

اثر بار رسوبی معلق بر ضریب افت انرژی در لوله‌های پلی اتیلن

کوثرگر جی، محمد حسین امید* و صلاح کوچک‌زاده**

*نگارنده مسئول، نشانی: کرج، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، گروه آبیاری، تلفن: ۰۲۶۱-۲۲۴۱۱۱۹

پیم نگر: momid@ut.ac.ir

** به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد؛ دانشیار و استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۸۸/۶/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۱/۲

چکیده

در آبیگری از رودخانه‌ها همواره ذرات رسوب به همراه آب به صورت بارهای کف و رسوبات معلق وارد تأسیسات انتقال و تنظیم آب می‌شوند و تغییراتی در شرایط جریان لوله‌ها و کانال‌ها ایجاد می‌کنند. این تحقیق با هدف بررسی تأثیر رسوبات معلق بر میزان افت انرژی در لوله‌های صاف انجام شده است. بدین منظور آزمایش‌هایی با مخلوط آب و رسوب با غلظت‌های ۰/۱ تا ۵ درصد حجمی ذرات رسوب ریزدانه با قطرهای میانه ۰/۰۴، ۰/۰۶۴، ۰/۱۵، ۰/۲۵، ۰/۷۲ و میلی‌متر در دو سری سیستم لوله پلی‌اتیلن با قطرهای داخلی ۶۶ و ۸۰ میلی‌متر انجام گردید. نتایج نشان داد وجود رسوب در جریان آب در اعداد رینولدز پایین تأثیر قابل توجهی بر میزان افت بار در لوله‌های صاف دارد به گونه‌ای که افزایشی تا ۱۲۵ درصد را نسبت به آب صاف نشان می‌دهد. نتایج همچنان نشان داد که مقدار افت انرژی با افزایش غلظت و قطر ذرات به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. با افزایش عدد رینولدز تأثیر بار رسوبی بر افت کاهش یافته و مقدار آن به افت آب خالص نزدیک می‌شود. در برخی موارد، در اعداد رینولدز بالا، حضور بار رسوبی موجب کاهش افت انرژی، تا کمتر از مقدار آن برای آب صاف نیز می‌گردد.

واژه‌های کلیدی

افت بار در لوله، بار رسوبی معلق، جریان دو فازی، لوله صاف

مقدمه

از یک سو به علت کاهش آشفتگی می‌تواند باعث کاهش مقاومت جریان شده و از سوی دیگر به دلیل افزایش لزجت و به تبع آن افزایش اصطکاک مکانیکی و اصطکاک لزجی، موجب افزایش مقاومت گردد. اصطکاک مکانیکی به دلیل برخوردهای دائم یا تصادفی ذرات جامد با دیواره لوله به وجود می‌آید، در صورتی که اصطکاک لزجی از وجود ذرات جامد در لایه‌های کنارهم و نزدیک دیواره ناشی می‌شود. در نوع اخیر اصطکاک، ذرات با دیواره لوله در تماس نیستند ولی خصوصیات سیال حمل‌کننده را در ناحیه نزدیک دیواره تغییر می‌دهند (Matousek, 2002). اصطکاک جریان دو فازی در یک لوله به شرایط جریان بستگی دارد، اما در هر حال وجود ذرات در جریان و حرکت آنها در هسته گردابه‌ها باعث تغییر رفتار جریان و

آبیگری از رودخانه‌ها با اهداف متفاوتی از جمله آبیاری، آبرسانی شهری یا تولید برق آبی انجام می‌شود که در هر صورت جریان از یک سری سازه آبی عبور می‌کند. بدون توجه به میزان آبیگری از مسیر اصلی، رژیم جریان آب و رژیم رسوب در رودخانه تغییر می‌کند و در بیشتر موارد، رسوبات منحرف شده به آبیگر نسبت به بار کل رسوبات رودخانه بزرگتر از نسبت آب جدا شده به دبی رودخانه می‌باشد (Jafarzadeh, 1992). به علت عدم امکان جداسازی کامل ذرات جامد از آب، به‌ویژه ذرات ریزدانه، این رسوبات وارد تأسیسات انتقال و تنظیم آب شده و سبب ایجاد تغییراتی در جریان لوله‌ها و کانال‌ها می‌گردند. از نقطه نظر مقاومت در مقابل جریان، وجود چنین ذراتی

f ضریب زبری جریان حاوی رسوب، f_0 ضریب زبری برای جریان متناظر بدون رسوب، s چگالی نسبی رسوب معلق، C_v غلظت رسوب بر حسب قسمت در میلیون در حجم جریان، W سرعت سقوط ذره، V سرعت متوسط در کانال و S شیب کانال می‌باشند.

تحقیقات زیادی در مورد افت بار ناشی از بارهای رسوبی در لوله‌ها صورت نگرفته است و کارهای انجام شده نیز غالباً قدیمی می‌باشند. اوبراین و فولسوم (OBrine & Folsom, 1973) آزمایش‌هایی در لوله‌های فلزی با قطرهای ۲ و ۳ اینچ با جریان آب حاوی رسوب انجام دادند. اندازه‌های میانه ماسه مورد استفاده بین ۰/۱۷ و ۱/۷ میلی‌متر تغییر می‌کرد. نتایج آزمایش‌های آنها با غلظت حجمی ماسه تا ۲۶ درصد، نشان داد که در سرعتی بالاتر از یک سرعت بحرانی، افت فشار در جریان مخلوط رسوب- آب در هر لوله معین، همانند افت ایجاد شده برای آب خالص در همان سرعت می‌باشد. آنها سرعت بحرانی را سرعتی تعریف کردند که در آن افت در فوت طول لوله در جریان مخلوط، شروع به متفاوت شدن از افت فشار آب خالص برای شرایط متناظر می‌کند. جریان همگن (رژیمی که در آن ذرات در حال حمل آنقدر کوچک هستند که سرعت سقوط آنها در مقایسه با نوسانات عمودی سرعت سیال قابل چشم‌پوشی است و توزیع عمودی ذرات رسوب تقریباً یکنواخت است) زمانی اتفاق می‌افتد که سرعت‌ها بیشتر از سرعت بحرانی باشند. دوراند (Durand, 1953) نیز به این نتیجه رسید که افت مرتبط با جریان همگن در صورتی که بر حسب افت مخلوط بیان شود، همانند افت جریان آب خالص می‌باشد. وی و همکارانش رابطه ۳ را برای جریان غیرهمگن ارائه کردند.

$$\frac{i_m - i}{i C_v} = K' \left(\frac{\sqrt{gD}}{V} \right)^3 \left(\frac{1}{\sqrt{C_D}} \right)^{1.5} \quad (3)$$

که در آن،

i و i_m گرادیان‌های هیدرولیک به ترتیب برای مخلوط و آب

تغییر نوع و میزان افت اصطکاکی خواهد بود. این پدیده به‌ویژه در لوله‌ها می‌تواند در توزیع سرعت و تنش برشی مؤثر باشد.

