

# ارزیابی روابط متداول محاسبه افت هیدرولیکی و واسنجی رابطه هیزن-ویلیامز در لاترال‌های آبیاری قطره‌ای

شاهین شفائی<sup>۱</sup>، قاسم زارعی<sup>۲</sup>، کیومرث ابراهیمی<sup>۳\*</sup>، شیما سلیمانی<sup>۴</sup> و محمد شمسی<sup>۵</sup>

۱ و ۵- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

[mohammad.shamsi@ut.ac.ir](mailto:mohammad.shamsi@ut.ac.ir) ، [Sha.Shafae@alumni.ut.ac.ir](mailto:Sha.Shafae@alumni.ut.ac.ir)

۲- دانشیار، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، کرج، ایران [gh.zarei@areeo.ac.ir](mailto:gh.zarei@areeo.ac.ir)

۳\* - استاد، گروه مهندسی انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

(نویسنده مسئول [EbrahimiK@ut.ac.ir](mailto:EbrahimiK@ut.ac.ir)).

۴- دانشجوی فوق‌دکتری مهندسی منابع آب، دانشگاه رایس، هوستون، تگزاس، آمریکا. [shimasoleimani@ksu.edu](mailto:shimasoleimani@ksu.edu)

## چکیده:

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

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

# Evaluation of the widely-used equations of Hydraulic Loss Calculation and Calibration of the Hazen-Williams Equation in Drip Irrigation Laterals

Shafaei Sh.<sup>۱</sup>, Zarei Gh.<sup>۲</sup>, Ebrahimi K.<sup>۳\*</sup>, Soleimani Sh.<sup>۴</sup> and Shamsi M.<sup>۵</sup>

<sup>۱,۵</sup> Graduated MSc. in Irrigation and Drainage Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran.

[Sha.Shafaei@alumni.ut.ac.ir](mailto:Sha.Shafaei@alumni.ut.ac.ir), [mohammad.shamsi@ut.ac.ir](mailto:mohammad.shamsi@ut.ac.ir)

<sup>۲</sup> Associate Professor, Agricultural Engineering Research Institute, Ministry of Agriculture – Jahad, Karaj, Iran.

[gh.zarei@areeo.ac.ir](mailto:gh.zarei@areeo.ac.ir)

<sup>۳\*</sup> Professor, Department of Renewable Energies and Environmental Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. (Corresponding Author [EbrahimiK@ut.ac.ir](mailto:EbrahimiK@ut.ac.ir))

<sup>۴</sup> Postdoc Associate, Rice University, Houston, Texas, United States, [Shimasoleimani@ksu.edu](mailto:Shimasoleimani@ksu.edu)

## Abstract:

In designing of drip irrigation systems, Hazen-William's equation is usually used to determine the hydraulic head loss. The mentioned equation is suggested for pipes with diameters greater than ۷۵ mm and flow rates above ۲,۳ l/s. However, for trickle irrigation lateral pipes with diameters from ۱۶ to ۳۲ mm are generally used. In this case, the calculated hydraulic head loss is lower than the actual hydraulic head loss, and subsequently, the hydraulic pressure at the desired point will be lower than the required value; In other words, the output flow from the droppers will be reduced and the uniformity of water distribution will be less than the expected amount. Herein, using laboratory models and the use of polyethylene pipes with a diameter of ۱۶, ۲۰, ۲۵ and ۳۲ mm, the amount of hydraulic loss was measured for different flow rates and according to the permissible velocity limits. Hydraulic pressures were measured using data Logger, one record for each second, and the discharge was adjusted volumetrically. To control the discharge and the hydraulic pressure, a by-pass pipe was installed on the physical model. The amount of hydraulic head loss was measured for different flow rates in the permissible flow velocity range (۱-۲ m/s). Then, by analyzing the recorded data, a new relationship was obtained that calculates the amount of hydraulic head loss in ۱۶ to ۳۲ mm pipes as a function of flow rate and pipe diameter. The Hazen-Williams equation was compared with the results of Moody, Churchill and Colebrook methods, as well as the actual measured values. According to the results, the largest error between the measured and the calculated head loss was for the Colebrook & White equation for the ۲۵ mm pipe and the smallest error was for the same equation for the ۳۲ mm pipe. The obtained relationship is recommended for polyethylene pipes with diameter of ۱۶ to ۳۲ mm and with Reynolds number above ۲۰۰۰ with high confidence. One of the advantages of the obtained relationship is its independence from the Hazen-Williams roughness coefficient and its remarkable accuracy.

**Keywords:** Drip irrigation, hydraulic loss, laboratory model, Hazen-Williams.

## ۱. مقدمه

بازده آبیاری بیشتر و یکنواختی بالاتر آبیاری از جمله اهداف آبیاران برای صرفه‌جویی در مصرف آب و دستیابی به بهره‌وری بالاتر آب می‌باشد. سامانه‌های آبیاری قطره با مقدور ساختن کنترل بیشتر بر دبی و پخش آب، رسیدن به اهداف اشاره‌شده را ممکن می‌سازند. از جمله مهم‌ترین مواردی که در طراحی سامانه‌های آبیاری قطره‌ای باید مورد توجه قرار گیرد، افت فشار آب در اثر اصطکاک می‌باشد. نحوه برآورد افت فشار بر انتخاب اندازه لوله‌های انتقال آب و پمپ تاثیر می‌گذارد؛ بنابراین برآورد صحیح افت فشار تاثیر به‌سزایی در هزینه اجرای سیستم آبیاری قطره‌ای دارد. برآورد صحیح میزان افت هیدرولیکی، تا حد زیادی به انتخاب رابطه مناسب جهت تعیین افت بستگی دارد. روابط متعددی به منظور محاسبه افت فشار لوله‌ها توسعه داده شده‌اند که از جمله معروف‌ترین آنها می‌توان به هیزن-ویلیامز<sup>۱</sup> و دارسی-ویسباخ<sup>۲</sup> اشاره نمود. رابطه هیزن-ویلیامز با وجود دقت کمتر در برآورد افت فشار، بدلیل آشنایی مهندسان با ضریب زبری<sup>۳</sup> موجود در این رابطه و افزایش توانایی آنها در تخمین این ضریب، همچنان در طراحی سیستم‌ها هیدرولیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. با توجه به اینکه رابطه هیزن-ویلیامز در مقایسه با دارسی-ویسباخ افت فشار را ۱۳ درصد بیشتر برآورد می‌کند [۲] و فراوانی کاربرد این رابطه در طراحی سامانه‌های آبیاری قطره‌ای، نیاز است که این رابطه برای لاترال‌های آبیاری درختان واسنجی گردد. در این تحقیق به ارزیابی روش‌های متداول تعیین میزان افت هیدرولیکی و واسنجی رابطه هیزن-ویلیامز در قطرهای متفاوت لاترال‌های آبیاری پرداخته شده است.

## ۱.۱. پیشینه موضوع

افشار و ستوده (۲۰۰۶)،<sup>[۱]</sup> مدلی برای طراحی بهینه شبکه‌های فاضلاب بر اساس روش برنامه‌ریزی غیرخطی ارائه دادند. آنها بعد از تبدیل مسئله مقید به مسئله بدون قید با استفاده از تابع توانی خارجی، برای مدل‌سازی افت هیدرولیکی از دو رابطه مانینگ<sup>۴</sup> و هیزن-ویلیامز استفاده نمودند، به طوریکه شیب لوله به عنوان متغیر در نظر گرفته شد. آنها در نهایت گزارش دادند که روش پیشنهادی آنها در مقایسه با سایر روش‌های مشابه برتری دارد. تاثیر ضریب افت شزی بر بار هیدرولیکی آب در ضربه قوچ در دو حالت با در نظرگیری معادله ضربه قوچ به طور کامل و بدون

