

# Experimental Evaluation of The Hydraulic Characteristics of VMHS Pipeline

Sarvenaz Hosseini Ghafari<sup>1</sup>, Peyman Badiei<sup>2\*</sup>, Salah Kouchakzadeh<sup>3</sup>

1- PhD of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Tehran, Iran.

2- Associated Professor, Faculty of Engineering, University of Tehran, Iran.

3- Professor in Water Structures, Irrigation and Reclamation Department, Campus of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran.

\*[pbadiei@ut.ac.ir](mailto:pbadiei@ut.ac.ir)

Received: 18 May 2025

Revised: 1 September 2025

Accepted: 19 October 2025

Discussion: 22 June 2026



J. Hydraul.

Iranian Hydraulic Association

Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** One of the most important issues discussed in the field of reservoir management is the release of accumulated sediments. According to documented reports, 1% of the available volume of reservoirs is lost annually to sedimentation, which can increase to 3% in semi-arid regions. Sedimentation causes undesirable consequences such as increased maintenance costs, inability to control floods, reduced power generation capacity, etc. Various methods have been proposed to manage sediment inflow into the reservoir and removal of accumulated sediment.

Among these methods, an innovative VMHS hydrosuction method has significant advantages which consists of the vertical multi-hole pipe connected to a pipeline continued to downstream of the reservoir. In this method, the energy is obtained by the difference in water level between the reservoir and the outlet of the system is used to discharge the water/sediment mixture flow through the holes and drive it to the downstream. The other considerable advantages of this system are the minor loss of the reservoir water, durability and the ease of use as well as environmentally friendliness.

In this research, it is attempted to provide quantitative understanding of hydraulic characteristics of flow through inlet, holes and connections of the pipeline system for designers of VMHS.

**Methods:** This study was conducted at the Hydraulics Laboratory of the College of Agriculture and Natural Resources of the University of Tehran. A physical model consisting of a tank and a hydro-suction pipe system. The system included a perforated vertical suction pipe with various hole configurations and dimensions, designed to evaluate hydraulic behavior for different flow and pressure conditions. Experiments were categorized into three stages to provide sufficient data for estimating longitudinal and local loss coefficients with a no-hole pipe and multi-hole vertical pipe based on flow discharge and pressure measurements. A total of 28 suction pipe types were tested, varying in hole number (1, 2 and 3 holes), position, spacing, and diameter (14.25, 28.5 and 42.75 mm). Dimensional analysis using the Buckingham  $\pi$  method was employed to define key dimensionless parameters influencing the system's flow characteristics.

**Results and Discussions:** This study focuses on determining head loss coefficients in a VMHS system across various configurations and flow rates. The first stage involved measuring frictional and minor

losses using Bernoulli's and Darcy-Weisbach equations for different energy head conditions (i.e.  $\Delta H_1$ ,  $\Delta H_2$ ,  $\Delta H_3$  respectively 1.5, 2 and 2.5m). The experiments encompassed a wide range of flow discharges, and associated Reynolds numbers revealed that all flows were turbulent. Frictional loss coefficients varied based on pipe roughness and Reynolds number, while minor loss coefficients were evaluated at bends, flowmeter, inlet, and globe valves. These coefficients were then averaged and summarized for further use in subsequent stages of the study.

In the third stage, the flow was restricted to only pass through pipe holes by sealing the pipe inlet, showing reduced discharge rates that were unaffected by the  $\Delta H$ . The suction performance improved with increased hole diameter and number, and the discharge coefficient ( $C_D$ ) for each configuration was calculated. Lower  $C_D$  values indicated smoother flow entry and reduced wall resistance. Notably, "Type 3" pipes with the largest holes showed negative minor loss coefficients ( $K_b$ ), indicating that perforations served as primary inlets. Hydraulic pressure analyses showed that in high flow discharges, negative pressures developed along the pipe walls due to inlet flow curvature, and averaged pressures were used for analysis when local measurements were unreliable. The influence of hole sizes and layout on inlet pressure was also assessed, indicating minimal effects for smaller diameters.

**Conclusion:** In the first phase of the experiments, energy losses in the hydrosuction system were analyzed, including both friction loss along the pipeline and minor losses from components such as bends, flowmeter, control valve, and the pipe inlet. In the second and third stages, the flow discharge coefficients and minor loss coefficients at the suction pipe holes were calculated using experimental data and hydraulic energy equations. Results showed that negative pressure at the pipe inlet wall is due to flow curvature and compression, and at higher discharges, the averaged inlet pressure becomes negative, with larger hole diameters leading to increased inlet pressure and greater flow contribution from side holes.

**Keywords:** Removal sediment in reservoir, Hydrosuction system, Loss coefficient in pipeline, VMHS

**Conflict of Interest:** The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article.

**Funding:** The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

**Data Availability Statements:** All information and results are presented in the text of the article. The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

**Authors' contribution:**

**First Author:** Investigating, Methodology, data analyzing, writing original draft preparation.

**Second Author:** Design and supervision on experiments, reviewing and acknowledging the results and editing manuscript.

**Third Author:** Design and supervision on experiments, reviewing and acknowledging the results.

**Acknowledgment:** This research was carried out as part of the Ph.D. thesis of the First author. The contribution of Hydraulics Laboratory of the School of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran is acknowledged.

# ارزیابی آزمایشگاهی خصوصیات هیدرولیکی خط لوله سیستم هیدروساکشن VMHS

سروناز حسینی غفاری<sup>۱</sup>، پیمان بدیعی<sup>۲\*</sup>، صلاح کوچک زاده<sup>۳</sup>

۱- دکتری عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تهران، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تهران، ایران.

۳- استاد سازه‌های آبی، گروه آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران.

\*pbadiei@ut.ac.ir

نشریه هیدرولیک

انجمن هیدرولیک ایران

وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir



دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۸

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۱۰

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۷

نقد و بررسی: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

**چکیده:** یکی از چالش‌های مهم عصر حاضر در زمینه مدیریت منابع آبی، تخلیه رسوبات تجمع یافته در مخازن سدها است. انباشت رسوبات باعث افزایش هزینه‌های احیای مخزن و کاهش کارایی تجهیزات سد مانند تولید برق و کنترل سیلاب می‌شود. بنابراین، بکارگیری روش‌های کارآمد برای کنترل رسوبات و تخلیه آن‌ها بسیار ضروری است. در میان روش‌های ارائه شده، روش هیدروساکشن<sup>۱</sup> VMHS به عنوان یکی از راهکارهای نوین موثر با بازدهی مناسب در تخلیه رسوبات به شمار می‌رود. در این تحقیق به شناخت بهتر از عملکرد و خصوصیات آن، موجب بهبود طراحی و افزایش بهره‌وری سیستم گردد. این تحقیق در شرایط آزمایشگاهی و با استفاده از انواع لوله‌های مکش بدون و با روزه‌های مکند با انواع قطرها و آرایش متنوع تحت سه اختلاف تراز تامین کننده انرژی سیستم استفاده شد و با کمک ابزارهای اندازه‌گیری دقیق، بده و فشار جریان بررسی و تحلیل شد. در نهایت، با کمک این داده‌ها و روابط تحلیلی تمامی افت‌های طولی و موضعی موجود در سیستم برآورد شد. همچنین، ضرایب بده جریان در روزه‌های جانبی لوله مکش تا ۱/۲ و مقادیر متوسط افت‌ها شامل افت طولی ۰/۱۷، افت موضعی در زانویی ۲/۰۹۴، دو زانویی متوالی ۲/۶۸۱، فلومتر ۱/۳۴۵، ورودی لوله مکش و شیر تویی به ترتیب برابر با ۰/۶۸۱ و ۰/۲۲۱ محاسبه شد. همچنین، ضریب افت موضعی ناشی از وجود روزه‌ها در لوله مکش تا ۱/۲ و ضریب بده جریان بده جریان در روزه‌های لوله مکش در دامنه ۰/۶۲ تا ۰/۸۵ محاسبه شد. علاوه بر آن، به بررسی دقیق فشار در دهانه لوله و اندرکنش آن با عملکرد روزه‌ها در انتقال جریان به درون سیستم پرداخته شد.

**کلیدواژگان:** رسوبدایی مخزن، سیستم هیدروساکشن، ضرایب افت در خط لوله، VMHS.

## ۱- مقدمه

پیامدهای رسوب‌گذاری است (Fan and Morris, 1992; Shetertha, et al. 2022). به صورت گسترده، روش‌های گوناگونی از جمله تخلیه جریان‌های غلیظ، فلاشینگ، لایروبی مکانیکی و هیدرولیکی (هیدروساکشن) به منظور حل این مسئله استفاده می‌شود (Brant, 2000). از میان روش‌های یاد شده، روش هیدروساکشن که با نام HSRS<sup>3</sup> شناخته شد، شامل تخلیه سریع مخلوط آب و رسوب کف

بر اساس گزارش انجمن بین‌المللی سدهای بزرگ<sup>۲</sup>، سالانه یک درصد از ظرفیت مخزن سدهای جهان در اثر رسوب‌گذاری از بین می‌رود. (Basson, 2009). کاهش ظرفیت ذخیره آب مخزن، آسیب دیدن تاسیسات برق-آبی و از دست رفتن توانایی سد در مهار کنترل سیلاب از جمله

1. Vertical Multi Hole Suction system  
2. International Committee on Large Dams (ICOLD)  
3. Hydro-suction Sediment Removal System

ظرفیت حمل رسوبها و نوع جریان توسط (Katayama and Tajima, 2013) در آزمایشگاه مورد تحقیق و مطالعه قرار گرفت. به علاوه، تاثیر آرایشهای متنوعی از روزنهها بر بازدهی بده رسوبی توسط (Katayama et al, 2013) مورد تحقیق قرار گرفت. همچنین، این روش به ازای نسبتهای مختلفی از رسوبها چسبیده رس و لای مورد ارزیابی قرار گرفت. در نتیجه تحقیقات، یک نسخه جدید شیاردار از این سامانه ارائه شد که با در نظر گرفتن عرض مناسب برای شیار آن از مکش غلظت‌های زیاد که عامل بسته شدن لوله بودند جلوگیری می‌شود (Numano et al, 2015).

عملکرد هیدرولیکی سامانه VMHS ابتدا در آزمایشگاه و سپس با مدل‌سازی عددی بررسی شد. در این تحقیق، لوله‌های مکش با قطر داخلی ۵۷ میلی‌متر با یک، دو و سه روزنه با قطرهای ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد قطر لوله انتخاب و آرایشهای متنوع جانمایی روزنهها در لوله مورد بررسی قرار گرفتند. اختلاف تراز مورد تحقیق ۱/۵، ۲ و ۲/۵ متر انتخاب شد و با اندازه‌گیری بده جریان آب خالص عبوری از روزنهها و خروجی سامانه هیدروساکشن، بازدهی هیدرولیکی هر یک از روزنهها و نیز لوله‌های مکش ارزیابی شد. نتایج تحقیق نشان داد که روزنه‌هایی با قطر ۷۵ درصد قطر لوله دارای بیشترین مقدار بازدهی هیدرولیکی بوده و با افزایش تعداد روزنهها در لوله میزان بازدهی هیدرولیکی لوله مکش تا ۸۸ درصد افزایش می‌یابد (Hosseini ghafari et al, 2020). در یک تحقیق دیگر بر روی سامانه هیدروساکشن لوله‌های روزنه دار افقی، عملکرد سامانه MHS را با شیب دادن بخش افقی لوله مکش تا ۲۰ درصد زاویه عمودی، که مکش چند روزنه شیبدار  $IMHS^5$  نامیده شد، تا حدی بهبود بخشیدند (Tavakolli et al, 2023).

