

Modelling of Air Entrainment in Dropshafts


Masoud Montazeri Namin¹, Ehsan Qonche², Malihe Eslampanah^{3*}

1- Associate Prof., School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran

2- Graduated M.Sc., School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran

3- M.Sc. Student, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran

* Malihe.eslampanah@gmail.com

Received: 1 February 2022, Accepted: 5 May 2022  J. Hydraul. Homepage: www.jhyd.iha.ir

Abstract

Introduction: The vertical shaft is one of the most important hydraulic structures that is often used in urban drainage systems. The function of the vertical shaft is to transfer water from an arbitrary level to lower levels.

The issue of air entering the vertical shaft is very important. The transfer of a significant amount of air inside the pressurized tubes can lead to the formation of high-pressure air masses, which gradually grow and may burst inside the tubes as they enlarge (Falvey, 1980) which causes damage to the shaft and the pipes that are connected to it and also it reduces the shaft permeability, which is also undesirable.

Due to the lack of attention to the hydraulics of the vertical shaft and the consequences of its incorrect construction, the study on the amount of inlet air seems necessary. In this study, measuring the amount of inlet air at different flow rates is desired. Finding the minimum amount of incoming air can help to better design the projectile shaft. By comparing the behavior of the projectile shaft in different states, the correction efficiency of the shaft can be obtained.

Methodology: The model is adapted from a laboratory study conducted at the University of Alberta.

The vertical shaft under study has a height of 7.72 meters and a diameter of 0.38 meters. The diameter of the inlet pipe of the shaft is half the diameter of its main body (0.19 m) and the diameter of the outlet pipe and its length are equal to 0.38 m and 1.5 m, respectively, and the flow of outlet water is discharged into the open air. The upper part of the shaft is blocked and the ambient air is allowed to enter the shaft only with a circular tube with a diameter of 0.10 m located at 0.20 m above the shaft. An air shaft with a diameter of 0.15 m is located at 0.5 m from the shaft outlet for air circulation, which is connected to the upper part of the shaft.

The software used in this research is open foam.

In this networking, a total of 121947 elements are used. The KOmega SST turbulence model is used to solve the current turbulence term. Boundary conditions are defined for velocity (u), pressure (p), fluid type index (α) and turbulence (k, omega, nut) parameters. The initial value of velocity and pressure was assumed to be zero. To consider the initial value of the fluid type index, the number zero is entered so that this shaft is empty of water at first.

Results and Discussion: As the speed increases, the pressure decreases sharply, causing the

pressure inside the shaft to become negative and air to be drawn in from the outside into the shaft.

The more intense the water inlet flow, the more air enters the shaft from the surrounding environment. As the dimensionless flow of water inflow increases, the relative demand decreases by 85%.

As the inlet flow increases, the amount of return air through the air shaft into the vertical shaft increases. As the inlet flow intensifies at low flow rates, the amount of air supplied by the air shaft increases, but in higher current intensities this value is almost constant.

As the amount of air circulated by this shaft increases, the pressure gradient between this point and the upper part of the shaft is expected to increase. As the inlet water velocity increases, it can be seen that as the inlet flow rate increases more, both the amount of air supplied by the air shaft and the amount of inlet air from outside the shaft do not change significantly, which can create a semi-closed area at the top of the shaft to allow air to flow and move down.

The pressure inside the shaft increases from the bottom to the top and the highest pressure gradient is observed in the middle points, which are called the rainfall areas.

There is not much difference in the intensity of low inlet currents between the performance of the two types of shafts, but as the amount of inlet water to the shaft increases, the effect of the air shaft on reducing the amount of inlet air becomes apparent.

The pressures inside the shaft are almost equal at low current intensities and are spaced apart at high current intensities.

Conclusion: The amount of inlet air increases with the increasing intensity of water inlet flow. By increasing the intensity the amount of air demand decreases.

The air shaft performs better at higher current intensities.