لحاظ جمله‌های غیر خطی معادله توسط دانش‌فراز و همکاران (۲۰۱۱)<sup>[۲]</sup> بررسی شد. در آن پژوهش از انواع لوله آهنی با ضریب‌های شزی ۸۰، ۱۰۰ و ۱۳۰ استفاده شد. نتایج آنها نشان داد که با افزایش ضریب شزی، اختلاف دو حالت در بار هیدرولیکی آب افزایش می‌یابد؛ همچنین عدم لحاظ جمله‌های غیرخطی منجر به راه‌حلی 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>۵</sup> پایین به منظور تعیین شرایط مناسب برای پیاده‌سازی روش‌های نشت‌یابی بر پایه مدل‌سازی جریان گذرا بررسی نمودند. آنها برای محاسبه افت اصطکاک غیرماندگار از رابطه برونن<sup>۶</sup> بهره جستند. نتایج آنها حاکی از این بود 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 می‌باشد و این اختلاف با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. زانویی و تنگ‌شدگی لوله از جمله مواردی هستند که می‌توانند بر سرعت جریان تاثیر بگذارند؛ این تاثیر توسط دانش‌فراز و همکاران (۲۰۱۷)<sup>[۴]</sup> مورد مطالعه قرار گرفت. آنها از برنامه رایانه‌ای FLUENT به منظور شبیه‌سازی جریان در زانویی ۹۰ درجه استفاده نمودند. نتایج آنها شامل بر حالت‌های بدون تنگ‌شدگی و تنگ‌شدگی‌های ۲۰ درصد، ۴۰ درصد و ۶۰ درصد بود و نشان داد که تنگ‌شدگی تاثیر معناداری بر پروفیل سرعت در زانویی دارد، به طوریکه باعث جابه‌جایی پروفیل سرعت به سمت پیچ خارجی زانویی می‌شود. همچنین مشاهده شد که در تنگ‌شدگی ۶۰ درصد و افزایش قابل توجه سرعت، وابستگی پروفیل سرعت به عدد رینولدز در زانویی و در پایین دست زانویی کاهش یافت.

حسن<sup>۷</sup> (۲۰۱۷)،<sup>[۵]</sup> با یک مدل برنامه‌ریزی خطی، هزینه و افت انرژی را در پنج لوله با قطرهای متفاوت و با استفاده از روابط هیزن-ویلیامز، دارسی-ویسباخ، مانینگ و اسکوبی<sup>۸</sup> محاسبه نمود و به این نتیجه رسید که روابط دارسی-ویسباخ و مانینگ بهترین تخمین را از افت انرژی به دست می‌دهند. تاس و آگیرالیوقلو<sup>۹</sup> (۲۰۱۸)،<sup>[۶]</sup> با بررسی افت طولی در لوله‌های پلی‌اتیلن، برتری دو معادله مانینگ و دارسی-ویسباخ را گزارش دادند؛ مونگه-فریله<sup>۱۰</sup> و همکاران (۲۰۱۹)،<sup>[۷]</sup> نیز به نتیجه مشابهی دست یافتند.

تابش و سوچلمایی (۲۰۱۸)،<sup>[۸]</sup> تاثیر عمر لوله چدنی بر ضریب زبری هیزن-ویلیامز را بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که اگر برای طراحی شبکه آب‌رسانی از ضریب زبری لوله نو استفاده شود، فشار سامانه در انتهای دوره بهره‌برداری بیشتر از ۲۵ درصد کاهش پیدا می‌کند ولی هزینه اجرای طرح حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. آنها در نهایت استفاده از ضریب زبری در انتهای دوره بهره‌برداری و پذیرفتن افزایش هزینه اجرای طرح را پیشنهاد دادند.

جمیل و موجیبو<sup>[۹]</sup> (۲۰۱۹)،<sup>[۹]</sup> افت هیدرولیکی را برای لوله‌های پلاستیکی با قطرهای ۱۵ تا ۵۰ میلی‌متر و آب با دماهای ۲۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد با دو رابطه داری-ویسباخ و هیزن-ویلیامز محاسبه نمودند و به وسیله برازش خطی، رابطه‌ای بین دو افت محاسبه‌شده برقرار ساختند و بیان داشتند که در صورت دانستن ضریب زبری هیزن-ویلیامز، می‌توان افت هیدرولیکی داری-ویسباخ را توسط معادله برازش داده شده بدست آورد.

وانگ و چن<sup>[۱۰]</sup> (۲۰۲۰)،<sup>[۱۰]</sup> برای تحلیل افت هیدرولیکی در سامانه آبیاری قطره‌ای با لاترال‌های حلقوی و انشعابی از روش اجزای محدود استفاده نمودند. آنها با ترکیب دو رابطه داری-ویسباخ و بلازیوس<sup>[۱۱]</sup>، رابطه‌ای جدید برای محاسبه افت طولی بدست آوردند. برای محاسبه افت موضعی قطره‌چکان نیز از رابطه‌ای بر اساس فشرده‌شدن خطوط جریان در قطره‌چکان‌ها استفاده شد. سپس دو نقطه انتزاعی در پایین‌دست و بالادست لوله در نظر گرفته و اطلاعات هیدرولیکی در رابطه برنولی<sup>[۱۲]</sup> قرار داده شدند. با جداسازی دبی در معادله بدست آمده، فاکتوری به نام ضریب لوله<sup>[۱۳]</sup> بدست آمد که در صورت ضرب در فشار لوله، افت هیدرولیکی را نشان می‌داد. بعد از تشکیل ماتریس‌های باقیمانده<sup>[۱۴]</sup> و سختی جزء<sup>[۱۵]</sup> و سپس سرهم‌سازی جواب‌ها با الگوی سختی مستقیم<sup>[۱۶]</sup>، نتایج بسیار دقیقی در شبیه‌سازی دبی و افت لاترال‌ها بدست آمد، به طوریکه 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 بدست‌آمده تنها برای لوله‌های افقی (بدون شیب طولی) صحیح هستند

در مورد طراحی لاترال با چند قطره‌چکان، پژوهشی توسط گنزالز-کویرینو<sup>[۱۷]</sup> و همکاران (۲۰۲۱)،<sup>[۱۷]</sup> انجام شد. آنها با تلفیق دو معادله داری-ویسباخ و مانینگ و با فرض کاهش خطی دبی

بعد از هر قطره‌چکان، معادله‌ای چندجمله‌ای بدست آوردند که بین تعداد قطره‌چکان‌ها و افت هیدرولیکی در لاترال ارتباط برقرار می‌کرد. آنها با جداسازی جملات چندجمله‌ای، معادلات جدیدی را بدست آوردند و سهم هر جمله در محاسبه افت هیدرولیکی را محاسبه نمودند. نتایج آنها نشان داد که خطای نسبی معادلات در محاسبه تعداد قطره‌چکان‌ها در بازه ۰/۰۰۹- تا ۰/۲۰۹ درصد بوده و با افزایش تعداد قطره‌چکان‌ها، خطای نسبی به سمت صفر میل می‌کند.

بیشتر تحقیقات انجام شده بر رابطه هیزن-ویلیامز معطوف به ضریب زبری این رابطه (C) می‌باشند. در این رابطه ضریب C تنها وابسته به جنس لوله بوده، اما پژوهشگران همواره سعی در مرتبط ساختن این ضریب با کمیت‌های دیگر، از جمله عدد رینولدز بوده‌اند [۱۲]؛ به عنوان مثال، پیژو<sup>[۱۳]</sup> و همکاران (۲۰۲۲)،<sup>[۱۳]</sup> بعد از ترکیب دو رابطه هیزن-ویلیامز و داری-ویسباخ، ضریب C را بر اساس ضریب f محاسبه نمودند، ضریب f خود نیز توسط رابطه توراسه<sup>[۱۴]</sup> (۱۹۸۶)،<sup>[۱۴]</sup> محاسبه گردید، سپس افت هیدرولیکی برای لوله‌های PVC با قطرهای ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌متری با دو رابطه هیزن-ویلیامز اصلاح‌شده و داری-ویسباخ محاسبه گردید. نتایج آنها نشان داد که مقادیر افت هیدرولیکی محاسبه‌شده به روش هیزن-ویلیامز اصلاح‌شده بسیار نزدیک به مقادیر محاسبه‌شده به روش داری-ویسباخ دارند و بیشترین تفاوت برابر با ۲/۵۸ درصد مربوط به لوله با قطر ۱۰۰ میلی‌متر با دبی ۷۶ لیتر بر ثانیه و عدد رینولدز ۱۰۰۰۰۰۰ و کمترین اختلاف برابر با ۰/۰۲ درصد مربوط به لوله با قطر ۵۰ میلی‌متر با دبی ۳/۹۵ لیتر بر ثانیه و عدد رینولدز ۱۰۰۰۰۰ بود. دینی و همکاران (۲۰۲۳)،<sup>[۱۵]</sup> واسنجی شبکه توزیع آب در شهر صوفیان و یک شبکه نمونه دو حلقه‌ای را با در نظرگیری عدم قطعیت گره‌ها پیاده‌سازی نمودند. به منظور صحت‌سنجی، با فرض معلوم‌بودن ضرایب هیزن-ویلیامز، فشار قطعی گرهی در شبکه نمونه بدست آمد و با تعدیل مقادیر فشار، ضریب هیزن-ویلیامز تنظیم گردید. برای واسنجی هر دو شبکه در حالت غیرقطعی، با بهره‌گیری از داده‌های فشار غیرقطعی گرهی که به روش مونتِه-کارلو<sup>[۱۶]</sup> و با توزیع نرمال بدست آمده بودند، ضرایب هیزن-ویلیامز شبکه در حالت غیرقطعی با استفاده از واسنجی بدست 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 می‌باشد.