در تحقیق دیگری، شاخص‌های جدیدی برای تعیین مدت زمان مناسب عملیات تخلیه رسوبها با استفاده از سامانه هیدروساکشن لوله‌های روزنه دار عمودی، با توجه به شرایط ذخیره آب مخزن و نیز تاثیرات زیست محیطی آن بر پایین دست پیشنهاد شد. در این تحقیق نشان داده شد که شاخص زمانی غلظت رسوبها خارج شده از مخزن تا

مخزن از طریق لوله مکش می‌باشد. برتری بزرگ این روش این است که انرژی مورد نیاز آن توسط اختلاف ارتفاع سطح آب درون مخزن و و تراز پایین دست سد تامین می‌شود. روش HSRS نخستین بار در مخزن سد ریوماجون<sup>۱</sup> الجزایر از سال ۱۹۸۲ تا ۱۹۹۴ اجرا شد (Bruk, 1985). از آن به بعد، محققان تحقیقات گسترده‌ای در ارتقاء عملکرد و بازدهی این سامانه انجام دادند. برای نمونه، یک سامانه HSRS برای مخزنی در کالیفرنیا پیشنهاد شد (Eftekharzade, 1987). یک سامانه هیدروساکشن دائمی برای دوره‌های کوتاه مدت نیز معرفی شد (Hotchkiss and Huang, 1995). بیش از ده مورد میدانی سامانه هیدروساکشن در چین گزارش شده است (Water News, 1993) و یک مطالعه آزمایشگاهی در راستای اندازه‌گیری و تحلیل ویژگی‌های حفره آبستنگی حاصل از سامانه یادشده انجام شد (Ullah, 2003).

یک نسخه ارتقاء یافته از سامانه هیدروساکشن به نام MHS<sup>۲</sup> ارائه شد که شامل لوله مکش در داخل بستر رسوبی است و شماری سوراخ‌های مکنده با فاصله‌های مساوی در زیر آن جانمایی شده است. در مقایسه با سامانه پیشین هیدروساکشن که در آن رسوبات از طریق دهانه ورودی لوله مکش به درون لوله مکش وارد می‌شدند، در این نسخه از طریق این روزنهها وارد می‌شوند (Okano et al, 2004).

نتایج میدانی نسخه MHS نشان داد که با قرار گرفتن لوله مکش در عمق بستر رسوبی توسعه حفره آبستنگی کاهش می‌یابد. دلیل این موضوع تاثیر پدیده قوس زدگی<sup>۳</sup> ذرات رسوبی است که در پیرامون لوله مکش در محدوده حفره آبستنگی به هم فشرده شده و باعث توقف جابجایی رسوبات می‌گردد. برای رفع این مشکل نسخه دیگری به نام VMHS<sup>۴</sup> پیشنهاد شد. این سامانه متشکل از یک لوله قائم روزنه‌دار است که باعث بهبود عملکرد ریزش رسوبات می‌شود. مزیت سامانه VMHS نسبت به سامانه MHS این است که مخلوط آب و رسوب در راستای ثقل جریان می‌یابد (Arakawa et al, 2013). عملکرد سامانه مذکور با توجه به

4. Vertical Multi-Hole Suction Pipe  
5. Incline Multi Holes Suction pipe system

1. Rioumajon  
2. Multi-Hole Suction Sand Pipe  
3. Arching

و برای ثابت ماندن سطح آب داخل مخزن از یک سرریز لبه تیز در مخزن استفاده شده است. به منظور مهار جریان خروجی از لوله هیدروساکشن، یک شیر تویی در انتهای لوله نصب شده است. لازم به ذکر است که در طول مدت زمان همه آزمایش‌ها این شیر به طور کامل باز نگه داشته شد. اندازه گیری بده و فشار جریان در طول لوله هیدروساکشن به ترتیب با کمک یک دستگاه فلومتر و تعداد نه فشارسنج از نوع Endress+Hauser ۲۵۰ میلی بار و فرکانس ۵۰ هرتز انجام شد. جدول ۱ ابعاد بخش‌های مختلف مدل آزمایشگاهی را نمایش می‌دهد. شکل ۱ نمایی از مدل آزمایشگاهی مورد استفاده و شکل ۲ تصاویری از بخش‌های مختلف این مدل را نشان می‌دهد.

برای اطمینان از دقت نتایج، تمامی ابزارهای اندازه‌گیری از جمله فلومتر و گیج‌های فشار پیش از آزمایش‌ها واسنجی شدند. بر اساس مشخصات کارخانه‌ای، خطای اندازه‌گیری فلومتر  $\pm 2\%$  و سنجنده فشار  $\pm 0.5\%$  بوده است. بررسی حساسیت نتایج نشان داد که تغییرات در این حدود تأثیر معناداری بر ضرایب افت و ضریب بده جریان ندارد و نتایج پایداری مناسبی دارند.

همان‌طور که در شکل‌های ۱ و ۲ نمایش داده شده است، سامانه لوله هیدروساکشن از دو قسمت درون و بیرون از مخزن تشکیل شده است. بخش درونی شامل یک لوله مکش قائم روزنه‌دار در مرکز مخزن است که توسط یک زانوئی به یک لوله افقی (جهت انتقال جریان به بیرون از مخزن) در کف متصل شده است. بخش بیرونی مخزن شامل دو لوله افقی است که با کمک دو زانوئی متوالی به یکدیگر متصل شده است. جهت تامین اختلاف ارتفاع سطح آب داخل مخزن با دهانه خروجی لوله برای تامین انرژی مورد نیاز سامانه ( $\Delta H$ )، از یک لوله قائم در انتهای سامانه هیدروساکشن استفاده شده است. یک روزنه کوچک در دیواره بالایی لوله افقی برای خروج هوای محبوس شده در مخزن جانمایی شده است.

لوله قائم مکش با طول  $0.7$  متر دارای چهار نوع متنوع از لحاظ تعداد روزنه‌های مکنده جریان می‌باشد که طرح آن در شکل ۳ نمایش داده شده است. لوله مدل صفر (Type 0) بدون روزنه و لوله‌های مدل ۱ (Type 1)، مدل ۲ (Type 2) و مدل ۳ (Type 3) به ترتیب دارای یک، دو و سه روزنه

۹۰٪ باعث جلوگیری از هدررفت آب ذخیره شده در هنگام تخلیه رسوب‌ها مخزن شود. همچنین، آرایش روزنه‌های لوله سامانه هیدروساکشن پیشنهادی آن‌ها در مقایسه با تحقیقات گذشته از لحاظ سرعت تخلیه رسوب‌ها و انتقال جریان مخلوط آب و رسوب به پایین‌دست با غلظت رسوب‌ها بیشتر بدون ایجاد هیچ‌گونه گرفتگی در خط لوله سامانه و حجم رسوب‌ها انتقال یافته بسیار کارآمدتر می‌باشد (Hosseini Ghafari et al., 2024).

نوآوری این تحقیق در بررسی و ارزیابی رفتار هیدرولیکی سامانه VMHS برای مجموعه متنوع‌تری از لوله‌های مکش است؛ موضوعی که در تحقیقات گذشته کمتر به آن پرداخته شده است. در این مطالعه با تحلیل دقیق افت انرژی، توزیع فشار و ضریب بده جریان، نواحی بحرانی سامانه که موجب کاهش بازده تخلیه می‌شوند شناسایی گردید. نتایج به‌دست‌آمده می‌تواند مبنای طراحی بهینه لوله‌های مکش و افزایش بازدهی تخلیه رسوب‌ها با حداقل هدررفت آب ذخیره شده باشد.

با وجود پیشرفت‌های اخیر، بررسی دقیق عملکرد هیدرولیکی سامانه VMHS در شرایط بدون رسوب همچنان ضروری است. در این تحقیق فرض بر این است که در نبود رسوب، رفتار هیدرولیکی سامانه را می‌توان تنها بر اساس پارامترهای هندسی لوله و شرایط هیدرولیکی ورودی تحلیل کرد. همچنین فرض می‌شود که با ثبات بودن قطر لوله اصلی، تغییر در قطر، تعداد و آرایش روزنه‌ها اثر معناداری بر افت انرژی، توزیع فشار و ضریب بده جریان خواهد داشت. بنابراین هدف این پژوهش، ارزیابی آزمایشگاهی و عددی این ویژگی‌ها در شرایط مختلف هندسی و هیدرولیکی است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مدل آزمایشگاهی

آزمایشات این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران انجام شد. همان‌طور که در شکل ۱ نمایش داده شده است، مدل آزمایشگاهی شامل یک مخزن و خط لوله هیدروساکشن برای انتقال رسوب‌ها به بیرون از مخزن می‌باشد. جریان ورودی به مخزن از طریق یک لوله دارای منافذ و پوشش نفوذپذیر (جهت ورود جریان آرام) وارد مخزن شده

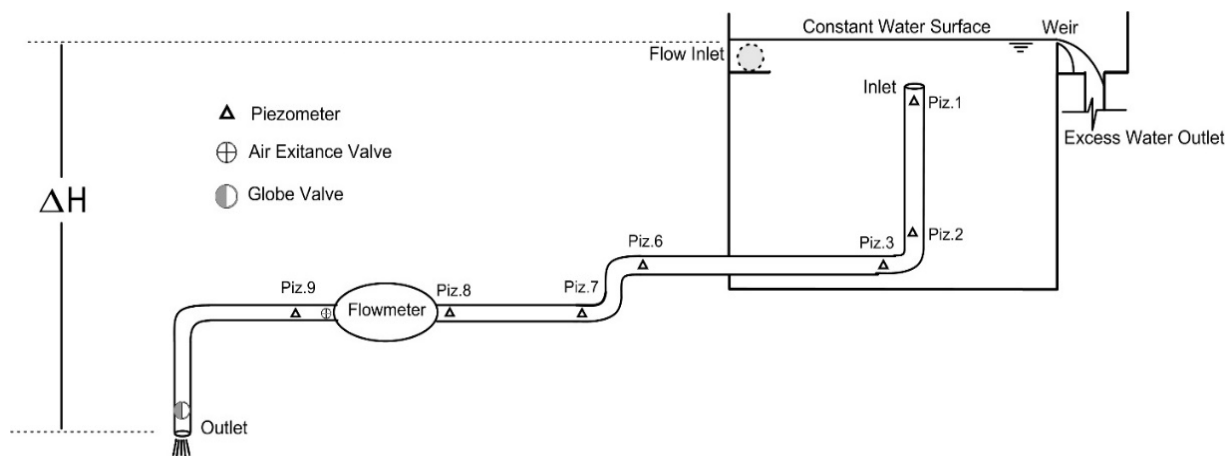


Fig. 1 Scheme of the Experimental setup of the VMHS

شکل ۱ طرحواره مدل آزمایشگاهی مدل هیدروساکشن

جدول ۱ مشخصات خط لوله سامانه هیدروساکشن

Table 1 The specifications of VMHS pipeline

Pipeline	Reservoir		Weir		
Pipe type	PVC	Reservoir type	Rustproof Iron	Weir type	Rectangular
Internal Diameter ( $D_p$ ) (mm)	57	Length (m)	1.8	Length (m)	0.8
Pipe thickness (mm)	3	Width (m)	1.2	Height (m)	0.1
Internal Surface Roughness (mm)	0.1	Depth (m)	1.25		
Total Pipe Length (m)	3.9				



Fig. 2 The experimental setup including of reservoir, suction pipeline, head setting pipes and the flow inlet pipe