افت اصطکاکی، در طراحی شبکه لوله‌ها، مستقیماً روی اندازه و قدرت پمپ و قطر لوله تأثیر داشته و همچنین در تعادل هیدرولیکی شبکه‌ها مؤثر می‌باشد. بنابراین محاسبه دقیق افت بار بخصوص در لوله‌هایی با طول زیاد، مهمترین بخش از طراحی سیستم‌های تحت فشار می‌باشد. به علاوه با افزایش افت، مقدار انرژی مصرف شده نیز افزایش می‌یابد و برای تولید انرژی بیشتر هزینه بالاتری باید صرف گردد. بنابراین، نتایج این تحقیق و اثبات اثر قابل توجه بار معلق بر مقدار افت می‌تواند توجیه اقتصادی مناسبی برای صرف هزینه بیشتر به منظور احداث حوضچه‌های رسوبگیر باشد.

طی سال‌های اخیر به دلیل گسترش استفاده از لوله‌های پلاستیکی (مخصوصاً لوله‌های پلی‌اتیلن و پی‌وی‌سی) و به‌ویژه کاربرد وسیع این لوله‌ها در آبیاری و آبرسانی، بیشتر مطالعات روی این لوله‌ها متمرکز شده است. به همین دلیل این تحقیق نیز روی لوله‌هایی با جنس پلی‌اتیلن (لوله‌های صاف) انجام گرفته است.

در مورد اثر بار معلق بر شرایط جریان در کانال‌ها مطالعات نسبتاً کاملی صورت گرفته است که در این جا تنها به آخرین تحقیق که جمع‌بندی کارهای گذشته است اشاره می‌شود. خولار و همکاران (Khullar et al., 2002) نتیجه تحقیقات خود را با ارائه رابطه‌های کاربردی ۱ و ۲ برای تعیین ضریب افت جریان‌های حاوی بار رسوبی معلق به ترتیب برای کانال‌های پایدار و آبرفتی ارائه کردند.

$$\frac{f}{f_0} = \exp \left(8 \times 10^{-6} (s-1) \frac{C_v W}{VS} \right) \quad (1)$$

$$(2) \quad 1 - \frac{f}{f_0} = 10^{-5} (s-1) \frac{C_v W}{VS}$$

که در آن،

مورد افت بار جریان‌های با غلظت کم مطالعات جدیدی مشاهده نگردید. آخرین کار مشاهده شده در رابطه با جریان‌های غلیظ مربوط به ماتوسک (Matousek, 2009) می‌باشد. این محقق، ساختار یک مدل پیش‌بینی کننده افت بار اصطکاکی و ضخامت بستر ساکن را ارائه کرده است. این مدل در جریان غلیظ لوله و در سرعت‌هایی که برای متحرک نگاه داشتن تمام ذرات، بسیار کم است، ارائه شده است. روابط تابعی مدل تشریح شده و روابط نیمه تجربی تکمیل کننده نیز ارائه شده‌اند. مدل ارائه شده با استفاده از داده‌های تجربی آزمایشگاهی نویسنده و تحقیقات قبلی تأیید اعتبار شده است.

تجهیزات و روش‌های آزمایشگاهی

به منظور انجام آزمایش‌های این تحقیق، دو مدار با دو قطر لوله طراحی گردیده و در مرکز تحقیقات آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران ساخته شد. طرح‌واره مدار مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است. مدار اول شامل یک حلقه آزمایشگاهی از لوله پلی‌اتیلن با قطر داخلی ۸۰ میلی‌متر بود که به صورت افقی روی زمین قرار داشت. لوله‌های انتقال، آب را از پمپ به سمت مقطع اندازه‌گیری منتقل می‌کردند. قطر این لوله‌ها همانند قطر لوله مقطع اندازه‌گیری بود. مقطع آزمایشی به طول ۳ متر بعد از یک زانویی بود و به منظور از بین بردن تأثیر زانویی روی جریان در فاصله ۴ متری (۴۴ برابر قطر لوله) از آن قرار داشت. پیزومتر متصل به قبل و بعد از این مقطع تحت فشار بوده و روی یک تابلوی پیزومتر نصب شده بود. این پیزومتر به طور مستقیم افت بار در طول ۳ متر لوله را نشان می‌داد. مقطع مشاهده‌ای به منظور مشاهده وضعیت جریان و انتقال رسوب در حدود یک متری انتهای مقطع اندازه‌گیری، از جنس پلاکسی‌گلاس، با قطر همانند لوله پلی‌اتیلن و با طول ۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده بود. لوله خروجی به همراه یک شیر فلکه به منظور تخلیه مدار از آب و رسوب در نظر گرفته شد. برای تغذیه سیستم و نیز تزریق رسوب از یک لوله ورودی با قطر همانند کل مدار به طول ۹۳ سانتی‌متر که به صورت

خالص، C_v غلظت رسوب در جریان به صورت حجمی، K' یک ثابت تناسب، g شتاب جاذبه، D قطر لوله و C_D ضریب کشش ذره می‌باشند.

هاوارد (Howard, 1962) از آزمایش‌های خود نتیجه گرفت که مخلوط‌های آب و رسوب ریزدانه در غلظت‌های پایین، خصوصیات گرادیان هیدرولیکی مشابه آب خالص را نشان می‌دهند. در حقیقت با غلظت‌های تا ۶ درصد حجمی رسوبات ریزدانه (قطر میانه ۰/۰۱ میلی‌متر) نتایج آزمایش‌ها با نتایج مشاهده شده در آزمایش‌های مشابه با آب خالص تفاوتی ندارد. با افزایش غلظت به مقادیر بیشتر از ۶ درصد حجمی، اثر غلظت رسوب بر افت بار، قابل توجه می‌شود.

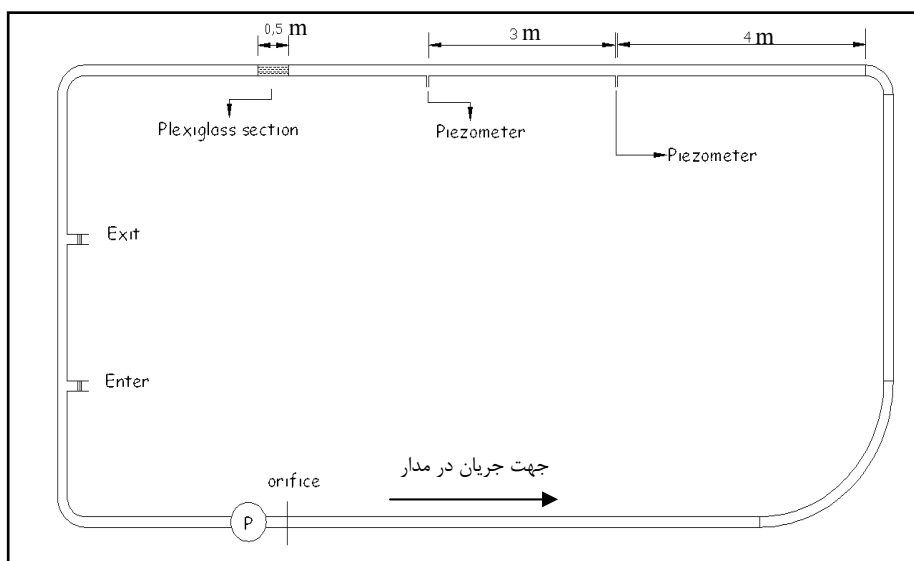
زند (Zandi, 1967) ذغال سنگ، خاکستر نرم، رس و ذغال چوب فعال شده در ۵ لوله مختلف را مورد آزمایش قرار داد. در ۸۰۰ آزمایش انجام شده، تقریباً تمام افت بارها زیر نقاط مورد نظر برای آب خالص افتادند. زندی چند مکانیزم ممکن برای عمل کاهش افت بار توسط ذرات ریز توصیف کرد ولی در ارائه ضوابطی به منظور تخمین کاهش افت بار در شرایط مختلف موفق نبود.

