خدمات صحت‌سنجی دقت عملکرد دبی‌سنج روزنه‌ای DN400 در هندسه خاص نصب

DN 400 Orifice Flow meter Services for Verification of Accuracy in Special Installation Condition

خرداد ۱۴۰۱

June 2022

فهرست مطالب

۱ مقدمه ۵

۲ تعریف دبی‌سنج روزنه‌ای DN400 ۵

۳ شرح خدمات تعریف‌شده و مدل آزمایشگاهی ۷

۴ ابزارهای اندازه‌گیری ۱۸

۴-۱ خط‌کش مانومتر ۱۸

۴-۲ دستگاه فشارسنج ۱۸

۴-۳ اندازه‌گیری دبی جریان ۲۱

۵ نتایج و بحث ۲۲

۵-۱ تغییرات فشار بالادست و پایین‌دست نسبت به دبی جریان ۲۲

۵-۲ واسنجی (کالیبراسیون) دستگاه فشارسنج دیجیتال ۲۵

۵-۳ بررسی تأثیر تکرار آزمایشات بر منحنی تغییرات Q - ΔP ۲۹

۵-۴ تعیین اختلاف منحنی تغییرات Q - ΔP در شرایط استاندارد (نظری) و آزمایشگاهی ۳۰

۵-۵ توسعه معادله جهت تخمین Q به‌صورت تابعی از ΔP ۳۱

۶ نتیجه‌گیری ۳۳

منابع مورد استفاده ۳۳

پیوست‌ها ۳۴

فهرست تصاویر

شکل ۱- نقشه و جزئیات هندسی دبی‌سنج روزنه‌ای DN400 ..... ۶
شکل ۲- نمایی از شرایط جریان در حضور دبی‌سنج روزنه‌ای ۷
شکل ۳- شِمای کلی از طرح موردنظر جهت اجرا در مؤسسه تحقیقات آب ۸
شکل ۴- نمایی از مخزن تأمین ارتفاع آب ۹
شکل ۵- نمایی از ورودی مدل آزمایشگاهی (قطر ۱۶ اینچ و طول ۳۳ سانتی‌متر) ۱۰
شکل ۶- اجرای شاسی فلزی جهت نصب تأسیسات موردنظر روی آن ۱۱
شکل ۷- تهیه و آماده‌سازی فلنج برای طرفین لوله‌ها ۱۱
شکل ۸- تصاویر مختلفی از مراحل ساخت و آماده‌سازی مدل آزمایشگاهی ۱۲
شکل ۹- نمایی از مخزن فلزی پایین‌دست، جهت کاهش آشفتگی و تلاطم جریان خروجی ۱۳
شکل ۱۰- مسیر اولیه انتقال جریان به کانال اندازه‌گیری دبی در پایین‌دست ۱۴
شکل ۱۱- نمایی از حوضچه استغراق پایین‌دست و مسیر نهایی انتقال جریان به سمت کانال اندازه‌گیری دبی ۱۵
شکل ۱۲- کانال هدایت‌کننده جریان به سرریز اندازه‌گیری ۱۶
شکل ۱۳- نمایی از مانومتر روی هِدتانک و خط‌کش مدرج کنار آن، جهت قرائت ارتفاع آب داخل مخزن ۱۹
شکل ۱۴- نمایی از دستگاه فشارسنج مورد استفاده ۲۰
شکل ۱۵- ساخت دو عدد سه راهی جهت اندازه‌گیری توأم فشار با مانومتر و فشارسنج دیجیتال ۲۰
شکل ۱۶- سرریز لبه‌تیز مستطیلی و لیمنیمتر مورد استفاده جهت اندازه‌گیری تغییرات بار آبی بالادست سرریز ۲۱
شکل ۱۷- روند تغییرات اختلاف فشار بالادست و پایین‌دست دبی‌سنج روزنه‌ای DN400 نسبت به دبی خروجی از آن، مبتنی بر اندازه‌گیری فشار با دستگاه دیجیتال ۲۳
شکل ۱۸- روند تغییرات نوسانات فشار، در شرایط استفاده از فشارسنج دیجیتال ۲۴
شکل ۱۹- روند تغییرات اختلاف فشار بالادست و پایین‌دست دبی‌سنج روزنه‌ای DN400 نسبت به دبی خروجی از آن، مبتنی بر اندازه‌گیری فشار با پیزومتر ۲۶
شکل ۲۰- روند تغییرات نوسانات فشار، در شرایط استفاده از پیزومتر ۲۷
شکل ۲۱- مقایسه روند تغییرات اختلاف فشار بالادست و پایین دست دبی‌سنج روزنه‌ای DN400 با دبی خروجی، در شرایط استفاده از فشارسنج دیجیتال و پیزومتر ۲۸

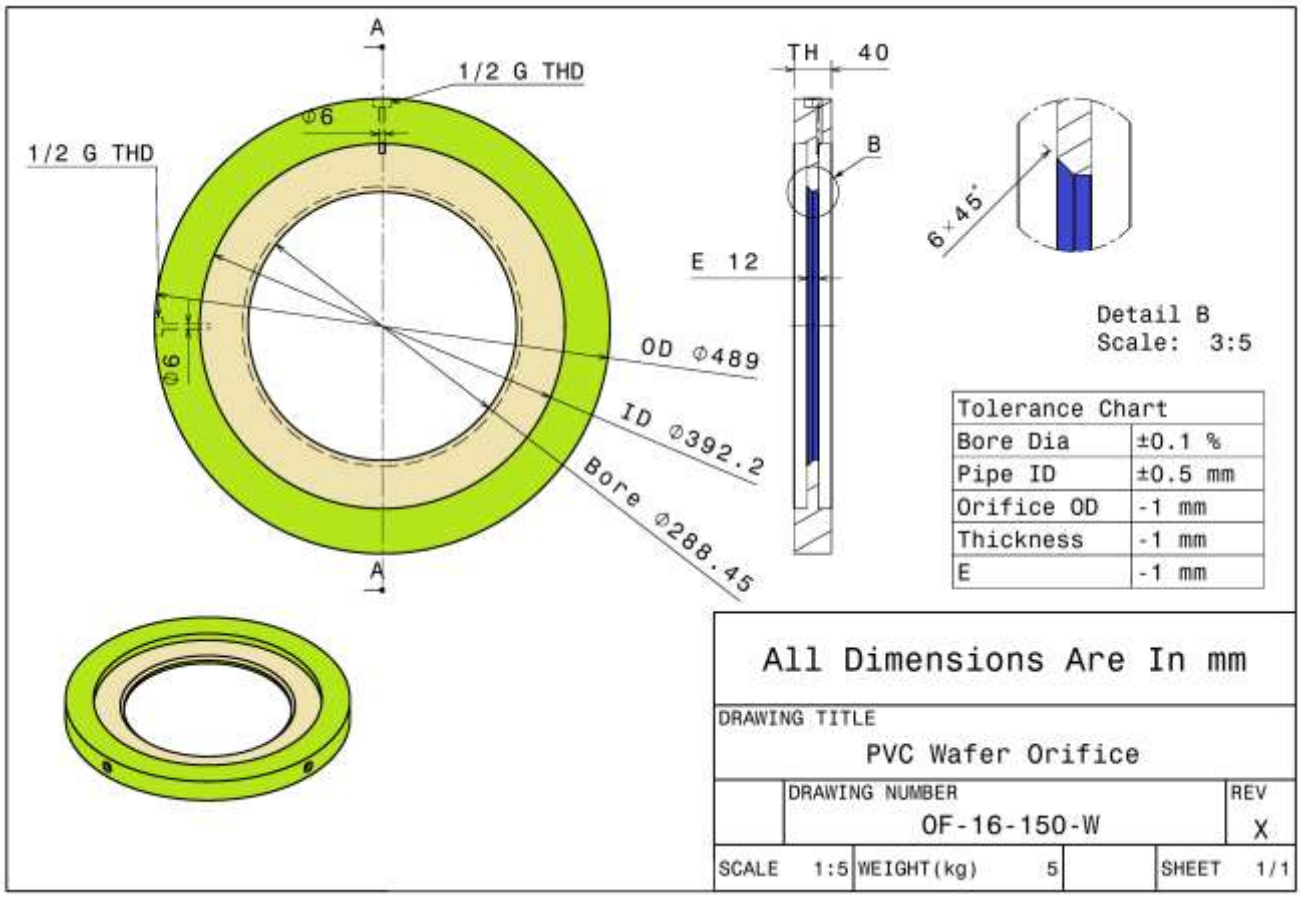
شکل ۲۲- روند تغییرات Q - ΔP، در صورت تکرار مجدد آزمایشات ۲۹
شکل ۲۳- مقایسه روند تغییرات Q - ΔP در دو حالت استاندارد و موجود ۳۱
شکل ۲۴- الف) روند تغییرات منحنی Q - ΔP، در شرایط استفاده از معادله توسعه‌یافته ب) روند تغییرات مقادیر جریان خروجی از دبی‌سنج روزنه‌ای DN400 .....۳۲

