

## ارزیابی روابط برآورد افت هیدرولیکی و واسنجی رابطه‌ی هیزن -

## ویلیامز در لاترال‌های آبیاری قطره‌یی

شاهین شفائی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران

قاسم زارعی (دانشیار)

مؤسسه‌ی تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، کرج، ایران.

کیومرث ابراهیمی\* (استاد)

گروه علوم و فناوری های محیطی، دانشکده‌ی مهندسی انرژی و منابع پایدار، دانشگاه تهران، تهران، ایران

شیما سلیمانی (دانشجوی فوق دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی منابع آب، دانشگاه رایس، هوستون، تگزاس، امریکا

محمد شمسی (کارشناس ارشد)

گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

در طراحی سیستم‌های آبیاری قطره‌یی برای تعیین مقدار افت هیدرولیکی معمولاً از رابطه‌ی هیزن-ویلیامز استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر، با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی و کاربرد لوله‌های پلی‌اتیلن با قطرهای ۱۶، ۲۰، ۲۵، ۳۲ میلی‌متر، میزان افت هیدرولیکی به ازاء دبی‌های مختلف و با توجه به محدوده‌ی سرعت مجاز اندازه‌گیری شد. سپس با تحلیل داده‌های مشاهده‌ای، رابطه‌ی جدیدی که مقدار افت هیدرولیکی را در لوله‌های ۱۶ تا ۳۲ میلی‌متر تابعی از دبی و قطر لوله محاسبه می‌کند، به دست آمد. رابطه‌ی ریاضی به دست آمده با نتایج حاصل از روش‌های متداول اندازه‌گیری افت هیدرولیکی و همچنین داده‌های محاسباتی مقایسه شد. مطابق با نتایج مطالعه‌ی حاضر، رابطه‌ی به دست آمده برای لوله‌های پلی‌اتیلن با قطرهای ۱۶ الی ۳۲ میلی‌متر و با عدد رینولدز بیش از ۲۰۰۰ با اطمینان بالایی پیشنهاد می‌شود. از مزایای رابطه‌ی به دست آمده، استقلال آن از ضریب افت C و دقت بالای آن است.

واژگان کلیدی: آبیاری قطره‌یی، افت هیدرولیکی، مدل آزمایشگاهی، هیزن-ویلیامز.

sha.shafae@alumni.ut.ac.ir

gh.zarei@areeo.ac.ir

EbrahimiK@ut.ac.ir

shimasoleimani@ksu.edu

mohammad.shamsi@ut.ac.ir

## ۱. مقدمه

اشاره کرد. رابطه‌ی هیزن-ویلیامز با وجود دقت کمتر در برآورد افت فشار، به دلیل آشنایی مهندسان با ضریب زبری<sup>۳</sup> موجود در رابطه‌ی هیزن-ویلیامز و افزایش توانایی آن‌ها در تخمین ضریب زبری، همچنان در طراحی سیستم‌های هیدرولیکی استفاده می‌شود.<sup>[۱]</sup> با توجه به اینکه رابطه‌ی هیزن-ویلیامز در مقایسه با رابطه‌ی داریسی-ویسباخ، افت فشار را ۱۳٪ بیشتر برآورد می‌کند،<sup>[۲]</sup> و همچنین فراوانی کاربرد رابطه‌ی هیزن-ویلیامز در طراحی سامانه‌های آبیاری قطره‌یی، لازم است که رابطه‌ی هیزن-ویلیامز برای لاترال‌های آبیاری درختان واسنجی شود. در پژوهش حاضر، به ارزیابی روش‌های متداول تعیین میزان افت هیدرولیکی و واسنجی رابطه‌ی هیزن-ویلیامز در قطرهای متفاوت لاترال‌های آبیاری پرداخته شده است.

## ۱.۱. پیشینه‌ی موضوع

افشار و ستوده (۲۰۰۶)،<sup>[۱]</sup> مدلی برای طراحی بهینه‌ی شبکه‌های فاضلاب

بازده آبیاری بیشتر و یکنواختی بالاتر آبیاری، از جمله اهداف آبیاران برای صرفه‌جویی در مصرف آب و دستیابی به بهره‌وری بالاتر آب است. سامانه‌های آبیاری قطره‌یی با مقهورساختن کنترل بیشتر بر دبی و پخش آب، رسیدن به اهداف اشاره‌شده را ممکن می‌سازند. از جمله مهم‌ترین مواردی که در طراحی سامانه‌های آبیاری قطره‌یی باید به آن توجه کرد، افت فشار آب در اثر اصطکاک است. نحوه‌ی برآورد افت فشار در انتخاب اندازه‌ی لوله‌های انتقال آب و پمپ تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین برآورد صحیح افت فشار تأثیر به‌سزایی در هزینه‌ی اجرای سیستم آبیاری قطره‌یی دارد. برآورد صحیح میزان افت هیدرولیکی، تا حد زیادی به انتخاب رابطه‌ی مناسب جهت تعیین افت بستگی دارد. روابط متعددی به منظور محاسبه‌ی افت فشار لوله‌ها توسعه داده شده‌اند، که از جمله‌ی معروف‌ترین آن‌ها می‌توان به روابط هیزن-ویلیامز و داریسی-ویسباخ<sup>۲</sup>

\*نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۰۶، تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۳/۰۱/۲۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۷.

استناد به این مقاله:

شفاهی، شاهین، زارعی، قاسم، ابراهیمی، کیومرث، سلیمانی، شیما، و شمسی، محمد، ۱۴۰۳. ارزیابی روابط برآورد افت هیدرولیکی و واسنجی رابطه‌ی هیزن-ویلیامز در لاترال‌های آبیاری قطره‌یی. مهندسی عمران شریف، ۴۰(۳)، صص. ۳-۱۱. DOI:10.24200/J30.2024.62619.3234

<sup>۲</sup> Darcy-Weisbach

<sup>۳</sup> Roughness Coefficient

<sup>۱</sup> Hazen-Williams

براساس روش برنامه‌ریزی غیرخطی ارائه داده‌اند. ایشان بعد از تبدیل مسئله‌ی مقید به مسئله‌ی بدون قید با استفاده از تابع تاوانی خارجی، برای مدل‌سازی افت هیدرولیکی از دو رابطه‌ی مانینگ<sup>۱</sup> و هیزن- ویلیامز استفاده کرده‌اند، به طوری که شیب لوله به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شد. ایشان در نهایت گزارش دادند که روش پیشنهادی‌شان در مقایسه با سایر روش‌های مشابه برتری دارد. دانش‌فراز و همکاران (۲۰۱۱)<sup>[۲]</sup> در پژوهشی تأثیر ضریب افت شزی در بار هیدرولیکی آب را در ضربه‌ی قوچ در دو حالت با در نظر گرفتن معادله‌ی ضربه‌ی قوچ به‌طور کامل و بدون لحاظ جمله‌های غیرخطی معادله بررسی و از انواع لوله‌های آهنی با ضریب‌های شزی ۸۰، ۱۰۰ و ۱۳۰ استفاده کردند و دریافتند که با افزایش ضریب شزی، اختلاف دو حالت در بار هیدرولیکی آب افزایش می‌یابد. همچنین لحاظ‌نکردن جمله‌های غیرخطی منجر به راه‌حلی‌هایی با خطای قابل قبول می‌شوند. شاملو و همکاران (۲۰۱۳)<sup>[۳]</sup> اثر مدت زمان بستن شیر در جریان‌های آرام و آشفته را با عدد رینولدز<sup>۲</sup> پایین به‌منظور تعیین شرایط مناسب برای پیاده‌سازی روش‌های نشست‌یابی بر پایه‌ی مدل‌سازی جریان گذرا بررسی کردند. ایشان برای محاسبه‌ی افت اصطکاک غیرماندگار از رابطه‌ی برون<sup>۳</sup> استفاده کردند و دریافتند که در لوله‌هایی به طول ۵۰ تا ۵۰۰ متر، بستن شیر در زمان کوتاه‌تر منجر به استهلاک انرژی بیشتر در مقایسه با بستن شیر در مدت زمان طولانی‌تر می‌شود و این اختلاف با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. دانش‌فراز و همکاران (۲۰۱۷)<sup>[۴]</sup> در پژوهشی به تأثیر زانویی و تنگ‌شدگی لوله در سرعت جریان مطالعه و از برنامه‌ی رایانه‌ی FLUENT به‌منظور شبیه‌سازی جریان در زانویی ۹۰ درجه استفاده کردند. نتایج ایشان شامل حالت‌های بدون تنگ‌شدگی و تنگ‌شدگی‌های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد بود و نشان داد که تنگ‌شدگی تأثیر معناداری در پروفیل سرعت در زانویی دارد، به طوری که باعث جابجایی پروفیل سرعت به سمت پیچ خارجی زانویی می‌شود. همچنین مشاهده شد که در تنگ‌شدگی ۶۰٪ و افزایش قابل‌توجه سرعت، وابستگی پروفیل سرعت به عدد رینولدز در زانویی و در پایین‌دست زانویی کاهش یافته است.