There is not much difference in the intensity of low inlet currents between the performance of the two types of shafts, but as the amount of inlet water to the shaft increases, the effect of the air shaft on reducing the amount of inlet air becomes apparent. Also, the value of the pressure in the modified shaft is clearly reduced.

Keywords: Vertical shaft, air inlet, air circulation pipe, turbulence model.



© 2022 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

مدل سازی عددی ورود هوا به آب شفت قائم

مسعود منتظری نمین^۱، احسان غنچه^۲، ملیحه اسلام پناه^{۳*}

۱- دانشیار مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

۲- کارشناس ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی دانشکده فنی، دانشگاه تهران

۳- کارشناس ارشد مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

* Malihe.eslampanah@gmail.com

دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۲، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۱۵، وب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

چکیده- شفت قائم اغلب در سیستم‌های زهکشی شهری استفاده می‌شود، وظیفه آن انتقال عمودی آب از سطحی بالاتر به پایین‌تر است. این مطالعه به بررسی رفتار شفت قائم اصلاح شده به وسیله شفت هوا و مقایسه با حالت اصلی پرداخته است. برای ساخت مدل هندسی از نرم‌افزار سالومه^۱ استفاده و حل هیدرولیکی توسط این‌فوم^۲ انجام گردید و برای استخراج و نمایش داده‌های خروجی نرم‌افزار پاراوو^۳ به کار گرفته شد. از مهم‌ترین مسائل مربوط به شفت قائم، ورود هوا از محیط بیرونی به داخل شفت و انتقال آن به سمت لوله‌های متصل به شفت است. تحقیق بر روی ۸ شدت جریان ورودی آب انجام شده و مقدار هوای ورودی، مقدار هوای گردش یافته توسط شفت هوا و مقدار فشار هوا در نقاط مختلف شفت محاسبه شد. با افزایش شدت جریان مقدار هوای ورودی به شفت افزایش یافته، ولی مقدار تقاضای هوا با افزایش شدت جریان بی بعد از ۰/۱۴ تا ۰/۱۷ به میزان ۸۵ درصد کاهش می‌یابد. فشار هوای منفی داخل شفت با افزایش شدت جریان بیش‌تر می‌شود بدین صورت که در شدت جریان ۳/۹ لیتر بر ثانیه ماکزیمم فشار منفی قرائت شده در محدوده بررسی شده ۱۰۰- پاسکال بوده، ولی در شدت جریان ۴۸/۸ این عدد حدوداً ۵۰۰- محاسبه شده است. با مقایسه شفت قائم اصلاح شده و بدون شفت هوا می‌توان دریافت که در شدت جریان‌های برابر مقدار هوای ورودی به شفت به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد، این کاهش در شدت جریان‌های بالا مشهودتر است همچنین فشار هوای منفی داخل شفت در وجود شفت هوا به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

کلیدواژگان: شفت قائم، ورود هوا، لوله گردش هوا، مدل آشفنگی

۱- مقدمه

در آن جابه‌جا شود و آب در ورودی و یا خروجی آن تا حد امکان تجمع پیدا نکند تا شدت جریان عبور دهی این سازه میزان قابل قبولی باشد. از هدف‌های ساخت شفت قائم می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- انتقال آب از سطح زمین به لایه‌های زیرین
- تخلیه و انتقال آب مخزن سد در سرریزهای نیلوفری
- کاربرد به صورت آبگیر و برداشت آب از رودخانه‌ها و برکه‌ها
- استهلاک انرژی آب برای جلوگیری از آسیب دیدن تجهیزات

شفت قائم یکی از مهم‌ترین سازه‌های هیدرولیکی می‌باشد که اغلب در سامانه‌های زهکشی شهری از آن استفاده می‌شود. وظیفه شفت قائم انتقال آب از یک سطح دلخواه به سطح‌های پایین‌تر می‌باشد. به طور کلی در هیدرولیک به هر لوله قائمی که آب را منتقل می‌کند شفت قائم گفته می‌شود و در سازه‌هایی چون آبگیر و سرریز نیلوفری نیز یافت می‌شود. با توجه به حساس بودن نقش شفت قائم، می‌بایست این سازه، قوی و با بازده بالا ساخته شود، تا هر لحظه آمادگی لازم برای بهره‌برداری را دارا باشد و از آسیب دیدن در حین عمل مصون بماند. طراحی هیدرولیکی شفت نیز باید به گونه‌ای باشد که آب به راحتی

