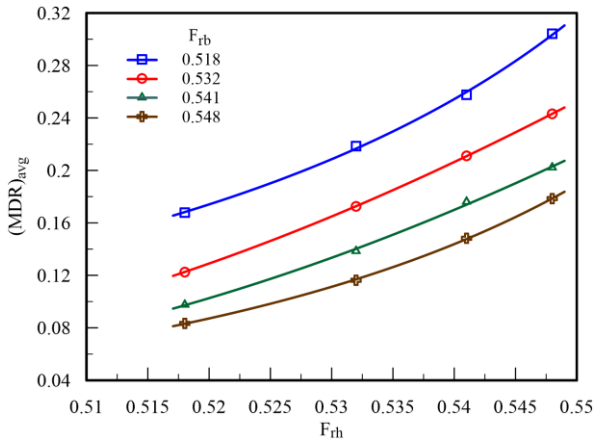
	Fr_h = ۰/۵۱۸	Fr_h = ۰/۵۳۲	Fr_h = ۰/۵٤۱	Fr_h = ۰/۵٤۸
Fr_b = ۰/۵۱۸	۱۷۷۰	۱۸۶۱	۱۹۷۲	۲۱۱۸
Fr_b = ۰/۵۳۲	۱۷۵۴	۱۸۲۳	۱۹۵۰	۲۱۰۱
Fr_b = ۰/۵٤۱	۱۷۲۷	۱۸۰۲	۱۸۷۸	۲۰۴۴
Fr_b = ۰/۵٤۸	۱۶۹۰	۱۷۹۳	۱۸۵۷	۱۹۷۹

بررسی مقادیر جدول ۲ نشان می‌دهد که برای تمامی ترکیب‌های پارامترهای Fr_b و Fr_h، مقدار زمان بحرانی بی‌بعد T_{nc} در بازه‌ای نسبتاً محدود (از ۱۶۹۰ تا ۲۱۱۸) قرار دارد. کوچک بودن دامنه تغییرات این پارامتر، در مقایسه با گستره کل زمان‌های بی‌بعد بررسی‌شده، بیانگر آن است که زمان وقوع بیشینه هیسترزیس در محدوده‌ای تقریباً ثابت باقی می‌ماند و تغییرات آن با تغییر مشخصه‌های هیدروگراف عبوری محدود است.

بااین‌حال، مقدار زمان بحرانی T_{nc} با افزایش دبی اوج Fr_h اندکی افزایش می‌یابد که می‌توان آن را به تشدید نقش اینرسی در جریان نسبت داد؛ به‌گونه‌ای که در هیدروگراف‌هایی با مقادیر بزرگ‌تر Fr_h، زمان بیشتری لازم است تا مؤلفه‌های اینرسی در ساختار جریان غیرماندگار به بیشترین اثر خود برسند و درنتیجه بیشینه جدایی بین شاخه‌های صعودی و نزولی حلقه هیسترزیس شکل گیرد. درعین‌حال، با افزایش دبی پایه Fr_b، مقدار T_{nc} اندکی کاهش می‌یابد؛ زیرا افزایش این پارامتر سبب می‌شود شرایط جریان به حالت شبه‌ماندگار نزدیک‌تر شده و درنتیجه زمان موردنیاز برای دستیابی به بیشینه اثرات غیرماندگاری جریان کاهش یابد.

بررسی اثر پارامترهای Fr_h و Fr_b بر مقدار هیسترزیس

به‌منظور تبیین دقیق‌تر نقش دو پارامتر Fr_h و Fr_b در تغییرات شاخص MDR و ارائه تصویری فشرده و قابل‌مقایسه از اثر کلی این دو پارامتر بر شدت هیسترزیس، میانگین مقدار این شاخص بی‌بعد برای هر گروه زمانی محاسبه و نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. این جدول نمایی کلی از نحوه تغییرات میانگین هیسترزیس در شرایط مختلف جریان ارائه می‌دهد و در کنار نمودارهای شکل ۵، امکان درک روشن‌تر و نظام‌مندتری از تأثیر هم‌زمان Fr_h و Fr_b بر رفتار هیسترزیس جریان را فراهم می‌سازد.