۱ مقدمه

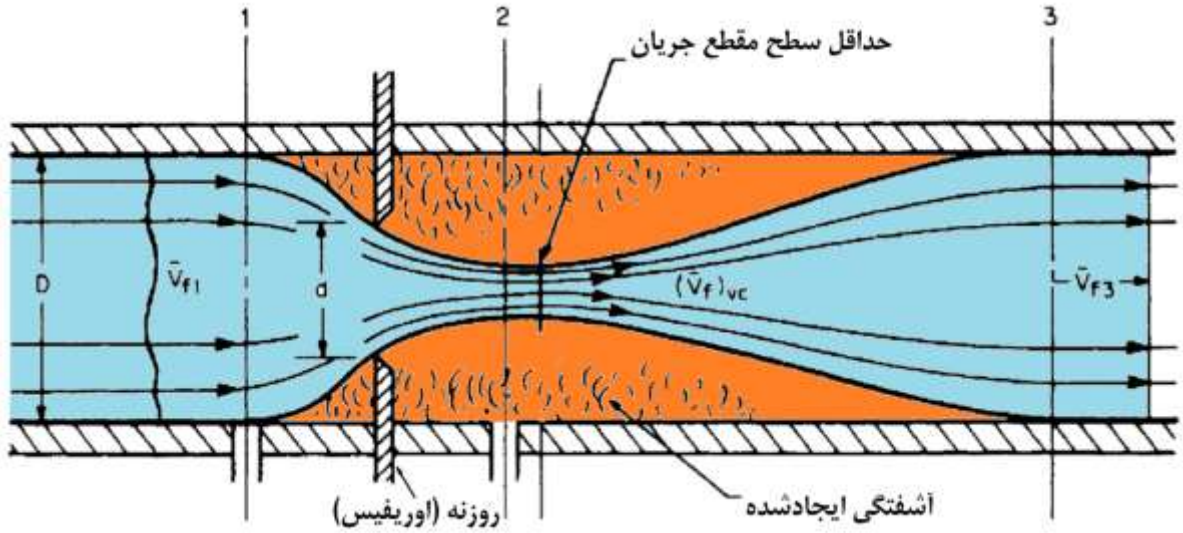
شرکت سازه‌سازان به‌منظور بررسی امکان استفاده و صحت‌سنجی دقت و عملکرد مناسب دبی‌سنج روزنه‌ای DN400، بنا به پیشنهاد شرکت مهندسین تهران-بوستُن، در قالب قرارداد شماره ۱۰۰۱۳/۳۷۸ مورخ ۱۴۰۰/۱۰/۱۱ از خدمات مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو استفاده نمود. وظیفه نظارت، هماهنگی‌های لازم فنی و صحه‌گذاری بر نوع، کفایت و دقت انجام آزمایشات از طرف شرکت سازه‌سازان به شرکت مهندسین تهران-بوستُن محول گردید. در این راستا مقرر شد از امکانات آزمایشگاهی مؤسسه جهت نصب و تِست دبی‌سنج روزنه‌ای DN400 جهت اندازه‌گیری دبی خروجی از کارتریج فیلترهای طرح آب‌شیرین‌کن خلیج‌فارس استفاده گردد. از آنجا که دبی‌سنج روزنه‌ای مذکور در شرایط غیر استاندارد (عدم رعایت فواصل بالادست و پایین‌دست توصیه‌شده) در نمونه واقعی نصب می‌گردد، لذا تغییرات فشار بالادست و پایین‌دست دبی‌سنج با میزان دبی جریان عبوری بایستی مورد بررسی قرار گرفته و در مرحله اول، امکان‌سنجی استفاده از سازه مذکور در شرایط میدانی موجود ارزیابی شود (امکان‌سنجی وجود رابطه متقن بین تغییرات فشار بالادست و پایین‌دست دبی‌سنج روزنه‌ای DN400 با میزان دبی خروجی از آن) و در مرحله دوم (در صورت وجود رابطه متقن بین تغییرات فشار با میزان دبی خروجی)، معادله دقیقی در این ارتباط توسعه یابد. در شکل ۱ نقشه و جزئیات هندسی دبی‌سنج روزنه‌ای DN400 مذکور ارائه شده است.

۲ تعریف دبی‌سنج روزنه‌ای DN400

دبی‌سنج روزنه‌ای DN400 یکی از رایج‌ترین تجهیزات اندازه‌گیری دبی جریان مبتنی بر اندازه‌گیری اختلاف فشار می‌باشد. وقتی سیال از دبی‌سنج عبور می‌کند، به دلیل کاهش سطح مقطع جریان، سرعت آن افزایش یافته و فشار آن کاهش می‌یابد. پس از این مرحله، سرعت سیال مجدداً کاهش یافته و فشار آن افزایش پیدا می‌کند. بر اساس اختلاف فشار ایجادشده در خط عبوری سیال و اندازه‌گیری آن، میزان دبی سیال عبوری قابل محاسبه می‌باشد. در شکل ۲، شرایط جریان عبوری از یک لوله تحت فشار، در حضور دبی‌سنج روزنه‌ای ارائه شده است.



شکل ۱- نقشه و جزئیات هندسی دبی‌سنج روزنه‌ای DN400



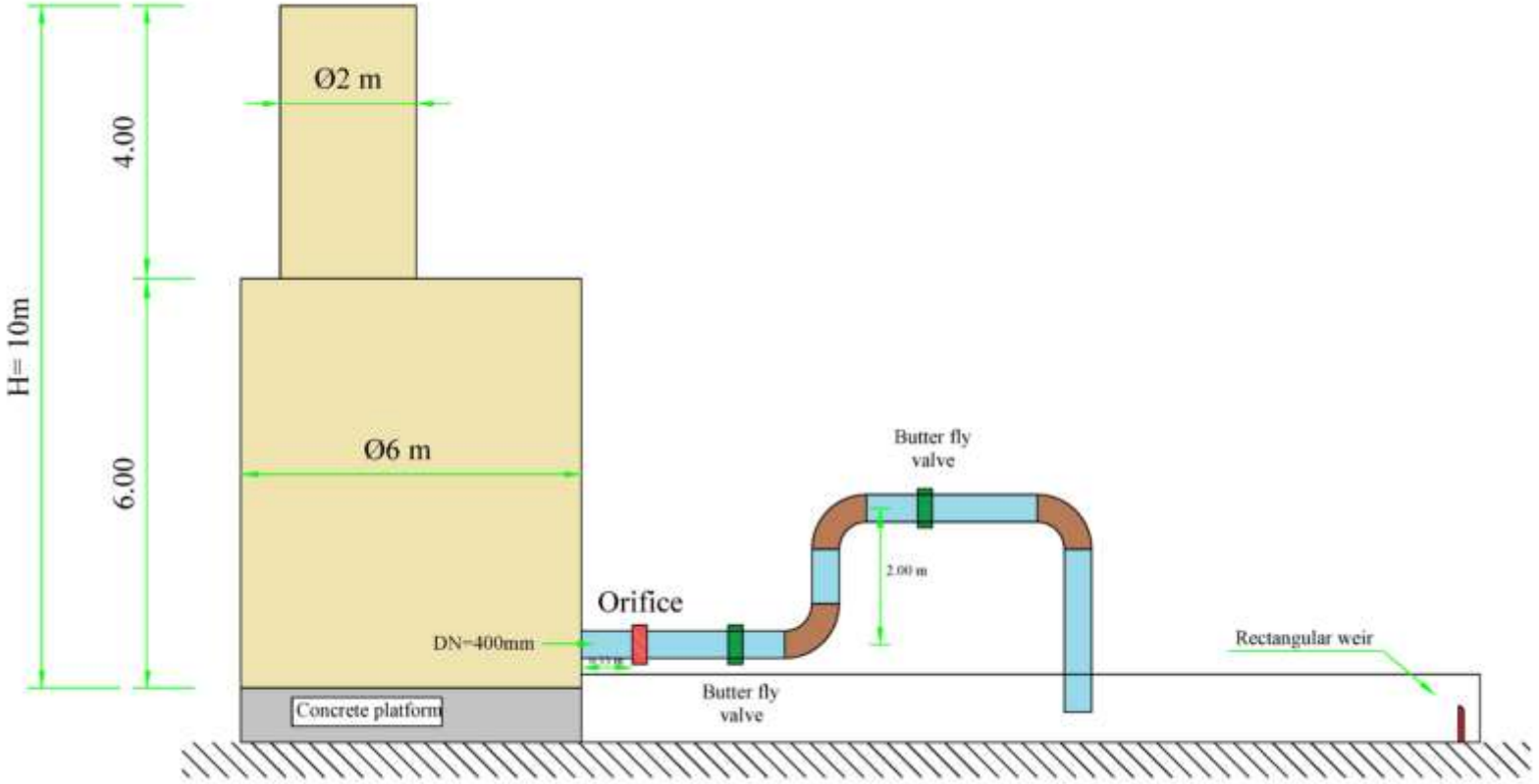
شکل ۲- نمایی از شرایط جریان در حضور دبی‌سنج روزنه‌ای

۳ شرح خدمات تعریف‌شده و مدل آزمایشگاهی

هدف از نصب و آزمایش بر روی دبی‌سنج روزنه‌ای مذکور، امکان‌سنجی وجود رابطه‌ای متقن و مشخص، بین تغییرات فشار بالادست و پایین‌دست دبی‌سنج، با تغییرات دبی عبوری، در شرایط مختلف بهره‌برداری می‌باشد. به همین منظور، محدوده دبی مطالعاتی، ۱۲۰۰-۸۰۰ مترمکعب بر ساعت در نظر گرفته شد. در شکل ۳ نمای کلی از طرح اجراشده در آزمایشگاه ارائه گردیده است که هر بخش، به تفکیک، تشریح خواهد شد.

به‌منظور تأمین ارتفاع آب لازم و دبی موردنیاز، از یک مخزن روباز فلزی استفاده شد. این مخزن به شکل استوانه بوده و مطابق شکل ۴، به قطر ۵ متر و ارتفاع ۶ متر، و در ارتفاع ۶ متری، مخزن دیگری به قطر ۲ متر و ارتفاع ۴ متر اضافه گردیده که ارتفاع کل هر دو مخزن ۱۰ متر می‌باشد. مخزن به‌وسیله چهار پمپ به ظرفیت هر یک، ۲۵۰ لیتر بر ثانیه تغذیه شده و برای جلوگیری از تلاطم آب ورودی به مخزن، از صفحات مشبک انرژی‌گیر استفاده می‌گردد. ارتفاع آب مؤثر در مخزن نیز توسط پمپ‌های ورودی و شیرهای تخلیه خروجی مخزن تنظیم می‌شود.