شکل ۲ مدل آزمایشگاهی تحقیق شامل مخزن، لوله مکش سامانه هیدروساکشن، لوله‌های تنظیم اختلاف تراز آب و لوله آرام کننده ورودی جریان

شکل ۳ نمایش داده شده است. در این شکل، متغیر  $k$  نماینده فاصله مرکز روزنه اول از دهانه ورودی لوله و  $T$ ، فاصله مرکز دو روزنه مکش متوالی برای لوله‌های مدل ۲ و

در دیواره لوله قائم می‌باشند. تمامی لوله‌ها از دو بخش طول آزاد ۱۰۰ میلی متری و طول فعال ( $L_a$ ) ۶۰۰ میلی متری تشکیل شده‌اند. آرایش روزنه‌ها در هر یک از انواع لوله‌ها در

مدل ۳ می‌باشد. مقدار متغیر  $S$  در لوله‌های مدل ۱ در سه حالت ۱۰ درصد، ۲۰ درصد و ۳۰ درصد از طول فعال لوله متغیر می‌باشد؛ در حالی که این مقدار برای لوله‌های مدل ۲ و مدل ۳ دارای مقدار ثابت ۲۰۰ میلی‌متر است. مقدار متغیر  $T$  نیز برای هر یک از لوله‌های مدل ۲ و ۳ در سه حالت گوناگون در نظر گرفته شد. قطر روزنه‌های مکش ( $D_h$ ) نیز در سه حالت ۲۵ درصد، ۵۰ درصد و ۷۵ درصد از قطر داخلی لوله تعریف شده است. در این تحقیق در کل ۲۸ نوع لوله مکش مورد آزمایش و بررسی قرار گرفتند که مشخصات هر یک از لوله‌ها (به جز لوله مدل صفر) در جدول ۲ نمایش داده شده است. در این تحقیق، با توجه به ثابت بودن قطر داخلی لوله مکش (۵۷ میلی‌متر) و طول مؤثر آن (۰.۶ متر) و همچنین قرار داشتن جریان در محدوده آشفتگی

مدل ۳ می‌باشد. مقدار متغیر  $S$  در لوله‌های مدل ۱ در سه حالت ۱۰ درصد، ۲۰ درصد و ۳۰ درصد از طول فعال لوله متغیر می‌باشد؛ در حالی که این مقدار برای لوله‌های مدل ۲ و مدل ۳ دارای مقدار ثابت ۲۰۰ میلی‌متر است. مقدار متغیر  $T$  نیز برای هر یک از لوله‌های مدل ۲ و ۳ در سه حالت گوناگون در نظر گرفته شد. قطر روزنه‌های مکش ( $D_h$ ) نیز در سه حالت ۲۵ درصد، ۵۰ درصد و ۷۵ درصد از قطر داخلی لوله تعریف شده است. در این تحقیق در کل ۲۸ نوع لوله مکش مورد آزمایش و بررسی قرار گرفتند که مشخصات هر یک از لوله‌ها (به جز لوله مدل صفر) در جدول ۲ نمایش داده شده است. در این تحقیق، با توجه به ثابت بودن قطر داخلی لوله مکش (۵۷ میلی‌متر) و طول مؤثر آن (۰.۶ متر) و همچنین قرار داشتن جریان در محدوده آشفتگی

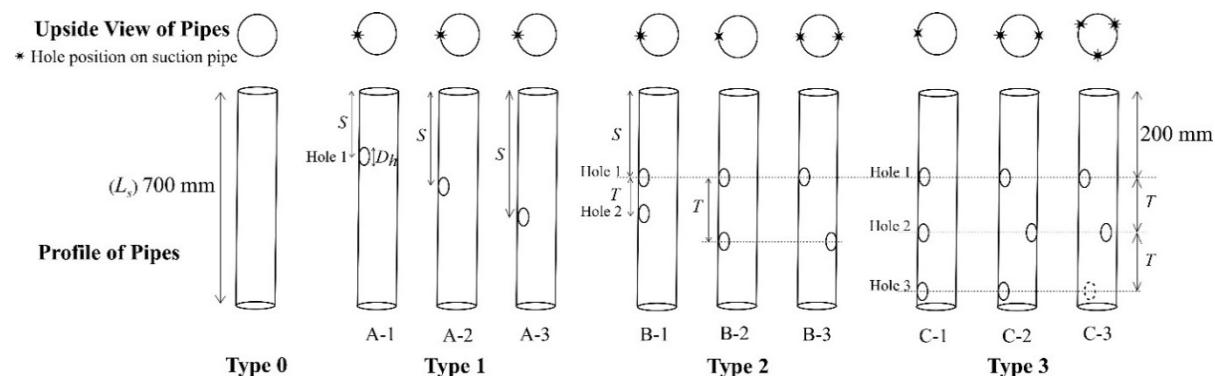


Fig. 3 Schematic view of the suction pipes

شکل ۳ طرح لوله‌های مکش سامانه هیدروساکشن مورد تحقیق

روزنه‌ها در لوله مکش ( $AT$ ).  $\bar{V}$  سرعت متوسط سیال و  $Q$  بده جریان در لوله هیدروساکشن می‌باشد.

$$SF = \frac{A_S}{A_T} \quad (2)$$

با در نظر گرفتن  $\rho$ ،  $Dp$  و  $\bar{V}$  به عنوان متغیرهای تکرارشونده در روش باکینگهام-پای، نه پارامتر بی‌بعد نشان داده شده در رابطه (۳) بدست می‌آید.

$$f_1 \left( \begin{matrix} \Pi_1 = \frac{\rho \bar{V} D_p}{\mu}, \Pi_2 = \frac{\bar{V}^2}{g D_p}, \Pi_3 = \frac{L_p}{D_p}, \Pi_4 = \frac{L_a}{D_p}, \Pi_5 = \frac{D_h}{D_p}, \\ \Pi_6 = \frac{\Delta H}{D_p}, \Pi_7 = \frac{S}{D_p}, \Pi_8 = SF, \Pi_9 = \frac{Q}{\bar{V} D_p^2} \end{matrix} \right) = 0 \quad (3)$$

## ۲-۲- تحلیل ابعادی

با توجه به پارامترهای موثر موضوع مورد تحقیق، دوازده متغیر هیدرولیکی و هندسی مختلف در رابطه (۱) خلاصه شده است.

$$f(\rho, \mu, g, D_p, L_p, L_a, D_h, \Delta H, S, SF, \bar{V}, Q) = 0 \quad (1)$$

که در آن،  $\rho$  چگالی سیال،  $\mu$  لزجت دینامیکی،  $g$  شتاب ثقل،  $Dp$  قطر داخلی لوله هیدروساکشن،  $Lp$  طول لوله مکش و  $L_a$  طول فعال لوله مکش می‌باشد.  $SF$  بر مبنای رابطه (۲)، برابر است با نسبت بیشینه مجموع مساحت روزنه‌ها در یک راستای لوله ( $AS$ ) به مجموع مساحت کل

جدول ۲ مشخصات لوله‌های مکش روزنه‌دار سامانه هیدروساکشن مورد تحقیق

Table 2 The specification of the perforated suction pipes

No. of Holes	Name	No. of pipe	Name of pipe	$D_h$ (mm)	$S$ (mm)	$T$ (mm)	
Type 1	A-1	1	AS1D1	25% $D_p$	14.25		
		2	AS1D2	50% $D_p$	28.5	10% $L_a$	60
		3	AS1D3	75% $D_p$	42.75		
	A-2	4	AS2D1	25% $D_p$	14.25		
		5	AS2D2	50% $D_p$	28.5	20% $L_a$	120
		6	AS2D3	75% $D_p$	42.75		--
	A-3	7	AS3D1	25% $D_p$	14.25		
		8	AS3D2	50% $D_p$	28.5	30% $L_a$	180
		9	AS3D3	75% $D_p$	42.75		
Type 2	B-1	10	BS1D1	25% $D_p$	14.25		42.75
		11	BS1D2	50% $D_p$	28.5		$3D_h$ 85.5
		12	BS1D3	75% $D_p$	42.75		128.25
	B-2	13	BS2D1	25% $D_p$	14.25		85.5
		14	BS2D2	50% $D_p$	28.5	100	$6D_h$ 171
		15	BS2D3	75% $D_p$	42.75		256.5
	B-3	16	BS3D1	25% $D_p$	14.25		85.5
		17	BS3D2	50% $D_p$	28.5		$6D_h$ 171
		18	BS3D3	75% $D_p$	42.75		256.5
Type 3	C-1	19	CS1D1	25% $D_p$	14.25		
		20	CS1D2	50% $D_p$	28.5		
		21	CS1D3	75% $D_p$	42.75		
	C-2	22	CS2D1	25% $D_p$	14.25		
		23	CS2D2	50% $D_p$	28.5	100	37.5% $L_a$ 225
		24	CS2D3	75% $D_p$	42.75		
	C-3	25	CS3D1	25% $D_p$	14.25		
		26	CS3D2	50% $D_p$	28.5		
		27	CS3D3	75% $D_p$	42.75		

انتقالی از نمودار مودی<sup>۱</sup> قرار گرفته، تغییرات ضریب زبری لوله مستقل از عدد رینولدز نبوده و در نتیجه از مجموعه پارامترهای بی‌بعد رابطه (۳) قابل حذف نمی‌باشد. با تعریف  $\Pi_{10}$  و  $\Pi_{11}$  در رابطه (۴)، بده جریان در لوله به عنوان تابعی از پارامترهای باقی‌مانده در رابطه (۳) به صورت رابطه (۵) نمایش داده شده است.

از آنجایی که  $D_p$ ،  $L_a$  و  $L_p$  دارای مقادیر ثابتی در طول آزمایش‌ها می‌باشند، پارامترهای بی‌بعد  $\Pi_3$  و  $\Pi_4$  دارای مقادیر ثابت و قابل حذف می‌باشند.  $\Pi_1$  و  $\sqrt{\Pi_2}$  به ترتیب به عنوان عدد رینولدز ( $Re$ ) و عدد فرود ( $Fr$ ) تعریف می‌شوند. با توجه به تغییرات عدد رینولدز ( $\times 10^5$ ) در این تحقیق، برای گام اول آزمایش‌ها، مقادیر بین ۰ تا  $1/33$  و به ازای گام دوم، مقادیر بین  $1/0.3$  تا  $1/26$  و ارتفاع زبری مطلق نیکوراتسه ( $\varepsilon$ )  $0.1$  میلی‌متر، جریان در لوله مکش در ناحیه

1. Moody diagram

روزنه‌دار استفاده شد که جزئیات مشخصات هر آزمایش در جدول‌های ۳، ۴ و ۵ به ترتیب برای هر مدل از لوله‌های روزنه‌دار نمایش داده شده است. در هر دو مرحله، هر لوله مکش برای سه حالت از اختلاف انرژی موجود در سامانه  $(\Delta H)$  شامل ۱/۵، ۲ و ۲/۵ متر آزمایش شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- ضریب‌های افت در خط لوله سامانه

##### هیدروساکشن

مرحله اول این تحقیق به منظور محاسبه ضریب‌های افت در سامانه هیدروساکشن انجام شد. با بازکردن تدریجی شیر کنترل جریان به ازای هر یک از اختلاف ارتفاع‌های  $\Delta H1$ ،  $\Delta H2$  و  $\Delta H3$ ، به ترتیب ۲۹، ۲۶ و ۳۰ بده مختلف از خط لوله سامانه هیدروساکشن عبور کرد، و شامل طیفی از مقادیر بده از صفر به ازای شیر کنترل جریان در حالت کاملاً بسته تا بده حداکثر به ترتیب ۴/۷۷، ۵/۵۳ و ۵/۹۳ لیتر بر ثانیه، در حالت بازشدگی کامل شیر، که برای محاسبه انواع افت‌ها استفاده شود.