## ۲.۱. جمع‌بندی پیشینه و ضرورت موضوع پژوهش

با توجه به پیشینه موضوع، تعدادی از پژوهش‌ها برتری رابطه داری-ویسباخ به هیزن-ویلیامز را گزارش داده‌اند؛ برخی نیز بین این دو رابطه، رابطه‌ای دیگر برآزش داده‌اند. تاثیر تعداد قطره‌چکان‌ها بر افت هیدرولیکی نیز به روش‌های اجزای محدود و آماری نیز بررسی شده است. در این پژوهش، با توجه به فراوانی کاربرد رابطه هیزن-ویلیامز در طراحی سامانه‌های هیدرولیکی در ایران و دقت نسبتاً پایین آن در مقایسه با رابطه‌های مشابه، این رابطه برای لاترال‌های آبیاری واسنجی و تدقیق شد و رابطه‌ای مستقل از ضریب زبری (C) ارائه شد.

## ۲. روش پژوهش

### ۲.۱. شرح مدل فیزیکی

در این تحقیق جهت بررسی میزان دقت رابطه‌های محاسبه ضریب  $f$ ، افت هیدرولیکی در لوله‌ی پلی‌اتیلن با چهار قطر ۱۶، ۲۰، ۲۵ و ۳۲ میلی‌متری که در آبیاری قطره‌ای معمولاً به عنوان لاترال استفاده می‌شوند، اندازه‌گیری شد. طول مسیر اندازه‌گیری افت در لوله‌ها ۳۵ متر بود که در ابتدا و انتهای آن فشار به ازای دبی‌های عبوری مختلف اندازه‌گیری و ثبت گردید. 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 گردید. برای تامین فشار مورد نیاز از پمپ استفاده شد و برای تنظیم دبی و فشار، سامانه By-Pass روی مدل فیزیکی نصب گردید و دبی به صورت حجمی اندازه‌گیری شد (شکل ۱).

پس از اندازه‌گیری افت هیدرولیکی به ازای دبی‌های عبوری مختلف در لوله‌ها، مقدار آن با مقادیر محاسبه‌شده توسط روابط مختلف تعیین ضریب افت  $f$  با کمک رابطه داری-ویسباخ و هیزن-ویلیامز مورد بررسی قرار گرفت. در این مورد سه روش مودی<sup>۲۳</sup>، چرچیل<sup>۲۴</sup> و کلبروک و وایت<sup>۲۵</sup> پیشنهاد شده است.

مقدار افت هیدرولیکی با استفاده از روابط ذکرشده برآورد شد و با افت هیدرولیکی اندازه‌گیری‌شده مقایسه شد؛ سپس نسبت مقدار افت هیدرولیکی محاسبه‌شده به مقدار واقعی در هر

یک از لوله‌ها به دست 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 می‌باشد. از آنجایی که افت هیدرولیکی متناسب با سرعت سیال می‌باشد، بالا بودن سرعت می‌تواند افت هیدرولیکی را افزایش داده و از سوی دیگر باعث بروز مشکلاتی از قبیل ضربه قوچ<sup>۲۶</sup> شود؛ از سوی دیگر سرعت کم جریان در لوله به معنی افزایش قطر لوله می‌باشد که باعث افزایش هزینه اجرایی می‌گردد؛ لذا برای رسیدن به حالت بهینه از نظر هیدرولیکی و اقتصادی، در حالات مختلف محدوده‌های سرعت خاصی برای جریان پیشنهاد شده است. معمولاً سرعت مناسب سیال را حدود یک الی دو متر در ثانیه در نظر می‌گیرند [۱۴].

### ۲.۲. روابط محاسبه افت هیدرولیکی

برای انجام محاسبات، ابتدا به تعیین ضریب افت داریسی (f) در رابطه داریسی-ویسباخ (۱) اشاره می‌شود [۱۵]:

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

که در آن  $V$  سرعت جریان (m/s)،  $L$  طول لوله (m)،  $D$  قطر لوله (m)،  $f$  ضریب افت داریسی-ویسباخ و  $g$  شتاب گرانش (m<sup>۲</sup>/s) می‌باشد.

کلبروک و وایت (۱۹۳۷)<sup>[۱۸]</sup> روش زیر را برای محاسبه ضریب  $f$  ارائه کردند.

$$\frac{1}{\sqrt{F}} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.71} + \frac{2.52}{R \sqrt{F}} \right) \quad (2)$$

که در آن  $D$  قطر لوله (m)،  $R$  عدد رینولدز،  $\varepsilon$  ارتفاع زبری جداره لوله (m) و  $f$  ضریب افت داریسی-ویسباخ می‌باشد.

دامنه کاربرد این رابطه برای جریان‌هایی با عدد رینولدز بین ۱۰۸ تا ۴۰۰۰ و زبری نسبی ۰ تا ۰/۰۵

مودی (۱۹۴۴)،<sup>[۱۹]</sup> برای تعیین ضریب  $f$ ، در لوله با قطر داخلی ۱۳ میلی‌متر با جداره صاف (۰/۵ اینچ) با دبی عبوری ۰/۰۱ الی ۰/۲۰ لیتر در ثانیه، میزان افت هیدرولیکی را در جریان آشفته:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0.8 + 2 \log R_y (f)^{0.5} \quad R_y < 2000 \quad (۴)$$

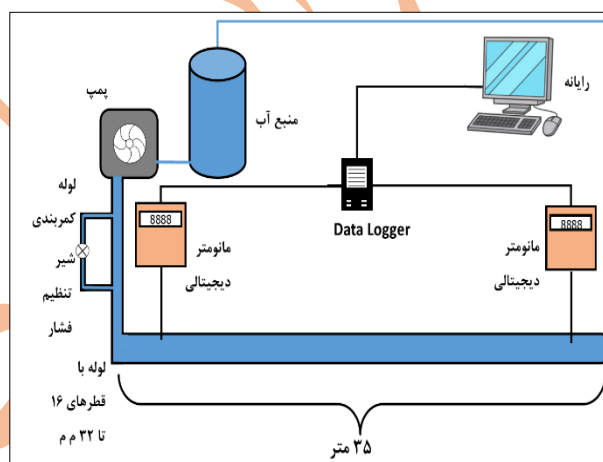
می‌باشد. این رابطه حالت‌های محدودی از جریان در لوله‌های صاف با زبری  $\varepsilon = 0$  و جریان کاملاً آشفته را پوشش می‌دهد.

اندازه‌گیری نمود. وی دریافت که برای محاسبه افت در لوله‌هایی با قطر کم که در آبیاری به عنوان لاترال مورد استفاده قرار می‌گیرند، رابطه دارسی-ویسباخ برآورد بهتری نسبت به روش هیزن-ویلیامز دارد. سپس برای تعیین ضریب افت  $f$  در لوله‌های صاف روش ذیل را پیشنهاد نمود:

در جریان لایه‌ای یا لامینار:

$$f = \frac{64}{R_y} \quad R_y < 2000 \quad (۳)$$

که در آن  $R_y$  عدد رینولدز،  $f$  ضریب افت دارسی-ویسباخ می‌باشد.