شکل ۷- میانگین شاخص هیسترزیس MDR به‌عنوان تابعی از Fr_b و Fr_h

تحلیل نمودارهای ارائه‌شده در شکل ۷ نشان می‌دهد که در تمامی ترکیب‌های پارامتری موردبررسی، افزایش عدد فرود ارتفاع هیدروگراف Fr_h همواره با افزایش شاخص هیسترزیس MDR همراه بوده است به‌طوری‌که بر اساس تحلیل حساسیت انجام‌شده بر روی این نتایج، به ازای هر یک درصد افزایش در مقدار Fr_h، مقدار شاخص MDR به‌طور متوسط حدود ۱۳٫۵ درصد افزایش می‌یابد. همچنین بررسی روند تغییرات بیانگر آن است که با بزرگ‌تر شدن مقادیر Fr_h، حساسیت شاخص MDR نسبت به تغییرات این پارامتر نیز افزایش می‌یابد؛ به‌عبارت‌دیگر در مقادیر بالاتر Fr_h، تغییرات کوچک در این پارامتر می‌تواند به افزایش محسوس‌تری در شدت هیسترزیس منجر شود. بااین‌حال، افزایش عدد فرود جریان پایه Fr_b موجب کاهش این حساسیت می‌گردد، به‌طوری‌که در مقادیر بزرگ‌تر Fr_b، اثر تغییرات Fr_h بر مقدار شاخص MDR به‌طور محسوسی تضعیف می‌شود.

افزایش مقدار شاخص هیسترزیس MDR با افزایش عدد فرود ارتفاع هیدروگراف Fr_h را می‌توان به‌طور مستقیم به تشدید ماهیت غیرماندگار جریان و غلبه‌ی پارامترهای اینرسی در معادله‌ی سنت‌ونان نسبت داد. با افزایش Fr_h، نرخ تغییرات زمانی سرعت جریان ($\partial V/\partial t$) در شاخه‌ی صعودی و نزولی هیدروگراف به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد که این امر موجب تشدید اثر پارامتر شتاب موضعی می‌شود. ازآنجاکه علامت این پارامتر در دو شاخه‌ی صعودی و نزولی متضاد است، پاسخ دینامیکی سیستم برای یک دبی یکسان در مسیر رفت و برگشت متفاوت شده و درنتیجه دامنه‌ی جدایی هیسترزیسی افزایش می‌یابد.

از سوی دیگر، پارامتر گرادیان سطح آب ($\partial h/\partial x$) که بیانگر پارامتر فشار هیدرواستاتیک در معادله سنت‌ونان است، اگرچه در طول عبور موج دچار تغییرات مقداری می‌شود، اما جهت آن در امتداد جریان ثابت بوده و برای یک عمق مشخص در شاخه‌های صعودی و نزولی تفاوت معناداری ندارد؛ ازاین‌رو نقشی در ایجاد جدایی هیسترزیسی ایفا نمی‌کند؛ بنابراین به‌طور خلاصه، افزایش عدد فرود ارتفاع هیدروگراف با تقویت اثرات اینرسی و وابستگی زمانی پاسخ جریان، موجب افزایش شاخص MDR می‌گردد.

نتایج حاصل از مقایسه نمودارهای شکل ۵ بیانگر آن است که صرف‌نظر از مقادیر عدد فرود ارتفاع Fr_h و در کل دامنه تغییرات زمان بی‌بعد T_n، افزایش Fr_b همواره با کاهش شاخص MDR همراه بوده است. پایداری این روند در تمامی شرایط آزمایش، نشان‌دهنده وجود یک رابطه معکوس ساختاری بین Fr_b و MDR است که به یک ناحیه خاص از داده‌ها محدود نمی‌شود. بررسی کمی این اثر در شرایط هم‌ارز (Fr_h ثابت و مقادیر نزدیک پارامتر T_n) حاکی از آن است که یک درصد افزایش Fr_b به‌طور متوسط موجب کاهش ۱۰/۰۳ درصدی مقدار شاخص هیسترزیس MDR می‌شود. افزون بر این، نتایج همچنین نشان می‌دهد که افزایش Fr_h با افزایش حساسیت شاخص هیسترزیس MDR نسبت به تغییرات Fr_b همراه است، درحالی‌که افزایش Fr_b به تضعیف این حساسیت می‌انجامد.