وانگ و چن<sup>۹</sup> (۲۰۲۰)<sup>[۱۰]</sup> برای تحلیل افت هیدرولیکی در سامانه‌ی آبیاری قطره‌یی با لاترال‌های حلقوی و انشعایی از روش اجزاء محدود استفاده کردند. ایشان با ترکیب دو رابطه‌ی داریسی- ویسباخ و بلازیوس<sup>۱۱</sup>، رابطه‌ی جدید برای محاسبه‌ی افت طولی به‌دست آوردند. برای محاسبه‌ی افت موضعی قطره‌چکان نیز از رابطه‌ی براساس فشرده‌شدن خطوط جریان در قطره‌چکان‌ها استفاده کردند. سپس دو نقطه‌ی انتزاعی در پایین‌دست و بالادست لوله در نظر گرفتند و اطلاعات هیدرولیکی را در رابطه‌ی برونولی<sup>۱۱</sup> قرار دادند. با جداسازی دبی در معادله‌ی به‌دست‌آمده، عاملی به نام ضریب لوله<sup>۱۲</sup> به‌دست آمد، که در صورت ضرب در فشار لوله، افت هیدرولیکی را نشان می‌داد. بعد از تشکیل ماتریس‌های باقیمانده<sup>۱۳</sup> و سختی جزء<sup>۱۴</sup> و سپس سرهم‌سازی جواب‌ها با الگوی سختی مستقیم<sup>۱۵</sup>، نتایج بسیار دقیقی در شبیه‌سازی دبی و افت لاترال‌ها به‌دست آمد، به طوری که ضریب همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی برای دبی و افت هیدرولیکی لاترال‌ها به ترتیب برابر با ۰/۹۹۲۲ و ۰/۹۹۰۵ بود. شایان ذکر است که نتایج به‌دست‌آمده فقط برای لوله‌های افقی (بدون شیب طولی) صحیح هستند.

در مورد طراحی لاترال با چند قطره‌چکان، پژوهشی توسط گنزالز-کویرینو<sup>۱۶</sup> و همکاران (۲۰۲۱)<sup>[۱۱]</sup> انجام شد. ایشان با تلفیق دو معادله‌ی داریسی- ویسباخ و مانینگ و با فرض کاهش خطی دبی بعد از هر قطره‌چکان، معادله‌ی چندجمله‌یی به‌دست آوردند، که بین تعداد قطره‌چکان‌ها و افت هیدرولیکی در لاترال ارتباط برقرار می‌کرد. آن‌ها با جداسازی جملات چندجمله‌یی، معادله‌های جدیدی را به‌دست آوردند و سهم هر جمله در محاسبه‌ی افت هیدرولیکی را محاسبه کردند و دریافتند که خطای نسبی معادله‌ها در محاسبه‌ی تعداد قطره‌چکان‌ها در بازه‌ی ۰/۰۰۹- تا ۰/۲۰۹ درصد است و با افزایش تعداد قطره‌چکان‌ها، خطای نسبی به سمت صفر میل می‌کند.

حسن (۲۰۱۷)<sup>[۵]</sup> با یک مدل برنامه‌ریزی خطی، هزینه و افت انرژی را در ۵ لوله با قطرهای متفاوت و با استفاده از روابط هیزن- ویلیامز، داریسی- ویسباخ، مانینگ، و اسکوبی<sup>۴</sup> محاسبه کرد و دریافت که روابط داریسی- ویسباخ و مانینگ بهترین تخمین را از افت انرژی به‌دست می‌دهند. تاس و آگیرالیوگلو<sup>۵</sup> (۲۰۱۸)<sup>[۶]</sup> با بررسی افت طولی در لوله‌های پلی‌اتیلن، برتری دو معادله‌ی مانینگ و داریسی- ویسباخ را گزارش دادند. مونگه-فریله<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۹)<sup>[۷]</sup> نیز به نتیجه‌ی مشابهی دست یافتند. تابش و سوچلمائی<sup>۷</sup> (۲۰۱۸)<sup>[۸]</sup> تأثیر عمر لوله‌ی چدنی در ضریب زبری هیزن-

<sup>۹</sup> Wang & Chen

<sup>۱۰</sup> Blasius

<sup>۱۱</sup> Bernoulli

<sup>۱۲</sup> Pipe Coefficient

<sup>۱۳</sup> Residual Matrix

<sup>۱۴</sup> Element Stiffness Matrix

<sup>۱۵</sup> Direct Stiffness Method

<sup>۱۶</sup> González-Quirino

<sup>۱</sup> Manning

<sup>۲</sup> Reynolds Number

<sup>۳</sup> Brunone

<sup>۴</sup> Scobey

<sup>۵</sup> Tas & Ağralıoğlu

<sup>۶</sup> Monge-Freile

<sup>۷</sup> Soochelmaei

<sup>۸</sup> Jamil & Mujeebu

افت هیدرولیکی در لوله‌ی پلی‌اتیلن با ۴ قطر ۱۶، ۲۰، ۲۵، و ۳۲ میلی‌متری که در آبیاری قطره‌ی معمولاً به‌عنوان لاترال استفاده می‌شوند، اندازه‌گیری شد. طول مسیر اندازه‌گیری افت در لوله‌ها ۳۵ متر بود، که در ابتدا و انتهای آن فشار به‌ازاء دبی‌های عبوری مختلف اندازه‌گیری و ثبت شد. محل نصب لوله‌ها کاملاً مسطح و بدون شیب تنظیم شد. برای اندازه‌گیری فشار هیدرولیکی از مانومتر دیجیتالی مدل ۸۲۱۰۰ با دقت ۰/۰۰۴ بار استفاده شد. ثبت اطلاعات توسط Data Logger انجام گرفت و در هر ثانیه، یک رکورد از فشار هیدرولیکی لوله ثبت شد. برای تأمین فشار موردنیاز از پمپ استفاده شد. همچنین، برای تنظیم دبی و فشار، سامانه‌ی By-Pass روی مدل فیزیکی نصب و دبی به‌صورت حجمی اندازه‌گیری شد (شکل ۱).

پس از اندازه‌گیری افت هیدرولیکی به‌ازاء دبی‌های عبوری مختلف در لوله‌ها، مقدار آن با مقادیر محاسبه‌شده توسط روابط مختلف تعیین ضریب افت  $f$  با کمک رابطه‌ی دارسی-ویسباخ و هیزن-ویلیامز بررسی شد. در این مورد، سه روش مودی<sup>۵</sup>، چرچیل<sup>۶</sup> و کلبروک و وایت<sup>۷</sup> پیشنهاد شده است.

مقدار افت هیدرولیکی با استفاده از روابط ذکرشده برآورد و با افت هیدرولیکی اندازه‌گیری‌شده مقایسه شد؛ سپس نسبت مقدار افت هیدرولیکی محاسبه‌شده به مقدار واقعی در هر یک از لوله‌ها به‌دست آمد. پس از ثبت و آماده‌سازی اطلاعات به‌دست‌آمده از مدل فیزیکی، افت هیدرولیکی اندازه‌گیری‌شده با افت محاسبه‌شده با روش‌های مودی، چرچیل، کلبروک و وایت، و هیزن-ویلیامز مقایسه شد.

