نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)

دوره ۱۲، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴، ص: ۱۳-۱

J. Energy Conversion
Volume: 12, Issue:2, 2025: 1-13

تحلیل عددی مقایسه هدررفت هد اصطکاکی شبکه انتقال آب دریا، در معادلات دارسی ویسباخ و هیزن ویلیامز

محمد صالحی[۱*]، محسن احسانی[۲]، وحید جاودان[۳]

*۱- کارشناس ارشد مکانیک، واحد مهندسی تحقیقات و تکنولوژی فولاد کاوه جنوب کیش
۲- کارشناس ارشد برق و الکترونیک، واحد مهندسی تحقیقات و تکنولوژی صبا فولاد خلیج فارس
۳- کارشناس ارشد مکانیک، واحد بهره برداری کوره قوس الکتریکی فولاد کاوه جنوب کیش

دریافت: ۱۴۰۴/۱/۸ بازنگری: ۱۴۰۴/۳/۱۲ ، پذیرش: ۱۴۰۴/۴/۱۰

چکیده

امروزه کاهش منابع آب زیرزمینی، حیات صنعتی و انسانی را با بحران مواجه ساخته است. صنعت آب‌شیرین‌کن با تبدیل آب دریا به آب شیرین به‌عنوان راهکاری کلیدی رشد چشم‌گیری داشته است. با این‌حال، طراحی سیستم‌های لوله‌کشی کارآمد به‌دلیل مسیرهای طولانی، تغییرات ارتفاعی و موانع محیطی، چالشی اساسی است که موجب هدررفت هد سیال می‌شود. در این پژوهش، هدررفت اصطکاکی با دو روش دارسی-ویسباخ (وابسته به عدد رینولدز) و هیزن-ویلیامز (تجربی) تحلیل و نتایج مقایسه شد. یافته‌ها نشان می‌دهد معادله هیزن-ویلیامز در جریان‌های کاملاً آشفته، با محدودیت‌هایی همراه است. هم‌چنین، تأثیر پارامترهایی مانند قطر لوله، طول مسیر، پوشش داخلی و دبی جریان بر هدررفت، با تحلیل عددی بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد افزایش قطر لوله و کاهش زبری سطح، هدررفت را به‌طور معناداری کاهش می‌دهد، درحالی‌که تغییرات دبی و توپوگرافی، نیازمند طراحی انعطاف‌پذیر است. این مطالعه با ارائه مدلی جامع، فرآیند طراحی پایپینگ را برای شرایط عملیاتی متنوع (مانند نوسانات دبی و تغییرات ارتفاعی) بهینه‌سازی کرده و راهکارهایی برای کاهش هزینه‌های اجرایی و افزایش بازدهی شبکه‌های انتقال پیشنهاد می‌دهد. کاربرد این پژوهش در پروژه‌های واقعی، بهبود پایداری سیستم‌های آب‌شیرین‌کن و مدیریت منابع آبی را تضمین می‌کند.

* **عهده‌دار مکاتبات:** M.SALEHI@SKSCO.IR

کلمات کلیدی: هیزن ویلیامز، دارسی ویسباخ، هد اصطکاکی، خط انتقال آب دریا، نمودار مودی

نحوه استناد به این مقاله محمد صالحی، محسن احسانی، وحید جاودان. تحلیل عددی مقایسه هدررفت هد اصطکاکی شبکه انتقال آب دریا، در معادلات دارسی ویسباخ و هیزن ویلیامز. **مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۴؛ ۱۲ (۲) : ۱۳-۱.**

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.547]