در جناح چپ مخزن، یک خروجی به قطر ۱۶ اینچ (با در نظر گرفتن تمهیدات لازم جهت کاهش آشفتگی جریان ورودی به لوله) ایجاد شد. سپس یک لوله به قطر ۱۶ اینچ و طول ۰/۳۳ متر تعبیه گردید (شکل ۵)



شکل ۳- شِمای کلی از طرح موردنظر جهت اجرا در مؤسسه تحقیقات آب

شکل ۴- نمایی از مخزن تأمین ارتفاع آب

شکل ۵- نمایی از ورودی مدل آزمایشگاهی (قطر ۱۶ اینچ و طول ۳۳ سانتی‌متر)

جهت استقرار لوله، شیرفلکه و زانوئی‌ها، ابتدا یک شاسی فلزی در راستای محل اتصال به هِدتانک اجرا شده است. در شکل ۶ شاسی فلزی اجراشده ارائه گردیده است. فلنج‌های قبل و بعد از هر قطعه لوله، به‌طور مناسب نصب و آب‌بندی شد (شکل ۷). دبی‌سنج روزنه‌ای DN400 در فاصله ۳۳ سانتیمتری از هِدتانک نصب شده است (شکل ۸- الف). پس از آن، یک لوله به طول ۴۰ سانتیمتر و در ادامه، یک شیر پروانه‌ای هم‌قطر با لوله (۱۶ اینچ) قرار گرفته است (شکل ۸- ب). مسیر با یک لوله به طول ۷۷ سانتیمتر به یک زانوئی ۹۰ درجه متصل می‌گردد که با یک لوله ۷۹ سانتیمتری و یک زانوئی، جریان را به ۲ متر بالاتر (برای حصول اطمینان از ایجاد شرایط جریان تحت‌فشار در محدوده دبی‌سنج روزنه‌ای) منتقل می‌کند (شکل ۸- ج). در ادامه، یک لوله ۱ متری و سپس شیرفلکه پروانه‌ای (به قطر ۱۶ اینچ) قرار گرفته است (شکل ۸- د). جهت انتقال جریان به پایین‌دست، یک لوله ۱۲۱ سانتیمتری و یک زانوئی تعبیه گردید (شکل ۸- ه).

شکل ۶- اجرای شاسی فلزی جهت نصب تأسیسات موردنظر روی آن

شکل ۷- تهیه و آماده‌سازی فلنج برای طرفین لوله‌ها

شکل ۸- تصاویر مختلفی از مراحل ساخت و آماده‌سازی مدل آزمایشگاهی

جهت آرام کردن جریان خروجی، از یک مخزن فلزی سه‌بخشی (بخش اول، به‌طول ۲، عرض ۱/۸ و ارتفاع ۱/۴ متر؛ بخش دوم، به‌طول ۲/۱، عرض ۱/۴ و ارتفاع ۰/۷۳ متر و بخش سوم، به‌طول ۲، عرض ۱/۶ و ارتفاع ۱/۲ متر) استفاده شد (شکل ۹).در ابتدا، مسیر انتقال جریان به کانال اندازه‌گیری دبی مطابق شکل ۱۰ پیاده گردید اما پس از آب‌اندازی مدل، مشخص شد که آشفتگی و تلاطم جریان در کانال منتهی به سازه اندازه‌گیری بسیار زیاد بوده و این آشفتگی و نوسانات سطح آب، باعث خطا در اندازه‌گیری شدت‌جریان خروجی خواهد شد. به همین منظور، مسیر انتقال جریان به سمت کانال اندازه‌گیری دبی، تغییر یافته و جهت توسعه‌یافتگی کامل جریان خروجی و آرام کردن هر چه بیشتر آن، جریان پس از ورود به مخزن فلزی، به داخل یک حوضچه استغراق (طول ۹ متر، عرض ۴/۵ متر و عمق ۱/۹ متر) هدایت گردید (شکل ۱۱).

شکل ۹- نمایی از مخزن فلزی پایین‌دست، جهت کاهش آشفتگی و تلاطم جریان خروجی

شکل ۱۰- مسیر اولیه انتقال جریان به کانال اندازه‌گیری دبی در پایین‌دست

شکل ۱۱- نمایی از حوضچه استغراق پایین‌دست و مسیر نهایی انتقال جریان به سمت کانال اندازه‌گیری دبی

جریان خروجی از حوضچه استغراق در نهایت پس از انتقال به یک کانال مستطیلی مطابق شکل ۱۲ به‌سوی سرریز اندازه‌گیری جریان هدایت شده و در نهایت به مخزن زیرزمینی آزمایشگاه منتقل می‌گردد. این فرآیند، یک سیستم گردشی تأمین آب در تمام طول آزمایش‌ها را فراهم می‌کند. همچنین در ورودی کانال، با تعبیه بلوک‌های سفالی و انرژی‌شکن‌های فلزی (صفحات مشبک) سعی گردید تا جریان نسبتاً آرامی در طول کانال ایجاد گردد تا نوسانات سطح آب به حداقل ممکن رسیده و امکان اندازه‌گیری دقیق بار آبی و در نتیجه دبی جریان فراهم شود (شکل ۱۲). در شکل ۱۳ نمایی از بخش‌های مختلف مدل هیدرولیکی در شرایط آب‌اندازی مشاهده می‌شود.

شکل ۱۲- کانال هدایت‌کننده جریان به سرریز اندازه‌گیری

شکل ۱۳- تصاویری از شرایط مختلف جریان در بخش‌های مختلف

۴ ابزارهای اندازه‌گیری

۴-۱ خط‌کش مانومتر

برای اندازه‌گیری ارتفاع آب در مخزن تأمین آب، از یک مانومتر و یک خط‌کش مدرج استفاده شده است که با دقت ±۱ میلی‌متر می‌توان هِد آب داخل مخزن را اندازه‌گیری نمود (شکل ۱۴).

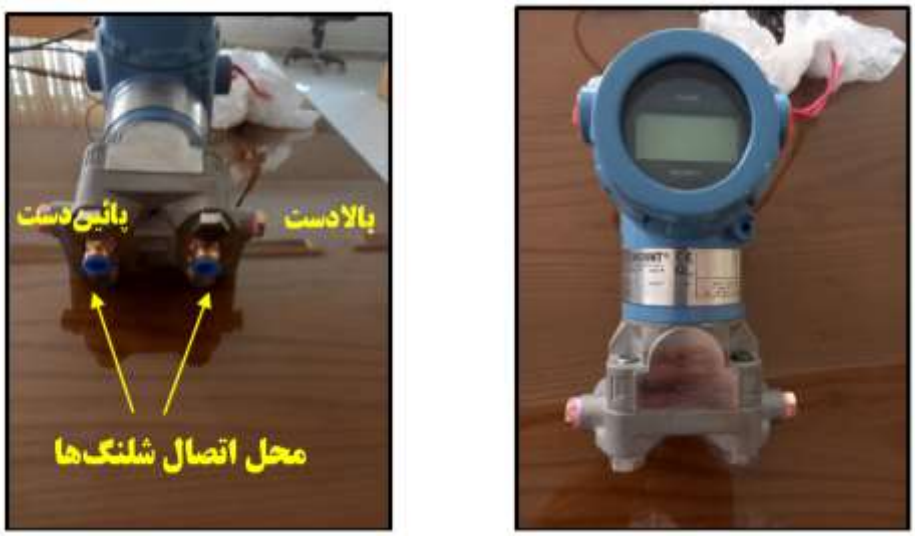
۴-۲ دستگاه فشارسنج

جهت ثبت مقادیر اختلاف فشار در بالادست و پایین‌دست دبی‌سنج روزنه‌ای از یک دستگاه فشارسنج دیجیتال[1] (Rousemount, Model 3051/3001, USA) استفاده شده است. این دستگاه دارای دو محل برای اتصال شلنگ می‌باشد که یک‌طرف آن به قسمت بالادست و طرف دیگر به قسمت پایین‌دست دبی‌سنج روزنه‌ای متصل شده و می‌تواند مقدار اختلاف فشار طرفین دبی‌سنج روزنه‌ای را برحسب میلی‌بار بر روی صفحه نمایشگر خود، با دقت ±۰/۱ میلی‌بار نشان دهد. نمایی از دستگاه مذکور در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود.

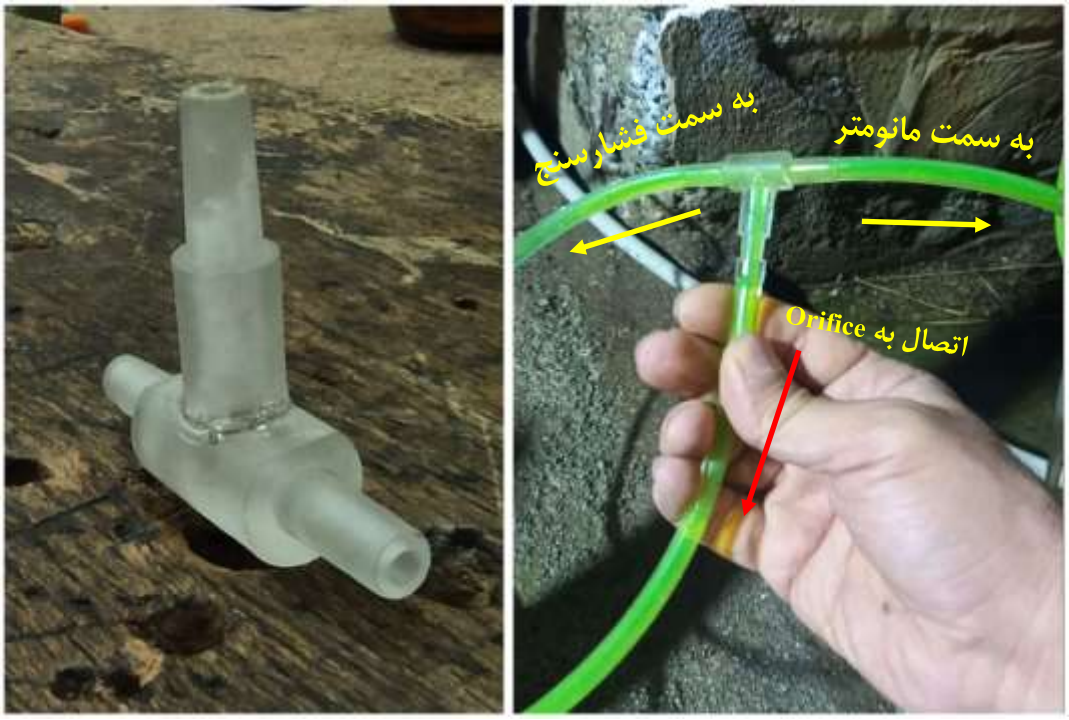
جهت اطمینان از عملکرد دستگاه فشارسنج، ترتیبی اتخاذ شد تا فشار بالادست و پایین‌دست دبی‌سنج روزنه‌ای، به‌طور هم‌زمان، هم از طریق دستگاه و هم با استفاده از شلنگ‌های پیزومتر اندازه‌گیری شود. برای این کار، از یک سه‌راهی مطابق شکل ۱۶ بهره‌برداری شده است.