چین میه (Chin Mih, 1979) اشاره کرده است که در مخلوط‌های همگن، هنگامی که ثابت ون کارمن و فاکتور لایه مرزی جریان آشفته معین باشند، افت اصطکاکی مخلوط همگن در هر اندازه‌ای از لوله قابل تخمین می‌باشد.

ماتوسک (Matousek, 2002) مشاهده کرد که جریان‌های دارای بار بستر به طور قابل ملاحظه‌ای اصطکاک بیشتری را نسبت به جریان‌های بدون بار بستر نمایش می‌دهند. اضافه کردن ماسه ریز به مخلوط ماسه متوسط یا درشت، افت‌های اصطکاکی را در جریان‌های دارای لایه بندی کاهش می‌دهد. به نظر می‌رسد اصطکاک جریان‌های آشفته (جریان‌های افقی بدون بار بستر حاوی ماسه ریز، متوسط و مخلوط ماسه ریز و متوسط) به میزان ناچیزی نسبت به اندازه و غلظت ذرات جامد حساس است. گرچه در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در مورد افت بار جریان‌های غلیظ در لوله‌ها صورت گرفته است، لیکن در

مانومتر متصل به مقطع اندازه‌گیری برای اندازه‌گیری افت در دبی‌های بالا و محل اندازه‌گیری دما بودند. با افزایش سرعت و به تبع آن افزایش میزان افت در لوله (به دلیل کاهش قطر)، در ورودی پمپ فشار منفی ایجاد می‌شد که برای اصلاح آن، از یک لوله پلاستیکی قائم پر از آب با سطح آزاد به منظور تأمین فشار لازم استفاده شد. این لوله از نقطه خروجی به طور قائم به سیستم متصل شد تا از ایجاد فشار منفی در سیستم جلوگیری کند. اندازه‌گیری دما در این مدار از طریق ورودی امکان‌پذیر نبود، بنابراین در نقطه‌ای بعد از مقطع مشاهده‌ای اندازه‌گیری دما انجام گرفت.

قائم قرار گرفته بود، استفاده گردید. همچنین اندازه‌گیری دما در طول آزمایش‌ها به کمک یک دماسنج جیوه‌ای در این نقطه انجام می‌گرفت. برای اندازه‌گیری دبی جریان در سیستم، از یک روزنه تحت فشار که به تابلوی پیزومتر تحت فشار متصل بود استفاده گردید. برای ایجاد جریان در مدار و نیز مخلوط کردن آب و رسوب از یک الکتروپمپ گریز از مرکز استفاده شد. بعد از پمپ یک شیر فلکه برای تنظیم دبی جریان در نظر گرفته شده بود. مدار دوم با اختلافات جزئی نسبت به مدار قبل طراحی و ساخته شد. تفاوت‌های موجود مربوط به قطر لوله‌های انتقال و مقطع اندازه‌گیری (برابر ۶۶ میلی‌متر)،



شکل ۱ - طرح اجمالی مدارهای ساخته شده

مشخصات رسوبات در جدول ۱ ارائه شده‌اند. با توجه به هدف این تحقیق که بررسی اثر بار معلق بر افت بار در لوله‌ها می‌باشد، از رسوبات چسبنده که بیشتر با افزایش لزجت بر جریان تأثیر می‌گذارند، استفاده نشده است.

در تمام آزمایش‌ها از آب شرب شهری برای تأمین آب مورد نیاز سیستم استفاده می‌شد. رسوبات مورد استفاده نیز متشکل از ذرات ریزدانه غیر چسبنده (کوارتز) بودند که از شرکت تولید کننده رسوبات دانه‌بندی شده تهیه شده بودند.

جدول ۱- مشخصات رسوبات مورد استفاده

کد مشخصه رسوب	محدوده قطر ذرات (میلی متر)	قطر میانه (میلی متر)	جرم مخصوص نسبی	ضریب یکنواختی
d1	< ۰/۰۵۳	۰/۰۴	۲/۶۵	۷/۰۸
d2	۰/۰۵۳ - ۰/۰۷۵	۰/۰۶۴	۲/۶۵	-
d3	۰/۰۵۳ - ۰/۱	۰/۱۱۵	۲/۵۶	۱/۶۳
d4	۰/۰۵۳ - ۰/۱۵	۰/۲۵	۲/۶۱	۱/۳۵
d5	۰/۰۹ - ۰/۷۱	۰/۷۲	۲/۶	۱/۱۹

در دور صرف شود تا کمترین اختلاف دما در محدوده هر دور رخ دهد. پس از انجام یک سری از آزمایش‌ها با قطر رسوب موردنظر، سیستم کاملاً تخلیه و داخل آن شستشو می‌شد تا برای آزمایش‌های قطر رسوب بعدی آماده گردد. سپس قطر رسوب بعدی به سیستم تزریق و آزمایش‌ها، طبق آنچه گفته شد، شروع می‌گردید.

تجزیه و تحلیل نتایج

آزمایش‌های آب خالص برای مدار دوم نشان داد، لوله پلی اتیلن مورد استفاده در این مدار، با وجود اینکه به عنوان لوله صاف در بازار عرضه می‌شود، به دلیل اشکال در تولید دارای زبری می‌باشد. به منظور بررسی تأثیر رسوبات بار معلق بر میزان افت، با استفاده از نتایج آزمایش‌های آب صاف و فرض صادق بودن معادله کلبروک- وایت برای لوله مورد استفاده، مقدار زبری معادل برای این لوله محاسبه و منحنی مربوط به این زبری در تمام نمودارهای تهیه شده رسم گردید. متوسط زبری بدست آمده با فرض صادق بودن رابطه کلبروک- وایت برای داده‌ها ۰/۰۶۲۳۱ میلی متر بود، بنابراین مقدار ضرایب افت مشاهده شده در این لوله با خط مربوط به لوله‌هایی با زبری نسبی ۰/۰۰۰۹۴ مقایسه شدند. آزمایش‌ها در این مدار نیز با ۳ قطر رسوب انجام گردید.

تأثیر غلظت رسوبات بر مقدار افت در محدوده

آزمایش‌های مدار اول

برای بررسی اثر بار رسوبی بر ضریب زبری، تغییرات ضریب زبری در مقابل عدد رینولدز آب صاف $Re=VD/v$ ، که ۷ ضریب لزجت سینماتیک می‌باشد) در شکل‌های ۲ و