1 Salome
2 Open Foam
3 ParaView

دیدن شفت و لوله‌های متصل به آن می‌شود و همچنین ضریب آبگذری شفت را کاهش می‌دهد که این امر نیز مطلوب نمی‌باشد. به دلیل توجه کم به هیدرولیک شفت قائم و پیامدهای ساخت اشتباه آن، بررسی بر روی میزان هوای ورودی ضروری به نظر می‌رسد در این پژوهش اندازه‌گیری میزان هوای ورودی در شدت جریان‌های مختلف مورد نظر می‌باشد. یافتن کمینه میزان هوای ورودی می‌تواند کمک شایانی در طراحی بهتر شفت پرتابه‌ای کند. با مقایسه رفتار شفت پرتابه‌ای در حالت‌های مختلف می‌توان میزان کارایی اصلاح انجام شده بر روی شفت را به دست آورد. شکل ۱ شفت قائم پرتابه‌ای را نشان می‌دهد.

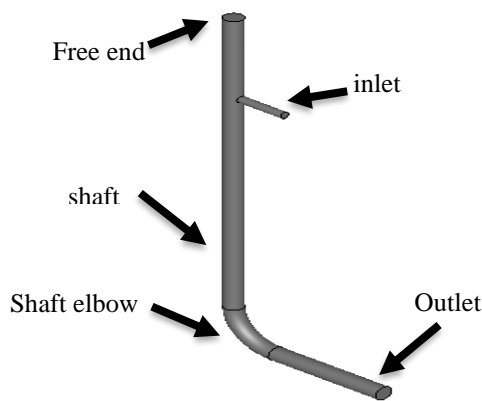


Fig. 1 Plunge drop shaft
شکل ۱ شفت قائم پرتابه‌ای

عامل‌های مختلفی بر روی هیدرولیک جریان شفت قائم پرتابه‌ای و همچنین سازوکار ورود هوا به درون آن تاثیرگذارند که این عامل‌ها عبارت‌اند از: طول شفت، قطر شفت، وجود یا نبود استخر استغراق در انتهای شفت، چگونگی ورود آب به درون شفت، شعاع زانویی و شدت جریان ورودی. در این تحقیق طول و قطر شفت در همه‌ی آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شده است و شفت بدون استخر استغراق می‌باشد. شدت جریان ورودی به شفت متغیر فرض شده است تا تاثیر افزایش و کاهش این فراسنجه بر میزان هوای ورودی به شفت اندازه‌گیری شود.

۱-۱- انواع شفت قائم

شفت قائم دارای انواع مختلفی می‌باشد که هر کدام برای کاربری خاصی ایجاد می‌شوند و برتری‌ها و کاستی‌ها مربوط به خود را دارند برخی از انواع شفت قائم به صورت زیر می‌باشد:

- شفت چرخشی^۱
- شفت سرسره‌ای (هلیکوپتری)^۲
- شفت پله‌ای^۳
- شفت ریزشی^۴

۲-۱- جریان دو فاز آب و هوا

در بسیاری از سازه‌های هیدرولیکی، ورود هوا به آب و انتقال آن توسط جریان آب باعث بروز نارسایی‌هایی می‌شود. ورود هوا به درون تاسیسات هیدرولیکی می‌تواند باعث آسیب رساندن به این ابنیه شود و همچنین از بازده آن‌ها بکاهد. ورود هوا به درون آب باعث تغییر در چگالی و تراکم‌پذیری آن می‌شود که در نتیجه ساختار اغتشاش جریان را عوض می‌کند (Carvalho, 2002).