از دیدگاه فیزیکی و هیدرولیکی، اثر کاهشی عدد فرود جریان پایه Fr_b بر شاخص بی‌بعد هیسترزیس MDR را می‌توان به نقش این پارامتر در تقویت یا تضعیف مؤلفه‌های اینرسی جریان نسبت داد. افزایش عدد فرود پایه Fr_b موجب می‌شود جریان در کل بازه‌ی زمانی هیدروگراف در شرایط ماندگارتری از نظر سرعت و اندازه‌حرکت هیدرولیکی قرار گیرد، به‌طوری‌که اختلاف پاسخ جریان در فازهای صعودی و نزولی کاهش می‌یابد. از دیدگاه معادله‌ی سن ونان، این وضعیت با کاهش دامنه‌ی تغییرات گرادیان زمانی سرعت $\partial V/\partial t$ همراه بوده و درنتیجه سهم پارامتر شتاب موضعی در رفتار دینامیکی جریان تضعیف می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، با افزایش، Fr_b پاسخ جریان نسبت به تغییرات لحظه‌ای دبی یکنواخت‌تر شده و وابستگی رفتار جریان به تاریخچه‌ی زمانی دبی نیز کاهش می‌یابد. بر این اساس، کاهش شاخص هیسترزیس MDR در عددهای فرود پایه بالاتر را می‌توان ناشی از این سازوکار فیزیکی تفسیر کرد.

نتیجه‌گیری

پدیده هیسترزیس در جریان‌های غیرماندگار می‌تواند موجب اختلاف قابل‌توجه میان دبی واقعی و دبی برآوردشده از منحنی‌های سنجه مبتنی بر شرایط ماندگار شود. در این پژوهش شاخصی با عنوان MDR به‌عنوان بیشینه اختلاف دبی میان شاخه‌های صعودی و نزولی منحنی دبی ـ شاخص نسبت به مقدار متناظر در شرایط ماندگار معرفی شد تا معیاری برای ارزیابی شدت هیسترزیس و خطای احتمالی برآورد دبی فراهم شود. بررسی اثر ویژگی‌های اصلی هیدروگراف‌های مثلثی نشان داد که تغییرات شاخص MDR نسبت به زمان بی‌بعد هیدروگراف T_n رفتاری غیرخطی دارد؛ به‌گونه‌ای که با افزایش T_n، مقدار MDR ابتدا افزایش یافته، سپس به بیشینه رسیده و در ادامه کاهش می‌یابد. این نتیجه بیانگر آن است که بیشینه شدت هیسترزیس در یک مقیاس زمانی میانی رخ می‌دهد. زمان متناظر با این بیشینه به‌عنوان زمان بحرانی T_{nc} معرفی شد که با وجود تغییر شرایط جریان در بازه نسبتاً محدودی قرار می‌گیرد و بیانگر وجود یک مقیاس زمانی دینامیکی غالب در شکل‌گیری بیشینه هیسترزیس است.

نتایج همچنین نشان داد که شرایط هیدرولیکی جریان نقش تعیین‌کننده‌ای در شدت هیسترزیس دارند. افزایش عدد فرود جریان پایه Fr_b موجب کاهش مقدار شاخص MDR و درنتیجه تضعیف هیسترزیس می‌شود، درحالی‌که افزایش عدد فرود دامنه هیدروگراف

Fr_h اثر معکوس داشته و سبب تشدید آن می‌گردد؛ به‌گونه‌ای که به‌طور متوسط با هر یک درصد افزایش در Fr_h، مقدار MDR حدود ۱۳/۵ درصد افزایش یافته است. علاوه بر این، میان دو پارامتر Fr_h و Fr_b نوعی تعامل مشاهده شد؛ به‌طوری‌که افزایش Fr_h حساسیت MDR نسبت به تغییرات Fr_b را افزایش می‌دهد، درحالی‌که افزایش Fr_b از شدت اثرگذاری Fr_h می‌کاهد. این رفتار را می‌توان به کاهش نقش مؤلفه اینرسی زمانی در معادلات سنت‌ونان در اثر افزایش جریان پایه نسبت داد. مجموعه این یافته‌ها می‌تواند در درک بهتر رفتار جریان‌های غیرماندگار و بهبود دقت برآورد دبی بر پایه منحنی‌های سنجه مورد استفاده قرار گیرد.

درمجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که هیسترزیس در جریان‌های غیرماندگار پدیده‌ای کاملاً وابسته به ویژگی‌های هیدروگراف عبوری است که نادیده گرفتن آن می‌تواند به بروز خطاهای قابل‌توجه در برآورد دبی بر اساس منحنی دبی ـ شاخص منجر شود. بر این اساس، شناخت کمی شدت هیسترزیس و زمان وقوع بیشینه آن می‌تواند نقش مهمی در بهبود تحلیل داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری، اصلاح روابط دبی ـ شاخص در شرایط جریان غیرماندگار و توسعه روش‌های دقیق‌تر پیش‌بینی جریان ایفا کند. یکی از دستاوردهای مهم این پژوهش آن است که نشان می‌دهد با شناخت مشخصات هیدروگراف‌های عبوری از یک ایستگاه هیدرومتری، می‌توان میزان بروز هیسترزیس و درنتیجه سطح عدم قطعیت در برآورد دبی آن ایستگاه را تخمین و ارزیابی کرد؛ موضوعی که می‌تواند به ارتقای دقت تحلیل‌های هیدرومتری و تفسیر صحیح‌تر داده‌های جریان کمک کند.

با توجه به اینکه این مطالعه بر هیدروگراف‌های مثلثی متقارن متمرکز بوده است، تعمیم نتایج به سایر اشکال هیدروگراف‌ها نیازمند مطالعات بیشتری است. در این چارچوب، گسترش چنین مطالعاتی می‌تواند به درک عمیق‌تر رفتار هیسترزیسی جریان و فراهم شدن امکان پیش‌بینی دقیق‌تر آن در ایستگاه‌های هیدرومتری مختلف بر اساس ویژگی‌های هیدروگراف‌های عبوری منجر شود.

لیست نمادها

B	:	عرض کف کانال
D_b	:	عمق هیدرولیکی جریان پایه
D_h	:	عمق هیدرولیکی متناظر با دامنه تغییرات دبی هیدروگراف
Fr_b	:	عدد فرود جریان پایه هیدروگراف
Fr_h	:	عدد فرود متناظر با دامنه تغییرات دبی هیدروگراف
g	:	شتاب گرانش
h	:	عمق جریان
m	:	شیب جانبی دیواره مقطع کانال
MDR	:	شاخص بدون‌بعد شدت هیسترزیس
n	:	ضریب زبری مانینگ
Q	:	دبی جریان
Q_b	:	دبی جریان پایه هیدروگراف
Q_h	:	دامنه تغییرات دبی هیدروگراف
Q_s	:	دبی جریان در حالت ماندگار
Q_{st}	:	دبی متناظر با تراز آب بیشینه‌ی اختلاف دبی
Re_b	:	عدد رینولدز جریان پایه هیدروگراف
ST_n		حساسیت زمانی نرمال‌شده هیسترزیس
S_0	:	شیب کف کانال
t	:	زمان
t_h	:	زمان پایه هیدروگراف
T_n	:	زمان پایه بدون‌بعد هیدروگراف
T_{nc}	:	زمان پایه بدون‌بعد بحرانی هیدروگراف
v	:	سرعت متوسط جریان

v_b : سرعت متوسط جریان پایه
v_h : سرعت متوسط متناظر با دامنه تغییرات دبی هیدروگراف
x : فاصله در امتداد کانال
y_b : عمق جریان پایه هیدروگراف
y_h : عمق جریان متناظر با دامنه تغییرات دبی هیدروگراف
ΔQ_{max} : بیشترین اختلاف دبی بین شاخه‌های صعودی و نزولی حلقه هیسترزیس
ρ : چگالی آب
μ : لزجت دینامیکی آب

تقدیر و تشکر

از دانشگاه تهران به سبب فراهم کردن امکانات پژوهشی در آزمایشگاه مرکزی تحقیقات آب سپاسگزاری می‌شود. همچنین از آقای عزیزاله قربانی، کارشناس محترم آزمایشگاه که در آماده‌سازی و فراهم‌سازی تجهیزات آزمایشگاهی همکاری ارزشمندی داشتند، قدردانی می‌گردد.

منابع

Bombar, G. 2016. Hysteresis and shear velocity in unsteady flows. Journal of Applied Fluid Mechanics. 9(2): 839–853.

Chow, V. T. 1959. Open channel flow. London: McGraw-Hill. 11(95): 99: 136–140.

Di Baldassarre, G. and Montanari, A. 2009. Uncertainty in river discharge observations: A quantitative analysis. Hydrology & Earth System Sciences. 13(6): 913–921.

Dottori, F., Martina, M. and Todini, E. 2009. A dynamic rating curve approach to indirect discharge measurement. Hydrology and Earth System Sciences. 13(6): 847–863.

Fenton, J.D. and Keller, R.J. 2001. The calculation of streamflow from measurements of stage. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology. Report 01/6.

Fread, D. 1975. Computation of stage-discharge relationships affected by unsteady flow. Journal of the American Water Resources Association. 11(2): 213–228.