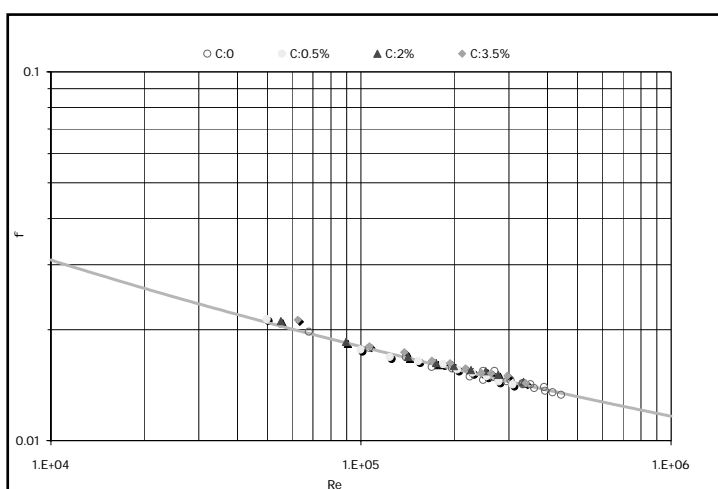
در ابتدای آزمایش‌ها و به منظور ایجاد غلظت‌های موردنظر، حجم کل هر دو سیستم، در مدار اول با استفاده از یک ظرف مدرج، و در مدار دوم با استفاده از یک جریان سنج حجمی اندازه‌گیری شدند. آزمایش‌ها در مدار اول با پنج و در مدار دوم با سه قطر مختلف رسوب انجام گرفت. برای هر قطر رسوب مورد استفاده، ابتدا کمترین غلظت مورد نظر تنظیم شده و پس از انجام آزمایش‌ها، میزان غلظت با افزودن رسوب افزایش داده می‌شد. مراحل انجام کار به صورت زیر بود:

پس از پر شدن سیستم از آب شهری و هواگیری اولیه آن، مقدار رسوب لازم برای ایجاد غلظت مورد نظر به آب اضافه می‌شد. در این آزمایش‌ها غلظت رسوب به صورت حجمی محاسبه و ایجاد شده است. به منظور کاهش مقدار خطا و جلوگیری از ایجاد جریان سه فازی، هوای داخل سیستم حتی الامکان باید خارج می‌گردید. این کار به وسیله کار کردن مداوم سیستم و خارج شدن هوای آن از لوله ورودی، و نیز، هواگیری مرتب لوله‌های پیرومترها صورت می‌گرفت. تنظیم دبی با استفاده از شیرفلکه موجود بعد از پمپ صورت می‌گرفت. به دلیل نوسان زیاد ارتفاع پیرومترها، قرائت آنها به وسیله عکسبرداری انجام می‌پذیرفت. قرائت دما به کمک یک دماسنج جیوه‌ای، در مدار اول در نقطه ورودی و در مدار دوم در نقطه‌ای بعد از مقطع مشاهده‌ای صورت می‌گرفت.

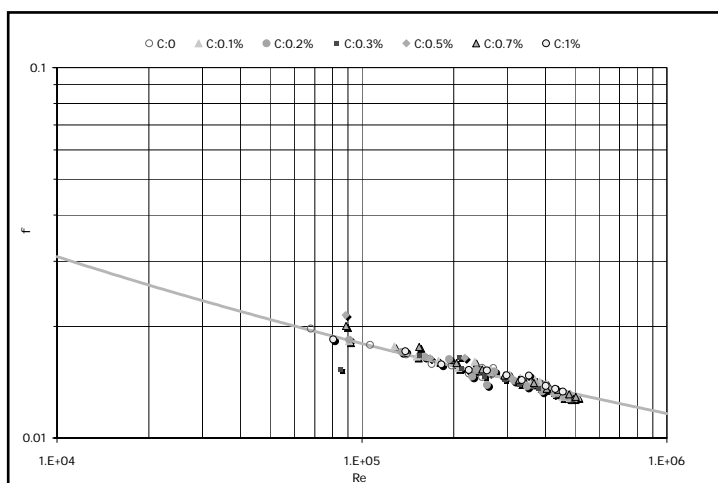
پس از پایان اندازه‌گیری‌ها در هر سری آزمایش، دبی افزایش داده می‌شد و اندازه‌گیری‌ها برای دبی جدید مجدداً آغاز می‌گردید. افزایش دبی تا حداکثری که پمپ قادر به ایجاد آن بود، ادامه می‌یافت. طی اندازه‌گیری‌ها سعی می‌شد تا کمترین زمان ممکن بین اندازه‌گیری‌ها در

قابل مشاهده است. البته افزایش غلظت تا حدود ۱ درصد حجمی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر میزان افت نداشت و با افزایش آن به ۱/۵ درصد یا بیشتر، مقدار افت به شدت افزایش یافت. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش عدد رینولدز، مقدار افت مشاهده شده به مقدار افت آب خالص نزدیک شده و در انتها بر خط ممتد مربوط به آب صاف و لوله‌های صاف از معادله کلبروک مماس می‌گردد.

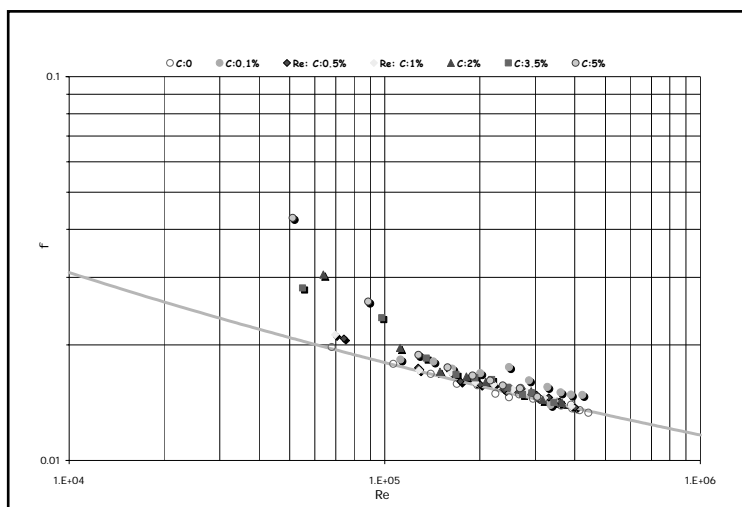
۳ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، افزایش غلظت رسوبات ریزدانه d_1 تا ۱ درصد حجمی و d_2 تا ۳/۵ درصد حجمی تأثیر قابل مشاهده‌ای بر میزان افت نداشت و مقدار افت مشاهده شده برابر مقدار آن برای آب صاف می‌باشد. در شکل‌های ۴ تا ۶ که در آنها رسوبات d_3 ، d_4 و d_5 استفاده شده است، افزایش مقدار افت در اثر افزایش غلظت رسوبات به خوبی



شکل ۲ - ضریب افت انرژی در غلظت‌های مختلف، (رسوب d_1 ، مدار اول)



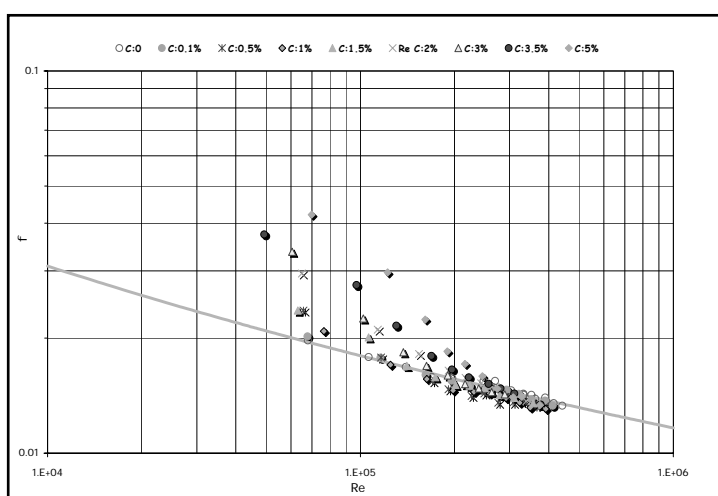
شکل ۳ - ضریب افت انرژی در غلظت‌های مختلف، (رسوب d_2 ، مدار اول)