یکی از پارامترهای مهم در طراحی یک سیستم هیدرولیکی، سرعت جریان سیال در لوله است. از آنجایی که افت هیدرولیکی متناسب با سرعت سیال است، بالا بودن سرعت می‌تواند افت هیدرولیکی را افزایش دهد و از سوی دیگر، باعث بروز مشکلاتی از قبیل ضربه‌ی قوچ<sup>۸</sup> شود؛ همچنین، سرعت کم جریان

بیشتر مطالعات انجام‌شده در مورد رابطه‌ی هیزن-ویلیامز معطوف به ضریب زبری (C) رابطه‌ی مذکور هستند. در رابطه‌ی هیزن-ویلیامز، ضریب C فقط وابسته به جنس لوله است، اما پژوهشگران همواره سعی در مرتبط‌سازی ضریب C با کمیت‌های دیگر، از جمله عدد رینولدز بوده‌اند؛<sup>۱۲</sup> به‌عنوان مثال، پیزو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۲)،<sup>۱۳</sup> بعد از ترکیب دو رابطه‌ی هیزن-ویلیامز و دارسی-ویسباخ، ضریب C را براساس ضریب  $f$  محاسبه کردند. ضریب  $f$  خود نیز توسط رابطه‌ی توراسه<sup>۲</sup> (۱۹۸۶)،<sup>۱۴</sup> محاسبه شده است، سپس افت هیدرولیکی برای لوله‌های PVC با قطرهای ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۱۵۰، و ۲۰۰ میلی‌متری با دو رابطه‌ی هیزن-ویلیامز اصلاح‌شده و دارسی-ویسباخ محاسبه شد. نتایج آن‌ها نشان داد که مقادیر افت هیدرولیکی محاسبه‌شده به روش هیزن-ویلیامز اصلاح‌شده بسیار نزدیک به مقادیر محاسبه‌شده به روش دارسی-ویسباخ است و بیشترین تفاوت برابر با ۲/۵۸٪ مربوط به لوله با قطر ۱۰۰ میلی‌متر با دبی ۷۶ لیتر بر ثانیه و عدد رینولدز ۱۰۰۰۰۰ و کمترین اختلاف برابر با ۰/۰۲٪ مربوط به لوله با قطر ۵۰ میلی‌متر با دبی ۳/۹۵ لیتر بر ثانیه و عدد رینولدز ۱۰۰۰۰۰ بوده است.

دینی<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۲۳)،<sup>۱۵</sup> واسنجی شبکه‌ی توزیع آب در شهر صوفیان و یک شبکه‌ی نمونه‌ی دو حلقه‌ی را با در نظر گرفتن عدم قطعیت گره‌ها پیاده‌سازی کردند. به‌منظور راستی‌آزمایی، با فرض معلوم‌بودن ضرایب هیزن-ویلیامز، فشار قطعی گرهی در شبکه‌ی نمونه به‌دست آمد و با تعدیل مقادیر فشار، ضریب هیزن-ویلیامز تنظیم شد. برای واسنجی هر دو شبکه در حالت غیرقطعی، با بهره‌گیری از داده‌های فشار غیرقطعی گرهی، که به روش مونت-کارلو<sup>۴</sup> و با توزیع نرمال به‌دست آمده بودند، ضرایب هیزن-ویلیامز شبکه در حالت غیرقطعی با استفاده از واسنجی به‌دست آمد و توسط آن‌ها فشار گرهی در حالت غیرقطعی محاسبه شد. نتایج آن‌ها نشان داد که بین داده‌های محاسباتی و مشاهداتی همخوانی قابل قبولی وجود دارد و عملکرد مدل واسنجی در حالت غیرقطعی قابل قبول است.

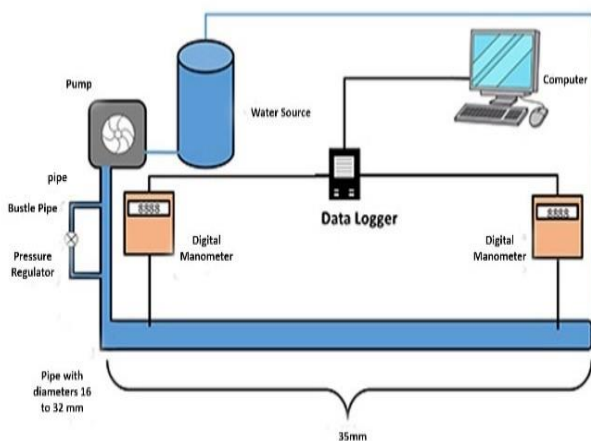
## ۲.۱. جمع‌بندی پیشینه و ضرورت موضوع پژوهش

با توجه به پیشینه‌ی موضوع، تعدادی از پژوهش‌ها برتری رابطه‌ی دارسی-ویسباخ به هیزن-ویلیامز را گزارش داده‌اند؛ برخی نیز بین دو رابطه‌ی اخیر، رابطه‌ی دیگر برآزش داده‌اند. تأثیر تعداد قطره‌چکان‌ها در افت هیدرولیکی نیز به روش‌های اجزاء محدود و آماری نیز بررسی شده است. در پژوهش حاضر، با توجه به فراوانی کاربرد رابطه‌ی هیزن-ویلیامز در طراحی سامانه‌های هیدرولیکی در ایران و دقت نسبتاً پایین آن در مقایسه با رابطه‌های مشابه، رابطه‌ی مذکور را برای لاترال‌های آبیاری واسنجی و تدقیق کرده و رابطه‌ی مستقل از ضریب زبری (C) ارائه داده است.

## ۲. روش پژوهش

### ۱.۲. شرح مدل فیزیکی

در پژوهش حاضر، جهت بررسی میزان دقت رابطه‌های محاسبه‌ی ضریب  $f$ ،



شکل ۱. شکل شماتیک مدل فیزیکی.

<sup>۶</sup> Churchill

<sup>۷</sup> Colebrook & White

<sup>۸</sup> Water Hammer

<sup>۱</sup> Pizzo

<sup>۲</sup> Tourasse

<sup>۳</sup> Dini

<sup>۴</sup> Monte Carlo

<sup>۵</sup> Moody

- در جریان آشفته (رابطه‌ی ۴):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0.18 + 2 \log R_y (f)^{-0.5} \quad R_y < 2000 \quad (4)$$

که در آن،  $R_y$  عدد رینولدز،  $f$  ضریب افت داری- ویسباخ هستند. چرچیل و یوساگی<sup>۱</sup> (۱۹۷۲)، رابطه‌ی ۵ را به‌دست آوردند:

$$\frac{1}{\sqrt{F}} = -2 \log \left( \frac{\epsilon/D}{3.7} + \left( \frac{\nu}{Re} \right)^{1/4} \right) \quad (5)$$

که در آن،  $D$  قطر لوله (m)،  $Re$  عدد رینولدز،  $\epsilon$  ارتفاع زبری جداره‌ی لوله (m)، و  $f$  ضریب افت داری- ویسباخ هستند. چرچیل (۱۹۷۷)<sup>۱۲۱</sup>، رابطه‌ی تعیین ضریب افت  $f$  را مطابق رابطه‌ی ۶ گسترش داد. رابطه‌ی اخیر یک رابطه‌ی کاربردی مناسب بود، که توانایی برآورد افت هیدرولیکی در تمامی محدوده‌ی عدد رینولدز و کلیه‌ی لوله‌ها با جنس-های مختلف را داشت.

$$F_f = 18 \times \left[ \left( \frac{1}{R_y} \right)^{12} + \left( \frac{1}{k_1 + k_2} \right)^{1/5} \right]^{1/12}$$

$$K_1 = \left[ 2.45 \ln \left( \frac{1}{\left( \frac{\nu}{R_y} \right)^{1/4} + 0.27(e/D)} \right) \right]^6$$

$$K_2 = \left( \frac{37530}{R_y} \right)^{1/6}$$

که در آن،  $R_y$  عدد رینولدز و  $f$  ضریب افت داری- ویسباخ هستند. معادله‌ی دیگری که در نوشتار حاضر برای محاسبه‌ی افت طولی استفاده شده است، معادله‌ی هیزن- ویلیامز است (مطابق رابطه‌ی ۷):

$$h_f = K \frac{L}{D^{4.75}} \left( \frac{Q}{C} \right)^{1.85} \quad (7)$$

که در آن،  $K$  ضریب تبدیل واحد،  $Q$  دبی ( $m^3/s$ )،  $L$  طول لوله (m)،  $D$  قطر لوله (m)، و  $C$  ضریب افت هیزن- ویلیامز هستند.