[1] Pressure Transmitter

شکل ۱۴- نمایی از مانومتر روی هِدتانک و خط‌کش مدرج کنار آن، جهت قرائت ارتفاع آب داخل مخزن



شکل ۱۵- نمایی از دستگاه فشارسنج مورد استفاده



شکل ۱۶- ساخت دو عدد سه‌راهی جهت اندازه‌گیری توأم فشار با مانومتر و فشارسنج دیجیتال

۳-۴ اندازه‌گیری دبی جریان

جریان پس از خروج از حوضچه استغراق، وارد کانال عریض و طولانی گردیده که در اِنتها، سرریز لبه تیز مستطیلی مطابق شکل ۱۷ نصب شده و امکان اندازه‌گیری دبی جریان را فراهم می‌نماید. لبه سرریز مستطیلی بر اساس استانداردهای معمول ساخته و واسنجی شده است و منحنی دبی- اشل تهیه‌شده آن مورد استفاده قرار خواهد گرفت. اندازه‌گیری بار آبی روی سرریز نیز با استفاده از یک لیمنیمتر متصل در کنار کانال مطابق شکل ۱۷ که با لوله رابط به داخل کانال متصل گردیده بود، با دقت ۰/۱± میلی‌متر انجام پذیرفت.

رابطه کلی اندازه‌گیری دبی جریان روی سرریز مستطیلی عبارت است از:

$$Q = \frac{2}{3}\sqrt{2g}C_d L h^{\frac{3}{2}} \qquad (۱)$$

که در این رابطه، Q، دبی جریان (مترمکعب بر ثانیه)؛ g، شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)؛ C_d، ضریب دبی جریان؛ L، طول سرریز (متر) و h، فاصله لبه سرریز تا بالاترین تراز آب پشت سرریز (متر) می‌باشد. لازم به ذکر است تغییرات ضریب دبی جریان (C_d) به‌صورت تابعی از h/P، بر اساس معادله ربوک (۱۹۲۹) به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$C_d = 0.611 + 0.08\frac{h}{P} \qquad (۲)$$

این رابطه برای $h/P \leq 5$ کاربرد دارد. در رابطه فوق، P، فاصله لبه سرریز تا کف کانال می‌باشد.

شکل ۱۷- سرریز لبه تیز مستطیلی و لیمنیمتر مورد استفاده جهت اندازه‌گیری تغییرات بار آبی بالادست سرریز

۵ نتایج و بحث

۵-۱ تغییرات فشار بالادست و پایین‌دست نسبت به دبی جریان

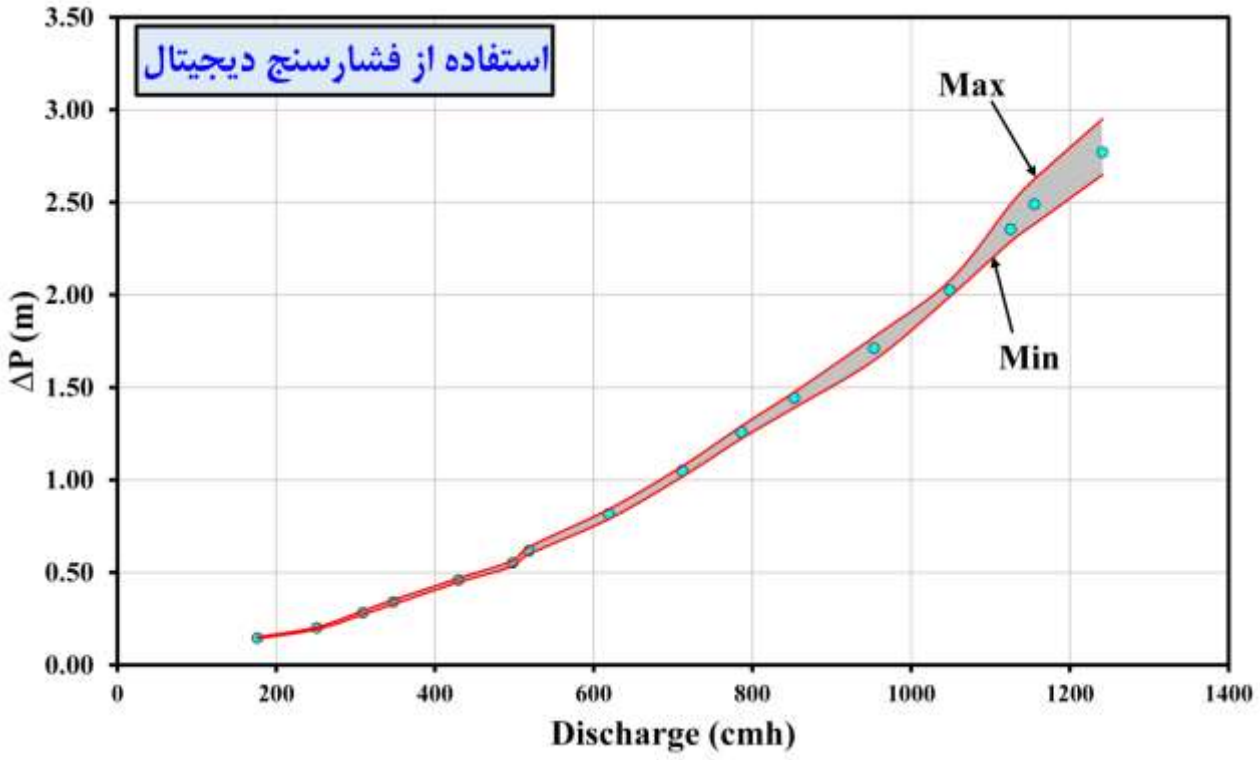
پس از نصب و آماده‌سازی مدل فیزیکی، آزمایش‌ها در محدوده تغییرات دبی $176.5 \le Q\left(m^3.h^{-1}\right) \le 1241.2$، با هدف بررسی وجود رابطه‌ای معین بین تغییرات فشار بالادست و پایین‌دست دبی‌سنج روزنه‌ای DN400 (ΔP) با میزان دبی عبوری از آن (Q)، انجام شد. در شکل ۱۸ روند تغییرات فشار در مقابل دبی جریان ارائه گردیده است. با توجه به شکل مذکور، مشاهده می‌شود که روند مشخصی بین دو پارامتر موردنظر وجود داشته و با افزایش میزان دبی عبوری از دبی‌سنج، اختلاف فشار بین دو سَر آن، افزایش می‌یابد. به‌گونه‌ای که این اختلاف فشار به اِزای دبی ۳۰۸/۹ مترمکعب در ساعت، به‌طور متوسط ۰/۲۸ متر بوده و برای دبی ۱۲۴۱/۲ مترمکعب در ساعت، به ۲/۷۷ متر می‌رسد. ذکر این نکته ضروری است که پس از پایداری شرایط جریان بر روی یک دبی معین، مشاهده شد که میزان اختلاف فشار ثبت‌شده توسط دستگاه اندازه‌گیری، تغییرات جزئی داشته و دارای نوسان است. به همین منظور و با هدف برداشت نوسانات فشار، به اِزای هر دبی مشخص، تعداد ۲۰ برداشت از دستگاه اندازه‌گیری ΔP انجام شد. در شکل ۱۸ نیز حد بیشینه و کمینه مقادیر فشار اندازه‌گیری‌شده مشاهده می‌گردد. جهت درک بهتر نوسانات فشار ثبت‌شده به ازای دبی‌های مختلف، روند تغییرات نوسانات مذکور (نسبت به مقدار متوسط ΔP) در شکل ۱۹ ارائه شده است. با توجه به شکل مذکور، در دبی‌های پایین، مقدار نوسانات فشار کم بوده و با افزایش دبی عبوری، محدوده این نوسانات افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که، در $Q = 176.5 m^3.h^{-1}$، این نوسانات در محدوده $-0.33cm \le \left(\Delta P_i - \Delta P_{ave}\right) \le +0.50cm$ بوده و با افزایش دبی به $Q = 1241.2 m^3.h^{-1}$، مقدار نوسانات فشار افزایش یافته و در محدوده $-12.05cm \le \left(\Delta P_i - \Delta P_{ave}\right) \le +18.11cm$ قرار می‌گیرد. در صورتی‌که بخواهیم مقدار نوسانات فشار را به‌صورت نسبتی از اختلاف فشار نشان دهیم، از رابطه زیر می‌توان استفاده نمود:

$$PF\left(\%\right) = \frac{\left(\Delta P_i - \Delta P_{ave}\right)}{\left(\Delta P_{ave}\right)} \times 100 \qquad (۳)$$