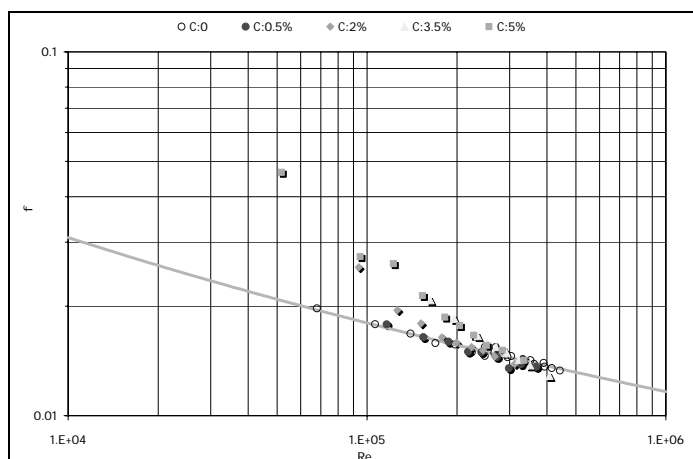
شکل ۴ - ضریب افت انرژی در غلظت‌های مختلف، (رسوب d_3 مدار اول)

افزایش توان جریان برای حمل رسوبات، و یا افزایش نسبت سرعت جریان به سرعت سقوط ذره، مقدار تعلیق این ذرات بیشتر شده و تماس آنها با جداره کمتر می‌گردد. این امر باعث کاهش زبری جریان شده و مقدار افت را کاهش می‌دهد (البته قدرت حمل رسوبات توسط جریان بستگی به قطر آنها نیز دارد).

در شکل ۴، برای قطر رسوب d_3 ، تقریباً از رینولدز ۱۵۰۰۰۰ به بعد، در شکل ۵، برای قطر رسوب d_4 ، تقریباً از رینولدز ۲۰۰۰۰۰ به بعد و در شکل ۶، برای قطر رسوب d_5 ، تقریباً از رینولدز ۲۵۰۰۰۰ به بعد، نقاط مربوط به داده‌ها به خط لوله‌های صاف مماس شده است. با توجه به این نتایج می‌توان گفت که با افزایش عدد رینولدز و



شکل ۵ - ضریب افت انرژی در غلظت‌های مختلف، (رسوب d_4 مدار اول)



شکل ۶ - ضریب افت انرژی در غلظت‌های مختلف، (رسوب 5d، مدار اول)

یکنواخت دانست.

تأثیر قطر رسوبات بر مقدار افت در محدوده

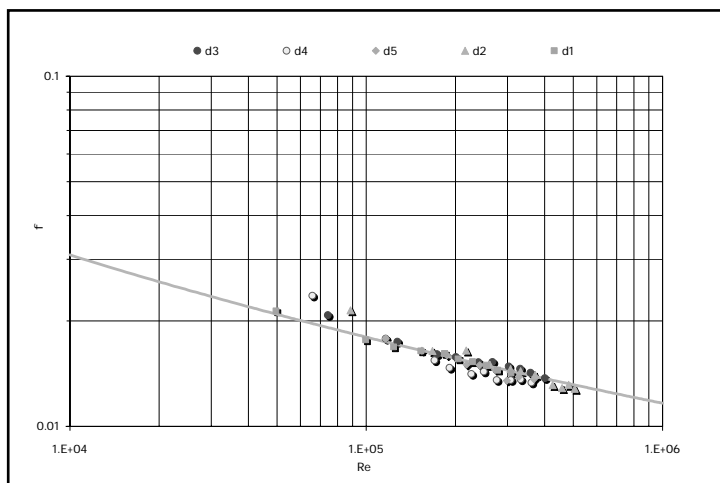
آزمایش مدار اول

با توجه به شکل‌های ۷ تا ۱۰ که در آنها قطرهای مختلف رسوب با غلظت‌های یکسان روی یک نمودار آورده شده است می‌توان تأثیر قطر ذرات را بر میزان افت مشاهده کرد. در شکل ۷ به علت غلظت کم رسوب، نقاط تقریباً به طور یکنواخت در اطراف خط لوله‌های صاف پراکنده شده‌اند و افزایش افت چندانی در اثر وجود رسوبات مشاهده نمی‌شود. در شکل‌های ۸ تا ۱۰ مشاهده می‌شود که با افزایش قطر رسوب مقدار افت نیز افزایش می‌یابد. در هریک از این نمودارها نیز می‌توان مشاهده کرد که با افزایش قطر رسوب، محدوده مماس شدن داده‌ها بر خط لوله‌های صاف، در اعداد رینولدز بالاتری اتفاق می‌افتد.

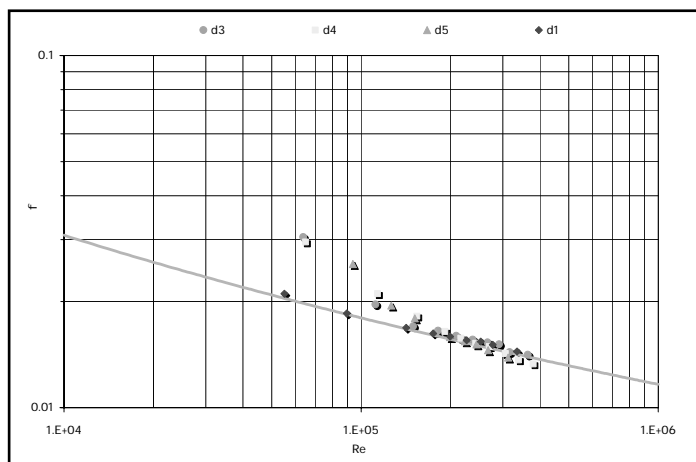
در شکل‌های ۴ تا ۶ نیز مشاهده می‌شود که با افزایش قطر رسوبات، این ذرات در رینولدز بالاتری به حالت تعلیق درآمدند و مقدار افت را تا میزان افت مربوط به آب خالص کاهش می‌دهند (در حقیقت با افزایش قطر رسوبات در سه نمودار متوالی، نقاط مربوط به داده‌ها در رینولدز بالاتری بر خط لوله‌های صاف مماس می‌شوند).

البته باید متذکر شد که منظور از افزایش تعلیق ذرات، افزایش حمل آنها به صورت یکنواخت می‌باشد. یعنی در رینولدزهای پایین‌تر نیز تمام ذرات معلق هستند ولی توزیع عمودی غلظت رسوبات در این حالت یکنواخت نیست. با توجه به نتایج فوق، می‌توان علت عدم تغییر افت جریان در حضور رسوبات ریزدانه را نیز توجیه کرد. در جریان‌های حاوی ذرات ریزدانه، سرعت سقوط کم ذرات در مقایسه با نوسانات سرعت عمودی سیال قابل چشم‌پوشی است، بنابراین می‌توان توزیع عمودی غلظت ذرات رسوب را تقریباً

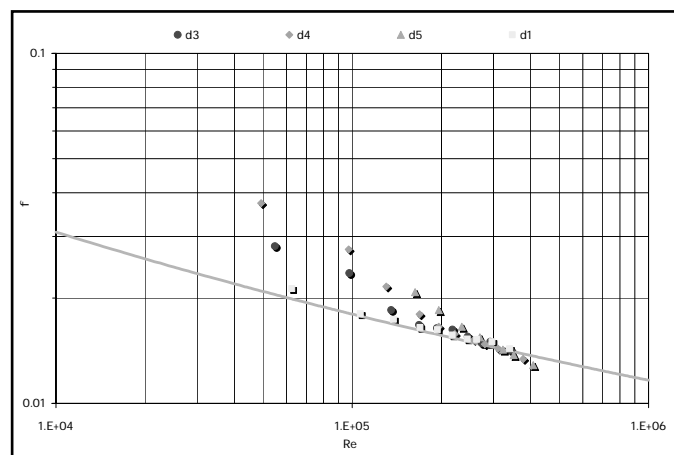
اثر بار رسوبی معلق بر ضریب افت انرژی ...