۳. نتایج

در طی آزمایش با مدل فیزیکی، با تنظیم دبی عبوری سعی شده است تا محدوده‌ی سرعت جریان به گونه‌ی باشد که محدوده‌ی سرعت مجاز را شامل شود. در جدول ۱، محدوده‌ی سرعت و عدد رینولدز در مدل فیزیکی با لوله‌های مختلف ارائه شده است.

جدول ۱. کمینه و بیشینه‌ی سرعت جریان و عدد رینولدز در مدل فیزیکی.

قطر اسمی لوله	قطر داخلی لوله (mm)	تعداد ثابت داده	کمینه‌ی سرعت (m/s)	بیشینه‌ی سرعت (m/s)	کمینه‌ی عدد رینولدز	بیشینه‌ی عدد رینولدز
۱۶	۸/۱۲	۲۲	۰.۶۰/۰	۶۷۴/۲	۷۰۶	۳۱۴۷۹
۲۰	۲/۱۶	۱۵	۰.۸۴/۰	۵۷۲/۳	۱۲۴۵	۵۳۲۱۲
۲۵	۴/۲۰	۱۴	۲۴۴/۰	۳۵۵/۴	۴۵۵۰	۸۱۲۹۵
۳۲	۴/۲۸	۱۱	۰.۶۸/۰	۱۰۶/۲	۱۷۷۱	۵۵۰۱۵

در لوله به معنی افزایش قطر لوله است، که باعث افزایش هزینه‌ی اجرایی می‌شود؛ لذا برای رسیدن به حالت بهینه از نظر هیدرولیکی و اقتصادی، در حالت‌های مختلف محدوده‌های سرعت خاصی برای جریان پیشنهاد شده است. معمولاً سرعت مناسب سیال را حدود ۱ الی ۲ متر در ثانیه در نظر می‌گیرند.<sup>۱۴</sup>

۲.۲. روابط محاسبه‌ی افت هیدرولیکی

برای انجام محاسبات، ابتدا به تعیین ضریب افت داری (f) در رابطه‌ی داری- ویسباخ (مطابق رابطه‌ی ۱) اشاره شده است.<sup>۱۵</sup>

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (1)$$

که در آن،  $V$  سرعت جریان (m/s)،  $L$  طول لوله (m)،  $D$  قطر لوله (m)،  $f$  ضریب افت داری- ویسباخ، و  $g$  شتاب گرانش ( $m^2/s$ ) هستند. کلبروک و وایت (۱۹۳۷)<sup>۱۸</sup>، رابطه‌ی ۲ را برای محاسبه‌ی ضریب افت ارائه کرده‌اند:

$$\frac{1}{\sqrt{F}} = -2 \log \left( \frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.45}{R \sqrt{F}} \right) \quad (2)$$

که در آن،  $D$  قطر لوله (m)،  $R$  عدد رینولدز،  $\epsilon$  ارتفاع زبری جداره‌ی لوله (m)، و  $f$  ضریب افت داری- ویسباخ است.

دامنه‌ی کاربرد رابطه‌ی اخیر برای جریان‌هایی با عدد رینولدز بین ۱۰۸ تا ۴۰۰۰ وزبری نسبی ۰ تا ۰/۰۵ است و حالت‌های محدودی از جریان در لوله-های صاف با زبری  $\epsilon=0$  و جریان کاملاً آشفته را پوشش می‌دهد. مودی (۱۹۴۴)<sup>۱۹</sup>، برای تعیین ضریب  $f$ ، در لوله با قطر داخلی ۱۳ میلی‌متر با جداره‌ی صاف (۰/۵ اینچ) با دبی عبوری ۰/۰۱ الی ۰/۲۰ لیتر در ثانیه، میزان افت هیدرولیکی را اندازه‌گیری کرد. وی دریافت که برای محاسبه‌ی افت در لوله‌هایی با قطر کم، که در آبیاری به عنوان لاترال استفاده می‌شوند، رابطه‌ی داری- ویسباخ برآورد بهتری نسبت به روش هیزن- ویلیامز دارد. سپس برای تعیین ضریب

ب افت  $f$  در لوله‌های صاف این روش را پیشنهاد کرده است:

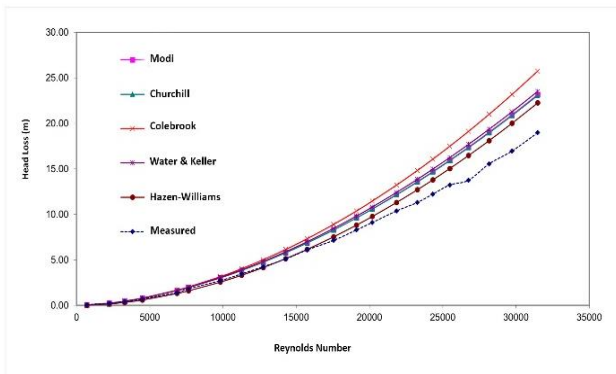
- در جریان لایه‌یی یا لامینار (رابطه‌ی ۳):

$$f = \frac{64}{R_y} \quad R_y < 2000 \quad (3)$$

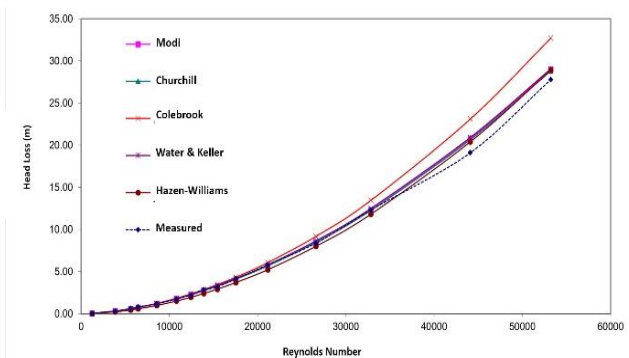
<sup>۱</sup> Churchill & Usagi

جدول ۲. کمینه و بیشینه‌ی نسبت افت محاسباتی به مشاهداتی.

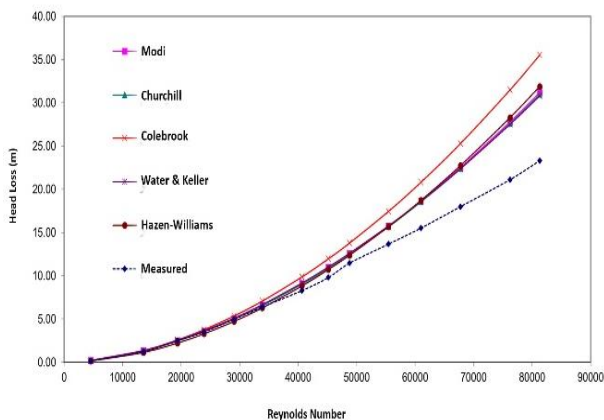
نسبت افت محاسباتی به مشاهداتی با روش‌های مختلف								قطر اسمی لوله
هیزن-ویلیامز		چرچیل		کلبروک و وایت		مودی		
بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه	
۱۹۸/۱	۲۴۵/۰	۳۹۹/۱	۵۶۸/۰	۳۶/۱	۴۵۰/۰	۲۶۵/۱	۵۶۸/۰	۱۶
۰۶۸/۱	۵۵۲/۰	۰۸۰/۱	۷۹۱/۰	۱۷۸/۱	۹۰/۰	۰۸۶/۱	۷۹۱/۰	۲۰
۳۶۸/۱	۸۸۳/۰	۳۵۱/۱	۹۶۸/۰	۵۲/۱	۳۶/۱	۳۳۸/۱	۹۷۰/۰	۲۵
۹۷۰/۰	۲۴۳/۰	۰۱۳/۱	۲۶۱/۰	۰۵۵/۱	۰۲/۰	۰۱۵/۱	۳۷۲/۰	۳۲



شکل ۲. افت هیدرولیکی محاسباتی و مشاهداتی در لوله‌ی ۱۶ میلی‌متری.