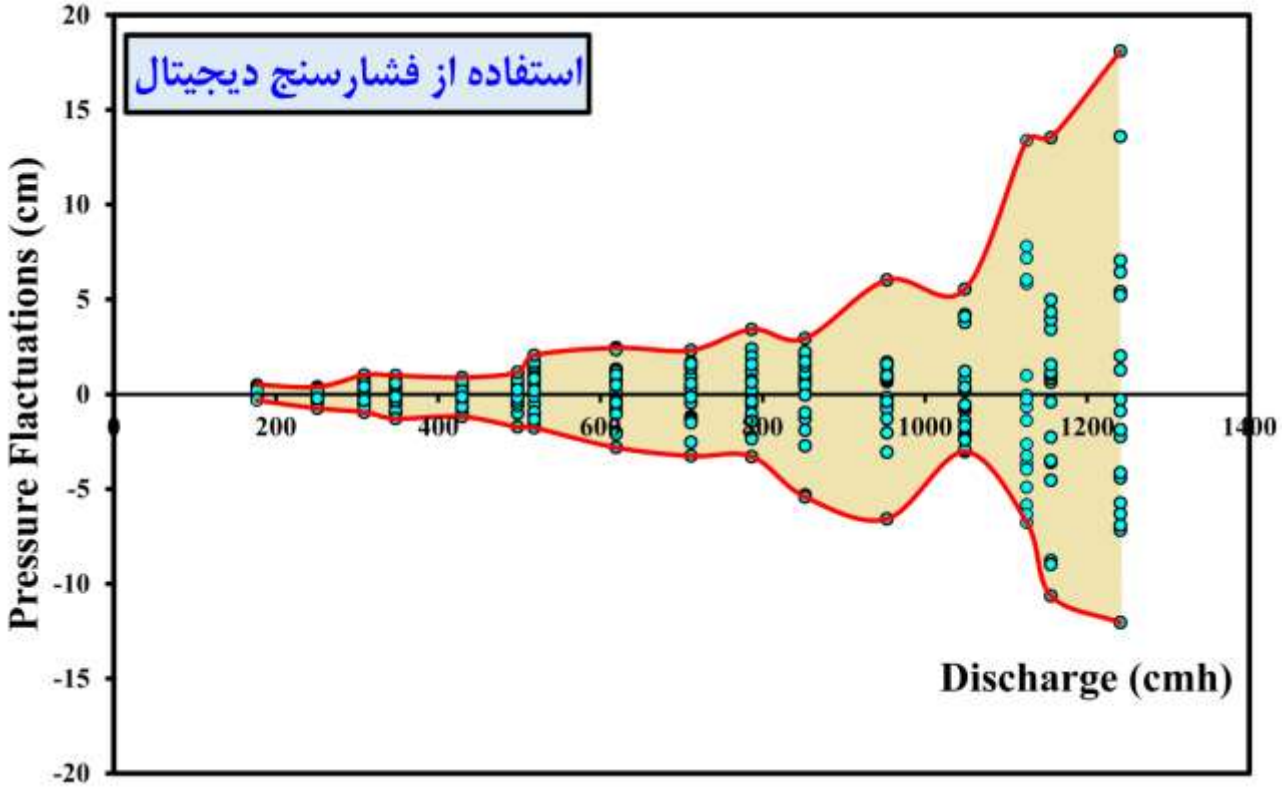
که در این رابطه، $PF\left(\%\right)$، درصد نوسانات فشار[2]؛ ΔP_i، اختلاف فشار اندازه‌گیری‌شده در هر بار قرائت (متر) و ΔP_{ave}، متوسط اختلاف فشار مستخرج (متر) از ۲۰ بار قرائت، به اِزای یک دبی معین می‌باشد. حداکثر مقدار $PF\left(\%\right)$، برای دبی ۱۲۴۱/۲ مترمکعب در ساعت ثبت شده و معادل $PF_{\max} = 10.9\%$ بدست آمد. به‌عبارت بهتر، مقدار نوسانات فشار به ازای هر

[2] Pressure Flactuations (PF)

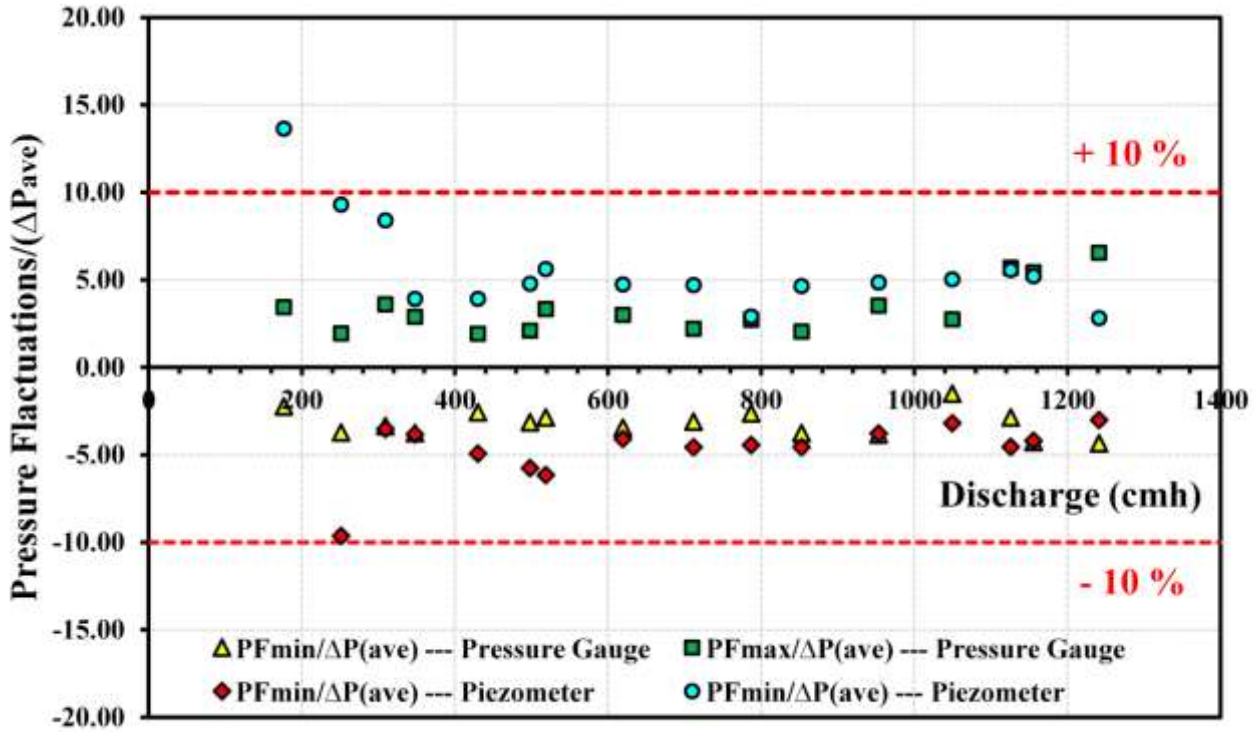
دبی معین، بایستی نسبت به مقدار متوسط اختلاف فشار در آن دبی (ΔP_{ave}) مورد ارزیابی قرار گیرد. در شکل ۲۰ این موضوع به تصویر کشیده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، تنها به ازای دبی ۱۷۶/۴۹ مترمکعب در ساعت، نسبت نوسانات فشار به متوسط اختلاف فشار ($(PF/\Delta P_{ave})\times 100$) بیش از ۱۰ درصد بوده و در سایر موارد، این نسبت در محدوده ۱۰± درصد قرار گرفته است که بیانگر ناچیز بودن نوسانات فشار می‌باشد.



شکل ۱۸- روند تغییرات اختلاف فشار بالادست و پایین‌دست دبی‌سنج روزنه‌ای DN400 نسبت به دبی خروجی از آن، مبتنی بر اندازه‌گیری فشار با دستگاه دیجیتال



شکل ۱۹- روند تغییرات نوسانات فشار، در شرایط استفاده از فشارسنج دیجیتال

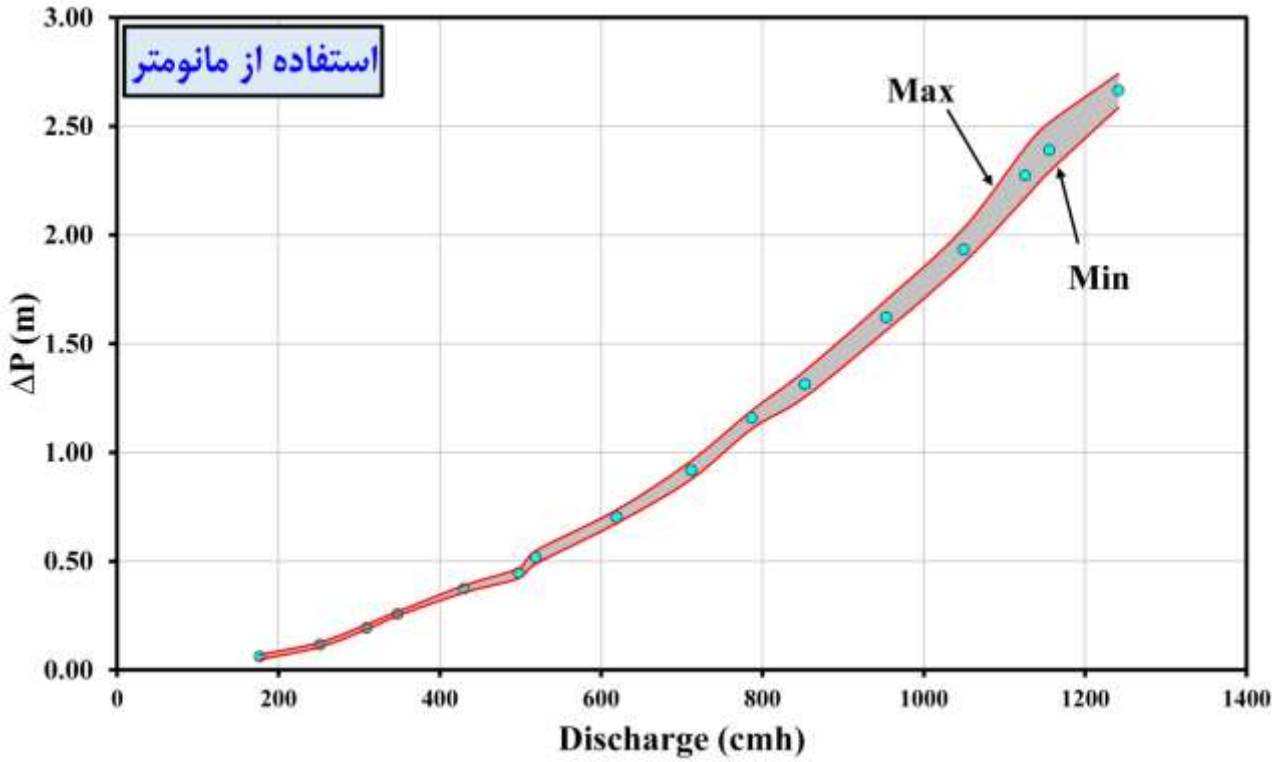


شکل ۲۰- روند تغییرات دبی خروجی در مقابل نسبت نوسانات فشار به متوسط اختلاف فشار بالادست و پایین‌دست ($(PF/\Delta P_{ave})\times 100$) دبی‌سنج روزنه‌ای DN400