۱- مقدمه

فناوری لوله‌کشی بر پایه اصول انتقال سیال استوار است که طی آن بخشی از انرژی سیال صرف غلبه بر اصطکاک و تلاطم داخلی جریان می‌شود. این پدیده به تبدیل انرژی مکانیکی به حرارتی و در نهایت افت هد (انرژی پتانسیل سیال بر حسب ارتفاع) منجر می‌گردد معمولاً به دو دسته طبقه بندی می‌شوند که دسته‌ی اول افت هد اصطکاکی یا عمده نامیده می‌شود و به‌صورت پیوسته در طول مسیر لوله رخ می‌دهد و عمدتاً تحت تأثیر طول لوله، زبری سطح و مشخصات جریان است و دسته دوم افت جزئی نامیده می شود که ناشی از تجهیزات هیدرولیکی (مانند شیرآلات، اتصالات و پمپ‌ها) در طول شبکه است. در مسیرهای کوتاه با تجهیزات فراوان، مجموع افت‌های جزئی ممکن است از افت اصطکاکی پیشی بگیرد. در شبکه‌های انتقال آب دریا با مسیرهای طولانی، افت اصطکاکی سهم غالب را در کاهش هد هیدرولیکی دارد. مطالعه سیستماتیک رفتار سیال در لوله‌ها به قرن هجدهم و پژوهش‌های دنیل برنولی (۱۷۳۸) بازمی‌گردد. او با ارائه معادله برنولی [۱] رابطه بین سرعت، چگالی، شتاب گرانش زمین، اختلاف ارتفاع، افت های هد و فشار را تبیین کرد. در سال ۱۸۵۱، جرج استوکس از نسبت نیروی لختی به نیروی گرانروی با معرفی عدد رینولدز [۲]، معیاری بی‌بعد معرفی کرد که بیانگر تمایل جریان به داشتن الگویی آرام و لایه‌ای در اعداد رینولدز پایین می‌باشد، در حالی‌که در اعداد رینولدز بالا جریان به حالت آشفته در می‌آید. در قرن نوزدهم، بهاوا [۳] یک فرمول جامع هدررفت هد به نام دارسی ویسباخ [۴] که حاصل مطالعات دانشمندانی به نام جولیوس ویسباخ و هنری دارسی بود تهیه کرد که افت اصطکاکی را به عدد رینولدز، زبری سطح و قطر لوله مرتبط می‌سازد. در دهه ۱۹۳۰، پرانتل و نیکورادزه با شبیه‌سازی زبری لوله به کمک ماسه‌های دانه‌بندی‌شده، با سایزهای یکنواخت، میزان زبری برابر با اپسیلون(ε) در خطوط لوله ایجاد کردند و با تحت فشار قرار دادن لوله توانستند رابطه تجربی برای محاسبه ضریب اصطکاک ارائه کردند. در سال ۱۹۴۴ میلادی، لوئیس فری مودی با توجه به پیچیده بودن معادله پرانتل، نموداری از ضریب اصطکاک دارسی-ویسباخ در برابر عدد رینولدز برای مقادیر مختلف زبری نسبی طراحی کرد [۵]. این نمودار معمولاً با عنوان نمودار مودی یا دیاگرام مودی شناخته می‌شود که وابسته به عدد رینولدز و زبری سطح و ضریب اصطکاک معادله دارسی-ویسباخ می‌باشد. در سال ۱۹۰۶ میلادی هیزن و ویلیامز فرمولی تجربی ارائه کرد که در آن افت هد را به‌عنوان تابعی از قطر، سرعت جریان و طول لوله با استفاده از یک ضریب تجربی بیان می‌کند که به ضریب هیزن ویلیامز شناخته شده است [۶] که به جنس لوله و سرعت جریان وابسته می‌باشد و در ادامه دانشمندی به نام لامونت پس از انجام آزمایشات زیادی مقادیر ضریب هیزن ویلیامز برای مواد مختلف لوله را ارائه داد [۷]. در سال ۲۰۰۹، آقای حسین سخایی‌نیا و همکارانش با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت به تحلیل حرکت سیال در محیط‌های متخلخل پرداختند [۸] و نتایج به‌دست‌آمده را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند. بررسی‌ها نشان داد که در جریان‌های آرام، تطابق قابل قبولی بین نتایج حاصل از تحلیل نرم‌افزاری و رابطه دارسی-ویسباخ وجود دارد. با این حال، در شرایط خاصی مانند جریان‌های با سرعت بالا یا سیالات با ویسکوزیته زیاد، انحراف‌هایی بین نتایج نرم‌افزاری و پیش‌بینی‌های رابطه دارسی-ویسباخ مشاهده شد. در سال ۲۰۲۰، طلعت نامداری و همکاران به ارزیابی تأثیر استفاده از فرمول هیزن ویلیامز در مقایسه با فرمول دارسی ویسباخ در تحلیل هیدرولیکی خطوط انتقال آب پرداختند [۱۰]. در این پژوهش، افت ارتفاع هیدرولیکی در یک متر لوله با جنس‌های مختلف شامل پلی‌اتیلن، PVC، چدن و فلز، در قطرهای گوناگون و با استفاده از هر دو روش مورد مقایسه قرار گرفت و نتایج نشان داد که در لوله‌های فلزی، اختلاف میان برآوردهای این دو روش تا حدود ۲۵ درصد نیز می‌رسد، که بیانگر اهمیت انتخاب صحیح رابطه‌ی هیدرولیکی متناسب با جنس و شرایط لوله است. در سال ۲۰۲۲ ارزیابی مقایسه‌ای افت هد اصطکاکی در جریان لوله‌ای با استفاده از مواد مختلف لوله در و قطرهای داخلی متفاوت توسط سعید مدودی و همکاران [۱۱] صورت گرفت و نتایج نشان داد که افت هد به‌طور قابل‌توجهی به جنس لوله و زاویه شیب لوله بستگی دارد. در همان سال ۲۰۲۲، ایناکی و هیوشی به بررسی ضریب هیزن ویلیامز بر اساس نتایج آزمایشگاهی پرداختند و با قرار دادن ضریب هیزن ویلیامز به‌عنوان تابعی از سرعت جریان و عدد رینولدز موجب افزایش دقت پیش بینی افت فشار در لوله ها شدند [۱۲]. در سال ۲۰۲۴، دارویش و همکاران، جریان تحت فشار آب در لوله ها بررسی کرده و با تمرکز بر تنش های برشی و افت های اصطکاکی، عملکرد رابطه ی تجربی هیزن ویلیامز را

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.547]

در شرایط مختلف عملیاتی تحلیل نمودند و با مقایسه با معادله دارسی-ویسباخ، رویکردی ترکیبی از دو معادله را ارائه نمودند که در آن قابلیت محاسبه افت فشار با دقت بالاتری فراهم بود [۱۳]. در سال ۲۰۲۵، آقای شاهین شفائی و همکاران به ارزیابی روابط برآورد افت هیدرولیکی و واسنجی رابطه‌ی هیزن ویلیامز در لاترال‌های آبیاری قطره‌ای پرداختند [۱۴] و آن‌ها با بهره‌گیری از مدل‌های آزمایشگاهی و لوله‌های پلی‌اتیلن با قطرهای مختلف، افت هیدرولیکی را در دبی‌ها و سرعت‌های گوناگون اندازه‌گیری کردند. بر اساس تحلیل داده‌های حاصل، رابطه‌ی ریاضی جدیدی ارائه شد که افت هیدرولیکی را به‌صورت تابعی از دبی و قطر لوله محاسبه می‌کند. این رابطه، برخلاف معادله‌ی هیزن-ویلیامز، به ضریب زبری C وابسته نیست و به‌ویژه برای لوله‌هایی با عدد رینولدز بالاتر از ۲۰۰۰ توصیه می‌شود.

۲- بدنه اصلی مقاله

در این مقاله، به تحلیل افت هد صنعت آب‌شیرین‌کن می‌پردازد و نمونه مورد تحلیل واحد آب شیرین‌کن کارخانه فولاد کاوه جنوب کیش با ظرفیت ۶۶۰۰ مترمکعب در ساعت برداشت آب دریا به طول ۱۷۰۰ متر خط انتقال می‌باشد، تحلیل عددی هدررفت هد اصطکاکی در خطوط انتقال آب دریا با استفاده از لوله‌های فایبرگلاس با قطرهای ۵۰۰ تا ۱۱۰۰ میلی‌متر و طول ۱۷۰۰ متر، در دبی‌های مختلف (۳۹۶۰، ۵۲۸۰، ۶۶۰۰ و ۷۹۲۰ مترمکعب بر ساعت) انجام شده است. این تحلیل با استفاده از دو معادله دارسی‌ویسباخ و هیزن‌ویلیامز صورت گرفت و نتایج حاصل از هر دو روش با یکدیگر مقایسه شدند. در این فرآیند، اثر پارامترهایی مانند میزان آشفتگی جریان، دبی سیال، تغییرات قطر لوله و رفتار سیال در لوله‌های دارای پوشش‌های داخلی متفاوت بررسی شده و نمودارهایی برای نمایش تأثیر این پارامترها نسبت به یکدیگر ترسیم گردیده است. تمامی این تحلیل‌ها در قالب چارچوب دو معادله مذکور انجام شد.