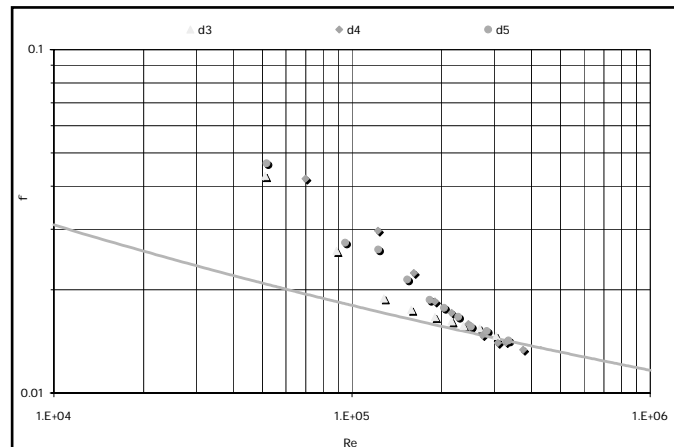
شکل ۷ - ضریب افت انرژی در قطرهای مختلف رسوب، (غلظت ۰/۵ درصد، مدار اول)



شکل ۸ - ضریب افت انرژی در قطرهای مختلف رسوب، (غلظت ۲ درصد، مدار اول)



شکل ۹ - ضریب افت انرژی در قطرهای مختلف رسوب، (غلظت ۳/۵ درصد، مدار اول)

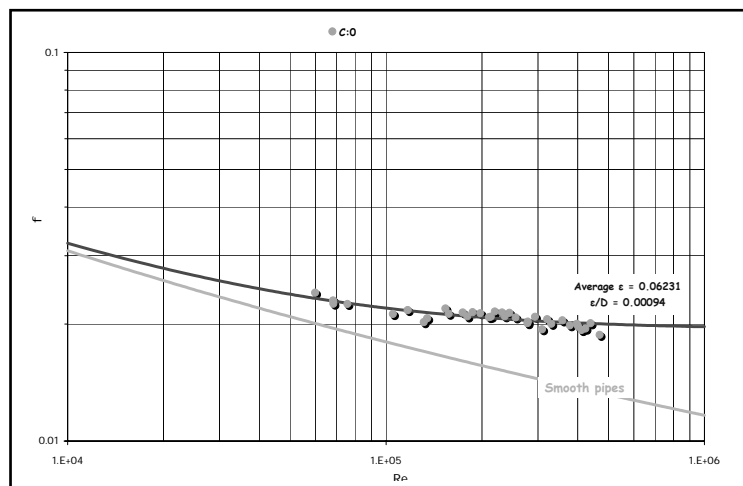


شکل ۱۰ - ضریب افت انرژی در قطرهای مختلف رسوب، (غلظت ۵ درصد، مدار اول)

حاکم بر انتقال رسوب در این دو مدار نباید بسیار متفاوت باشد. همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود نقاط به دست آمده از آزمایش‌های آب خالص به خوبی با خط مربوط به زبری نسبی 0.00094 مطابقت دارند.

تأثیر غلظت رسوبات بر مقدار افت در محدوده آزمایش مدار دوم

به علت وجود زبری ناخواسته در لوله مورد استفاده در این مدار، امکان مقایسه دقیق نتایج این مدار با مدار قبلی وجود ندارد ولی با این وجود، مکانیزم



شکل ۱۱ - ضریب افت انرژی در آب خالص در مدار دوم، روی دیاگرام مودی

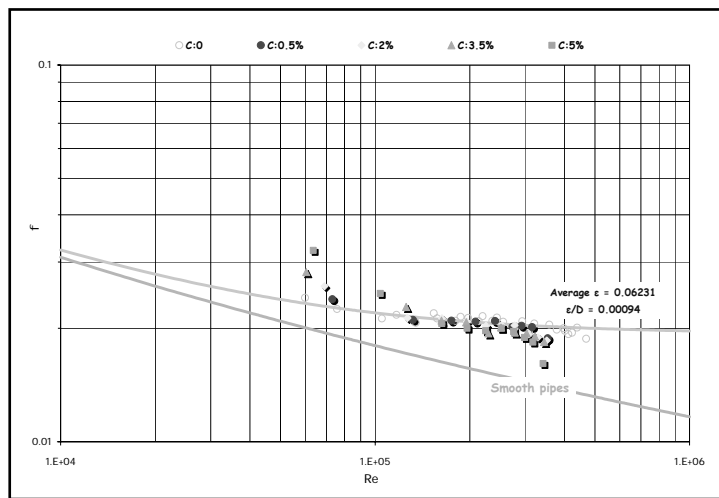
موجود به مقدار افت مربوط به آب خالص نزدیک شده و حتی در انتها از خط مربوط به لوله‌هایی با زبری نسبی 0.00094 نیز عبور می‌کند. درحقیقت در انتهای نمودارهای به دست آمده یعنی در عددهای رینولدز بالایی که طی آزمایش‌ها قابل اجرا بودند، مقدار افت در حضور رسوبات از مقدار آن برای آب خالص

در این مدار نیز با توجه به شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ که در آنها رسوبات با قطر $d3$ تا $d5$ استفاده شده است، مشاهده می‌شود که غلظت 0.5 درصد حجمی رسوبات تغییر قابل توجهی در میزان افت مشاهده شده نسبت به افت ناشی از آب خالص را نشان نمی‌دهد ولی با افزایش غلظت رسوبات، مقدار افت افزایش یافته است. با افزایش عدد رینولدز، افت

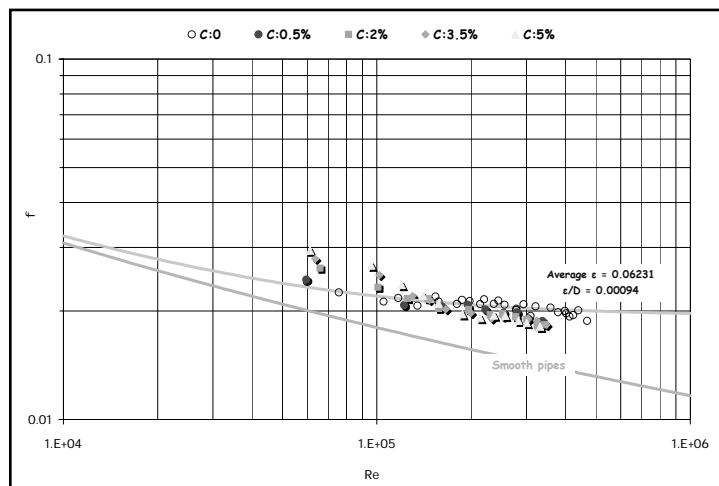
اثر بار رسوبی معلق بر ضریب افت انرژی ...