افت هیدرولیکی در تمامی محدوده عدد رینولدز و کلیه لوله‌ها با جنس‌های مختلف را داشت.

شکل ۱. شکل شماتیک مدل فیزیکی

$$F_f = 8 \times \left[ \left( \frac{8}{R_y} \right)^{12} + 1 / (k_1 + k_2)^{1.5} \right]^{1.12}$$

$$K_1 = \left[ 2.457 \ln \left( \frac{1}{(7/R_y)^{0.9} + 0.27(e/D)} \right) \right]^{16} \quad (۶)$$

$$K_2 = \left( \frac{37530}{R_y} \right)^{16}$$

که در آن  $R_y$  عدد رینولدز و  $f$  ضریب افت دارسی-ویسباخ می‌باشد.

چرچیل و یوساگی<sup>[۲۷]</sup> (۱۹۷۲)،<sup>[۲۰]</sup> رابطه زیر را به دست آوردند.

$$\frac{1}{\sqrt{F}} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon/D}{3.70} + \left( \frac{7}{Re} \right)^{0.9} \right) \quad (۵)$$

که در آن  $D$  قطر لوله (m)،  $Re$  عدد رینولدز،  $\varepsilon$  ارتفاع زبری جداره لوله (m) و  $f$  ضریب افت دارسی-ویسباخ می‌باشد.

چرچیل (۱۹۷۷)،<sup>[۲۱]</sup> رابطه تعیین ضریب افت  $f$  را گسترش داد. این رابطه یک رابطه کاربردی مناسب بود که توانایی برآورد

معادله دیگری که در این مقاله برای محاسبه افت طولی استفاده شد، معادله هیزن-ویلیامز می باشد (رابطه ۷):

$$h_f = K \frac{L}{D^{4.856}} \left( \frac{Q}{C} \right)^{1.85} \quad (7)$$

که در آن K ضریب تبدیل واحد، Q دبی (m<sup>3</sup>/s)، L طول لوله (m)، D قطر لوله (m) و C ضریب افت هیزن-ویلیامز می باشد.

### ۳. نتایج

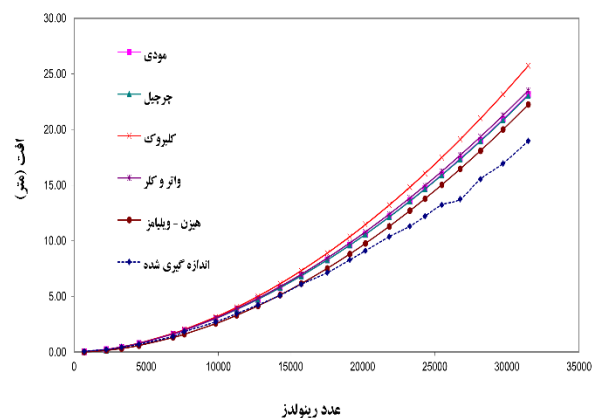
در طی آزمایش با مدل فیزیکی، با تنظیم دبی عبوری سعی گردید تا محدوده سرعت جریان به گونه ای باشد که محدوده

جدول ۱. حداقل و حداکثر سرعت جریان و عدد رینولدز در مدل فیزیکی

قطر اسمی لوله	قطر داخلی لوله (mm)	تعداد ثابت داده	حداقل سرعت (m/s)	حداکثر سرعت (m/s)	حداقل عدد رینولدز	حداکثر عدد رینولدز
۱۶	۱۲/۸	۲۲	۰/۰۶۰	۲/۶۷۴	۷۰۶	۳۱۴۷۹
۲۰	۱۶/۲	۱۵	۰/۰۸۴	۳/۵۷۲	۱۲۴۵	۵۳۲۱۲
۲۵	۲۰/۴	۱۴	۰/۲۴۴	۴/۳۵۵	۴۵۵۰	۸۱۲۹۵
۳۲	۲۸/۴	۱۱	۰/۰۶۸	۲/۱۰۶	۱۷۷۱	۵۵۰۱۵

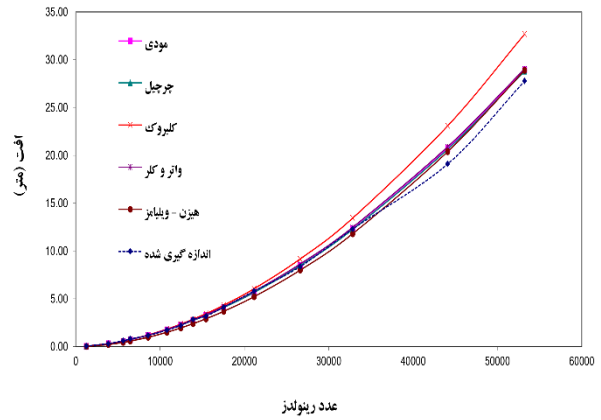
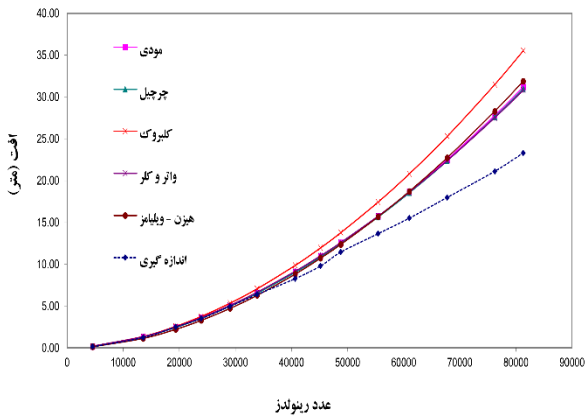
در شکل (۱) تا (۴) آورده شده است. حداقل و حداکثر نسبت افت محاسباتی به مشاهداتی در جدول (۲) ارائه شده است.

افت هیدرولیکی مشاهداتی در مدل فیزیکی، با افت هیدرولیکی محاسباتی با رابطه های هیزن-ویلیامز و دارسی-ویسباخ با سه روش پیشنهاد شده مقایسه گردید؛ سپس نسبت افت هیدرولیکی محاسباتی به مشاهداتی بدست آمده و نتایج



شکل ۲. افت هیدرولیکی محاسباتی و مشاهداتی در لوله ۱۶

میلی متری

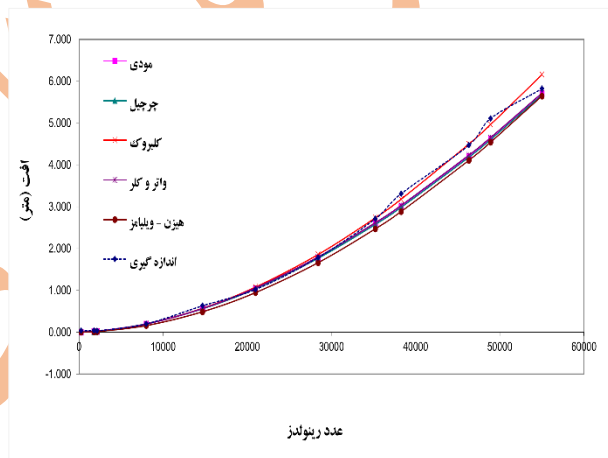


شکل ۴. افت هیدرولیکی محاسباتی و مشاهداتی در لوله

۲۵ میلی متری

شکل ۳. افت هیدرولیکی محاسباتی و مشاهداتی در لوله ۲۰

میلی متری



شکل ۵. افت هیدرولیکی محاسباتی و مشاهداتی لوله ۳۲

میلی متری

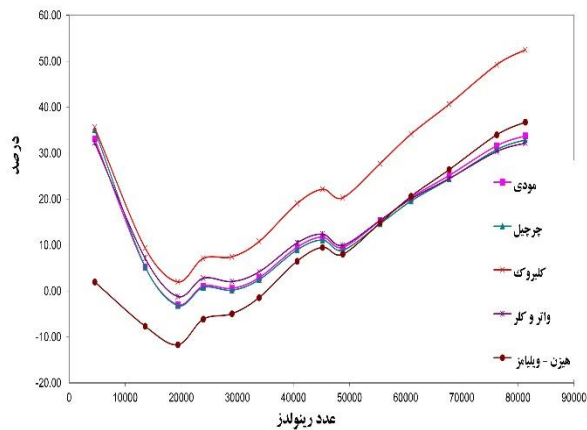
جدول ۲. حداقل و حداکثر نسبت افت محاسباتی به مشاهداتی