در گام بعدی، با استناد به داده‌های واقعی صنعت آب‌شیرین‌کن در منطقه خلیج فارس (با طول خط لوله ۱۷۰۰ متر)، اختلاف نتایج دو معادله در محیط عملیاتی ارزیابی گردید. هم‌چنین، با تحلیل تأثیر پوشش‌های داخلی لوله (مانند اپوکسی و پلی اتیلن) بر ضریب زبری سطح، راهکارهایی برای کاهش هدررفت هد ارائه شد. در نهایت، با تلفیق یافته‌ها در معادله بقای انرژی و معادله برنولی، هد مورد نیاز پمپ‌ها برای غلبه بر افت اصطکاکی محاسبه گردید. این رویکرد، امکان طراحی بهینه سیستم‌های انتقال آب دریا با کم‌ترین هزینه اجرایی و بیش‌ترین بازدهی هیدرولیکی را فراهم می‌کند.

۲-۱- جریان سیال در لوله

رابطه (۱) معادله رینولدز می‌باشد که نشان دهنده نسبت نیروهای اینرسی به ویسکوزیته درون یک سیال است و بیانگر میزان آرام یا آشفته بودن یک جریان می باشد [۱۵].

مقادیر عدد رینولدز کم‌تر از ۲۰۰۰ معمولاً نشان‌دهنده جریان آرام، مقادیر بین ۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰ جریان گذرا، و مقادیر بالاتر از ۴۰۰۰ جریان آشفته در نظر گرفته می‌شوند. این پارامتر در تحلیل افت اصطکاکی و انتخاب مدل ریاضی مناسب (مانند دارسی-ویسباخ یا هیزن-ویلیامز) نقش کلیدی ایفا می‌کند.

$$Re = \frac{V_{(m/s)} \cdot D_{(m)}}{\upsilon_{(m^2/s)}} \quad (۱)$$

که در آن V(m/s) سرعت مرجع، D(m) طول مشخصه و ν(m^2/s) لزجت سیال است.

۲-۲- معادلات برنولی

رابطه (۲) که به معادله برنولی یا اصل برنولی شناخته می‌شود، رفتار سیال در جریان پایا را توصیف کرده و بیان ریاضی قانون بقای انرژی در مکانیک سیالات است [۱۶]. این معادله نشان می‌دهد در یک جریان ایده‌آل و غیرلزج، افزایش سرعت سیال با

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.547]

کاهش فشار همراه است، به شرطی که ارتفاع سیال ثابت باقی بماند. در شرایط واقعی، این معادله با درنظرگیری پارامترهای مؤثر از جمله اختلاف ارتفاع، هد اصطکاکی (ناشی از اصطکاک سیال با لوله)، هد تجهیزات هیدرولیکی (مانند شیرها و اتصالات) اصلاح می‌شود. به این ترتیب، معادله برنولی به‌عنوان ابزاری کلیدی در تحلیل سیستم‌های انتقال سیال، تعادل بین انرژی جنبشی، انرژی فشاری و انرژی پتانسیل را در طول مسیر جریان تضمین می‌کند.

$$Z_{(1)} + \frac{P_{(1)}}{\gamma_{(Fluid)}} + \frac{V_1^2}{2g} + H_{P(m)} - H_{M(m)} - H_{L(m)} = Z_{(2)} + \frac{P_{(2)}}{\gamma_{(Fluid)}} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (۲)$$

که در آن $Z_{(m)}$ سطح مکش، $P(Pa)$ فشار در مبداء، $\gamma_{fluid}(N/m^3)$ چگالی وزنی سیال، $V(m/s)$ سرعت سیال،$g\ (m/s^2)$ شتاب جاذبه‌ی زمین، $H_{L(m)}$ هد ناشی از اصطکاک، $H_{M(m)}$ هد موتورهای هیدرولیکی در مسیر سیال، $H_{P(m)}$ هد پمپ است.

۲-۳- رابطه دارسی-ویسباخ

رابطه (۳) در مکانیک سیالات، رابطه دارسی-ویسباخ رابطه‌ای تجربی برای سیالات است که افت فشار (افت هد) سیال در طول یک لوله ناشی از اصطکاک را به سرعت متوسط جریان مرتبط می‌کند. این رابطه به نام دانشمندان، هنری دارسی و جولیوس ویسباخ نام‌گذاری شده است و برای سیالات با جریان آشفته کاربرد دارد.

$$H_{f(m)} = f \times \frac{L_{(m)}}{D_{(m)}} \times \frac{V^2}{2g} \quad (۳)$$

که در آن $H_{f(m)}$ افت فشار ناشی از اصطکاک، f ضریب اصطکاک، $L\ (m)$ طول لوله، $V\ (m/s)$ سرعت سیال، $D\ (m)$ قطر لوله ، $g\ (m/s2)$ شتاب جاذبه‌ی زمین است.

رابطه (۴) میزان ضریب اصطکاک دارسی-ویسباخ مربوط به سیال آرام و رابطه (۵) و (۶) میزان ضریب اصطکاک دارسی-ویسباخ مربوط به سیال ناآرام به ترتیب برای سطوح صاف و زبر می‌باشد.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (۴)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \times Log\frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \quad (۵)$$

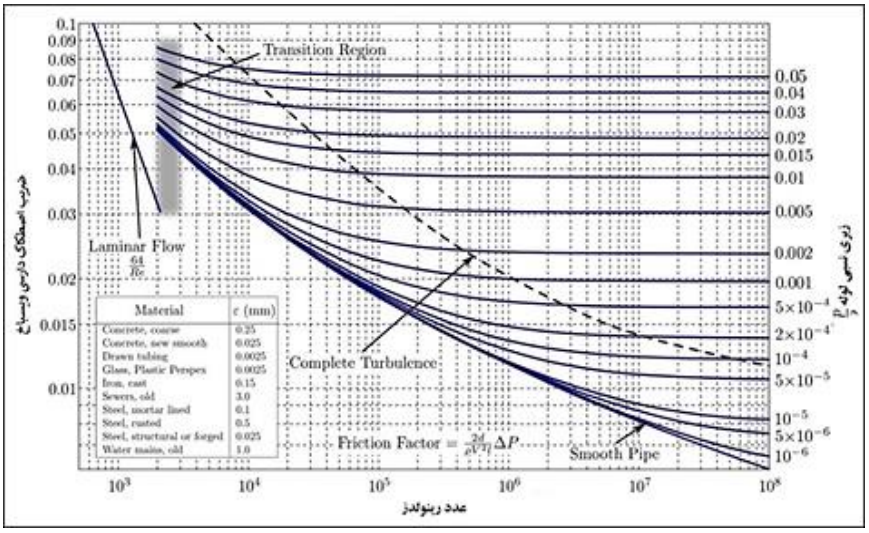
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \times Log\frac{\varepsilon/D}{3.7} \quad (۶)$$