برای محاسبه افت‌ها، بر اساس پیوستگی انرژی، از رابطه برنولی (۶) و (۷)، و دارسی-ویسباخ<sup>۳</sup> برای افت طولی<sup>۳</sup>  $(h_f)$  و موضعی<sup>۴</sup>  $(h_s)$  به ترتیب رابطه‌های (۸) و (۹)، و مقدار سرعت متوسط جریان و فشار اندازه‌گیری شده در پیزومترهای سامانه هیدروساکشن بهره گرفته شد.

$$\frac{P_i}{\gamma} + \frac{\bar{V}_i^2}{2g} + Z_i = \frac{P_j}{\gamma} + \frac{\bar{V}_j^2}{2g} + Z_j + H_{L(i-j)} \quad (6)$$

$$H_L = h_f + h_s \quad (7)$$

$$h_f = f \frac{L \bar{V}^2}{D 2g} \quad (8)$$

$$h_s = K \frac{\bar{V}^2}{2g} \quad (9)$$

$$\pi_{10} = \sqrt{\pi_2} \times \pi_9 = \frac{Q}{\sqrt{gD_p^5}}, \pi_{11} = \frac{\pi_7}{\pi_3} = \frac{S}{L_a} \quad (4)$$

$$Q = \sqrt{gD_p^5} f_3 \left( \text{Re}, \frac{D_h}{D_p}, \frac{\Delta H}{D_p}, \frac{S}{L_a}, SF \right) \quad (5)$$

محدوده و تغییرات هر یک از پارامترهای بی‌بعد در رابطه (۵) برای آزمایش‌های انجام شده در بخش بعدی ارائه شده است.

#### ۳-۲- آرایش آزمایش‌ها

این تحقیق بر مبنای هدف‌های مشخص در سه مرحله دسته‌بندی شده است. مرحله اول جهت برآورد و محاسبه ضریب‌های افت‌های طولی و موضعی خط لوله سامانه هیدروساکشن است که با استفاده از لوله مکش مدل صفر (بدون روزنه) صورت گرفت. مرحله دوم تحقیق شامل ارزیابی هیدرولیکی جریان در سامانه هیدروساکشن از منظر تغییرات فشار می‌باشد که در آن از انواع لوله‌های مکش یک، دو و سه روزنه استفاده شده است. مرحله سوم تحقیق، با هدف محاسبه ضرایب بده جریان عبوری از سامانه و نیز برآورد ضریب افت موضعی روزنه‌های لوله مکش طراحی و اجرا شد. در این مرحله، یک درپوش<sup>۱</sup> بر روی دهانه ورودی لوله مکش قرار گرفت تا از ورود جریان از طریق دهانه لوله به طور کامل جلوگیری و جریان تنها از طریق روزنه‌های مکنده سامانه هیدروساکشن وارد شود. در نهایت، همه آزمایش‌های صورت گرفته در مرحله دوم در شرایط حضور درپوش در دهانه لوله مکش تکرار شد. با اندازه‌گیری‌های صورت گرفته و با کمک روابط هیدرولیکی، میزان ضریب افت روزنه‌های تمامی لوله‌های مکش مورد تحقیق برآورد و ارزیابی شد.

در مرحله اول با قرار دادن لوله بدون روزنه در سامانه هیدروساکشن و بستن تدریجی شیر تویی، جریان عبوری از آن مهیار و اندازه‌گیری انجام شد. در مرحله دوم، لوله‌های

3. Friction loss  
4. Minor loss

1. Cap  
2. Darcy-Weisbach

جدول ۳ مشخصات آزمایش‌ها بر روی سامانه هیدروساکشن لوله‌های روزنه‌دار مدل ۱

Table 3 The test specifications of the suction pipes of Type 1

No.	Test name	Pipe name	$\frac{\Delta H}{D_p}$	$\frac{D_h}{D_p}$	SF	$\frac{S}{L_a}$	Re ( $\times 10^5$ )
1	AS1D1H1	AS1D1	26.3	0.25	1	0.1	1.06
2	AS2D1H1	AS2D1	26.3	0.25	1	0.2	1.05
3	AS3D1H1	AS3D1	26.3	0.25	1	0.3	1.05
4	AS1D2H1	AS1D2	26.3	0.5	1	0.1	1.06
5	AS2D2H1	AS2D2	26.3	0.5	1	0.2	1.06
6	AS3D2H1	AS3D2	26.3	0.5	1	0.3	1.06
7	AS1D3H1	AS1D3	26.3	0.75	1	0.1	1.05
8	AS2D3H1	AS2D3	26.3	0.75	1	0.2	1.04
9	AS3D3H1	AS3D3	26.3	0.75	1	0.3	1.06
10	AS1D1H2	AS1D1	35.1	0.25	1	0.1	1.15
11	AS2D1H2	AS2D1	35.1	0.25	1	0.2	1.16
12	AS3D1H2	AS3D1	35.1	0.25	1	0.3	1.15
13	AS1D2H2	AS1D2	35.1	0.5	1	0.1	1.15
14	AS2D2H2	AS2D2	35.1	0.5	1	0.2	1.15
15	AS3D2H2	AS3D2	35.1	0.5	1	0.3	1.16
16	AS1D3H2	AS1D3	35.1	0.75	1	0.1	1.14
17	AS2D3H2	AS2D3	35.1	0.75	1	0.2	1.14
18	AS3D3H2	AS3D3	35.1	0.75	1	0.3	1.14
19	AS1D1H3	AS1D1	43.9	0.25	1	0.1	1.25
20	AS2D1H3	AS2D1	43.9	0.25	1	0.2	1.25
21	AS3D1H3	AS3D1	43.9	0.25	1	0.3	1.26
22	AS1D2H3	AS1D2	43.9	0.5	1	0.1	1.25
23	AS2D2H3	AS2D2	43.9	0.5	1	0.2	1.24
24	AS3D2H3	AS3D2	43.9	0.5	1	0.3	1.25
25	AS1D3H3	AS1D3	43.9	0.75	1	0.1	1.24
26	AS2D3H3	AS2D3	43.9	0.75	1	0.2	1.24
27	AS3D3H3	AS3D3	43.9	0.75	1	0.3	1.24

متناظر با عدد رینولدز مربوطه به دست آمده است. مقادیر ضریب افت طولی  $f$ ، به ازای آزمایش‌های مرحله اول محاسبه و در نمودار شکل ۴ نمایش داده شده است. ضریب افت طولی  $f$ ، بسته به مقدار عدد رینولدز (مقدار آشفتگی) و زبری نسبی لوله ( $\varepsilon/D$ ) در لوله متغیر می‌باشد؛ که در آن  $\varepsilon$ ، اندازه زبری مطلق دیواره داخلی لوله است. جنس لوله سامانه هیدروساکشن که PVC و دارای زبری نسبی ۰/۰۰۱۷ می‌باشد. اعداد رینولدز در محدوده  $4.02 \times 10^3 < Re < 1.33 \times 10^5$  (در ناحیه انتقالی دیاگرام مودی) و مقدار ضریب  $f$  محاسبه شده در نمودار شکل ۵ نمایش داده شده است.

که در آن، پارامترهای  $P$ ،  $\bar{V}$  و  $Z$  به ترتیب مقادیر فشار، سرعت متوسط ( $Q = A_p \bar{V}$ ) و  $A_p$  به ترتیب بده جریان و سطح مقطع لوله مکش) و تراز ارتفاعی مقطع مورد نظر از تراز مبناسست.  $H_L$ ، کل افت انرژی بین دو مقطع  $i$  و  $j$  لوله و  $L$  فاصله طولی بین دو مقطع  $i$  و  $j$  است.  $f$  و  $K$  نیز به ترتیب برابر با ضریب افت طولی و موضعی در سامانه هیدروساکشن است. از آنجایی که بده‌های ایجاد شده در لوله هیدروساکشن در مرحله اول، طیف گسترده‌ای از عدد رینولدز را در لوله ایجاد می‌کنند، هر یک از ضرایب افت‌های موجود در لوله، به ازای تمامی بده‌های مذکور و

جدول ۴ مشخصات آزمایش‌های مورد تحقیق بر روی سامانه هیدروساکشن لوله‌های روزنه‌دار مدل ۲

Table 4 The test specifications of the suction pipes of Type 2

No.	Test name	Pipe name	$\frac{\Delta H}{D_p}$	$\frac{D_h}{D_p}$	SF	$\frac{T}{D_p}$	Re ( $\times 10^5$ )
1	BS1D1H1	BS1D1	26.3	0.25	1	0.75	1.07
2	BS2D1H1	BS2D1	26.3	0.25	1	1.5	1.07
3	BS3D1H1	BS3D1	26.3	0.25	0.5	1.5	1.07
4	BS1D2H1	BS1D2	26.3	0.5	1	1.5	1.05
5	BS2D2H1	BS2D2	26.3	0.5	1	3	1.05
6	BS3D2H1	BS3D2	26.3	0.5	0.5	3	1.07
7	BS1D3H1	BS1D3	26.3	0.75	1	2.25	1.07
8	BS2D3H1	BS2D3	26.3	0.75	1	4.5	1.05
9	BS3D3H1	BS3D3	26.3	0.75	0.5	4.5	1.06
10	BS1D1H2	BS1D1	35.1	0.25	1	0.75	1.15
11	BS2D1H2	BS2D1	35.1	0.25	1	1.5	1.16
12	BS3D1H2	BS3D1	35.1	0.25	0.5	1.5	1.16
13	BS1D2H2	BS1D2	35.1	0.5	1	1.5	1.14
14	BS2D2H2	BS2D2	35.1	0.5	1	3	1.14
15	BS3D2H2	BS3D2	35.1	0.5	0.5	3	1.17
16	BS1D3H2	BS1D3	35.1	0.75	1	2.25	1.14
17	BS2D3H2	BS2D3	35.1	0.75	1	4.5	1.15
18	BS3D3H2	BS3D3	35.1	0.75	0.5	4.5	1.16
19	BS1D1H3	BS1D1	43.9	0.25	1	0.75	1.23
20	BS2D1H3	BS2D1	43.9	0.25	1	1.5	1.25
21	BS3D1H3	BS3D1	43.9	0.25	0.5	1.5	1.25
22	BS1D2H3	BS1D2	43.9	0.5	1	1.5	1.24
23	BS2D2H3	BS2D2	43.9	0.5	1	3	1.23
24	BS3D2H3	BS3D2	43.9	0.5	0.5	3	1.26
25	BS1D3H3	BS1D3	43.9	0.75	1	2.25	1.24
26	BS2D3H3	BS2D3	43.9	0.75	1	4.5	1.24
27	BS3D3H3	BS3D3	43.9	0.75	0.5	4.5	1.26