شکل ۳. افت هیدرولیکی محاسباتی و مشاهداتی در لوله‌ی ۲۵ میلی‌متری.



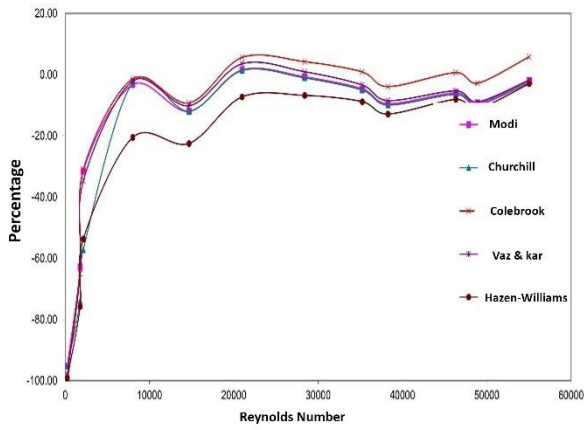
شکل ۴. افت هیدرولیکی محاسباتی و مشاهداتی در لوله‌ی ۲۵ میلی‌متری.

افت هیدرولیکی مشاهداتی در مدل فیزیکی، با افت هیدرولیکی محاسباتی با رابطه‌های هیزن-ویلیامز و دارسی-ویسباخ با سه روش پیشنهادی مقایسه شده است؛ سپس نسبت افت هیدرولیکی محاسباتی به مشاهداتی به دست آمد، که نتایج آن در شکل‌های ۲ الی ۵ مشاهده می‌شود. کمینه و بیشینه‌ی نسبت افت محاسباتی به مشاهداتی در جدول ۲ ارائه شده است.

بر اساس اطلاعات به دست آمده از مدل، مقایسه‌ی درصد اختلاف افت محاسباتی به مشاهداتی در نمودارهای شکل‌های ۶ الی ۹ مشاهده می‌شود. برای انتخاب روش محاسبه‌ی مناسب، جذر میانگین مربعات خطای افت هیدرولیکی محاسباتی و مشاهداتی در مدل محاسبه و در جدول ۳ ارائه شده است.

اختلاف بین جذر میانگین مربعات خطا ناشی از تعداد ثابت اطلاعات و محدوده‌ی سرعت جریان آب در هر مدل است. به عنوان مثال، با توجه به جدول ۱، در لوله‌ی ۲۵ میلی‌متری، بیشینه‌ی سرعت جریان به ۴/۳۵۵ متر در ثانیه رسیده است، در نتیجه جهت انتخاب حالت کاربردی، جذر میانگین مربعات خطا در حالتی که سرعت جریان آب در لوله در محدوده‌ی ۱ الی ۲ متر در ثانیه بوده است، محاسبه و در جدول ۴ ارائه شده است.

در حین بررسی داده‌ها و محاسبه‌ی افت با روش‌های مختلف دارسی-ویسباخ، نکته‌ی جالبی مشاهده شده است. نمودار ضریب افت  $f$  در روش چرچیل با افزایش عدد رینولدز برخلاف سایر روش‌ها، سیر ثابتی نداشته است. مثلاً در لوله‌ی ۱۶ میلی‌متری با افزایش عدد رینولدز تا عدد ۲۲۰۰، سیر نزولی و از ۲۲۰۰ تا ۳۱۵۸، حالت صعودی و پس از آن مانند سایر روش‌های محاسبه‌ی ضریب افت، سیر نزولی داشته است (شکل ۱۰). علت این امر می‌تواند ماهیت تابع ریاضی روش دارسی-ویسباخ باشد. تغییر قطر لوله در مکان کمینه و بیشینه‌ی نمودار تغییر جزئی دارد. یعنی با تغییر قطر لوله، عددهای ذکر شده برای نقاط بحرانی نمودار تغییر جزئی می‌کنند. لذا پیشنهاد می‌شود رابطه‌ی دارسی-ویسباخ در جریان‌هایی با عدد رینولدز کمتر از ۳۲۰۰ استفاده نشود. با توجه به جدول ۳، روش هیزن-ویلیامز و کلبروک-وایت، بیشترین خطا را نسبت به سایر روش‌ها در مقایسه با داده‌های مشاهداتی داشته‌اند. باید توجه داشت که روش هیزن-ویلیامز برخلاف سایر روش‌ها، مستقل از ضریب افت هیدرولیکی دارسی-ویسباخ است. در جدول ۴، نیز میزان خطا در روش‌های متفاوت در محدوده‌ی سرعت جریان بین ۱ تا ۲ متر ارائه شده است، که روندی مشابه با جدول ۳ را نشان می‌دهد؛ به طوری که روش هیزن-ویلیامز و روش



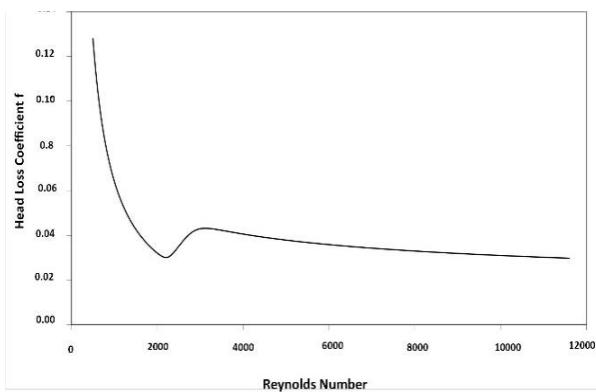
شکل ۹. درصد اختلاف افت محاسباتی به مشاهداتی در لوله‌ی ۳۲ میلی متری.

جدول ۳. جذر میانگین مربعات خطای افت فشار محاسباتی و مشاهداتی نرمال شده در مدل فیزیکی.

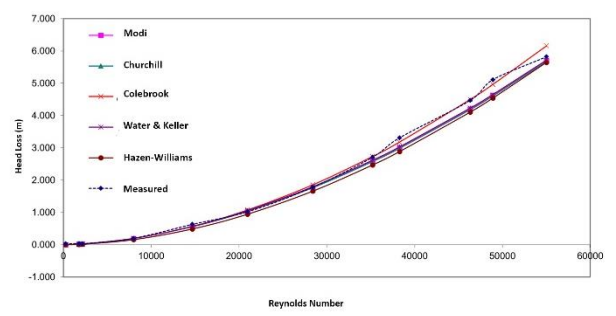
قطر اسمی لوله	جذر میانگین مربعات خطا		
	هیزن- ویلیامز	چرچیل	کلبروک و وایت
۱۶	۰/۱۲۰۷	۰/۰۵۴۳	۰/۰۷۴۶
۲۰	۰/۳۴۷	۰/۳۰۶	۰/۳۱۰
۲۵	۰/۴۸۳	۰/۴۲۷	۰/۴۳۰
۳۲	۰/۴۷۷	۰/۴۳۸	۰/۴۳۷

جدول ۴. جذر میانگین مربعات خطای افت فشار محاسباتی و مشاهداتی نرمال شده در محدوده‌ی سرعت ۱ الی ۲ متر در ثانیه.