۲-۴- نمودار مودی

نمودار مودی یا دیاگرام مودی (شکل ۱)، یک نمودار بدون بعد است که ضریب اصطکاک دارسی-ویسباخ، عدد رینولدز و زبری سطح را برای جریان کامل توسعه‌یافته در یک لوله مدور مرتبط می‌سازد. می‌توان از این دیاگرام برای تعیین ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ استفاده کرد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.547]



شکل ۱: نمودار مودی

۵-۲- رابطه هیزن ویلیامز

رابطه (۷) هیزن ویلیامز، یک رابطه تجربی در علم مکانیک سیالات است که در آن میزان افت فشار ناشی از اصطکاک از دبی سیال در یک لوله و خواص فیزیکی و مشخصات پایپینگ تعیین می‌شود. این رابطه در طراحی سیستم‌های انتقال آب کاربرد دارد و میزان افت هد را محاسبه می‌کند که در آن ضریب اصطکاک تابعی از عدد رینولدز نمی‌باشد و تأثیرات دما و ویسکوزیته در افت هد لحاظ نمی‌گردد.

$$H_{f(m)} = \frac{10.68 \times L \times Q^{1.852}}{C_{H(water)}^{1.852} \times D^{4.87}} \quad (۷)$$

که در آن $H_{f(m)}$ افت فشار ناشی از اصطکاک، L (m) طول لوله و Q (m^3/S) دبی پمپ، C (H) ضریب هیزن ویلیامز،D (m) قطر لوله است.

۳- نتایج و بحث

مشخصات لاین مورد تحلیل به شرح مشخصات جدول ۱ می‌باشد.

جدول۱: مشخصات لاین تحلیل شده

ضریب هیزن ویلیامز C (H)	زبری سطح ε (mm)	جنس لوله	طول لاین (m)	قطر داخلی لوله (mm)	دبی (m^3/h)
۱۵۰	۰,۰۰۱۵	فایبرگلاس	۱۷۰۰	۵۰۰	۷۹۲۰
				۶۰۰	۶۶۰۰
				۷۰۰	۵۲۸۰
				۸۰۰	۳۹۶۰
				۹۰۰	
				۱۰۰۰	
				۱۱۰۰	

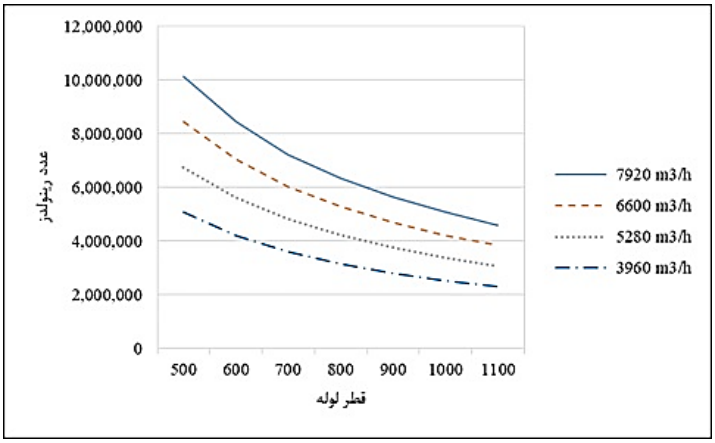
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.547]

۳-۱- تاثیر دبی و قطر لوله در عدد رینولدز

با توجه به ارتباط مستقیم معادله دارسی-ویسباخ با عدد رینولدز، میزان ناآرامی سیال تعیین گردید که در آن دمای آب دریا در بدترین حالت در ماه ژانویه ۳۵ درجه می‌باشد [۱۶].

سیال آرام	سیال نا آرام
Re < 2300	Re > 2300

طبق شکل (۲)، سیال در تمامی نواحی در حالت جریان آشفته قرار دارد، به‌طوری‌که سرعت در نزدیکی دیواره‌ها به صفر می‌رسد. این پدیده باعث افزایش شدت اختلاط و تلاطم در جریان می‌شود [۹] و انرژی جنبشی جریان آشفته، تحت تأثیر نیروهای اصطکاکی، به انرژی درونی (حرارتی) سیال تبدیل می‌گردد [۱۰]. این تبدیل انرژی، شرایط را برای افزایش هدررفت هد اصطکاکی فراهم می‌کند. با توجه به مسیرهای طولانی در سیستم‌های برداشت آب دریا، میزان هدررفت اصطکاکی در جریان‌های آشفته به طور مستقیم به طول خط لوله وابسته است. برای کاهش این هدررفت، افزایش قطر لوله به عنوان یک راهکار مؤثر پیشنهاد می‌شود، چرا که این اقدام باعث کاهش سرعت جریان و در نتیجه کاهش تنش‌های اصطکاکی می‌گردد.



شکل۲: تأثیر دبی و قطر لوله در عدد رینولدز

۳-۲- محاسبه هدررفت اصطکاکی توسط معادله دارسی-ویسباخ

با توجه به ارتباط معادله‌ی دارسی ویسباخ با عدد رینولدز و قطر لوله و طول سیال و زبری سطح، میزان هدر رفت اصطکاکی مطابق جدول (۲) تعیین شد.

جدول۲: هدررفت هد اصطکاکی با معادله دارسی ویسباخ

قطر لوله / دبی	500mm	600mm	700mm	800mm	900mm	1000mm	1100mm
7920 m3/h	183.5	74.3	34.7	17.9	10.1	6.0	3.8
6600 m3/h	127.4	51.6	24.1	12.5	7.0	4.2	2.6
5280 m3/h	81.6	33.0	15.4	8.0	4.5	2.7	1.7
3960 m3/h	45.9	18.6	8.7	4.5	2.5	1.5	0.9

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.547]

۳-۳- محاسبه هدررفت اصطکاکی توسط معادله هیزن ویلیامز

رابطه تجربی هیزن ویلیامز وابسته به دبی آب و خواص فیزیکی لوله و افت فشار ناشی از اصطکاک می باشد و جدول (۳) بیانگر میزان افت هد در شبکه مورد مطالعه می باشد.