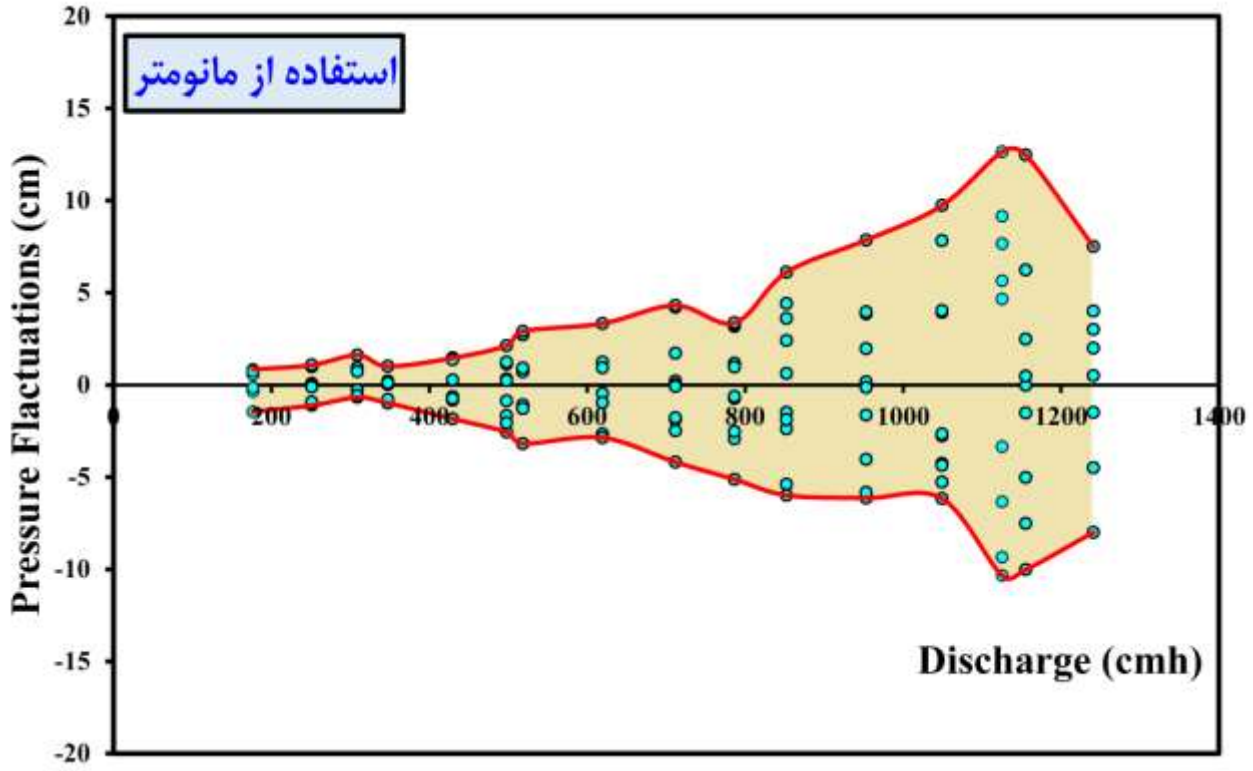
۵-۲ واسنجی (کالیبراسیون) دستگاه فشارسنج دیجیتال

همانطور که در بخش قبلی ذکر گردید، جهت اطمینان از اندازه‌گیری تغییرات فشار با دستگاه دیجیتال و جهت واسنجی آن، تغییرات فشار به‌ازای دبی‌های مختلف، به‌طور همزمان، با استفاده از پیزومتر نیز اندازه‌گیری و برداشت گردید. در شکل ۲۱ روند تغییرات اختلاف فشار بالادست و پایین‌دست دبی‌سنج روزنه‌ای DN400 در مقابل دبی خروجی نشان داده شده است. همچنین در شکل ۲۲ روند تغییرات نوسانات فشار (نسبت به مقدار متوسط ΔP)، در شرایط استفاده از پیزومتر، ارائه شده است. مشاهده می‌شود که نوسانات فشار در شرایط استفاده از پیزومتر نیز وجود داشته و ارتباطی به دستگاه فشارسنج دیجیتال ندارد و دلیل آن، عدم رعایت فاصله مجاز از بالادست و پایین‌دست دبی‌سنج روزنه‌ای می‌باشد. در شرایط استفاده از پیزومتر نیز مقدار نوسانات فشار، به ازای دبی‌های کم، پایین بوده و در صورت افزایش دبی، بالا خواهد رفت. موضوع مهم، مقایسه روند تغییرات ΔP و

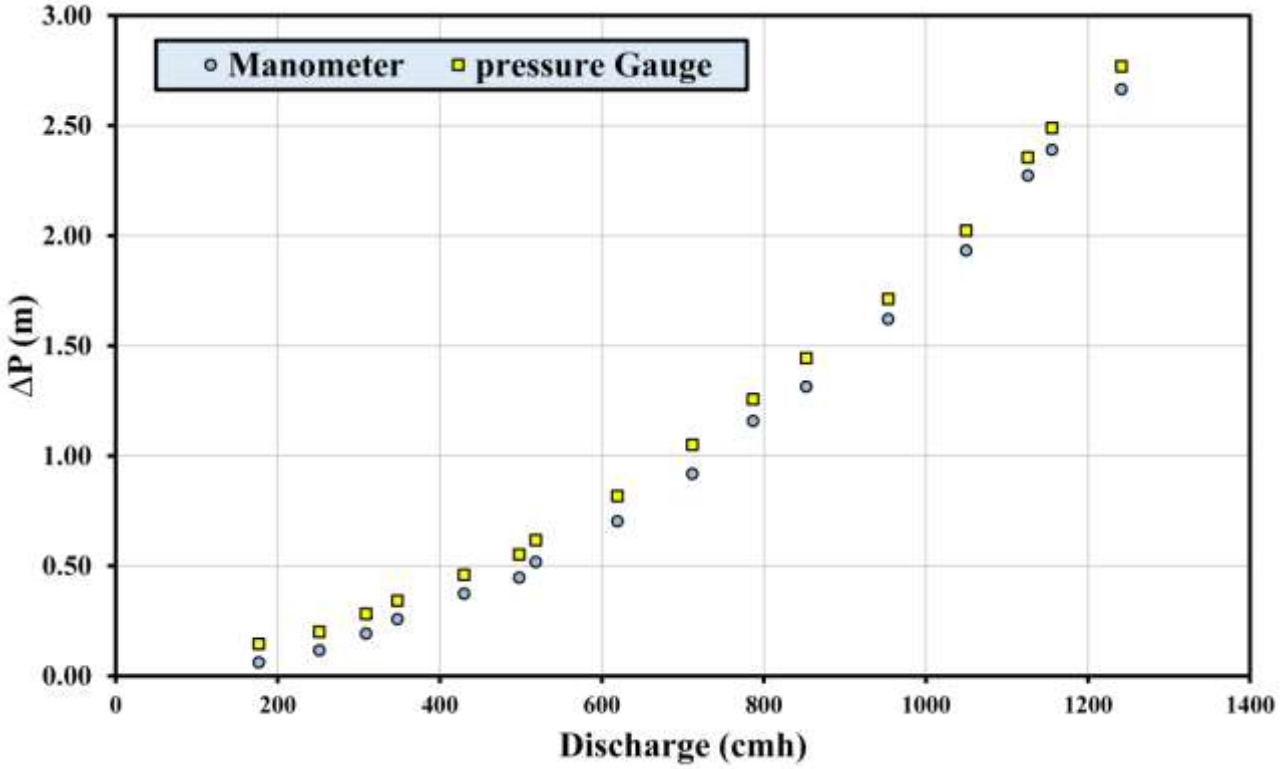
Q در شرایط استفاده از فشارسنج دیجیتال و پیزومتر، با یکدیگر می‌باشد (شکل ۲۳). با توجه به شکل ۲۳ می‌توان نتیجه گرفت که اندازه‌گیری‌های انجام‌شده توسط دستگاه فشارسنج مطلوب و قابل اطمینان است.



شکل ۲۱- روند تغییرات اختلاف فشار بالادست و پایین‌دست دبی‌سنج روزنه‌ای DN400 نسبت به دبی خروجی از آن، مبتنی بر اندازه‌گیری فشار با پیزومتر



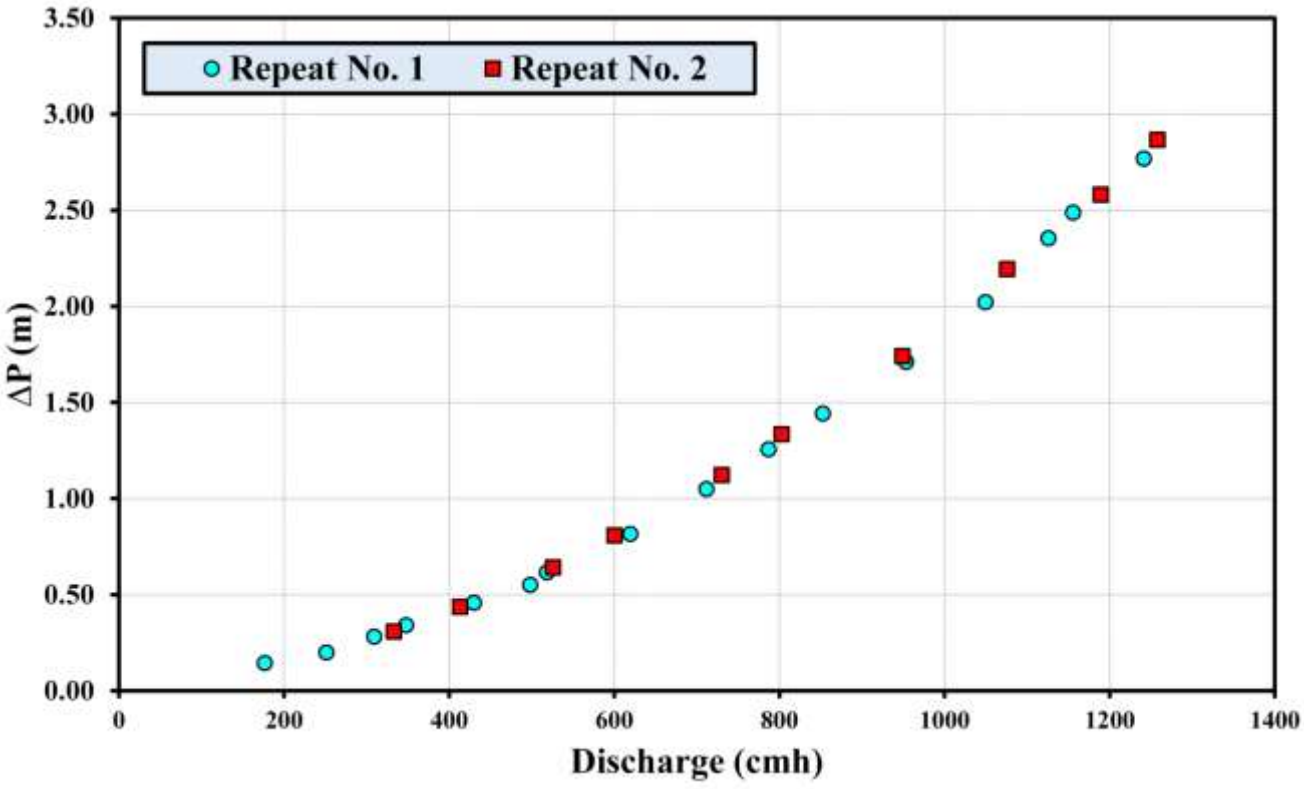
شکل ۲۲- روند تغییرات نوسانات فشار، در شرایط استفاده از پیزومتر