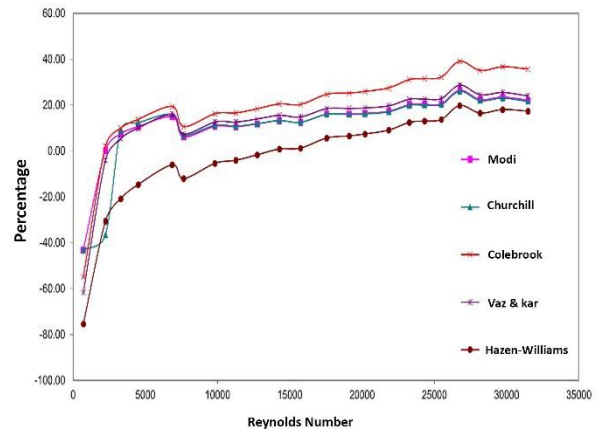
قطر اسمی لوله	جذر میانگین مربعات خطا		
	هیزن- ویلیامز	چرچیل	کلبروک و وایت
۱۶	۰/۰۹۱	۰/۰۳۲	۰/۰۵۴
۲۰	۰/۲۴۷	۰/۲۱۵	۰/۲۲۱
۲۵	۰/۱۷۳	۰/۱۴۹	۰/۱۵۳
۳۲	۰/۶۷۰	۰/۶۱۱	۰/۶۰۷



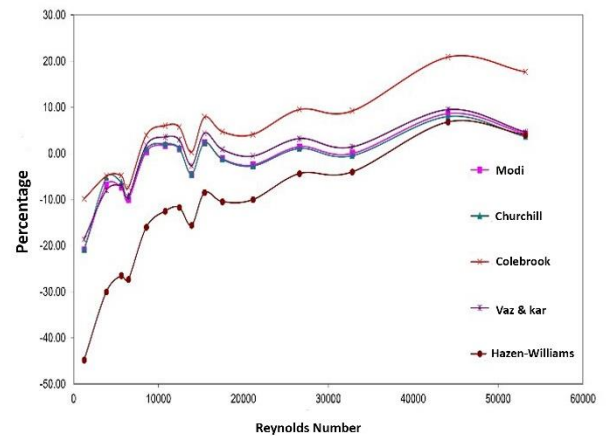
شکل ۱۰. نمودار ضریب افت f محاسبه شده با روش چرچیل.



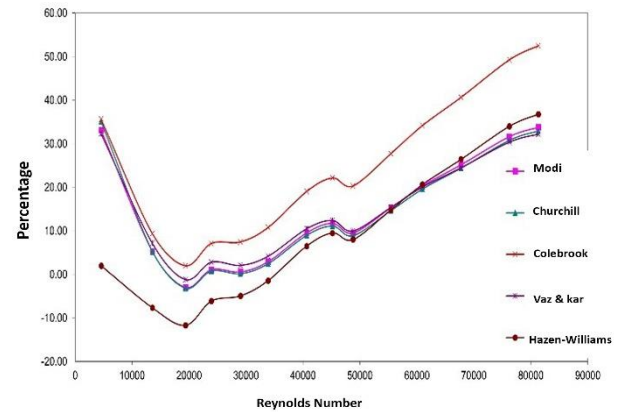
شکل ۵. افت هیدرولیکی محاسباتی و مشاهداتی لوله‌ی ۳۲ میلی متری.



شکل ۶. درصد اختلاف افت محاسباتی به مشاهداتی در لوله‌ی ۱۶ میلی متری.



شکل ۷. درصد اختلاف افت فشار محاسباتی به مشاهداتی در لوله‌ی ۲۰ میلی متری.



شکل ۸. درصد اختلاف افت محاسباتی به مشاهداتی در لوله‌ی ۲۵ میلی متری.

کلبروک- وایت بیشترین اختلاف را با داده‌های افت هیدرولیکی مشاهداتی دارند.

### ۱.۳. ارائه‌ی رابطه‌ی مناسب تعیین افت هیدرولیکی در لاترال

پس از مقایسه‌ی نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تعیین افت هیدرولیکی در لوله‌های مختلف، رابطه‌ی مناسب برای برآورد افت هیدرولیکی به‌دست آمد. برای این کار از نرم‌افزار ۱/۸ DataFit استفاده شد.

اطلاعات ورودی توسط ۲۹۸ مدل ریاضی مختلف ارزیابی شدند. پس از مشاهده‌ی مدل‌های مختلف، مدلی که آسان‌ترین کاربرد و حالت متعارف را داشت، انتخاب شد، که شباهت زیادی به رابطه‌ی هیزن- ویلیامز داشت. با این تفاوت که مستقل از ضریب C بوده و دقت بیشتری داشته و با تغییر سرعت یا عدد رینولدز جریان در لوله نسبت افت هیدرولیکی مشاهداتی به محاسباتی در حدود ۱ بوده است. از آنجایی که فن‌آوری تولید لوله‌های پلی‌اتیلن تقریباً ثابت است، می‌توان گفت که در صورت رعایت استانداردهای تولید و کنترل کیفیت، زبری داخل لوله‌ها یا به تعبیری ضریب C در آن‌ها یکسان خواهد بود. برای اجرای برنامه، دو حالت مختلف در نظر گرفته شد. در مرحله‌ی اول، برای هر قطر از لوله، رابطه‌ی بین دبی و افت هیدرولیکی مشاهداتی به‌دست آمد، که براساس رابطه‌ی ۷ تعریف شده است. پس از به‌دست‌آوردن روابط ۸ الی ۱۱، نمودارهای افت هیدرولیکی مشاهداتی و محاسباتی توسط آن‌ها به ازاء واحد طول لوله در شکل‌های ۱۱ الی ۱۵ مشاهده می‌شوند:

- در لوله‌ی ۱۶ میلی‌متری کلاس A با قطر داخلی ۱۲/۸ میلی‌متر (مطابق رابطه ۸):

$$h_f = 3/0.854 \times L \times Q^{1/647} \quad (8)$$

$$R^2 = 0.9993$$

- در لوله‌ی ۲۰ میلی‌متری کلاس ۱۰ بار با قطر داخلی ۱۶/۲ میلی‌متر (مطابق رابطه ۹):

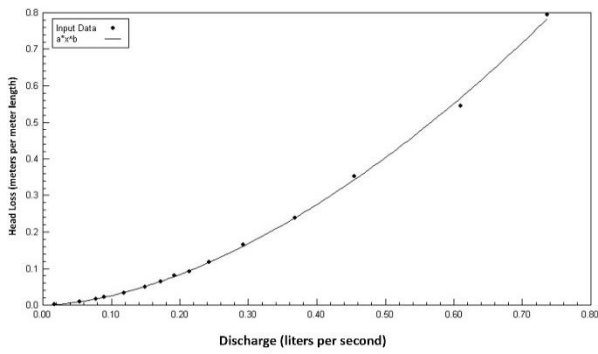
$$h_f = 1/3239 \times L \times Q^{1/714} \quad (9)$$

$$R^2 = 0.9989$$

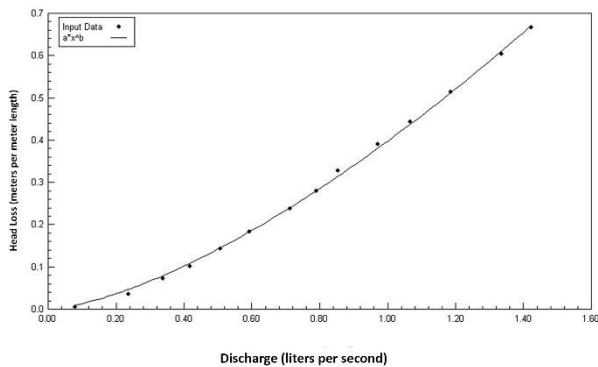
- در لوله‌ی ۲۵ میلی‌متری کلاس ۱۰ بار با قطر داخلی ۲۰/۴ میلی‌متر (مطابق رابطه ۱۰):

$$h_f = 0/3974 \times L \times Q^{1/482} \quad (10)$$

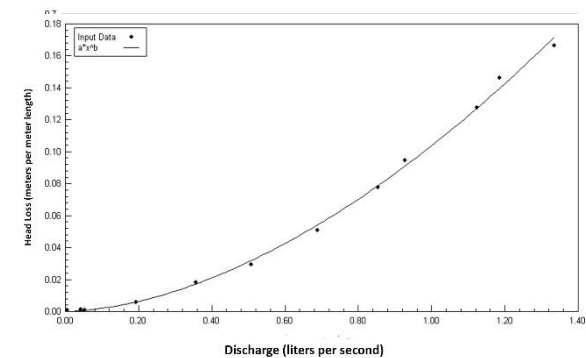
$$R^2 = 0.9987$$



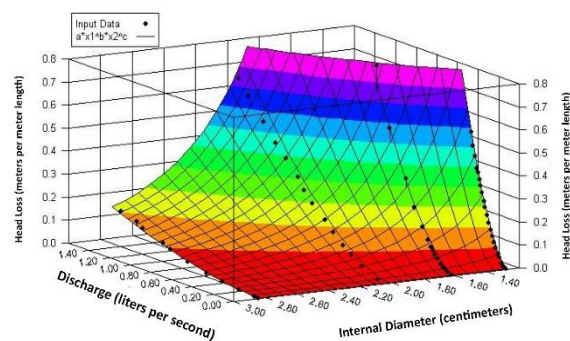
شکل ۱۲. برازش بین افت هیدرولیکی مشاهداتی و محاسباتی توسط رابطه ۹ برای لوله‌ی ۹ میلی‌متری.