نسبت افت محاسباتی به مشاهداتی با روش‌های مختلف

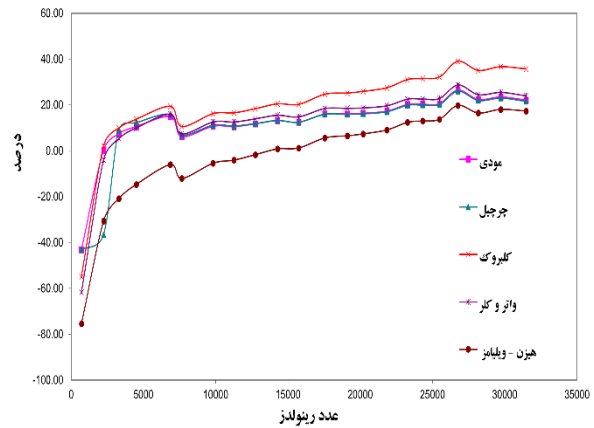
هیزن-ویلیامز		چرچیل		کلبروک و وایت		مودی		قطر اسمی لوله
حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	
۱/۱۹۸	۰/۲۴۵	۱/۳۹۹	۰/۵۶۸	۱/۳۶	۰/۴۵۰	۱/۲۶۵	۰/۵۶۸	۱۶
۱/۰۶۸	۰/۵۵۲	۱/۰۸۰	۰/۷۹۱	۱/۱۷۸	۰/۹۰	۱/۰۸۶	۰/۷۹۱	۲۰
۱/۳۶۸	۰/۸۸۳	۱/۳۵۱	۰/۹۶۸	۱/۵۲	۱/۳۶	۱/۳۳۸	۰/۹۷۰	۲۵
۰/۹۷۰	۰/۲۴۳	۱/۰۱۳	۰/۲۶۱	۱/۰۵۵	۰/۰۲	۱/۰۱۵	۰/۳۷۲	۳۲



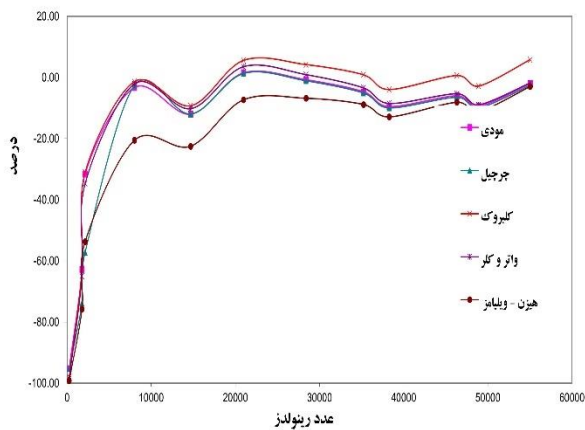
بر اساس اطلاعات به دست آمده از مدل، درصد اختلاف افت محاسباتی به مشاهداتی مقایسه و در نمودارهای ذیل ترسیم شده است.



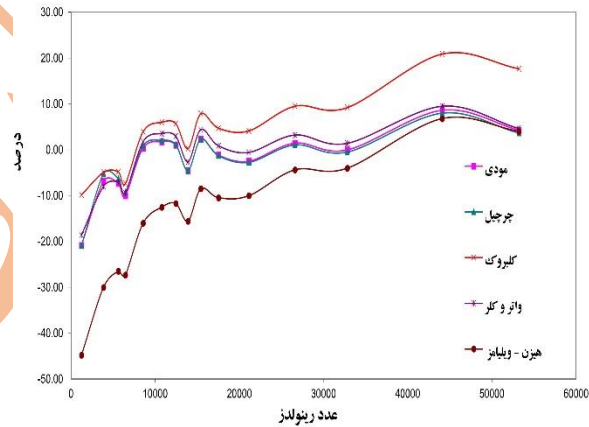
شکل ۸. درصد اختلاف افت محاسباتی به مشاهداتی در لوله ۲۵ میلی متری



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



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



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

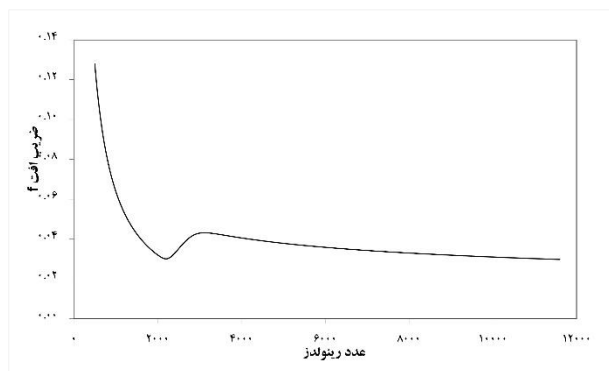
برای انتخاب روش محاسبه مناسب، جذر میانگین مربعات خطای افت هیدرولیکی محاسباتی و مشاهداتی در مدل محاسبه شده و در جدول (۳) ارائه گردیده است.

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

جذر میانگین مربعات خطا				قطر اسمی لوله
مودی	کلبروک و وایت	چرچیل	هیزن-ویلیامز	
۰/۰۷۴۶	۰/۰۷۶۲	۰/۰۵۴۳	۰/۱۲۰۷	۱۶
۰/۳۱۰	۰/۳۱۵	۰/۳۰۶	۰/۳۴۷	۲۰
۰/۴۳۰	۰/۴۵۴	۰/۴۲۷	۰/۴۸۳	۲۵

جدول ۴. جذر میانگین مربعات خطای افت فشار محاسباتی و مشاهداتی نرمال شده در محدوده سرعت یک الی دو متر در ثانیه

قطر اسمی لوله	جذر میانگین مربعات خطا		
	هیزن-ویلیامز	چرچیل	کلبروک و وایت
۱۶	۰/۰۹۱	۰/۰۳۲	۰/۰۵۸۶
۲۰	۰/۲۴۷	۰/۲۱۵	۰/۲۲۷
۲۵	۰/۱۷۳	۰/۱۴۹	۰/۱۵۹
۳۲	۰/۶۷۰	۰/۶۱۱	۰/۶۲۰



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

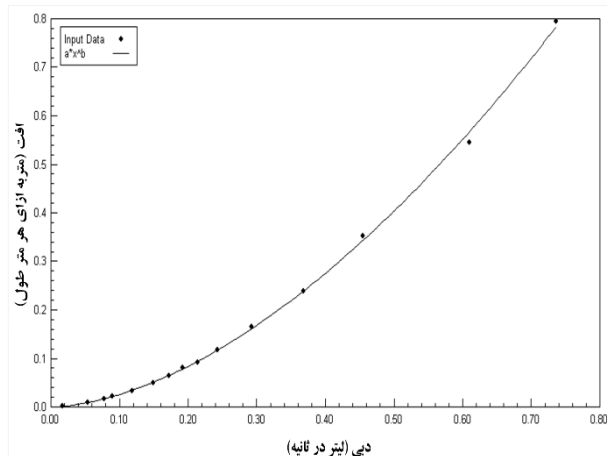
### ۱.۳. ارائه رابطه مناسب تعیین افت هیدرولیکی در لاترال

پس از مقایسه نتایج به دست آمده از آزمایش‌های تعیین افت هیدرولیکی در لوله‌های مختلف، رابطه‌ای مناسب برای برآورد افت هیدرولیکی بدست آمد. برای این کار از نرم‌افزار DataFit ۱.۸ استفاده شد.