شکل ۲۳- مقایسه روند تغییرات اختلاف فشار بالادست و پایین‌دست دبی‌سنج روزنه‌ای DN400 با دبی خروجی، در شرایط استفاده از فشارسنج دیجیتال و پیزومتر

۵-۳ بررسی تأثیر تکرار آزمایشات بر منحنی تغییرات Q - ΔP

یکی دیگر از نگرانی‌های موجود در ارتباط با دبی‌سنج روزنه‌ای DN400 و روند تغییرات اختلاف فشار در مقابل دبی خروجی آن، عدم یکسان بودن نتایج، در صورت تکرار مجدد آزمایشات بود. به همین منظور، داده‌برداری در محدوده تغییرات دبی سری اول آزمایش‌ها، مجدداً انجام گردید. نتایج مقایسه دو تکرار موردنظر در قالب شکل ۲۴ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که منحنی‌های موردنظر به ازای دو تکرار مختلف کاملاً منطبق بر هم بوده و روند تغییرات یکسانی داشته و هیچ‌گونه اختلافی با یکدیگر ندارند. بنابراین می‌توان با قاطعیت، تأثیرگذاری تکرار آزمایشات بر روند تغییرات $Q-\Delta P$ را رد نمود.



شکل ۲۴- روند تغییرات ΔP - Q، در صورت تکرار مجدد آزمایشات

۵-۴ تعیین اختلاف منحنی تغییرات Q - ΔP در شرایط استاندارد (نظری) و آزمایشگاهی

همان‌طور که قبلاً عنوان شد، یکی از دلایل انجام مطالعه حاضر، عدم رعایت فاصله استاندارد دبی‌سنج روزنه‌ای از بالادست و پایین‌دست، در فیلد می‌باشد. مطابق استاندارد، فواصلی که بایستی به‌عنوان حد استاندارد در بالادست و پایین‌دست دبی‌سنج در شرایط نصب رعایت شود، به ترتیب، ۱۰ برابر و ۵ برابر قطر لوله می‌باشد (میلر، ۱۹۸۳). بدین ترتیب، دبی‌سنج روزنه‌ای در شرایطی بایستی مورد استفاده قرار گیرد که به ترتیب، در فواصل ۴ و ۲ متری از بالادست و پایین‌دست آن، هیچ‌گونه تجهیزات و متعلقاتی وجود نداشته باشد. با این وجود و به دلیل محدودیت‌های اجرایی، نمی‌توان شرایط استاندارد را رعایت نمود. به همین منظور، پس از تعیین روند تغییرات $Q-\Delta P$ در شرایط موجود (شکل ۲۱)، مقایسه‌ای با روند تغییرات آن در شرایط استاندارد انجام گرفت. در شکل ۲۵ مقایسه تغییرات $Q-\Delta P$ در دو حالت شرایط استاندارد و شرایط فعلی (عدم رعایت فواصل استاندارد بالادست و پایین‌دست) نشان داده شده است. همچنین جهت ارزیابی دقت و صحت منحنی تغییرات $Q-\Delta P$ در شرایط موجود با حالت استاندارد، از شاخص‌های آماری میانگین قدر مطلق خطای نسبی[3] ($MARE$)، بیشینه خطا[4] (ME) و ریشه میانگین مربعات خطا[5] ($RMSE$) مطابق معادلات زیر استفاده شد:

$$MARE\ (\%)=\frac{100}{n}\sum\left|\frac{\left(\Delta P_{Theo}-\Delta P_{Exp}\right)}{\left(\Delta P_{Theo}\right)}\right|\times 100 \qquad (۴)$$

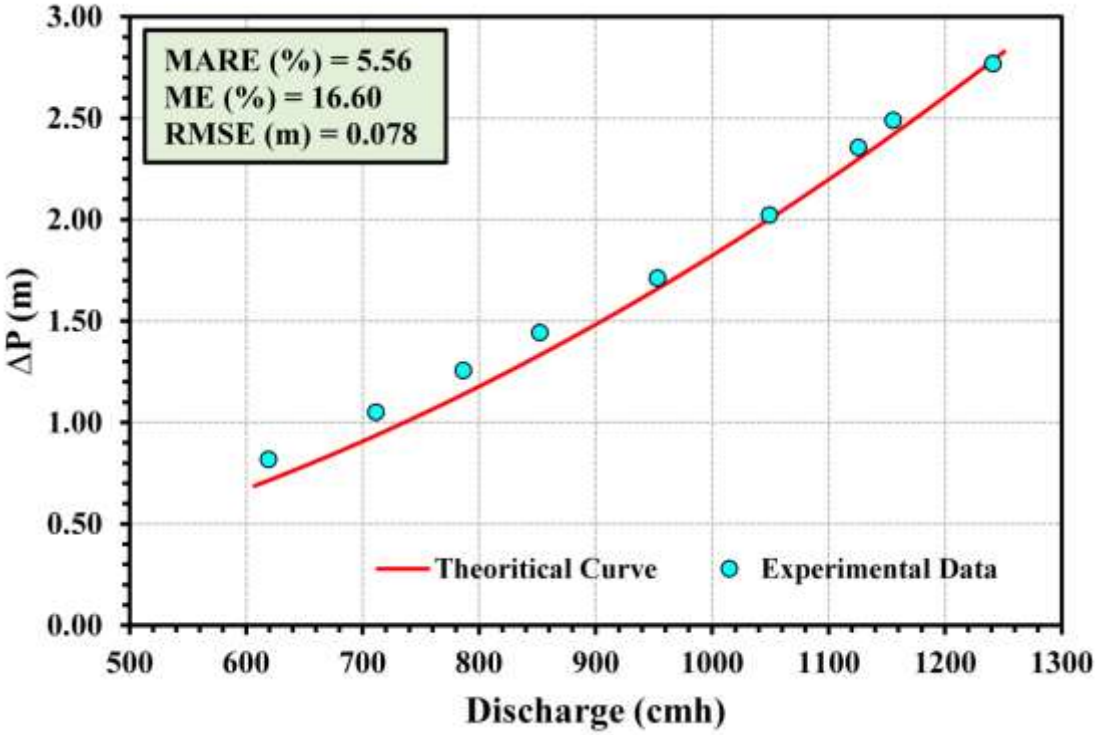
$$ME\ (\%)=\left(Max\left|\frac{\left(\Delta P_{Theo}-\Delta P_{Exp}\right)}{\left(\Delta P_{Theo}\right)}\right|\right)\times 100 \qquad (۵)$$

$$RMSE\ (m)=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\Delta P_{Theo}-\Delta P_{Exp}\right)^2} \qquad (۶)$$

که در این روابط، ΔP_{Theo} و ΔP_{Exp}، به ترتیب اختلاف فشار در شرایط استاندارد و موجود (بر حسب متر)، به ازای یک دبی ثابت و n، تعداد داده‌های مورد استفاده می‌باشد. با توجه به شکل ۲۵، اختلاف بین منحنی تغییرات $Q-\Delta P$ در شرایط استاندارد و شرایط موجود بسیار ناچیز است؛ به‌گونه‌ای مقادیر شاخص‌های آماری مورد استفاده، $MARE\ (\%)=5.56$، $ME\ (\%)=16.60$ و $RMSE\ (m)=0.078$ به دست آمد که بیانگر این موضوع است که عدم رعایت استانداردهای توصیه‌شده (به دلیل محدودیت‌های اجرایی) تأثیر چندانی بر روند تغییرات $Q-\Delta P$ ندارد.

---

[3] Mean Absolute Relative Error (MARE)
[4] Maximum Error (ME)
[5] Root Mean Square Error (RMSE)



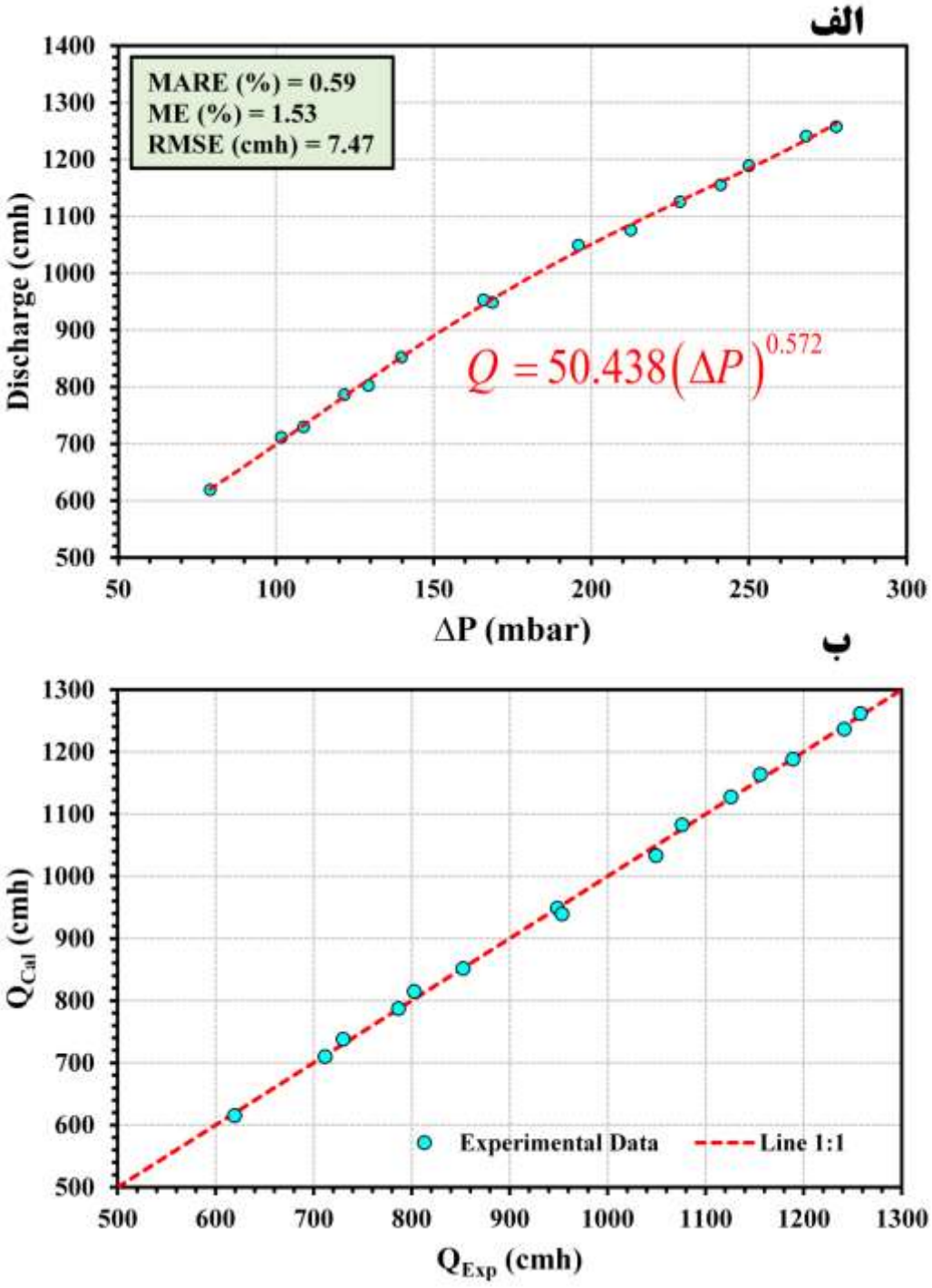
شکل ۲۵- مقایسه روند تغییرات ΔP - Q در دو حالت استاندارد و موجود