می‌شود. در این سه نمودار، تقریباً از اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰۰ به بعد، نقاط مربوط به آزمایش‌ها به خط لوله مشخصه رسیده و یا از آن عبور کرده‌اند. بنابراین در این مدار، اختلاف قابل توجهی بین محدوده تشکیل جریان همگن در حضور قطرهای مختلف رسوب مشاهده نشده است.

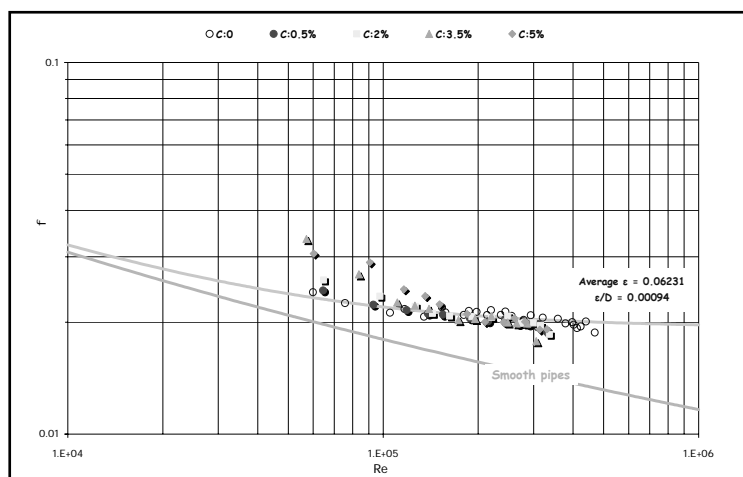
کمر بوده است. در توجیه این رفتار جریان، می‌توان گفت که اگرچه زبری ناشی از کیفیت لوله صاف مورد استفاده باعث افزایش افت گردیده است، لیکن در رینولدزهای بالا وجود ذرات رسوب باعث شکسته شدن هسته گردابه‌ای جریان کاملاً متلاطم گردیده و موجب کاهش افت آشفتگی



شکل ۱۲ - ضریب افت انرژی در غلظت‌های مختلف، (رسوب d_3 مدار دوم)



شکل ۱۳ - ضریب افت انرژی در غلظت‌های مختلف، (رسوب d_4 مدار دوم)

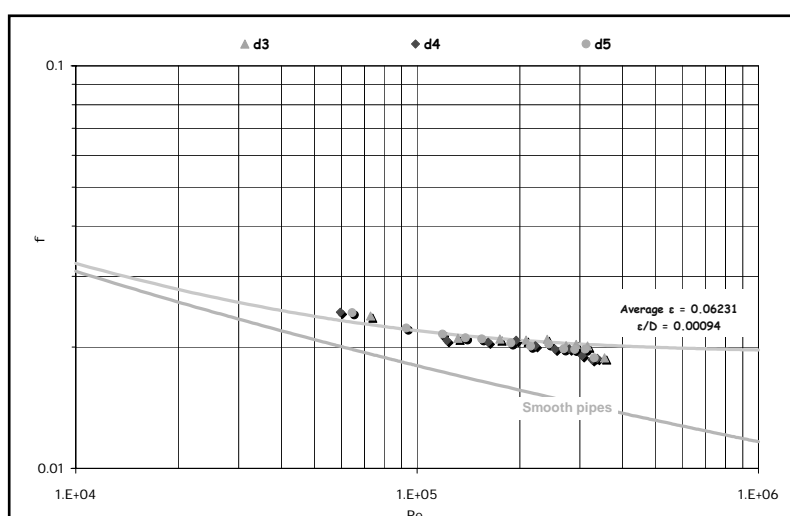


شکل ۱۴ - ضریب افت انرژی در غلظت‌های مختلف، (رسوب d5، مدار دوم)

میزان افت کمتر از تأثیر آن در مدار اول می‌باشد. در قسمت انتهایی ۴ نمودار به‌دست آمده، مقدار افت مشاهده شده کمتر از میزان افت برای آب خالص است. در اینجا نیز همان توجیه ارائه شده در بخش قبل قابل تعمیم است. با توجه به شکل‌های ۱۵ تا ۱۸ با افزایش غلظت در این ۴ نمودار، شیب نمودارهای به‌دست آمده بیشتر می‌شود.

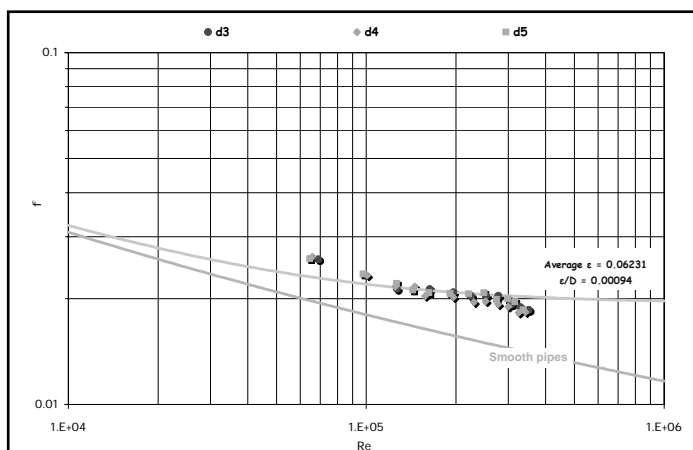
تأثیر قطر رسوبات بر مقدار افت در محدوده آزمایش مدار دوم

در شکل‌های ۱۵ تا ۱۸ که در آنها قطرهای مختلف رسوب با غلظت‌های یکسان روی یک نمودار آورده شده است نیز می‌توان تأثیر قطر ذرات را بر میزان افت در مدار دوم مشاهده کرد. همانطور که از این شکل‌ها مشخص است، در این مدار تأثیر مشاهده شده قطر رسوبات بر

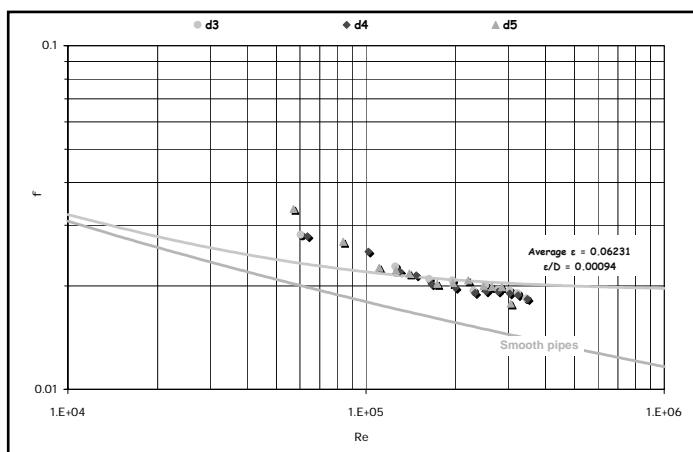


شکل ۱۵ - ضریب افت انرژی در قطرهای مختلف رسوب، (مدار دوم، غلظت ۵٪ درصد)

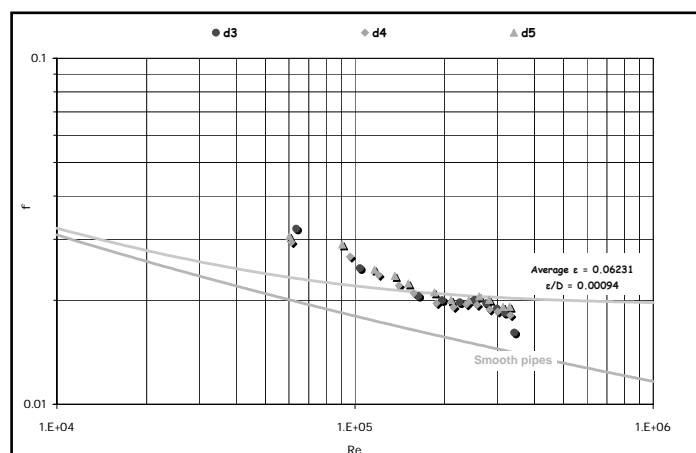
اثر بار رسوبی معلق بر ضریب افت انرژی ...