جدول۳: هدررفت هد اصطکاکی با معادله هیزن ویلیامز

قطر لوله / دبی	500mm	600mm	700mm	800mm	900mm	1000mm	1100mm
7920 m3/h	213.3 m	87.8 m	41.4 m	21.6 m	12.2 m	7.3 m	4.6 m
6600 m3/h	152.2 m	62.6 m	29.6 m	15.4 m	8.7 m	5.2 m	3.3 m
5280 m3/h	100.7 m	41.4 m	19.6 m	10.2 m	5.8 m	3.4 m	2.2 m
3960 m3/h	59.1 m	24.3 m	11.5 m	6.0 m	3.4 m	2.0 m	1.3 m

جریان سیال در لوله به دلیل تنش‌های برشی ناشی از چسبندگی سیال، با مقاومت مواجه می‌شود [۱۷]. این پدیده به‌ویژه در نزدیکی دیواره داخلی لوله رخ می‌دهد و شدت آن به زبری سطح و جنس پوشش داخلی لوله وابسته است. به‌همین دلیل، هدررفت اصطکاکی در معادله هیزن-ویلیامز به‌عنوان تابعی پیچیده از هندسه سیستم تعریف می‌شود که با ویژگی‌های سیال (مانند لزجت و چگالی) و نرخ جریان ارتباط مستقیم دارد. بر اساس مشاهدات تجربی، هدررفت اصطکاکی با مجذور نرخ جریان رابطه مستقیم دارد؛ به‌طوری‌که با افزایش دبی، هدررفت افزایش یافته و با افزایش سطح مقطع لوله (یا قطر لوله)، هدررفت کاهش می‌یابد. این رفتار نشان‌دهنده اهمیت طراحی بهینه سیستم‌های لوله‌کشی برای کاهش تلفات انرژی و بهبود بازدهی انتقال سیال است.

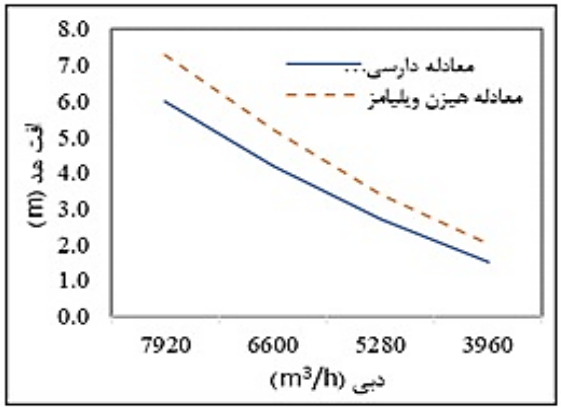
۳-۴- مقایسه میزان افت هد اصکاکی در معادله دارسی ویسباخ و هیزن ویلیامز

شکل‌های (۳) و (۴) نتایج مربوط به تلفات هد اصطکاکی در لوله‌های با قطر ۱۰۰۰ و ۵۰۰ میلی‌متر را نشان می‌دهند که نشان می‌دهد با افزایش آشفتگی سیال افت هد افزایش می‌یابد که این امر به دلیل افزایش اصطکاک داخلی سیال است [۱۸]. هم‌چنین، شکل‌های (۵) و (۶) تلفات هد اصطکاکی را در سایزهای مختلف لوله و دبی‌های ۷۹۲۰ و ۳۹۶۰ مترمکعب بر ساعت نمایش می‌دهند. این نتایج حاکی از آن است که مقادیر افت هد اصطکاکی محاسبه‌شده توسط معادلات هیزن-ویلیامز و دارسی-ویسباخ به یکدیگر نزدیک هستند. این نزدیکی با کاهش آشفتگی و حرکت جریان به سمت ناحیه آرام بیش‌تر می‌شود. در مقابل، با افزایش آشفتگی جریان، اختلاف بین نتایج این دو معادله بیش‌تر می‌گردد که این موضوع نشان‌دهنده اهمیت انتخاب مدل مناسب برای تحلیل هدررفت انرژی در شرایط جریان‌های کاملاً آشفته است.

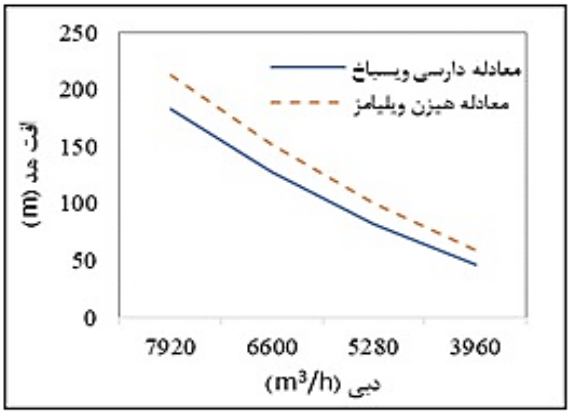
مطابق شکل ۷، با افزایش عدد رینولدز و شدت آشفتگی جریان، اختلاف بین مقادیر افت هد محاسبه‌شده توسط معادلات هیزن-ویلیامز و دارسی-ویسباخ بیشتر می‌شود. به نظر می‌رسد این اختلاف ناشی از وابستگی ضریب اصطکاک در معادله دارسی-ویسباخ به عدد رینولدز باشد. در حالی که معادله هیزن-ویلیامز از یک ضریب اصطکاک تجربی ثابت استفاده می‌کند که وابسته به جنس لوله است. در جریان‌های کاملاً آشفته، نتایج معادله هیزن-ویلیامز به دلیل عدم وابستگی به عدد رینولدز، به شرایط واقعی نزدیک‌تر است. این موضوع اهمیت انتخاب مدل مناسب را با توجه به شرایط جریان (آرام یا آشفته) در تحلیل‌های هیدرولیکی نشان می‌دهد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

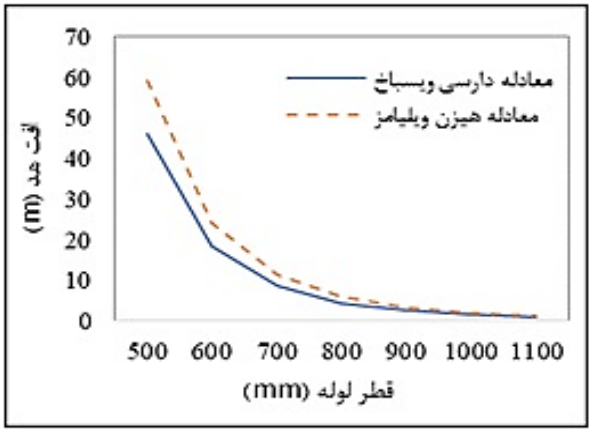
[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.547]