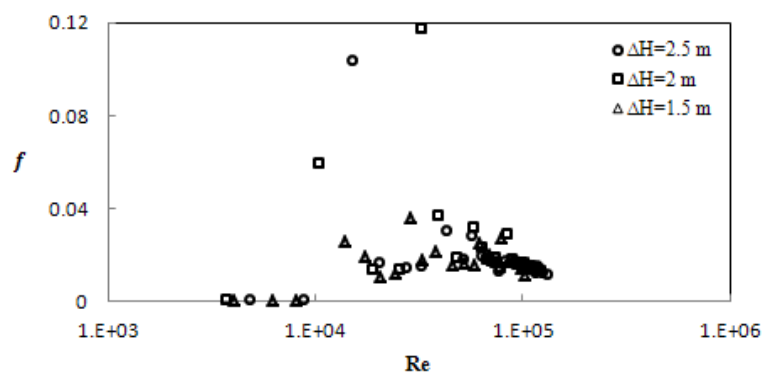


Fig. 4 Friction loss coefficient  $f$  in the suction pipe for the step 1 tests

شکل ۴ مقادیر ضریب افت طولی  $f$  در مرحله اول آزمایش‌ها

جدول ۵ مشخصات آزمایش‌های مورد تحقیق بر روی سامانه هیدروساکشن لوله‌های روزنه‌دار مدل ۳

Table 5 The test specifications of the suction pipes of Type 3

No.	Test name	Pipe name	$\frac{\Delta H}{D_p}$	$\frac{D_h}{D_p}$	SF	Re ( $\times 10^5$ )
1	CS1D1H1	CS1D1	26.3	0.25	1	1.05
2	CS2D1H1	CS2D1	26.3	0.25	0.67	1.04
3	CS3D1H1	CS3D1	26.3	0.25	0.33	1.05
4	CS1D2H1	CS1D2	26.3	0.5	1	1.04
5	CS2D2H1	CS2D2	26.3	0.5	0.67	1.03
6	CS3D2H1	CS3D2	26.3	0.5	0.33	1.03
7	CS1D3H1	CS1D3	26.3	0.75	1	1.05
8	CS2D3H1	CS2D3	26.3	0.75	0.67	1.03
9	CS3D3H1	CS3D3	26.3	0.75	0.33	1.03
10	CS1D1H2	CS1D1	35.1	0.25	1	1.14
11	CS2D1H2	CS2D1	35.1	0.25	0.67	1.14
12	CS3D1H2	CS3D1	35.1	0.25	0.33	1.14
13	CS1D2H2	CS1D2	35.1	0.5	1	1.14
14	CS2D2H2	CS2D2	35.1	0.5	0.67	1.13
15	CS3D2H2	CS3D2	35.1	0.5	0.33	1.13
16	CS1D3H2	CS1D3	35.1	0.75	1	1.11
17	CS2D3H2	CS2D3	35.1	0.75	0.67	1.12
18	CS3D3H2	CS3D3	35.1	0.75	0.33	1.12
19	CS1D1H3	CS1D1	43.9	0.25	1	1.23
20	CS2D1H3	CS2D1	43.9	0.25	0.67	1.21
21	CS3D1H3	CS3D1	43.9	0.25	0.33	1.23
22	CS1D2H3	CS1D2	43.9	0.5	1	1.23
23	CS2D2H3	CS2D2	43.9	0.5	0.67	1.22
24	CS3D2H3	CS3D2	43.9	0.5	0.33	1.21
25	CS1D3H3	CS1D3	43.9	0.75	1	1.20
26	CS2D3H3	CS2D3	43.9	0.75	0.67	1.21
27	CS3D3H3	CS3D3	43.9	0.75	0.33	1.21

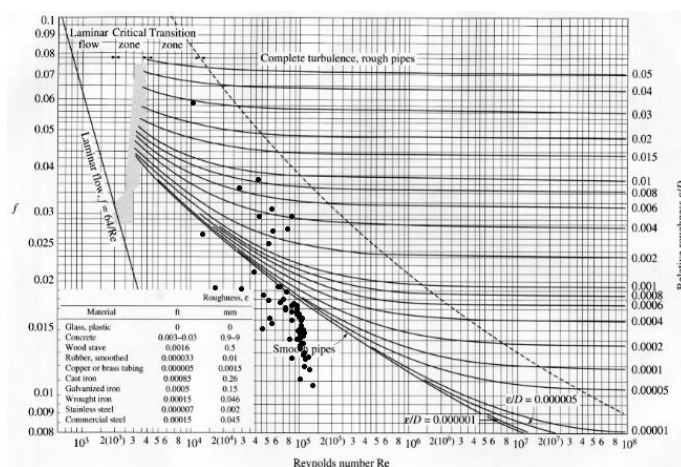
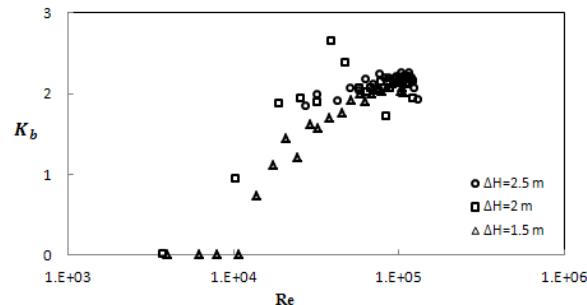


Fig. 5 Friction loss coefficient  $f$  in Moody diagram

شکل ۵ مقادیر ضریب افت طولی  $f$  در دیاگرام مودی

زانویی بسته به نسبت شعاع انحنا به قطر داخلی لوله از ۰/۳ تا ۱/۵ متغیر است (Kaiser and McAllister, 2022).

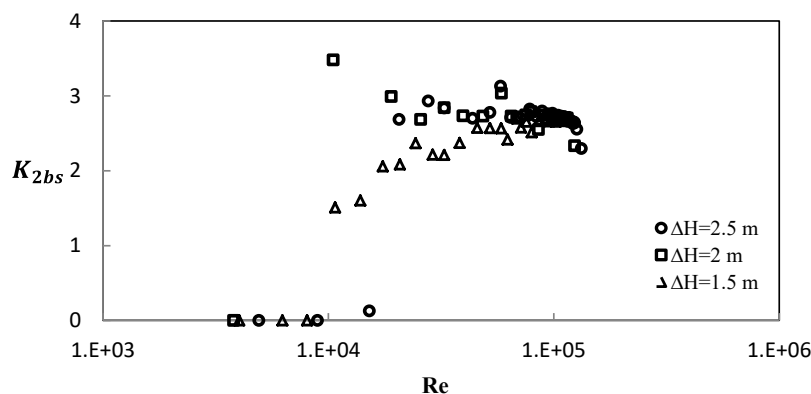
ضرایب افت موضعی زانویی ( $k_b$ ) که اتصال دهنده لوله مکش به لوله افقی داخل مخزن است، در نمودار شکل ۶ نمایش داده شده است. مقدار ضریب افت موضعی در



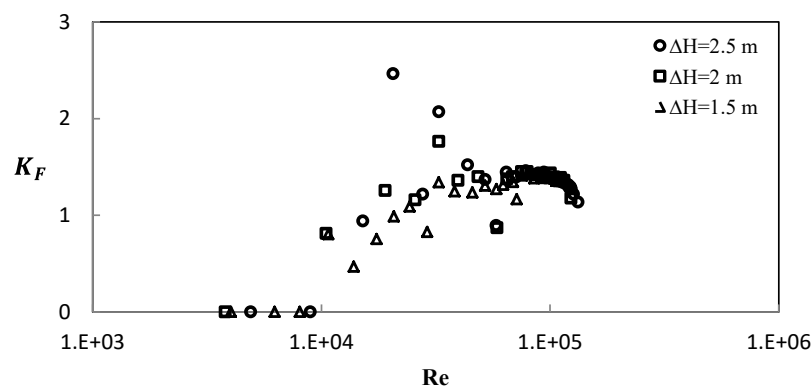
**Fig. 6** Minor head loss coefficient of bend,  $k_b$  in the suction pipe for step 1  
 شکل ۶ مقادیر ضریب افت موضعی زانویی  $k_b$ ، در مرحله اول آزمایش‌ها

ازای جریان‌های آشفته (محدوده اعداد رینولدز نزدیک به و بیشتر از  $10^5$ )، تمامی  $K_F$  و  $K_{2bs}$  در یک محدوده مشخص و به صورت متمرکز می‌باشد.

نمودارهای شکل ۷ و ۸، به ترتیب ضریب افت موضعی در دو زانویی متوالی بین دو لوله افقی در بخش خارجی سامانه هیدروساکشن ( $K_{2bs}$ ) و ضریب افت موضعی دستگاه فلومتر ( $K_F$ ) را نمایش می‌دهند. مشاهده می‌شود که به



**Fig. 7** Minor head loss coefficient of 2 series bends,  $K_{2bs}$  in the suction pipe for step 1  
 شکل ۷ مقادیر افت موضعی در دو زانویی متوالی  $K_{2bs}$ ، در مرحله اول آزمایش‌ها



**Fig. 8** Minor head loss coefficient of the flowmeter,  $K_F$  in the suction pipe for step 1  
 شکل ۸ مقادیر ضریب افتی موضعی در فلومتر  $K_F$ ، در مرحله اول آزمایش‌ها

شده و با کاهش آشفتگی و موازی تر شدن خطوط جریان در دهانه ورودی لوله مکش، از مقدار آن کاسته می شود. شکل ۱۰ نشان می دهد که ضریب افت شیر تویی به ازای انواع بازشدگی ها دارای طیف گسترده ای می باشد. اما از آنجایی که تمامی آزمایش های آتی در حالت شیر کاملا باز و در محدود مشخصی از میزان آشفتگی انجام شده است، از مقادیر متوسط ضرایب افت در همان دامنه آشفتگی استفاده خواهد شد.

نمودارهای شکل ۹ و ۱۰، به ترتیب ضریب افت موضعی در دهانه ورودی لوله هیدروساکشن ( $K_i$ ) و ضریب افت موضعی شیر تویی ( $K_v$ ) که در انتهای لوله قرار گرفته است را نمایش می دهند. مقدار ضریب افت موضعی در دهانه ورودی لوله بدون در نظر گرفتن جنس آن و میزان آشفتگی جریان ورودی به لوله، ۰/۸ تا ۱ در نظر گرفته می شود (Kaiser and McAllister, 2022). نتایج آزمایشگاهی (شکل ۹) نشان می دهد که به ازای جریان های آشفته در سامانه هیدروساکشن،  $K_i$  در محدوده مشخصی متمرکز

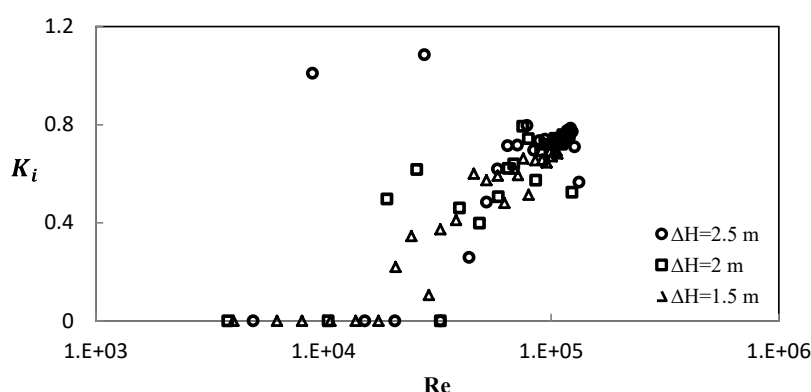


Fig. 9 Minor head loss coefficient of the suction pipe inlet,  $K_i$  for step 1

شکل ۹ مقادیر ضریب افت دهانه ورودی لوله هیدروساکشن  $K_i$ ، در مرحله اول آزمایش ها