شکل ۱۶ - ضریب افت انرژی در قطرهای مختلف رسوب، (مدار دوم، غلظت ۲ درصد)



شکل ۱۷ - ضریب افت انرژی در قطرهای مختلف رسوب، (مدار دوم، غلظت ۳/۵ درصد)



شکل ۱۸ - ضریب افت انرژی در قطرهای مختلف رسوب، (مدار دوم، غلظت ۵ درصد)

نتیجه‌گیری

میلی‌متری، با افزایش سرعت جریان (به علت کاهش قطر) نسبت به مدار اول و افزایش توان جریان برای حمل رسوبات، و یا افزایش سرعت جریان نسبت به سرعت سقوط ذره، مقدار تعلیق این ذرات بیشتر شده و تماس آنها با جداره کمتر می‌گردد. این امر باعث کاهش زبری جریان گشته و مقدار افت را کاهش می‌دهد.

با افزایش قطر رسوبات در جریان مخلوط آب و رسوب، سرعت سقوط ذرات افزایش یافته و توان جریان برای حمل آنها کاهش می‌یابد. در نتیجه این کاهش توان، یکنواختی توزیع غلظت رسوب در عمق جریان کمتر شده و مقدار افت به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. گرچه در آزمایش‌های این تحقیق رسوبات مورد استفاده در محدوده کوچکی از قطر قرار داشتند، لیکن همین افزایش اندک در قطر ذرات نیز، افزایش قابل توجهی در مقادیر افت را به دنبال داشت. در جریان‌های حاوی ذرات ریزدانه، به علت سرعت سقوط کم ذرات، جریان قابلیت حمل ذرات را در تمام رینولدزهای مورد آزمایش داشته است. به عبارت دیگر در این حالت، ذرات رسوب آنقدر کوچک بوده‌اند که سرعت سقوط آنها در مقایسه با سرعت جریان و نوسانات عمودی سرعت قابل چشم‌پوشی باشد. بنابراین توزیع عمودی غلظت ذرات رسوب تقریباً یکنواخت شده است.

اثر غلظت بار رسوبی معلق بر افت انرژی جریان در دو سری لوله صاف به قطرهای داخلی ۶۶ و ۸۰ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد وجود بار رسوبی در جریان با غلظت ۱/۵ درصد حجمی یا بیشتر در محدوده اعداد رینولدز آزمایش شده در این تحقیق، افت را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد، تا جایی که در بالاترین غلظت درشت‌ترین رسوب مورد استفاده، و در کمترین رینولدز مورد آزمایش، در سیستم لوله‌های ۸۰ میلی‌متر تا ۱۲۵ درصد و در لوله‌های ۶۶ میلی‌متری تا ۴۳ درصد افزایش ضریب افت مشاهده شده است. در رینولدزهای بیشتر از ۱۵۰۰۰، بسته به قطر ذرات و غلظت بار رسوبی، کاهش ضریب افت نیز مشاهده شده است. با افزایش عدد رینولدز، افت بار کاهش یافته و به مقدار افت مربوط به آب خالص نزدیک می‌شود. در اعداد رینولدز بالا و در اکثر موارد، افت بار حتی از خط مربوط به لوله‌های صاف (و خط مربوط به لوله‌هایی با زبری نسبی ۰/۰۰۰۹۴) نیز کمتر می‌گردد. در توجیه این رفتار می‌توان گفت در رینولدزهای بالا وجود ذرات رسوب باعث شکسته شدن هسته گردابه‌ای جریان کاملاً متلاطم گردیده و باعث کاهش افت توربولنت می‌شود. در لوله ۶۶

مراجع

- Durand, R. 1953. Basic relationship of the transportation of solids in Pipes-Experimental research. Proceedings, Minnesota International Hydraulics Convention. Minneapolis, Minnesota, 89-103.
- Howard, C. D. D. 1962. The effect of fines on the pipeline flow of sand water mixtures. M.Sc. Thesis. Alberta.Edmonton University.
- Jafarzadeh, I. 1992. Sediment control methods in irrigation and water supply networks. First Edition, Farhang jame Publications. (in Farsi)
- Khullar, N. K., Kothyari. U. C. and Ranga Raju. K. G. 2002. The effect of suspended sediment on flow resistance. Proceeding of the 5th International Conference on Hydro-Science and Engineering, Poland, Warsaw.
- Matousek, V. 2002. Pressure drops and flow patterns in sand-mixture pipes Exp. Therm. Fluid. Sci. 26 (6-7): 693-702
- Matousek, V. 2009. Pressure drops and flow patterns in sand-mixture pipes. Power. Tech. 192, 367-374.

اثر بار رسوبی معلق بر ضریب افت انرژی ...

O'Brien, M. P. and Folsom, R. G. 1973. The transportation of sand in Pipelines. University of California, Berkeley. Calif. Publication in Engineering, 3 (7): 343-384.

Chin Mih, W. 1979. Transporting solid particles in smooth pipelines. Trans. Eng. J., ASCE, 105(4):427-437.

Zandi, I. 1967. Heterogeneous solid transportation in pipelines, J. Hydraulics Division, ASCE, 93 (HY3):145-159

Effect of Suspended Sediment on Friction in Polyethylene Pipes

K. Gorji, M. Omid* and S. Kouchakzadeh

* Corresponding Author: Associate Professor in Hydrolic Engineering, Department of Irrigation & Reclamation, University of Tehran, Karaj, I.R.Iran, E-mail: momid@ut.ac.ir

Received: 5 September 2009, Accepted: 22 January 2011

The results of an experimental study on the effect of sediment laden flow on hydraulic resistance in a smooth pipe are presented. The experiments were carried out in two horizontal PE pipe flow systems of 66 and 80 mm in diameter. Flows of volumetric concentrations of 0.1% to 5% and particle diameters of 0.04, 0.064, 0.15, 0.25, 0.72 mm were studied in the experiments. The results are compared with the flow resistance of clear water flow in smooth pipes. These results showed that the presence of suspended sediment in the flow where the Reynolds number is low may increase the head loss up to 125% for an 80 mm smooth pipe. The results also confirm an increase in flow resistance with an increase in volumetric concentration and particle diameter. In some experiments with high Reynolds numbers, sediment transport caused a decrease in pressure drop to less than that of clear water flow. Increasing the Reynolds number may decrease the effect of sediment concentration on head loss so that the number approaches that of clear water flow resistance.

Keywords: Pipe head loss, Sediment laden flow, Smooth pipe, Two-phase flow