اطلاعات ورودی توسط ۲۹۸ مدل ریاضی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از مشاهده مدل‌های مختلف، مدلی که آسان‌ترین کاربرد را داشته و حالت متعارف نیز داشته باشد انتخاب گردید. این گزینه شباهت زیادی به رابطه هیزن-ویلیامز دارد، با این تفاوت که مستقل از ضریب  $C$  و دارای دقت بیشتری بوده و با تغییر سرعت یا عدد رینولدز جریان در لوله نسبت افت هیدرولیکی مشاهداتی به محاسباتی در حدود یک می‌باشد. از آنجایی که فناوری تولید لوله‌های پلی اتیلن تقریباً ثابت است، می‌توان گفت که در صورت رعایت استانداردهای

اختلاف بین جذر میانگین مربعات خطا ناشی از تعداد ثبت اطلاعات و محدوده سرعت جریان آب در هر مدل می‌باشد. به عنوان مثال، با توجه به جدول (۱)، در لوله ۲۵ میلی‌متری حداکثر سرعت جریان به ۴/۳۵۵ متر در ثانیه می‌رسد، در نتیجه جهت انتخاب حالت کاربردی، جذر میانگین مربعات خطا در حالتی که سرعت جریان آب در لوله در محدوده یک الی دو متر در ثانیه بوده، محاسبه و در جدول (۴) ارائه گردیده است.

در حین بررسی داده‌ها و محاسبه افت با روش‌های مختلف داری-ویسباخ، نکته جالبی مشاهده می‌شود. نمودار ضریب افت  $f$  در روش چرچیل با افزایش عدد رینولدز بر خلاف سایر روش‌ها سیر ثابتی ندارد. مثلاً در لوله 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 محاسبه ضریب افت سیر نزولی دارد (شکل ۱۰). علت این امر می‌تواند ماهیت تابع ریاضی این رابطه باشد. تغییر قطر لوله در مکان کمینه و بیشینه نمودار تغییر جزئی دارد. یعنی با تغییر قطر لوله عددهای ذکر شده برای نقاط بحرانی نمودار تغییر جزئی می‌کند. لذا پیشنهاد می‌گردد این رابطه در جریان‌هایی با عدد رینولدز کم‌تر از ۳۲۰۰ مورد استفاده قرار نگیرد. با توجه به جدول (۳)، روش هیزن-ویلیامز و کلبروک-وایت دارای بیشترین خطا نسبت به سایر روش‌ها در مقایسه با داده‌های مشاهداتی هستند. باید توجه داشت که روش هیزن-ویلیامز برحلاف سایر روش‌ها، مستقل از ضریب افت هیدرولیکی داری-ویسباخ بوده. جدول (۴) نیز میزان خطا در روش‌های متفاوت در محدوده سرعت جریان بین یک تا دو متر را نشان می‌دهد و روندی مشابه با جدول (۳) را نشان می‌دهد، به طوری که روش هیزن-ویلیامز و روش کلبروک-وایت بیشترین اختلاف را با داده‌های افت هیدرولیکی مشاهداتی دارند.



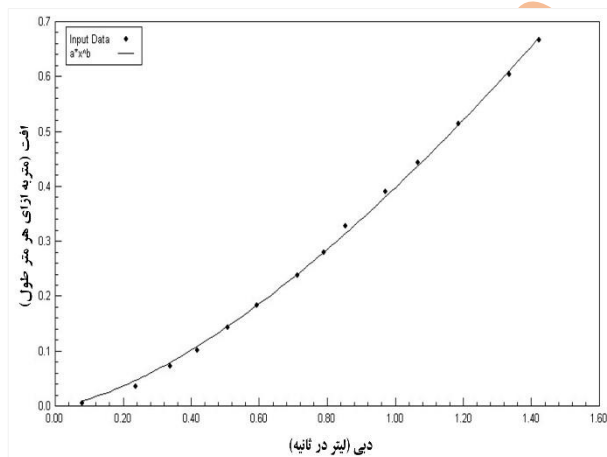
شکل ۱۲. برازش بین افت هیدرولیکی مشاهداتی و محاسباتی توسط رابطه (۹) برای لوله ۲۰ میلی متری

در لوله ۲۵ میلی متری کلاس ۱۰ بار با قطر داخلی ۲۰/۴

$$h_f = 0.3974 \times L \times Q^{1.4852}$$

$$R^2 = 0.9987$$

میلی متر: (۱۰)



شکل ۱۳. برازش بین افت هیدرولیکی مشاهداتی و محاسباتی توسط رابطه (۱۰) برای لوله ۲۵ میلی متری

در لوله ۳۲ میلی متری کلاس ۶ بار با قطر داخلی ۲۸/۴ میلی -

متر:

$$h_f = 0.1037 \times L \times Q^{1.744}$$

(۱۱)

$$R^2 = 0.9973$$

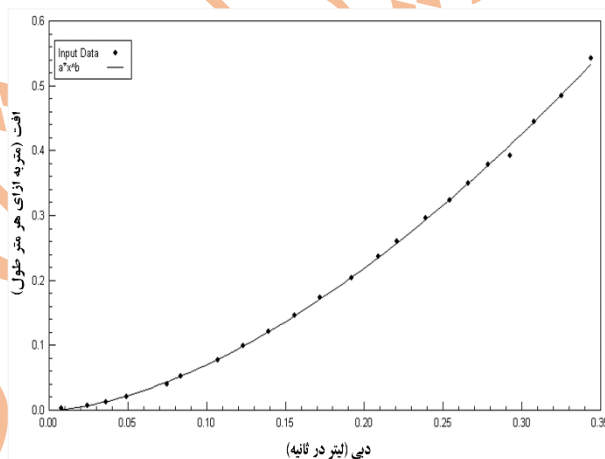
تولید و کنترل کیفیت، زبری داخل لوله‌ها یا به تعبیری ضریب C در آنها یکسان خواهد بود

برای اجرای برنامه دو حالت مختلف در نظر گرفته شد. در مرحله اول برای هر قطر از لوله، رابطه‌ای بین دبی و افت هیدرولیکی مشاهداتی به دست آمد. این روابط بر اساس رابطه (۷) تعریف گردید. پس از به دست آوردن روابط، نمودار افت هیدرولیکی مشاهداتی و محاسباتی توسط آنها به ازای واحد طول لوله در شکل های ۱۰ تا ۱۴ ترسیم و ارائه شده است. در روابط ذیل از این مرحله به دست آمد:

در لوله ۱۶ میلی متری کلاس A با قطر داخلی ۱۲/۸ میلی متر:

$$h_f = 3.0854 \times L \times Q^{1.6447} \quad (۸)$$

$$R^2 = 0.9993$$



شکل ۱۱. برازش بین افت هیدرولیکی مشاهداتی و محاسباتی توسط رابطه (۸) برای لوله ۱۶ میلی متری

در لوله ۲۰ میلی متری کلاس ۱۰ بار با قطر داخلی ۱۶/۲ میلی - متر:

$$h_f = 1.3239 \times L \times Q^{1.7141} \quad (۹)$$

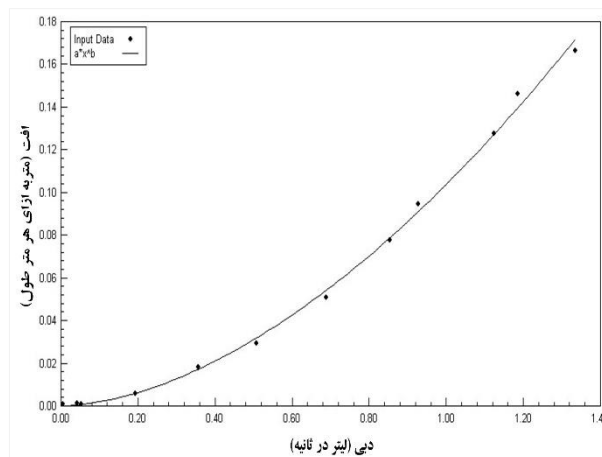
$$R^2 = 0.9989$$

از آنجایی که لاترال‌های آبیاری قطره‌ای عموماً قطری بین ۱۶ الی ۳۲ میلی‌متر دارند، آزمایش‌ها و رابطه (۱۳) به دست آمده، تنها برای برآورد افت هیدرولیکی در لوله پلی‌اتیلن با قطر ۱۶ الی ۳۲ میلی‌متر توصیه می‌شود.