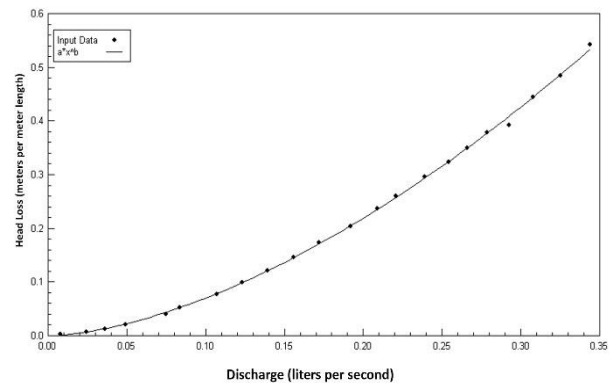
شکل ۱۳. برازش بین افت هیدرولیکی مشاهداتی و محاسباتی توسط رابطه ۱۰ برای لوله‌ی ۱۰ میلی‌متری.



شکل ۱۴. برازش بین افت هیدرولیکی مشاهداتی و محاسباتی توسط رابطه ۱۱ برای لوله‌ی ۱۱ میلی‌متری.



شکل ۱۵. برازش بین افت هیدرولیکی مشاهداتی و محاسباتی توسط رابطه ۱۳ برای لوله‌های ۱۶ تا ۳۲ میلی‌متری.



شکل ۱۱. برازش بین افت هیدرولیکی مشاهداتی و محاسباتی توسط رابطه ۸ برای لوله‌ی ۱۶ میلی‌متری.

- در لوله‌ی ۳۲ میلی‌متری کلاس ۶ بار با قطر داخلی ۲۸/۴ میلی‌متر (مطابق رابطه‌ی ۱۱):

$$h_f = 0.1037 \times L \times Q^{1.744} \quad (11)$$

$$R^2 = 0.9973$$

که در آن،  $Q$  دبی بر حسب لیتر در ثانیه،  $D$  قطر داخلی لوله بر حسب سانتی‌متر، و  $L$  طول لوله بر حسب متر است.

در مرحله‌ی دوم، برای لوله‌های ۱۶ الی ۳۲ میلی‌متری، رابطه‌ی بین دبی و قطر داخلی لوله با افت هیدرولیکی براساس رابطه‌ی ۱۲ به‌دست آمد:

$$h_f = f Q, D \quad (12)$$

که در لوله‌های ۱۶ تا ۳۲ میلی‌متری، رابطه‌ی بین دبی و افت هیدرولیکی مشاهداتی مطابق رابطه‌ی ۱۳ بودند:

$$h_f = 8/8113 \times L \times \frac{Q^{1.608}}{D^{4.3136}} \quad (13)$$

$$R^2 = 0.9876$$

از آنجایی که لاترال‌های آبیاری قطره‌یی عموماً قطری بین ۱۶ الی ۳۲ میلی‌متر دارند، آزمایش‌ها و رابطه‌ی ۱۳ به‌دست‌آمده، فقط برای برآورد افت هیدرولیکی در لوله‌ی پلی‌اتیلن با قطر ۱۶ الی ۳۲ میلی‌متر توصیه می‌شود. براساس تجزیه و تحلیل اطلاعات به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انجام‌شده، برای بالابردن دقت برآورد پیشنهاد می‌شود روابط اخیر در جریان‌هایی با عدد رینولدز بیش از ۲۰۰۰ استفاده شوند.

در محدوده‌ی عدد رینولدز کمتر از ۲۰۰۰، ضرایب افت  $f$  به‌ازاء ضرایب زبری متفاوت، منحنی‌ها در ازاء مقادیر مختلف  $\varepsilon/D$  بر هم منطبق هستند. در روابط به‌دست‌آمده اختلاف بین افت محاسباتی و مشاهداتی در محدوده‌ی عدد رینولدز کمتر از ۲۰۰۰، در حد چند سانتی‌متر ستون آب است؛ این دقت می‌تواند قابل قبول باشد، اما به‌دلیل درصد اختلاف نسبتاً زیاد، توصیه می‌شود برای دستیابی به دقت برآورد مناسب در محدوده‌ی موردنظر استفاده نشود. مطالعه‌ی حاضر، بر روی لوله‌های پلی‌اتیلن با قطرهای بسیار کوچک، یعنی ۳۲ میلی‌متر، ۲۵ میلی‌متر، ۲۰ میلی‌متر، و ۱۶ میلی‌متر متمرکز شده است. دقیق‌ترین واسنجی معادله‌ی هیزن- ویلیامز برای لوله‌ی ۱۶ میلی‌متری ( $R^2 = 0.9993$ ) و به دنبال آن لوله‌ی ۲۰ میلی‌متری ( $R^2 = 0.9989$ )، لوله‌ی ۲۵ میلی‌متری ( $R^2 = 0.9987$ )، و لوله‌ی ۳۲ میلی‌متری ( $R^2 = 0.9983$ ) مشاهده شد. در مقابل، میراندا<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۹)<sup>[۲۳]</sup> که معادله‌ی هیزن- ویلیامز را برای لوله‌های PVC با قطر بزرگ‌تر از ۵ سانتی‌متر واسنجی کرده‌اند، از لحاظ دقت واسنجی به نتیجه‌ی متفاوتی رسیدند. به‌عنوان مثال، بزرگ‌ترین میانگین خطای مطلق (MAE) برای کوچک‌ترین لوله، یعنی لوله با قطر ۰/۰۵۰۸ متر مساوی ۰/۰۰۲۹۹ بوده است؛ و به دنبال آن برای لوله با قطر ۰/۰۷۶۲ متر (MAE=۰/۰۰۰۴۳)، لوله با قطر ۰/۱۰۱۶ متر (MAE=۰/۰)، و لوله با قطر ۰/۱۲ متر (MAE=۰/۰۰۰۱) مشاهده شد. تفاوت در جنس

لوله‌ی بررسی‌شده در دو مطالعه (پی‌وی‌سی و پلی‌اتیلن) می‌تواند باعث تولید نتیجه‌ی متضاد شده باشد. یکی دیگر از عوامل مؤثر در زبری، جریان لایه‌ی مرزی است<sup>[۲۳]</sup>، اما طول لوله توسط میراندا و همکاران (۲۰۱۹)<sup>[۲۰]</sup> اعلام نشده است؛ بنابراین، امکان مقایسه‌ی مستقیم در مورد اثر لایه‌ی مرزی در دو مطالعه وجود ندارد. مطالعه‌ی حاضر به‌طور کامل زبری و قطر را در معادلات واسنجی‌شده حذف کرد (روابط ۸ تا ۱۱)، در حالی که در معادلات واسنجی‌شده توسط میراندا و همکاران (۲۰۱۹)<sup>[۲۰]</sup> هنوز پارامتر قطر مشاهده می‌شود، که این خود باعث می‌شود واسنجی آن‌ها با واسنجی انجام‌شده در مطالعه‌ی حاضر ناسازگارتر باشد. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، حساسیت افت هیدرولیکی نسبت به متغیرهای ورودی، مانند ضریب افت داری- ویسباخ، عدد رینولدز، قطر لوله، زبری نسبی، و ... تحلیل و در تفسیر روند تغییرات افت هیدرولیکی و همچنین اختلاف روش‌ها در محاسبه‌ی افت هیدرولیکی استفاده شود.