۵-۵ توسعه معادله جهت تخمین Q به‌صورت تابعی از ΔP

جهت استفاده راحت‌تر از منحنی تغییرات $Q-\Delta P$، در فیلد و در شرایط مختلف بهره‌برداری، ضروری است در محدوده کارکرد دبی‌سنج روزنه‌ای DN400، معادله‌ای جهت تخمین دبی (Q) به‌صورت تابعی از پارامتر اختلاف فشار (ΔP) توسعه یابد. به همین منظور، مبتنی بر نتایج آزمایشگاهی، معادله زیر جهت برآورد مقدار شدت‌جریان خروجی از دبی‌سنج روزنه‌ای DN400 پیشنهاد می‌شود:

$$Q = 50.438\left(\Delta P\right)^{0.572} \qquad (۷)$$

که در این رابطه، Q، دبی جریان (مترمکعب در ساعت) و ΔP، اختلاف فشار بالادست و پایین‌دست (میلی‌بار) دبی‌سنج روزنه‌ای می‌باشد. در شکل ۲۶ دقت و صحت معادله پیشنهادی ارائه شده است. مشاهده می‌شود که دقت معادله پیشنهادی بسیار مطلوب است؛ به‌طوری‌که مقادیر شاخص‌های آماری تعریف‌شده، $MARE\ (\%) = 0.59$، $ME\ (\%) = 1.53$ و $RMSE\ (cmh) = 7.47$ به دست آمد.



شکل ۲۶- الف) روند تغییرات منحنی Q - ΔP، در شرایط استفاده از معادله توسعه‌یافته ب) روند تغییرات مقادیر جریان خروجی از دبی‌سنج روزنه‌ای DN400

۶ نتیجه‌گیری

با توجه به آزمایش‌های انجام‌شده و مطالعات صورت‌گرفته و همچنین، مبتنی بر شاخص‌های ارزیابی تعریف‌شده، به نظر می‌رسد استفاده از دبی‌سنج روزنه‌ای DN400 در هندسه خاص ارائه‌شده تأییدشده و ممکن می‌باشد.

منابع مورد استفاده

- Miller, Richard W. "Flow measurement engineering handbook." (1983).
- Roebuck, A. "Reports to the Ministry of Agriculture and Fisheries." (1929).

پیوست‌ها

	تعداد برداشت‌ها	آزمایش ۱	آزمایش ۲	آزمایش ۳	آزمایش ۴	آزمایش ۵	آزمایش ۶	آزمایش ۷	آزمایش ۸
		Q (cmh)	Q (cmh)	Q (cmh)	Q (cmh)	Q (cmh)	Q (cmh)	Q (cmh)	Q (cmh)
		1125.55	**1049.25**	**953.27**	**852.29**	**786.46**	**711.52**	**619.18**	**518.38**
تغییرات فشار --- فشارسنج دیجیتال (میلی‌بار)	1	241	196	166.4	141.7	124	103.3	79.6	61
	2	233.7	196.1	167.2	139.8	119.5	100.5	79.2	61.3
	3	233.9	199.5	166.5	141.2	125	102	78.9	60.5
	4	235.6	193.5	166.8	140.4	123.6	102.6	80.4	58.8
	5	228	196.6	167.4	140.3	122.9	103.9	81.5	61.7
	6	221.5	192.9	166.5	141.7	121.1	101.2	79.8	60.8
	7	235	195	166.6	140.6	122.8	100.2	80.3	60.3
	8	228	201.2	165.6	140.8	122.3	103.3	81.4	59.2
	9	225.5	195.2	166.8	134.6	121.9	102.5	78.8	58.7
	10	227.4	193	167.3	140.2	120.5	98.5	79.8	60.6
	11	226.7	193.8	163.8	139.7	123.2	103	80.1	60.2
	12	222.4	199.9	159.4	137.1	119.4	100.4	78.6	59.8
	13	221.9	196.2	166.7	138.5	121.4	99.2	77.2	58.1
	14	224.5	194.5	165.2	134.5	122.4	100.3	78.3	59.6
	15	227.8	199.8	163.8	141.2	120.6	101.9	78.7	58.8
	16	226.7	195.3	165	137.9	120.7	102.2	78.7	58
	17	224.2	193.6	171.6	138.8	121.32	103.2	79.6	60.5
	18	223.3	194.2	165.4	141.9	118.5	100.2	77.1	58
	19	229	197	164.5	141.4	120.3	101.5	78.1	58.4
	20	224.9	193.5	162.8	142.6	122.3	103.2	76.4	59.9
تغییرات فشار --- پیزومتر (متر آب)	1	2.17	1.905	1.605	1.338	1.17	0.893	0.715	0.525
	2	2.24	1.89	1.56	1.375	1.151	0.92	0.698	0.507
	3	2.33	1.871	1.641	1.29	1.129	0.935	0.676	0.545
	4	2.365	1.88	1.7	1.32	1.19	0.96	0.715	0.526
	5	2.35	1.972	1.623	1.299	1.152	0.918	0.693	0.505
	6	2.4	2.03	1.66	1.26	1.168	0.961	0.715	0.525
	7	2.21	2.011	1.581	1.295	1.191	0.899	0.693	0.486
	8	2.18	1.889	1.563	1.254	1.133	0.917	0.674	0.527
	9	2.17	1.973	1.661	1.35	1.107	0.876	0.712	0.547
	10	2.32	1.906	1.62	1.358	1.192	0.9	0.736	0.486

	تعداد برداشت‌ها	آزمایش ۹	آزمایش ۱۰	آزمایش ۱۱	آزمایش ۱۲	آزمایش ۱۳	آزمایش ۱۴	آزمایش ۱۵	آزمایش ۱۶
		Q (cmh)	Q (cmh)	Q (cmh)	Q (cmh)	Q (cmh)	Q (cmh)	Q (cmh)	Q (cmh)
		497.82	**429.68**	**347.49**	**308.91**	**251.19**	**176.49**	**1241.17**	**1155.44**
تغییرات فشار --- فشارسنج دیجیتال (میلی‌بار)	1	53.9	45.3	33.9	26.8	19.2	14.3	262.5	254.1
	2	52.9	44.9	32.1	28	19.3	13.9	274.9	238.8
	3	51.7	44.3	33.3	27.8	19.6	14.2	267.8	237.5
	4	54.4	44.4	32.5	28.3	19.8	14.1	274.3	244.8
	5	54.45	45.3	32.9	27.7	19.6	14	285.6	241.6
	6	53.7	44.5	33.4	27.4	19.7	13.9	265.9	241.8
	7	54.11	45.3	32.8	26.5	19.5	13.9	263.78	244.3
	8	52.4	44.8	32.2	27.8	19.8	14.6	267.2	242
	9	54.5	44.5	33.1	26.4	19.4	14.3	281.22	242.1
	10	53.1	43.8	33.3	27.2	19.6	14	256.4	232.5
	11	53.2	44.6	34	27	19.7	14.1	261.3	244.3
	12	53.3	43.5	32.9	26.9	19.3	14.5	261.96	245.8
	13	53.2	43.3	32.9	27.5	19	14.4	261.11	244.8
	14	52.8	44.1	33.1	27.5	18.7	14.2	266.25	240.6
	15	53.4	45.1	31.8	27.5	19.3	14	261.37	237.6
	16	53.4	44.4	32.7	27.9	19.5	14.1	269.3	236.6
	17	53.3	44.6	33.5	26.8	19.4	14.3	273.3	232.3
	18	53	44.1	32.9	27.7	19.3	13.9	273.1	230.7
	19	53.2	43.8	34	26.6	19.6	13.8	270.02	242.5
	20	53.6	44.3	33.6	27	19.2	13.8	264.06	245.2
تغییرات فشار --- پیزومتر (متر آب)	1	0.45	0.365	0.248	0.187	0.105	0.06	2.685	2.415
	2	0.458	0.388	0.26	0.19	0.117	0.047	2.695	2.375
	3	0.468	0.376	0.25	0.186	0.116	0.058	2.705	2.29
	4	0.43	0.355	0.259	0.209	0.127	0.07	2.585	2.39
	5	0.421	0.367	0.268	0.187	0.106	0.059	2.65	2.395
	6	0.459	0.376	0.258	0.19	0.116	0.068	2.62	2.34
	7	0.468	0.388	0.25	0.202	0.107	0.058	2.65	2.4525
	8	0.426	0.366	0.259	0.19	0.115	0.067	2.67	2.415
	9	0.438	0.387	0.259	0.2	0.126	0.06	2.65	2.515
	10	0.449	0.366	0.268	0.187	0.127	0.069	2.74	2.315