بر اساس تجزیه تحلیل اطلاعات به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده، برای بالابردن دقت برآورد پیشنهاد می‌شود روابط بالا در جریان‌هایی با عدد رینولدز بیش از ۲۰۰۰ مورد استفاده قرار گیرند.

در محدوده عدد رینولدز کمتر از ۲۰۰۰، ضرایب افت  $f$  به ازای ضرایب زبری متفاوت منحنی‌ها در ازای مقادیر مختلف  $\varepsilon/D$  بر هم منطبق هستند. در روابط به دست آمده اختلاف بین افت محاسباتی و مشاهداتی در محدوده عدد رینولدز کمتر از ۲۰۰۰، در حد چند سانتی‌متر ستون آب می‌باشد؛ این دقت می‌تواند قابل قبول باشد اما به دلیل درصد اختلاف نسبتاً زیاد، توصیه می‌گردد برای دستیابی به دقت برآورد مناسب در محدوده مورد نظر مورد استفاده قرار نگیرد. این مطالعه بر روی لوله‌های پلی‌اتیلن با قطرهای بسیار کوچک، یعنی ۳۲ میلی‌متر، ۲۵ میلی‌متر، ۲۰ میلی‌متر و ۱۶ میلی‌متر متمرکز شد. دقیق‌ترین واسنجی معادله هیزن-ویلیامز برای لوله ۱۶ میلی‌متری ( $R^2 = 0.9993$ ) و به دنبال آن لوله ۲۰ میلی‌متری ( $R^2 = 0.9989$ )، لوله ۲۵ میلی‌متری ( $R^2 = 0.9987$ ) و لوله ۳۲ میلی‌متری ( $R^2 = 0.9983$ ) مشاهده شد. در مقابل، میراندا و همکاران<sup>۲۸</sup>.

(۲۰۱۹)، [۲۲] که معادله هیزن-ویلیامز را برای لوله‌های PVC با قطر بزرگتر از ۵ سانتی‌متر واسنجی کردند، از لحاظ دقت واسنجی، به نتیجه متفاوتی رسیدند. به عنوان مثال، بزرگترین میانگین خطای مطلق (MAE) برای کوچکترین لوله، یعنی لوله با قطر ۰/۰۵۰۸ متر ( $MAE = 0.00299$ )، به دنبال آن لوله با قطر ۰/۰۷۶۲ متر ( $MAE = 0.00043$ )، لوله با قطر ۰/۱۰۱۶ متر ( $MAE = 0.0001$ ) و لوله با قطر ۰/۱۲ متر (MAE) (= 0.0001) مشاهده شد. تفاوت در جنس لوله مورد بررسی در دو مطالعه (پی‌وی‌سی و پلی‌اتیلن) می‌تواند باعث تولید نتیجه متضاد شده باشد. یکی دیگر از عوامل مؤثر بر زبری، جریان لایه مرزی است [۲۳]، اما طول لوله توسط میراندا و همکاران (۲۰۱۹)، [۲۰] اعلام نشده است، بنابراین امکان مقایسه مستقیم در مورد اثر لایه مرزی در دو مطالعه وجود ندارد. مطالعه حاضر



شکل ۱۴. برازش بین افت هیدرولیکی مشاهداتی و محاسباتی توسط رابطه (۱۱) برای لوله ۳۲ میلی‌متری

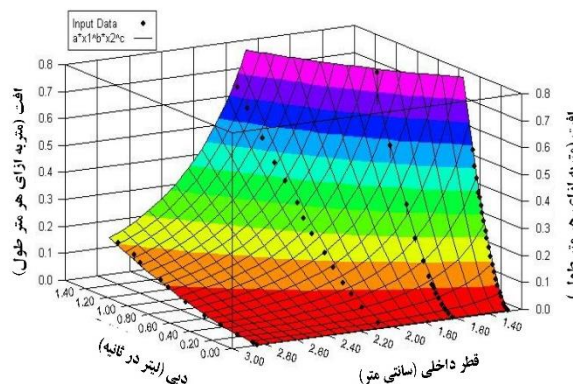
که در آن  $Q$  دبی بر حسب لیتر در ثانیه،  $D$  قطر داخلی لوله بر حسب سانتی‌متر و  $L$  طول لوله بر حسب متر می‌باشد. در مرحله دوم برای لوله‌های ۱۶ الی ۳۲ میلی‌متری رابطه‌ای بین دبی و قطر داخلی لوله با افت هیدرولیکی بر اساس رابطه (۱۲) به دست آمد.

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

در لوله‌های ۱۶ تا ۳۲ میلی‌متری:

$$h_f = 8.8113 \times L \times \frac{Q^{1.6058}}{D^{4.3136}} \quad (13)$$

$$R^2 = 0.9876$$



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

## قدردانی و تشکر

بدینوسیله از دانشگاه تهران و موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی که این تحقیق با پشتیبانی آنها انجام شده است تشکر می‌شود.

## پانویسها

1. Hazen-Williams
2. Darcy-Weisbach
3. Roughness Coefficient
4. Manning
5. Reynolds Number
6. Brunone
7. Hassan
8. Scobey
9. Tas & Ağralioğlu
10. Monge-Freile
11. Jamil & Mujeebu
12. Wang & Chen
13. Blasius
14. Bernoulli
15. Pipe Coefficient
16. Residual Matrix
17. Element Stiffness Matrix
18. Direct Stiffness Method
19. González-Quirino
20. Pizzo
21. Tourasse
22. Monte Carlo
23. Moody
24. Churchill
25. Colebrook & White
26. Water Hammer
27. Churchill & Usagi
28. Miranda

## منابع

- [1] Afshar, M., & Sotoodeh, M. H., ۲۰۰۶. Application of nonlinear programming methods to the optimal design of sewer networks. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 22(۳۵), pp. ۳-۱۱. [In Persian]
- [2] R. Daneshfaraz, R., Sadeqfam, R., & M. Majedi-Asl, M., ۲۰۱۱. 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)*, ۲(۳), pp. ۱۵-۲۲.

به طور کامل زبری و قطر را در معادلات واسنجی شده حذف کرد (روابط ۸ تا ۱۱)، درحالیکه در معادلات واسنجی شده توسط میراندا و همکاران (۲۰۱۹)، هنوز پارامتر قطر مشاهده می‌گردد که این خود باعث می‌شود واسنجی آنها با واسنجی انجام شده در مطالعه 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 شود و در تفسیر روند تغییرات افت هیدرولیکی و همچنین اختلاف روش‌ها در محاسبه افت هیدرولیکی مورد استفاده قرار گیرد.

## ۴. نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج این تحقیق میزان افت هیدرولیکی محاسبه شده با روش‌های مختلف با یکدیگر تا حدودی اختلاف دارند. در لوله های ۱۶، ۲۰ و ۲۵ میلی‌متری با افزایش سرعت بیش از حد پیشنهاد شده (حدود دو متر در ثانیه) و عدد رینولدز، افت هیدرولیکی محاسبه شده بیش تر از افت اندازه‌گیری شده است (شکل های ۱ تا ۳)؛ همچنین میزان اختلاف بین افت محاسباتی و مشاهداتی افزایش می‌یابد (شکل های ۵ تا ۷). در لوله ۳۲ میلی‌متری با توجه به شرایط و امکانات آزمایش حداکثر سرعت جریان ۲/۱۰۶ متر در ثانیه بوده است (شکل ۴)؛ در این لوله میزان افت مشاهداتی از افت محاسباتی بیشتر است.