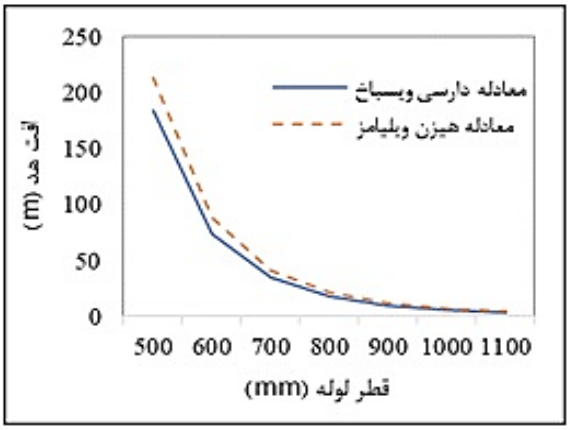
شکل ۳: مقایسه افت هد لوله ۱۰۰۰ میلی‌متر با معادلات دارسی-ویسباخ و هیزن-ویلیامز



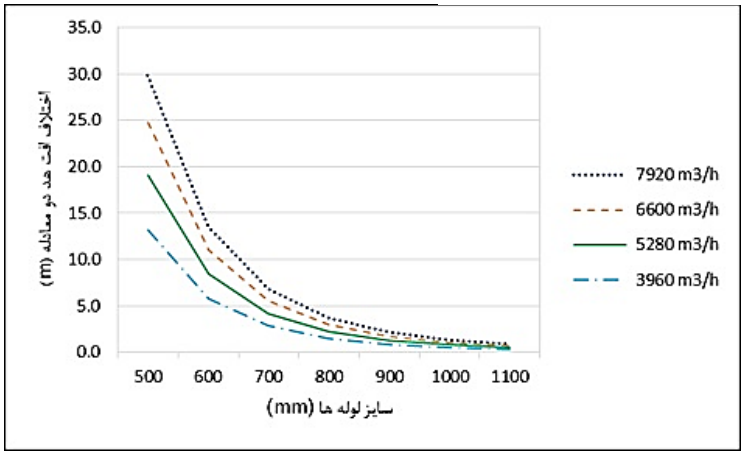
شکل ۴: مقایسه افت هد لوله ۵۰۰ میلی‌متر با معادلات دارسی-ویسباخ و هیزن-ویلیامز



شکل ۵: مقایسه افت هد با دبی ۳۹۶۰ مترمکعب در ساعت با معادلات دارسی-ویسباخ و هیزن-ویلیامز



شکل ۶: مقایسه افت هد با دبی ۷۹۲۰ مترمکعب در ساعت با معادلات دارسی ویسباخ و هیزن ویلیامز



شکل ۷: اختلاف افت هد وابسته به عدد رینولدز در دو معادله دارسی ویسباخ و هیزن ویلیامز در دبی ۷۹۲۰ مترمکعب در ساعت

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.547]

۵-۳- تاثیر جنس پوشش لوله در هدر رفت هد اصطکاکی

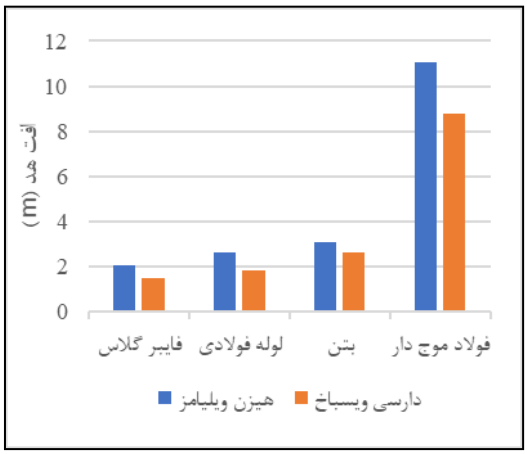
جدول(۴) و جدول (۵) میزان افت هد اصطکاکی در انواع پوشش‌های لوله را نشان می‌دهد که عامل آن زبری سطح پوشش می‌باشد.

جدول۴: هدررفت هد اصطکاکی با معادله دارسی ویسباخ در پوشش های متفاوت

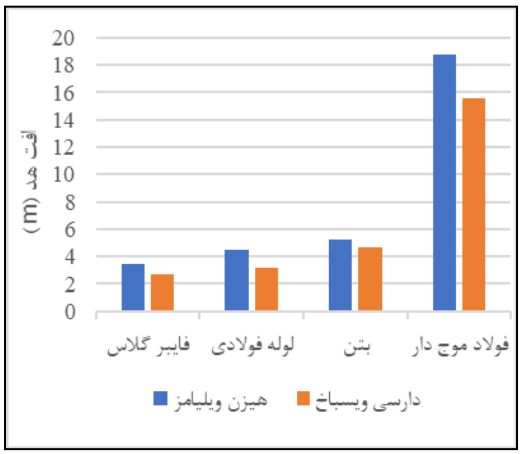
متریال لوله / دبی	فایبر گلاس	لوله فولادی	بتن	فولاد موج دار
7920 m3/h	6.0m	7.2m	10.6m	35.1m
6600 m3/h	4.2m	5.0m	7.3m	24.4m
5280 m3/h	2.7m	3.2m	4.7m	15.6m
3960 m3/h	1.5m	1.8m	2.6m	8.8m

جدول۵: هدررفت هد اصطکاکی با معادله هیزن ویلیامز در پوشش های متفاوت

متریال لوله / دبی	فایبر گلاس	لوله فولادی	بتن	فولاد موج‌دار
7920 m3/h	7.3m	9.5m	11.0m	39.8m
6600 m3/h	5.2m	6.8m	7.9m	28.4m
5280 m3/h	3.4m	4.5m	5.2m	18.8m
3960 m3/h	2.0m	2.6m	3.1m	11.0m