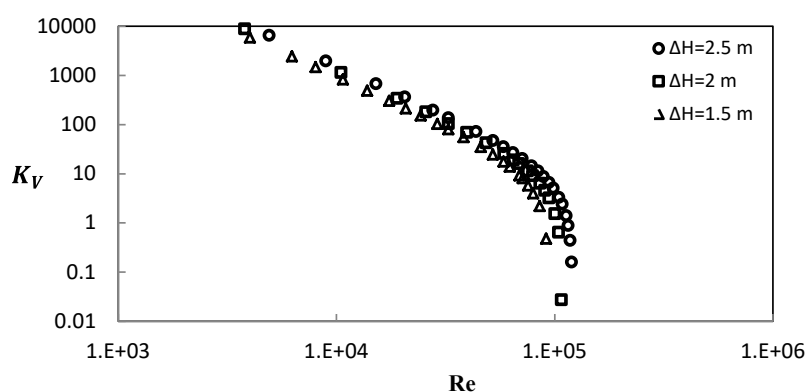


Fig. 10 Minor head loss coefficient of Globe valve,  $K_v$  for step 1

شکل ۱۰ مقادیر ضریب افت موضعی شیر تویی  $K_v$ ، در مرحله اول آزمایش ها

از خط لوله سامانه هیدروساکشن در محدوده جریانات آشفته قرار دارند. بنابراین، با توجه به نتایج موجود در اشکال ۴ تا ۱۰، مقدار متوسط هر یک از ضرایب افت در محدوده مورد نظر از اعداد رینولدز محاسبه و در جدول ۶ نمایش داده شده است. در ادامه تحقیق، از این اعداد به عنوان

در نهایت، برای استفاده از ضرایب افت به دست آمده برای سامانه های هیدروساکشن در مرحله دوم آزمایش، اعداد رینولدز هر یک از آزمایش ها محاسبه شد که در جداول ۳ تا ۵ به ازای هر مدل از لوله های روزنه دار ارائه شده است. در این جداول مشاهده می شود که تمامی جریانات عبوری

ارتفاع تراز سطح آب داخل مخزن با دهانه خروجی خط لوله سامانه هیدروساکشن می‌باشد.

همچنین، نوع آرایش روزنه‌ها در لوله، تاثیری قابل توجهی بر  $Q_r^c$  ندارد. در حالی که، به ازای لوله‌های مکش مدل / نمونه ۱ (تک روزنه) با قطر روزنه  $(D_{hl} / 14/25)$  میلی متر، به دلیل کوچک بودن سطح مقطع روزنه نسبت به سطح مقطع دهانه خروجی لوله  $(0/0625)$  و جریان ثقیلی حاکم بر سامانه هیدروساکشن، روزنه لوله مکش توانایی پر نگه داشتن سامانه هیدروساکشن را نداشته و دستگاه فلومتر قادر به اندازه‌گیری بده جریان نمی‌باشد. زیرا دستگاه فلومتر تنها در شرایط پر بودن لوله از سیال قادر به اندازه‌گیری است. درست بودن این موضوع از طریق نصب یک قطعه لوله شفاف در مسیر خط لوله پس از خروج از مخزن آب بررسی و تایید شد. با توجه به پایین‌تر بودن تراز روزنه‌ها نسبت به دهانه ورودی لوله، بزرگ‌تر کردن قطر آن‌ها منجر به ورود جریان بیشتری از آن‌ها شده و سهم دهانه لوله از بده جریان را کاهش می‌دهد. به همین دلیل، مقدار  $Q_r^c$  با افزایش قطر روزنه‌ها، کاهش می‌یابد. متناسب با همین گزاره، افزایش تعداد روزنه‌ها (در یک قطر همانند) همین نتیجه را ارائه می‌دهد. عملکرد روزنه‌ها در مکش جریان با افزایش قطر و تعداد آن‌ها بهبود می‌یابد.

$$Q_r^c (\%) = \frac{Q - Q_h}{Q} \times 100 \quad (10)$$

ضرایب افت سامانه هیدروساکشن استفاده خواهد شد.

جدول ۶ مقادیر ضرایب افت میانگین‌گیری شده در سامانه

هیدروساکشن به ازای آزمایش‌های مرحله دوم تحقیق

Table 6 The averaged head loss coefficients of hydrosuction system

Apparatus	Symbol	Coefficient
Friction.	$f$	0.017
Bend	$K_b$	2.094
Consecutive bends	$K_{2bs}$	2.681
Flowmeter	$K_F$	1.345
Inlet	$K_i$	0.681
Globe Valve	$K_V$	0.221

در مرحله سوم، با قرار درپوش در دهانه ورودی لوله‌های مکش روزنه‌دار، سهم ورودی جریان از طریق آن حذف شده و جریان تنها از طریق روزنه‌ها با حداکثر ظرفیت، وارد سامانه هیدروساکشن می‌شوند. در مقایسه با مرحله دوم، مقدار بده جریان در این مرحله کاهش می‌یابد. درصد کاهش بده جریان با قرار دادن درپوش  $(Q_r^c)$  با توجه به رابطه ۱۰ برای همه لوله‌های مورد تحقیق در شکل ۱۱ نمایش داده شده است.  $Q_h$  بده جریان عبوری از سامانه هیدروساکشن در مرحله سوم (حداکثر بده عبوری از روزنه-ها) است. همانطور که در شکل ۱۱ نمایش داده شده است، به ازای تمام اختلاف ارتفاع‌های مورد تحقیق، مقدار  $Q_r^c$  برای هر لوله روزنه‌دار در یک مقدار نسبتاً ثابتی قرار دارد. این به آن معناست که درصد کاهش بده مستقل از اختلاف

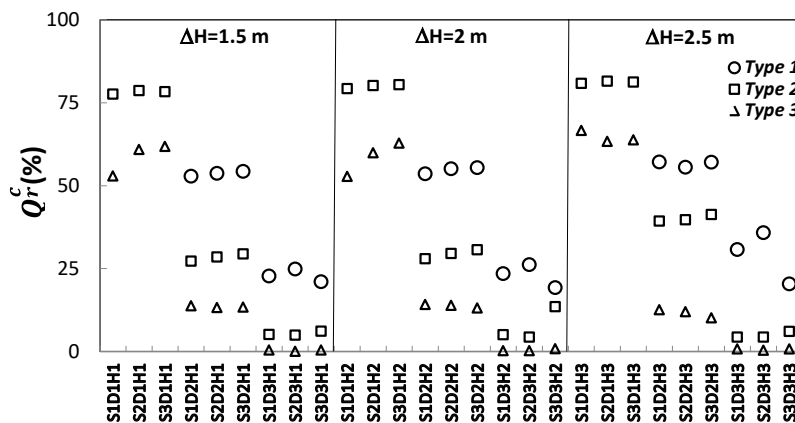


Fig. 11 Reduction of flow discharge by putting cap on the inlet of the suction pipe

شکل ۱۱ کاهش بده جریان با قرار دادن درپوش در دهانه ورودی لوله مکش

نمی‌توان بده‌های ورودی از طریق روزنه‌ها را به طور مستقل اندازه‌گیری نمود.

در شکل ۱۲ مقادیر ضریب بده روزنه‌ها برای تمامی لوله‌های مکش مورد تحقیق نمایش داده شده است. با توجه به اینکه ضریب  $C_D$ ، به معنی میزان مانع بودن دیواره روزنه‌ها در ورودی جریان به لوله مکش می‌باشد، برابر این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش قطر و تعداد روزنه‌های جانبی (افزایش سطح مقطع) و تسهیل در ورود جریان، مقدار  $C_D$  کاهش یافته است. در نتیجه می‌توان گفت که سهولت جریان در عبور از روزنه‌ها می‌تواند به درگیر نشدن ذرات رسوب با دیواره‌های لوله مکش و کاهش تنش برشی در این مقطع کمک کند.

$$Q_h = C_D Q_t = C_D A_h \sqrt{2g \Delta H} \quad (11)$$

موضوع دیگر مورد تحقیق، محاسبه ضریب بده ( $C_D$ ) در روزنه‌های لوله مکش می‌باشد. در واقع، با استفاده از برآورد ضریب بده روزنه‌ها و رابطه برنولی می‌توان به مقادیر ضریب افت موضعی روزنه‌های لوله مکش دست یافت. با توجه به رابطه ۱۱، ضریب بده برابر با نسبت بده اندازه‌گیری شده روزنه‌های مکند لوله مکش ( $Q_h$ ) به بده تئوریک ( $Q_t$ ) است.  $A_h$  برابر با سطح مقطع روزنه می‌باشد؛ و در اینجا فرض شده است که در لوله‌های مدل ۲ و مدل ۳، بده جریان عبوری اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه در همه روزنه‌های یک لوله مکش مقدار برابری است. زیرا از طریق آزمایش‌های آزمایشگاهی نمی‌توان به مقادیر تک تک بده جریان عبوری از روزنه‌ها دست یافت. به بیان دیگر، تاثیر جت جریان ورودی از تک تک روزنه‌ها به داخل لوله مکش و اندرکنش آن‌ها با یکدیگر بر مقادیر مورد نظر تاثیر گذاشته و در نتیجه

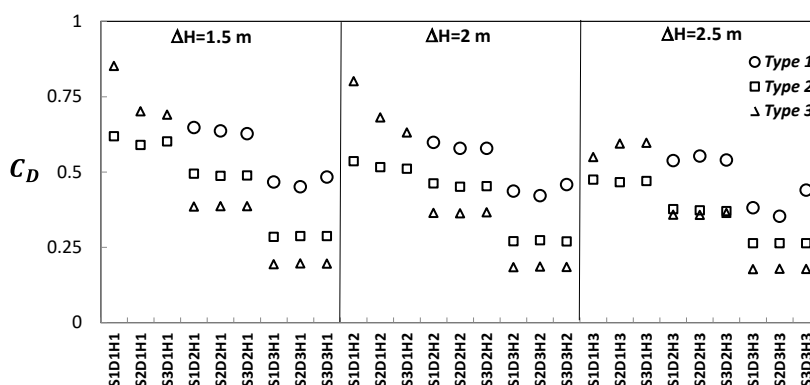


Fig. 12 Discharge coefficient of the suction pipe holes

شکل ۱۲ ضریب بده در روزنه‌های جانبی لوله مکش

را به درون لوله مکش وارد نمی‌کنند، در نتیجه مانعی برای جریان ورودی به داخل لوله مکش نبوده و در نتیجه مقادیر  $K_h$  نزدیک به صفر ایجاد می‌شوند.

در لوله‌های مکش مدل ۳ (سه روزنه) با بزرگ‌ترین قطر روزنه ( $D_{h3}$ )، مقادیر منفی  $K_h$  نشان می‌دهد که وجود این روزنه‌ها تنها نقش یک مانع در مسیر جریان ورودی به خط لوله سامانه هیدروساکشن را بازی نکرده، بلکه خود آن‌ها به عنوان ورودی‌های اصلی جریان به داخل لوله مکش به شمار می‌آیند. به بیان دیگر، سهم ورود جریان از طریق این روزنه‌ها بیشتر از دهانه ورودی لوله مکش

همانطور که پیشتر اشاره شد، ورود جریان از طریق روزنه‌ها به عنوان مانعی در برابر حرکت آزادانه جریان در لوله مکش عمل می‌کند. بنابراین، افت موضعی ایجاد شده در لوله‌های مکش می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. با کمک رابطه برنولی، افت موضعی روزنه‌ها ( $K_h$ ) محاسبه و در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که مقادیر  $K_h$  تحت تاثیر انرژی تامین کننده سامانه یا همان اختلاف ارتفاع سطح آب سامانه ( $\Delta H$ ) و آرایش روزنه‌ها در لوله مکش نمی‌باشد. همانطور که پیشتر بیان شده بود، از آنجایی که کوچک‌ترین قطر روزنه‌ها ( $D_{h1}$ ) جریان زیادی

محل روزنه به وجود نمی‌آید و در نتیجه، دهانه ورودی لوله نقش مهمی در ورود جریان به سامانه هیدروساکشن بازی نمی‌کند. بیشترین مقادیر  $K_h$  در لوله‌های مکش از مدل ۲ (دو روزنه) مشاهده می‌شود که در آن‌ها سهم ورود جریان به درون لوله از طریق دهانه ورودی لوله مکش و روزنه‌ها تقریباً مشابه است و بیشترین برخورد دو جریان با یکدیگر در محل روزنه‌ها می‌باشد.