بر اساس جدول (۳)، مقدار جذر میانگین مربعات خطا در لوله ۱۶ میلی‌متری با رابطه هیزن-ویلیامز در لوله ۲۰ و ۲۵ میلی‌متری با رابطه چرچیل و در لوله ۳۲ میلی‌متری با رابطه کلبروک و وایت از بقیه کمتر بوده است، اما در محدوده سرعت جریان یک الی دو متر در ثانیه بر اساس جدول (۴)، مقدار جذر میانگین مربعات خطا در لوله ۱۶ و ۲۵ میلی‌متری با رابطه هیزن-ویلیامز، در لوله ۲۰ میلی‌متری با رابطه مودی و در لوله ۳۲ میلی‌متری با رابطه کلبروک و وایت از بقیه کمتر بوده است. در نهایت در لوله ۱۶ و ۲۵ میلی‌متری با توجه به جدول (۴) توصیه می‌شود از رابطه هیزن-ویلیامز استفاده شود.

با توجه به مشکلات محاسبه ضریب افت  $f$  می‌توان با تصحیح رابطه ساده و کاربردی هیزن-ویلیامز دقت این رابطه را بالاتر برده و از آن بهره جست. این کار برای لوله های ۱۶ تا ۳۲ میلی‌متری انجام شده است.

- [۱۳] Pizzo, H. D. S., Dantas, C. A. S., & Ribeiro, C. B. M., ۲۰۲۲. Fitting Hazen-Williams Roughness Coefficient to the Head Loss Obtained by Darcy-Weisbach Equation in PVC Pipes. *Advance Researches in Civil Engineering*, 4(۱), pp. ۱-۱۴. doi: ۱۰.۳۰۴۶۹/arce.۲۰۲۲.۱۵۰۲۹۲.
- [۱۴] Tourasse, E., ۱۹۸۶. Explicit equation for coefficient of friction and duct calculation. *Eng. Sanit*, 25(۲), pp. ۱۷۷-۱۷۸.
- [۱۵] Dini, M., Abbaspoor, G., & Saghebian, S. A., ۲۰۲۲. Calibration of water distribution networks by considering the uncertainty of nodal pressure. *Journal of Water and Wastewater Science and Engineering*, ۸(۳), pp. ۱۳-۲۴. [In Persian]. doi: ۱۰.۲۲۱۱۲/jwwse.۲۰۲۳.۳۵۰۰۹۰.۱۳۲۰.
- [۱۶] Keller, J., & Bliesner, R. D., ۱۹۹۰. Trickle irrigation planning factors. *Springer US*. pp. ۴۵۳-۴۷۷. doi: ۱۰.۱۰۰۷/۹۷۸-۱-۴۷۵۷-۱۴۲۵-۸\_۱۹.
- [۱۷] Manning, F. S., & Thompson, R. E., ۱۹۹۵. Oilfield processing of petroleum: Crude oil (Vol. ۲). *Pennwell books*, pp. ۱۸۳-۱۸۵. doi: ۱۰.۱۰۱۶/j.energy.۲۰۰۵.۱۰.۰۰۹.
- [۱۸] Colebrook, C. F., & White, C. M., ۱۹۳۷. Experiments with fluid friction in roughened pipes. *Proceedings of the royal society of london. series a, mathematical and Physical sciences*, pp. ۳۶۷-۳۸۱. doi: ۱۰.۱۰۹۸/rspa.۱۹۳۷.۰۱۵۰.
- [۱۹] Moody, L. F., ۱۹۴۴. Friction factors for pipe flow. *Trans. Asme*, ۶۶(۸), pp. ۶۷۱-۶۸۴. doi: ۱۰.۱۱۱۵/۱.۴.۱۸۱۴۰.
- [۲۰] Churchill, S. W., & Usagi, R., ۱۹۷۲. A general expression for the correlation of rates of transfer and other phenomena. *AIChE Journal*, ۱۸(۶), pp. ۱۱۲۱-۱۱۲۸. doi: ۱۰.۱۰۰۲/aic.۶۹۰۱۸۰۶۰۶.
- [۲۱] Churchill, S. W., ۱۹۷۷. Friction-factor equation spans all fluid-flow regimes. *Chemical Engineering*, ۸۶(۲۴), pp. ۹۱-۹۲.
- [۲۲] Miranda, E. P., Custodio, T. B. D. S., DE LIMA, F. U., Pereira, T. A., & Bicudo, A. L. R., ۲۰۱۹. Adjustment of the hazen-williams equation for determination of continuous pressure drop in PVC pipe. *IRRIGA*, ۱۶(۲), pp. ۹۴-۱۰۰. doi: ۱۰.۱۵۸۰۹/irriga.۲۰۱۹۷۱n۱p۹۴-۱۰۰.
- [۲۳] Lu, Y., Liu, H., Liu, Z., & Yan, C., ۲۰۲۰. Investigation and parameterization of transition shielding in roughness-disturbed boundary layer with direct numerical simulations. *Physics of Fluids*, 32(۷), pp. ۲۵۱-۲۶۰. doi: ۱۰.۱۰۶۳/۵.۰۰۱۲۴۶۴.
- [۲۴] Shamloo, H., Mousavi Fard, S. M., & Haghghi, A., ۲۰۱۳. Investigation of unsteady effects of friction loss and transient flow using 1d energy relations. *Sharif Journal of Civil Engineering, Volume 29-2(۱)*, pp. ۱۴۹-۱۵۷ [In Persian].
- [۲۵] Daneshfaraz R., Rezazadeh joudi, A., & Abraham, J., ۲۰۱۷. Numerical investigation on the effect of sudden contraction on flow behavior in a 9۰-degree bend. *KSCE Journal of Civil Engineering*, ۲۲(۲), pp. ۶۰۳-۶۱۲. doi: ۱۰.۱۰۰۷/s۱۲۲۰۵-۰۱۷-۱۳۱۳-۳.
- [۲۶] Hassan, A., ۲۰۱۷. Design of sprinkler irrigation tapered main line by linear programming. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 34(۳), pp. ۱۳۳۵-۱۳۵۰. doi: ۱۰.۲۱۶۰۸/mjae.۲۰۱۷.۹۷۴۶۸.
- [۲۷] Tas, E., & Ağralıoğlu, N., ۲۰۱۸. Comparison of friction losses in long polyethylene pipe systems using different formulas. *International Symposium on Urban Water and Wastewater Management*, pp. ۶۰۲-۶۰۹.
- [۲۸] Monge-Freile, M., Sánchez-Delgado, M., Huanca-Velarde, L., & Moreno-Llacza, A., ۲۰۱۹. Bamboo (*Guadua angustifolia* spp.) as a conduction alternative for a multi floodgates irrigation system. *Lima, Perú. Anales Científicos*, 80(۱), pp. ۲۴۰-۲۵۲. doi: ۱۰.۲۱۷۰۴/ac.v۸۰j۱.۱۳۹۱.
- [۲۹] Tabesh, M., & Kazemi Soochelmaei, M., ۲۰۱۸. 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(۲), pp. ۲۳-۳۴. [In Persian]. doi: ۱۰.۲۲۱۱۲/jwwse.۲۰۱۸.۱۲۹۹۲۴.۱۰.۸۹.
- [۳۰] Jamil, R., & Mujeebu, M. A., ۲۰۱۹. Empirical relation between Hazen-Williams and Darcy-Weisbach equations for cold and hot water flow in plastic pipes. *Imam, Saudi Arabia. WATER, 108(۶)*, pp. ۱۰۴-۱۱۴.
- [۳۱] Wang, J., & Chen, R., ۲۰۲۰. An improved finite element model for the hydraulic analysis of drip irrigation subunits considering local emitter head loss. *Irrigation Science*, 38(۲), pp. ۱۴۷-۱۶۲. doi: ۱۰.۱۰۰۷/s۰۰۲۷۱-۰۱۹-۰۰۶۵۶-۰.
- [۳۲] González-Quirino, J. G., Fortis-Hernández, M., Preciado-Rangel, P., Yescas-Coronado, P., Barrios-Díaz, J. M., & Reyes-González, A., ۲۰۲۱. Deterministic equation for hydraulic system design multiple outlet irrigation. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 12(۵), pp. ۷۷۷-۷۸۹. doi: ۱۰.۲۹۳۱۲/remexca.v۱۲i۵.۲۹۸۶.
- [۳۳] Achour, B., & Amara, L., ۲۰۲۰. Theoretical considerations on flow regime dependency of the Hazen-Williams coefficient. *LARHYSS Journal*, 9728(۴۲), pp. ۵۳-۶۲.