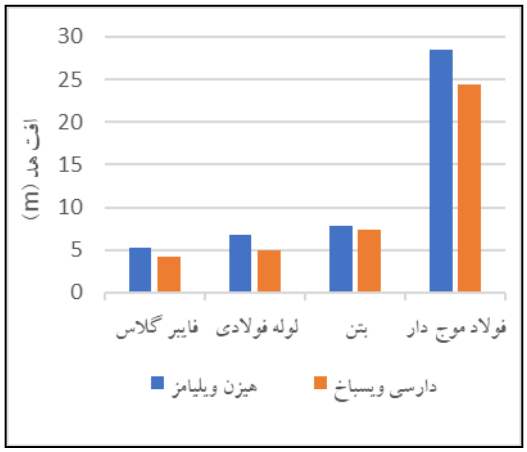
شکل ۸: مقایسه افت هد در دبی ۳۹۶۰ مترمکعب در ساعت در پوشش متفاوت



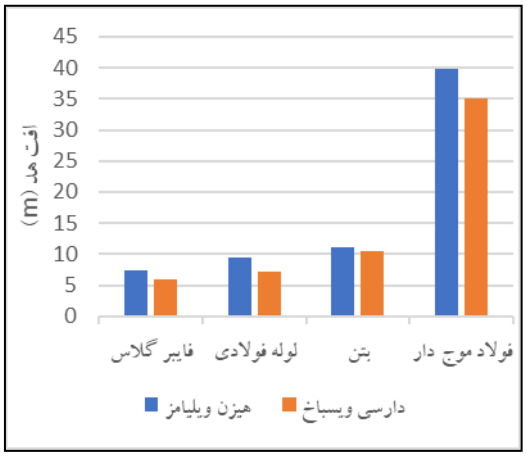
شکل ۹: مقایسه افت هد در دبی ۵۲۸۰ مترمکعب در ساعت در پوشش متفاوت

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.547]

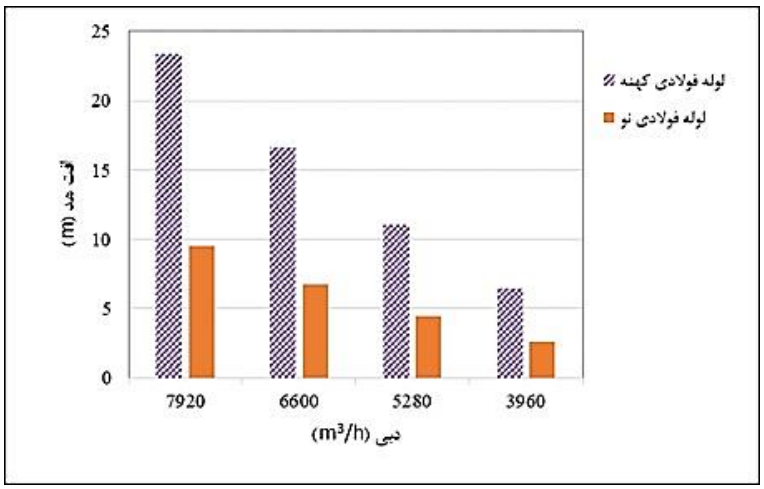


شکل ۱۰: مقایسه افت هد در دبی ۶۶۰۰ مترمکعب در ساعت در پوشش متفاوت



شکل ۱۱: مقایسه افت هد در دبی ۷۹۲۰ مترمکعب در ساعت در پوشش متفاوت

مطابق شکل (۱۱)، در لوله‌های فرسوده و کهنه، میزان افت هد اصطکاکی به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این افزایش عمدتاً ناشی از دو عامل است که شامل ۱- کاهش سطح مقطع مؤثر لوله به دلیل تجمع رسوبات در دیواره داخلی۲- افزایش زبری سطح ناشی از خوردگی یا ناهمواری‌های ایجادشده در طول زمان و در چنین شرایطی، ضخامت لایه رسوب یا خوردگی می‌تواند از ۱میلی‌متر تا ۱۰میلی‌متر متغیر باشد. این تغییرات باعث افزایش مقاومت جریان و در نتیجه افزایش تلفات انرژی می‌شود. این پدیده اهمیت نگهداری و بازرسی دوره‌ای خطوط لوله را برای جلوگیری از کاهش کارایی سیستم‌های انتقال سیال نشان می‌دهد.



شکل ۱۲: افت هد اصطکاکی در لوله های نو و کهنه

۴- نتیجه‌گیری

بررسی تطبیقی دو روش دارسی-ویسباخ و هیزن-ویلیامز در محاسبه تلفات هد اصطکاکی خطوط انتقال آب دریا نشان داد که با افزایش آشفتگی جریان، اختلاف نتایج این دو روش به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. این پدیده عمدتاً ناشی از وابستگی معادله دارسی-ویسباخ به عدد رینولدز و زبری دیواره لوله است، در حالی که معادله هیزن-ویلیامز فاقد چنین وابستگی بوده و از

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.547]

یک ضریب تجربی ثابت (وابسته به جنس لوله) استفاده می‌کند. در جریان‌های با آشفتگی متوسط (عدد رینولدز پایین)، حداکثر اختلاف بین نتایج دو روش حدود ۱متر مشاهده شد، اما با افزایش آشفتگی تا عدد رینولدز ۱۰،۰۰۰،۰۰۰، این اختلاف به ۳۰ متر رسید.

از سوی دیگر، فرسایش لوله‌ها در طول زمان (ناشی از خوردگی، رسوب‌گذاری و تغییرات زبری سطح) به عنوان عاملی کلیدی در تشدید تلفات هد شناسایی شد. این یافته‌ها اهمیت طراحی بهینه سیستم‌های لوله‌کشی (با درنظرگیری قطر مناسب و پوشش ضدخوردگی) و نگهداری دوره‌ای را برای کاهش تلفات انرژی و افزایش عمر مفید خطوط انتقال برجسته می‌سازد. در نهایت، این مطالعه نشان می‌دهد انتخاب مدل محاسباتی مناسب (دارسی ویسباخ برای جریان‌های آشفته و هیزن ویلیامز برای جریان‌های آرام) نقش تعیین‌کننده‌ای در دقت پیش‌بینی تلفات هد و بهینه‌سازی هزینه‌های اجرایی دارد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی			
Re	عدد رینولدز	L	طول لوله، (m)
V	سرعت جریان سیال، (m/s)	Q	دبی، (m^3/s)
D	قطر داخلی لوله، (m)	$C_{(H)}$	ضریب هیزن ویلیامز مربوط به پوشش لوله
Z	ارتفاع سطح، (m)	f	ضریب اصطکاک
P	فشار ناحیه مخزن، (PA)	**علائم یونانی**	
g	شتاب جاذبه ی زمین، (m/s^2)	ν	لزجت سینماتیکی، (m^2/s)
H_M	هد موتور های هیدرولیکی در مسیر سیال (m)	ρ	چگالی، (kg/m^3)
H_P	هد پمپ، (m)	γ	چگالی وزنی، (N/m^3)
H_f	افت هد ناشی از اصطکاک ، (m)	ε	زبری لوله

مراجع

[1] Daniel Bernoulli, Hydrodynamica (1738).