می‌باشد. هرچند که این موضوع در شکل ۱۱ نیز قابل پیگیری و اثبات می‌باشد؛ زیرا با قرار دادن درپوش در دهانه ورودی لوله مکش، سهم افت جریان نزدیک به صفر بوده که به معنی فعال نبودن دهانه لوله مکش در ورود جریان به داخل سامانه است. به بیان دیگر، در این لوله‌های مکش، خطوط جریان به صورت موازی از طریق روزنه‌ها به درون لوله مکش وارد شده و جمع‌شدگی قابل توجهی در

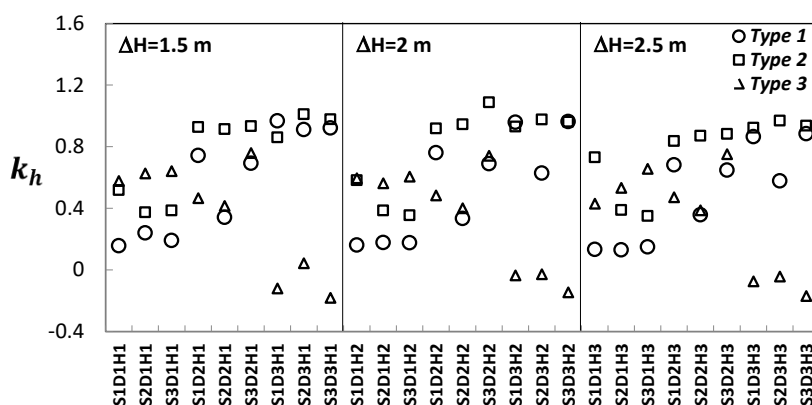


Fig. 13 Minor loss coefficient of the suction pipe holes

شکل ۱۳ ضریب افت موضعی ناشی از وجود روزنه‌ها در لوله مکش

سرعت و افت ورودی برای بده‌های برداشت شده محاسبه و ارتفاع خط گرادین هیدرولیکی بالای ورودی لوله بدون روزنه تعیین و مقادیر فشار نسبت به اختلاف ارتفاع آب کل سامانه در برابر بده نسبی در شکل ۱۵ ارائه شده است. در اینجا منظور از  $H^*$  پارامتر بی‌بعد  $\Delta H/D_p$  می‌باشد که در رابطه ۵ در بخش تحلیل ابعادی اشاره شده است. با توجه به مقادیر ذکر شده برای هر یک از پارامترهای تحقیق، به ازای سه اختلاف ارتفاع تراز مورد نظر، مقادیر  $H^*$  بدست آمد.  $۲۶/۳$ ،  $۳۵/۱$  و  $۴۳/۹$  برای  $H^*$  بدست آمد.

شکل ۱۵ نشان می‌دهد که تقریباً تا بده برابر با ۲۵٪ بده بیشینه ترازهای نسبی آزمون شده، بین مقادیر ثبت شده توسط پیژومتر ناحیه ورودی به لوله و متوسط فشار مقطع، اختلاف قابل توجهی به وجود نمی‌آید. اما با افزایش بده سامانه اثر انحنای خطوط جریان ورودی به لوله و ایجاد فشار منفی در جدار بخش ورودی زیاد شده تا جایی که تقریباً در بده ۹۰ درصد بده بیشینه فشار نسبی متوسط مقطع هم منفی می‌شود. در چنین شرایطی فشار اندازه‌گیری شده

### ۲-۳- فشار هیدرولیکی در سامانه هیدروساکشن

در این بخش از تحقیق، تغییرات فشار و تراز پیژومتریک در دهانه لوله مکش بررسی شد که دارای نکته قابل ملاحظه و بحث می‌باشد. ورود آب به لوله با فشردگی جریان و ایجاد ناحیه فشار منفی در جداره لوله مطابق شکل ۱۴ صورت می‌گیرد. اگر چه نزدیک جدار لوله فشار منفی وجود دارد، اما فشار متوسط مقطع ورودی و محل نصب پیژومتر اول (در نزدیکی دهانه لوله مکش)، مقداری مثبت است.

لازم به ذکر است که منظور از فشار متوسط، میانگین فشار در مقطع دهانه ورودی لوله مکش است. توزیع فشار در این مقطع غیریکنواخت بوده و در نزدیکی دیواره مقادیر منفی و در مرکز لوله بیشینه مقدار مشاهده می‌شود (شکل ۱۴). از آنجا که جریان پس از حدود ۱۰ ثانیه به حالت پایدار می‌رسد، داده‌های فشار در بازه زمانی جریان پایدار مورد میانگین‌گیری قرار گرفتند.

با در دست داشتن بده جریان ورودی به لوله، ارتفاع معادل

مبنای تحلیل‌های بعدی قرار گرفت.

توسط پیزومتر اول نمی‌تواند نماینده متوسط فشار مقطع در این ناحیه تلقی شود. از این رو فشار متوسط محاسبه شده

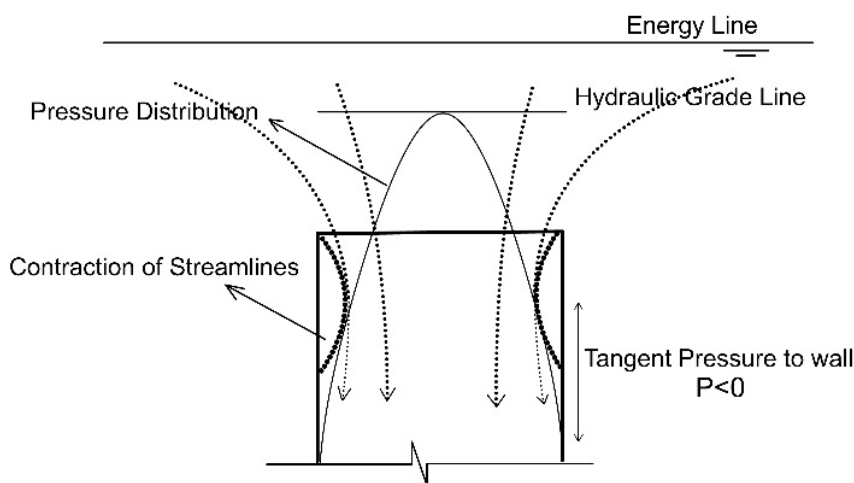


Fig. 14 scheme of the pressure distribution on the inlet of the suction pipe

شکل ۱۴ نمای کلی توزیع فشار جریان ورودی از طریق دهانه ورودی لوله

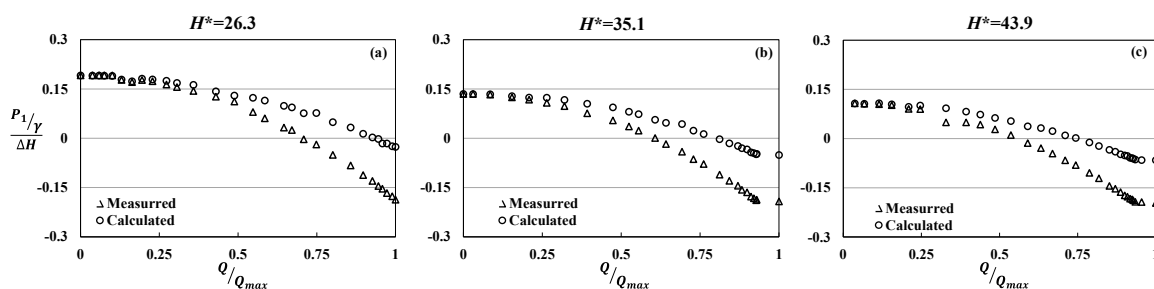


Fig. 15 Measured and calculated mean pressure in the inlet of suction pipe for a)  $H^*=26.3$ , b)  $H^*=35.1$  and c)  $H^*=43.9$

شکل ۱۵ مقادیر فشار نسبی اندازه‌گیری و محاسبه شده میانگین در دهانه ورودی لوله مکش به ازای (a)  $H^*=26/3$  (b)  $H^*=35/1$  (c) و  $H^*=43/9$

$$H^* = 43/9$$

منفی است. اما جریان آب از روزنه‌های لوله‌های دو و سه روزنه بر متوسط فشار مقطع ورودی لوله اثر قابل توجهی داشته است (نمودارهای b1 تا c3 شکل ۱۶). شکل مورد بررسی همچنین نشان می‌دهد که عملاً قطرهای روزنه متوسط و بزرگ ( $D_{h2}$  و  $D_{h3}$ ) در اختلاف ارتفاع‌های سطح آب متنوع و فاصله روزنه‌های گوناگون، اثر یکسانی بر متوسط فشار دهانه ورودی داشته است. این بدان معنی است که اگر افزایش متوسط فشار مقطع ورودی لوله به مثابه کاهش بده ورودی از آن دهانه لوله تلقی شود، افزایش سهم روزنه‌های جانبی لوله را نشان می‌دهد.

برای بررسی تاثیر قطر روزنه‌ها، فاصله و آرایش آنها بر فشار دهانه ورودی لوله هیدروساکشن، فشار متوسط دهانه ورودی لوله در آزمایش‌های مختلف برای اختلاف ارتفاع‌های نسبی آزمایش شده تعیین و در شکل ۱۶ نمایش داده شد. نمودارهای (a1) تا (a3) این شکل نشان می‌دهد که قطر کوچک روزنه،  $D_{h1}$ ، در لوله‌های تک روزنه در تمامی اختلاف ارتفاع‌های سطح آب مطالعه شده و فواصل روزنه‌های مختلف از دهانه ورودی لوله اثر قابل توجهی بر فشار مقطع ورودی لوله نگذاشته است؛ به طوری که در این قطر میزان متوسط فشار مقطع ورودی همچنان