#### ۴. نتیجه‌گیری

براساس نتایج پژوهش حاضر، میزان افت هیدرولیکی محاسبه‌شده با روش‌های مختلف با یکدیگر تا حدودی اختلاف دارند. در لوله‌های ۱۶، ۲۰، و ۲۵ میلی‌متری با افزایش سرعت بیش از حد پیشنهادشده (حدود ۲ متر در ثانیه) و عدد رینولدز، افت هیدرولیکی محاسبه‌شده بیشتر از افت اندازه‌گیری‌شده است (شکل‌های ۱ الی ۳). همچنین میزان اختلاف بین افت محاسباتی و مشاهداتی افزایش یافته است (شکل‌های ۵ الی ۷). در لوله‌ی ۳۲ میلی‌متری با توجه به شرایط و امکانات آزمایش، بیشینه‌ی سرعت جریان ۲/۱۰۶ متر در ثانیه بوده است (شکل ۴)، که در آن میزان افت مشاهداتی از افت محاسباتی بیشتر بوده است.

براساس جدول ۳، مقدار جذر میانگین مربعات خطا در لوله‌ی ۱۶ میلی‌متری با رابطه‌ی هیزن- ویلیامز در لوله‌ی ۲۰ و ۲۵ میلی‌متری با رابطه‌ی چرچیل و در لوله‌ی ۳۲ میلی‌متری با رابطه‌ی کلبروک و وایت از بقیه کمتر بوده است، اما در محدوده‌ی سرعت جریان ۱ الی ۲ متر در ثانیه براساس جدول ۴، مقدار جذر میانگین مربعات خطا در لوله‌های ۱۶ و ۲۵ میلی‌متری با رابطه‌ی هیزن- ویلیامز، در لوله‌ی ۲۰ میلی‌متری با رابطه‌ی مودی، و در لوله‌ی ۳۲ میلی‌متری با رابطه‌ی کلبروک و وایت از بقیه کمتر بوده است.

درنهایت، در لوله‌های ۱۶ و ۲۵ میلی‌متری با توجه به جدول ۴ توصیه می‌شود از رابطه‌ی هیزن- ویلیامز استفاده شود. با توجه به مشکلات محاسبه‌ی ضریب افت  $f$ ، می‌توان با تصحیح رابطه‌ی ساده و کاربردی هیزن- ویلیامز، دقت رابطه‌ی اخیر را بالاتر برد و از آن استفاده کرد. این کار برای لوله‌های ۱۶ تا ۳۲ میلی‌متری انجام شده است.

#### تقدیر و تشکر

بدین وسیله از دانشگاه تهران و مؤسسه‌ی تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی که پژوهش حاضر با پشتیبانی آن‌ها انجام شده است، تشکر می‌شود.

<sup>۱</sup> Miranda



## منابع - References

1. Afshar, M. and Sotoodeh, M. H., 2006. Application of nonlinear programming methods to the optimal design of sewer networks. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 22(35), pp. 3-11. [In Persian].
2. R. Daneshfaraz, R., Sadeqfam, R. and M. Majedi-Asl, M., 2011. The effect of non-linear terms on the process of computing water hammer with regard to friction coefficient for different cast iron pipe. *International Journal of Engineering & Applied Sciences (IJEAS)*, 3(3), pp. 15-22.
3. Shamloo, H., Mousavi Fard, S. M. and Haghighi, A., 2013. Investigation of unsteady effects of friction loss and transient flow using 1d energy relations. *Sharif Journal of Civil Engineering*, Volume 29-2(1), pp. 149-157 [In Persian].
4. Daneshfaraz, R., Rezazadeh joudi, A. and Abraham, J., 2017. Numerical investigation on the effect of sudden contraction on flow behavior in a 90-degree bend. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 22(2), pp. 603-612. doi: 10.1007/s12205-017-1313-3.
5. Hassan, A., 2017. Design of sprinkler irrigation tapered main line by linear programming. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 34(3), pp. 1335-1350. doi: 10.21608/mjae.2017.97468.
6. Tas, E. and Ağralıoğlu, N., 2018. Comparison of friction losses in long polyethylene pipe systems using different formulas. *International Symposium on Urban Water and Wastewater Management*, pp. 602-609.
7. Monge-Freile, M., Sánchez-Delgado, M., Huanca-Velarde, L. and Moreno-Llacza, A., 2019. Bamboo (*Guadua angustifolia* spp.) as a conduction alternative for a multi floodgates irrigation system. *Lima, Perú. Anales Científicos*, 80(1), pp. 240-252. doi: 10.21704/ac.v80i1.1391.
8. Tabesh, M. and Kazemi Soochelmaei, M., 2018. Studying the effect of factors influencing the change in hazen-williams roughness coefficient of cast iron pipes during operation period. *Journal of Water and Wastewater Science and Engineering*, 3(2), pp. 23-34. [In Persian]. doi: 10.22112/jwwse.2018.129924.1089.
9. Jamil, R. and Mujeebu, M. A., 2019. Empirical relation between Hazen-Williams and Darcy-Weisbach equations for cold and hot water flow in plastic pipes. *Imam, Saudi Arabia. WATER*, 108(6), pp. 104-114.
10. Wang, J. and Chen, R., 2020. An improved finite element model for the hydraulic analysis of drip irrigation subunits considering local emitter head loss. *Irrigation Science*, 38(2), pp. 147-162. doi: 10.1007/s00271-019-00656-0.
11. González-Quirino, J. G., Fortis-Hernández, M., Preciado-Rangel, P., Yescas-Coronado, P., Barrios-Díaz, J. M. and Reyes-González, A., 2021. Deterministic equation for hydraulic system design multiple outlet irrigation. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(5), pp. 777-789. doi: 10.29312/remexca.v12i5.2986.
12. Achour, B. and Amara, L., 2020. Theoretical considerations on flow regime dependency of the Hazen-Williams coefficient. *LARHYSS Journal*, 9728(42), pp. 53-62.
13. Pizzo, H. D. S., Dantas, C. A. S. and Ribeiro, C. B. M., 2022. Fitting Hazen-Williams Roughness Coefficient to the Head Loss Obtained by Darcy-Weisbach Equation in PVC Pipes. *Advance Researches in Civil Engineering*, 4(1), pp. 1-14. doi: 10.30469/arce.2022.150292.
14. Tourasse, E., 1986. Explicit equation for coefficient of friction and duct calculation. *Eng. Sanit*, 25(2), pp. 177-178.
15. Dini, M., Abbaspoor, G. and Saghebian, S. A., 2023. Calibration of water distribution networks by considering the uncertainty of nodal pressure. *Journal of Water and Wastewater Science and Engineering*, 8(3), pp. 13-24. [In Persian]. doi: 10.22112/jwwse.2023.350090.1320.
16. Keller, J. and Bliesner, R. D., 1990. Trickle irrigation planning factors. *Springer US*, pp. 453-477. doi: 10.1007/978-1-4757-1425-8\_19.
17. Manning, F. S. and Thompson, R. E., 1995. Oilfield processing of petroleum: Crude oil (Vol. 2). *Pennwell books*, pp. 183-185. doi: 10.1016/j.energy.2005.10.009.
18. Colebrook, C. F. and White, C. M., 1937. Experiments with fluid friction in roughened pipes. *Proceedings of The Royal Society of London. Series a, Mathematical and Physical Sciences*, pp. 367-381. doi: 10.1098/rspa.1937.0150.
19. Moody, L. F., 1944. Friction factors for pipe flow. *Trans. Asme*, 66(8), pp. 671-684. doi: 10.1115/1.4018140.
20. Churchill, S. W. and Usagi, R., 1972. A general expression for the correlation of rates of transfer and other phenomena. *AIChE Journal*, 18(6), pp. 1121-1128. doi: 10.1002/aic.690180606.
21. Churchill, S. W., 1977. Friction-factor equation spans all fluid-flow regimes. *Chemical Engineering*, 84(24), pp. 91-92.
22. Miranda, E. P., Custodio, T. B. D. S., DE LIMA, F. U., Pereira, T. A. and Bicudo, A. L. R., 2019. Adjustment of the hazen-willians equation for determination of continuous pressure drop in PVC pipe. *IRRIGA*, 16(2), pp. 94-100. doi: 10.15809/irriga.2019v1n1p94-100.
23. Lu, Y., Liu, H., Liu, Z. and Yan, C., 2020. Investigation and parameterization of transition shielding in roughness-disturbed boundary layer with direct numerical simulations. *Physics of Fluids*, 32(7), pp. 251-260. doi: 10.1063/5.0012464.