[2] Stokes George, On the Effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums. Transactions of the Cambridge Philosophical Society, Part II, 9 (1851), 8-106.

[3] Bhave, P.R., Analysis of flow in water distribution networks, Technomic Pub. Co., Inc., USA (1991).

[4] Weisbach J., Die Experimental Hydraulik, Freiberg, Germany: Engelhard (1855).

[5] Moody, L.F. Friction Factors for Pipe Flow. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 66 (1944), 671-681.

[6] Williams, G.S. and Hazen, A., Hydraulic tables, 3rd Edition, John Wiley & Sons nc., USA.

[7] Lamont, P., 1969, "The Choice of the Pipe Flow Laws for Practical Use", Water and Water Engineering, (1933),55-63.

[8] H. Sakhainia, M. Kazemi Gili, M. Saeedi, Analysis and Examination of Fluid Flow in Porous Media According to Darcy's Law and Comparison with Experimental Results, Annual Mechanical Engineering Student Conference,2009, (in Persian).

[9] B.Guerrero, M.Lambert, R.Chin, Spectral analysis of the net turbulent force in accelerating turbulent pipe flow, journal of fluid Mechanics, (2025).

[10] T.Namdari, N.Taleb Bidakhti, Evaluation of the Impact of Using the Hazen-Williams Formula Compared to the Darcy-Weisbach Formula in the Hydraulic Analysis of Water Transmission Lines, National Civil Engineering Congress, (2020), (in Persian).

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.547]

[11] Saeed A.Madodi, Hasanain A.Abdul Wahhab & Nabeel Sameer Mahmoud, Comparative Assessment of Friction Head Losses in Pipe Flow, Springer Journal, (2022).
[12] H.Inagaki, K.Hiyoshi, Re-evaluation of Hazen-Williams Coefficient C of Pipeline (II):Redefinition of coefficient C based on hydraulic experiment results, Journal of Rainwater Catchment Systems, (2022).
[13] M.Darweesh, W.Salah, T.Awwad, E.Ragab, A.Ahmed, An improved Form of Hazen-Williams Equation for Pressurized Flow, Engineering technology, (2024).
[14] Sh. Shafaei, Gh. Zarei, K. Ebrahimi, Sh. Soleimani, M. Shamsi, EVALUATION OF THE WIDELY-USED EQUATIONS OF HYDRAULIC LOSS CALCULATION AND CALIBRATION OF THE HAZEN-WILLIAMS EQUATION IN DRIP IRRIGATION LATERALS, Sharif Civil Engineering Journal, (2025), (in Persian).
[15] N. Dombrowski, E. A. Foumeny, S. Ookawara, A. Riza,The influence of reynolds number on the entry length and pressure drop for laminar pipe flow, The Canadian Journal OF CHEMICAL ENGINEERING, (1993).
[16] Paul J. LaNasa, E. Loy Upp, in Fluid Flow Measurement (Third Edition) , (2014).
[17] A.Lakshmi, J.Zhang, R.Hu, Parametrizing the probability density function of wall-shear stress in turbulent channel flows, Journal Physical Review Fluids, (2024).
[18] Divyesh A. Patel, Vimal N. Chaudhari, Deep R. Patel, EVALUATION OF ENERGY LOSSES IN PIPES, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), (2019).
[19] Ruqiong Qina, Chunyi Duanb, The principle and applications of Bernoulli equation, Journal of Physics: Conf. Series 916 (2017) 012038 .
[20] M, Ebrahimi, L, Mohebi Nozer, K, Ajjali Khanqah, M, Saeed Sanjabi, Spatial and temporal changes of salinity, density and temperature of sea waters of Hormozgan province, Strait of Hormoz and Persian Gul, Scientific Journal of Iranian Fisheries, (2008), (in Persian).

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.547]

Numerical Analysis and Comparison of Frictional Head Loss in Water Transmission Networks Using the Darcy-Weisbach and Hazen-Williams Equations

Mohammad Salehi[1,*], Mohsen Ehsani[2], Vahid Javdan[3]

[1,*]MSc of mechanical engineering, Department of engineering, research and technology, South Kaveh Steel Co
[2]MSc of electrical engineering, Department of engineering, research and technology, Saba Steel Co
[3]MSc of mechanical engineering, Department of engineering, research and technology, South Kaveh Steel Co

Received: spring 2025 Accepted: summer 2025

Abstract

Today, the depletion of groundwater resources has posed a critical challenge to industrial and human life. The desalination industry, which converts seawater into freshwater (with appropriate TDS levels), has emerged as a key solution and has experienced significant growth. However, designing efficient piping systems remains a major challenge due to long-distance pipelines, elevation changes, and environmental obstacles, all of which contribute to fluid head loss. In this study, frictional head loss was analyzed using two methods: the Darcy-Weisbach equation (dependent on the Reynolds number) and the Hazen-Williams equation (empirical). The results were compared, revealing that the Hazen-Williams equation has limitations in fully turbulent flows. Additionally, the effects of parameters such as pipe diameter, pipeline length, internal coating, and flow rate on head loss were investigated through numerical analysis. The findings indicate that increasing pipe diameter and reducing surface roughness significantly reduce head loss, while variations in flow rate and topography necessitate flexible design approaches. This study optimizes the piping design process for diverse operational conditions (such as flow rate fluctuations and elevation changes) by proposing a comprehensive model, offering solutions to reduce implementation costs and enhance the efficiency of transmission networks. The practical application of this research ensures improved stability of desalination systems and sustainable water resource management.

Key words: Hazen Williams, Darcy Weisbach, friction head, seawater transfer line, Moody diagram
*corresponding author: m.salehi@sksco.ir

Cite this article as: Mohammad Salehi, Mohsen Ehsani, Vahid Javdan, Numerical Analysis and Comparison of Frictional Head Loss in Water Transmission Networks Using the Darcy-Weisbach and Hazen-Williams Equations, . **Journal of Energy Conversion, 2025, 12(2), 1-13**.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.2.547]