Herschy, R.W. 2009. Streamflow measurement (3rd ed.). Taylor & Francis.

Holmes, R. 2016. River rating complexity, Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydralics (River Flow 2016), St. Louis, USA.

House, A., Meselhe, E., Muste, M. and Demir, I. 2025. Streamflow Hysteresis Analysis Through a Deep-Dive Budget of the St Venant Equation Momentum Terms. Water Resources Research. 61(8): e2024WR038103.

Jones, B.E. 1916. A method of correcting river discharge for a changing stage. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 375-E.

Kennedy, E. 1984. Discharge ratings at gaging stations: US Geological survey techniques of water-resources investigations, book 3, chap. A10, 59.

Knight, D. 2006. River flood hydraulics: validation issues in one-dimensional flood routing models. Taylor & Francis.

Lee, K. and Muste, M. 2017. Refinement of the Fread method for improved tracking of stream discharges during unsteady flows. Journal of Hydraulic Engineering. 143(6): Article 06017003.

Majdalani, S., Delestre, O. and Moussa, R. 2023. Experimental investigation of loop rating curve on a small 3D printed laboratory channel. Journal of Hydrology. 623: 129741.

Muste, M. and Hoitink, T. 2017. Measuring flood discharge. Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science.

Muste, M., Lee, K., Kim, D., Bacotiu, C., Oliveros, M.R., Cheng, Zh. and Quintero, F. 2020. Revisiting hysteresis of flow variables in monitoring unsteady streamflows. Journal of Hydraulic Research. 58(6): 867-887.

Ozbey, N. 2011. Adjustment factors for unsteady State-discharge measurements [Paper presentation]. Proceedings of the 34th World Congress of the International Association for Hydro-Environment Research and Engineering: 33rd Hydrology and Water Resources Symposium and 10th Conference on Hydraulics in Water Engineering, Brisbane, Australia.

Perret, E., Lang, M. and Le Coz, J. 2022. A framework for detecting stage-discharge hysteresis due to flow unsteadiness: Application to France's national hydrometry network, Journal of Hydrology. 608: 127567.

Petersen-Overleir, A. 2006. Modelling stage—discharge relationships affected by hysteresis using the Jones

formula and nonlinear regression. Hydrological Sciences Journal. 51(3): 365–388.

Schmidt, A. R. 2002. Analysis of stage-discharge relations for open-channel flows and their associated uncertainties. University of Illinois at Urbana-Champaign.

Tang, H., Chen, K., Yuan, S., Xu, L., Qiu, J. and Lin, Q. 2024. Effects of tributary inflows on unsteady flow hysteresis and hydrodynamics in the mainstream. Hydrology Research. 55(8): 815–833.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.4, Vol. 20, Oct.-Nov. 2026, p. 671-684

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۲۰، مهر - آبان ۱۴۰۵، ص. ۶۸۴-۶۷۱

Effect of Hydrograph Characteristics on Hysteresis in Unsteady Flow

A. Nazeri[1], S. Kouchakzadeh[2]*

Recived: May.10, 2026 Accepted: Jun.28, 2026

Abstract

The hysteresis phenomenon in unsteady flows causes a discrepancy between the actual discharge and the discharge estimated from single-valued rating curves, thereby reducing the accuracy of flow monitoring and measurement. This study investigates the effect of hydrograph characteristics on hysteresis intensity, focusing on symmetric triangular hydrographs. To generalize the results, the effective physical parameters—including base discharge, hydrograph height, and base time—were transformed into three dimensionless parameters: the base-flow Froude number, the hydrograph-height Froude number, and the dimensionless time. The study is based on 192 physical experiments conducted in a hydraulically long flume 60 m in length with a trapezoidal cross-section (30 cm bed width, 1:1 side slopes, and 25 cm depth). The results show that hysteresis intensity is directly influenced by hydrograph characteristics. With other parameters held constant, increasing the dimensionless time initially increases hysteresis intensity, reaches a maximum at mid-range values, and subsequently decreases it. Furthermore, increasing the hydrograph-height Froude number intensifies hysteresis across the entire range of dimensionless time, whereas increasing the base-flow Froude number diminishes it.

Keywords: Hydrograph, Hysteresis, Laboratory model, Rating curve, Unsteady flow

1- Ph.D. Student of Water Science and Engineering, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. P.O. Box: 31587-4111, Postal Code: 31587-77871.

(*- Corresponding Author Email: skzadeh@ut.ac.ir)