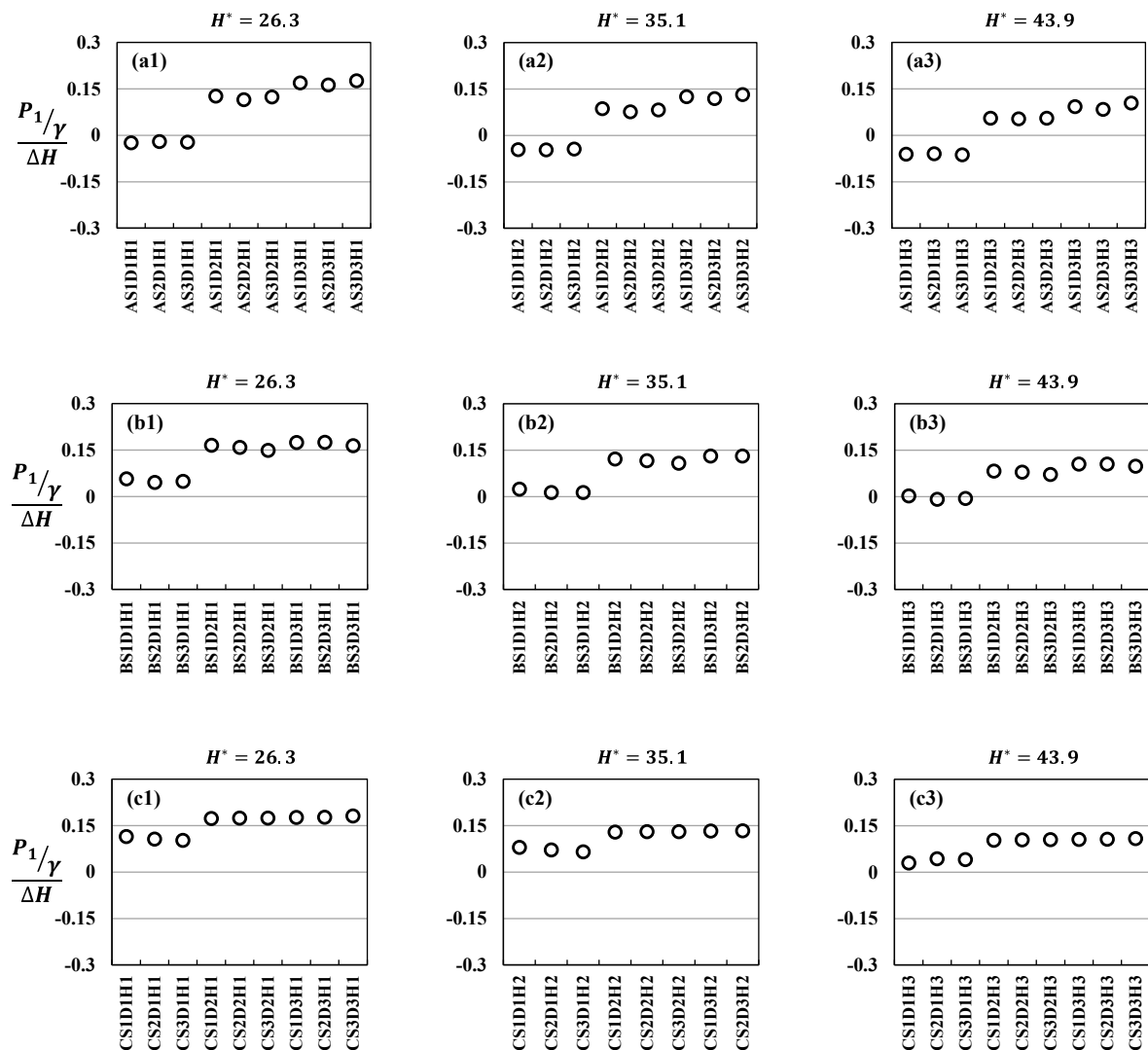


Fig. 16 Measured and calculated mean pressure on the inlet of the suction pipe for the step 2 investigation for a) Type1, b) Type2 and c) Type3

شکل ۱۶ مقادیر فشار اندازه‌گیری و متوسط فشار محاسبه شده در دهانه لوله مکش در مرحله دوم آزمایش‌های تحقیق برای لوله‌های (a) مدل ۱، (b) مدل ۲ و (c) مدل ۳

کاهش افت انرژی و افزایش راندمان سامانه VMHS دارند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

این تحقیق به بررسی مشخصات هیدرولیکی سامانه مکش عمودی چند روزنه‌ای (VMHS) بدون حضور رسوب در مخزن پرداخته است؛ موضوعی که به‌رغم اهمیت بالا، تاکنون کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. آزمایش‌ها شامل بررسی انواع لوله‌های مکش با آرایش‌ها و اندازه‌های مختلف روزنه‌ها در شرایط مختلف انرژی ورودی بود. نتایج نشان داد که در مرحله اول، ضریب افت طولی لوله در محدوده آزمایش‌ها به طور متوسط برابر با ۰/۰۱۷ و ضرایب افت

به منظور بررسی دقیق‌تر اثر متغیرهای هندسی، نتایج برای لوله‌های مختلف به‌صورت تفکیک‌شده تحلیل شد. برای نمونه، در لوله‌های تک‌روزنه با قطر نسبی ۰/۲۵ درصد، ضریب بده جریان به طور متوسط ۰/۶۵ به‌دست آمد، در حالی که در لوله‌های سه‌روزنه با قطر نسبی ۰/۷۵ درصد این مقدار تا ۰/۸۳ افزایش یافت (حدود ۲۸ درصد بهبود). همچنین، مقایسه لوله‌های دو روزنه و سه روزنه نشان داد که با افزایش تعداد روزنه‌ها، فشار نسبی دهانه لوله حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد کاهش یافته و در نتیجه سهم ورود جریان از روزنه‌ها افزایش پیدا کرده است. این نتایج بیانگر آن است که قطر و تعداد روزنه‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در

موضعی برای زانویی، دو زانویی متوالی و فلومتر به ترتیب ۲/۰۹۴، ۲/۶۸۱ و ۱/۳۴۵ برآورد شدند.

همچنین نتایج مرحله دوم و سوم آزمایش‌ها نشان داد که ضریب بده جریان روزنه‌ها در دامنه ۰/۶۲ تا ۰/۸۵ متغیر بوده که بیانگر کاهش حدود ۲۵ تا ۴۰ درصدی نسبت به مقدار تئوریک است. بررسی فشار هیدرولیکی در دهانه ورودی لوله گویای آن بود که با افزایش قطر و تعداد روزنه‌ها، میانگین فشار نسبی دهانه لوله تا حدود ۳۰ درصد کاهش یافت و در مقابل سهم ورود جریان از طریق روزنه‌ها تا بیش از ۷۰ درصد افزایش پیدا کرد. به‌ویژه در لوله‌های سه روزنه با قطر بزرگ (معادل ۷۵ درصد قطر لوله)، بیشترین کاهش ضریب افت موضعی روزنه‌ها مشاهده شد، به‌طوری که مقادیر منفی ضریب افت موضعی ناشی از وجود روزنه‌ها در لوله مکش ( $k_f$ ) نشان دادند این روزنه‌ها نه تنها مانعی در برابر جریان نبودند، بلکه به‌عنوان مسیر اصلی ورود جریان به سامانه عمل کرده‌اند. همچنین، مقایسه فشار متوسط نشان داد که نسبت به لوله بدون سوراخ، در لوله‌های دو سوراخه کاهش فشار حدود ۱۵٪ و در لوله‌های سه سوراخه با قطر بزرگ‌تر کاهش فشار تا حدود ۳۰٪ مشاهده شد به طور کلی، نتایج کمی و کیفی این تحقیق نشان می‌دهد که افزایش تعداد و قطر روزنه‌ها می‌تواند موجب کاهش افت انرژی و بهبود عملکرد هیدرولیکی سامانه VMHS شود؛ یافته‌ای که می‌تواند مبنای طراحی بهینه و ارتقاء بازدهی سامانه‌های تخلیه رسوب در مقیاس میدانی قرار گیرد.

در راستای ارتقای این تحقیق، پیشنهاد می‌شود که از سامانه هیدروساکشن VMHS با انواع متنوعی تری از قطر لوله مکش، قطر، تعداد و آرایش روزنه‌ها (که در این تحقیق به دلیل محدودیت زمانی صورت نپذیرفت)، استفاده شود تا نتایج جامع‌تر به دست آمده منجر به شناخت بهتر این سامانه و در نهایت ارتقاء بازدهی آن در تخلیه رسوبات مخزن شود.

#### تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این

پژوهش ندارند.

#### منابع مالی

نویسنده (نویسندگان) هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

#### دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است. مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

#### مشارکت نویسندگان

**نویسنده اول:** طراحی و انجام آزمایش‌ها، تجزیه و تحلیل داده‌ها، بررسی نتایج و نگارش اولیه مقاله.

**نویسنده دوم:** نظارت بر انجام آزمایش‌ها، بررسی و انجام اصلاحات در نتایج و متن.

**نویسنده سوم:** نظارت بر انجام آزمایش‌ها، بررسی و پیشنهاد اصلاحات.

#### تقدیر و تشکر

این تحقیق در قالب رساله دکتری نویسنده اول انجام شده است و از مساعدت‌های آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران قدردانی می‌گردد.

#### ۵- منابع

Arakawa, K., Fukuhama, M. & Katayama, H. (2013). Experimental study on the VMHS method using a water head. ICOLD. International Symposium on 81<sup>st</sup> Annual Meeting, Seattle, USA, 1671-1681

Basson, G.R. (2009). Management of siltation in existing and new reservoirs. (General Report Q. 89). 23<sup>rd</sup> Congeries. of the International Commission on Large Dams CIGB-ICOLD, Brasilia (vol. 2).

Brandt, S.A. (2000). A review of reservoir desiltation. *International Journal of Sediment Research*, Elsevier, 15(3), 321-342.

Eftekharzadeh, S. (1987). Sediment bypass system

*Multiphase Flow*, 27(3), 282–289.

Katayama, H., Fukuhama, M. & Arakawa, K. (2013). Experimental study about the vertical multi-hole suction pipe method using water head. *Journal of Japanese Society of Civil Engineering*, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), 69(4), I\_1081– I\_1086. 10.2208/jscejhe.69.I\_1081.

Numano, Y., Nakamura, T. & Katayama, H. (2015). Experimental study on the conditions for use of the vertical multi hole suction pipe (VMHS) method. ICOLD, International commission on des grands barrages, Stavanger, Norway, Q96-R.

Okano, M., Matano, F., Sekimoto, T. & Katayama, H. (2004). Experimental study on the hydraulic characteristics of the multi-hole suction pipe. *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, 48, 1393–1398.

Shrestha, J.P., Pahlow, M. & Cochrane, T.A. (2022). Managing reservoir sedimentation through coordinated operation of a transboundary system of reservoirs in the Mekong. *Journal of Hydrology*, 610, 127930. 10.1016/j.jhydrol.2022.127930

Tavakoli, S., Ghiassi, R. & Saneie, M. (2023). Proposing inclined multi-hole suction (IMHS) systems for sediment removal in reservoirs using the hydro-suction method. *Arabian Journal of Science Engineering*, 48(4), 5185–5198.

Ullah, S.M. (2003). Siphon removal of cohesionless materials. MSc. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Windsor, Ontario, Canada.

Water News (1993), Water Current, 25(3), 3.

for impounding reservoirs. Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering and Engineering Mechanic, University of Arizona, Tucson, Arizona.

Bruk, S. (1985). Methods of Preserving Reservoir Capacity. Methods of computing sedimentation in lakes and reservoirs, Paris, Unesco, 233.

Fan, J. & Morris, G.L. (1992). Reservoir sedimentation II: reservoir desiltation and long-term storage capacity. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(3), 370–384.

Hosseini Ghafari, S., Badiei, S.P. & Kouchakzadeh, S. (2020). Hybrid physical-numerical study on the performance of clear-water flow through vertical multi-holes suction (VMHS) systems. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 28(2), 174–185.

Hosseini Ghafari, S., Kouchakzadeh & Badiei, P., (2024). Reservoir sediment removal using VMHS: storage loss vs. environmental impact, *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 30(3), <https://doi.org/10.1080/09715010.2024.2329131>.

Hotchkiss, B.H. & Huang, X. (1995). Hydro suction sediment-removal systems (HSRS): principles and field test. *Journal of Hydraulic Engineering*, June, 121(6), 479–489.

Kaiser, M.J. & McAllister, E.W. (2022). Pipeline rules of thumb handbook: A manual of quick, accurate solutions to everyday pipeline engineering problems, 9<sup>th</sup> ed. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2019-0-04885-6>.

Katayama, H. & Tajima, Y. (2013). Pipeline sediment transportation using hydro suction sediment removal systems. *Japanese Journal of*

© 2026 The Author(s). Published by Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