در شفت قائم نیز اختلاط آب و هوا مطلوب نبوده و باعث پایین آمدن کارایی می‌شود همچنین در انتهای شفت هوای محبوس شده در آن ممکن است در حین آزاد شدن ضربه‌هایی به سازه وارد کرده و همچنین باعث ایجاد آلودگی صوتی بیشتر شود.

شفت پرتابه‌ای کارکرد هیدرولیکی مناسبی ندارد ولی به دلیل مقرون به صرفه بودن استفاده از این نوع شفت، هنوز برای انتقال آب در سامانه‌های زهکشی شهری به وفور استفاده می‌شود. با پیدا کردن رفتار هیدرولیکی شفت می‌توان به بهبود کارکرد آن کمک کرد. مسئله ورود هوا به داخل شفت قائم بسیار مهم می‌باشد. انتقال میزان قابل توجهی از هوا درون لوله‌های تحت فشار می‌تواند باعث تشکیل توده‌های پر فشار هوا شود و این توده‌ها به تدریج رشد کرده و ممکن است پس از بزرگ شدن، با ترکیدن در لوله‌ها آزاد شوند (Falvey, 1980) که این امر باعث آسیب

1 Vortex drop shaft
2 Helicoidal ramp drop shaft
3 Cascade drop shaft
4 Plunge drop shaft

۱-۳- نوآوری تحقیق

پیش از این تحقیقات پراکنده‌ای برای اندازه‌گیری میزان هوای ورودی به شفت به صورت آزمایشگاهی انجام شده است ولی در هیچ کدام از تحقیقات به صورت عددی به بررسی این موضوع پرداخته نشده است. لازم به یادآوری است که در شفت قائم به صورت معمول میزان استهلاک انرژی مورد توجه قرار می‌گرفت؛ به همین دلیل در اینجا سعی شد به جنبه مهم دیگر که ممکن است باعث بروز آسیب به تجهیزات شود پرداخته شود. به دلیل این که این تحقیق به صورت عددی می‌باشد نسبت به کار Ma et al. (2018) که به صورت آزمایشگاهی بوده است دارای سرعت بالاتر و هزینه کمتر می‌باشد. همچنین بررسی مدل‌های آشفته‌گی مناسب با حل این نوع شفت‌ها، ارائه راه حل کلی برای بررسی و طراحی و بهینه کردن شفت‌های قائم از برتری‌های این کار نسبت به کار ما و همکاران می‌باشد. به طور کلی در این تحقیق تلاش شده است برای نخستین بار شفت قائم پرتابه‌ای به صورت هیدرولیکی بررسی شود. افزون بر این موارد بررسی و مقایسه شفت‌های مختلف برای نخستین بار در این تحقیق به انجام رسیده است.

شفت قائم پرتابه‌ای در مقایسه با دیگر انواع شفت‌ها دارای هزینه ساخت پایین‌تر است و ساخت آن بسیار ساده‌تر می‌باشد ولی دارای کاستی‌هایی مانند استهلاک کم انرژی و ورود زیاد هوا به درون سامانه لوله‌کشی می‌باشد بنابراین در این تحقیق به بررسی و ارزیابی بر روی میزان هوای ورودی به این نوع شفت پرداخته شده است تا در آینده دید بهتر و جامع‌تری برای طراحی و میزان ورودی هوا به درون این نوع شفت وجود داشته باشد.

Camino et al. (2014) با بررسی دو شفت به طول‌های ۷/۷ و ۶/۳ متر میزان مستهلک شدن انرژی و همچنین ورود هوا به درون شفت را اندازه‌گیری کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش شدت جریان ورودی میزان هوای وارد شده به آب بیشتر می‌شود. همچنین میزان هوای ورودی در نسبت‌های ارتفاع به قطرهای (H/Ds) مختلف را بررسی و دریافتند که با افزایش این نسبت، میزان هوای ورودی به درون شفت به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد (Camino et al. , 2014).

Wei et al. (2018) با ایجاد گردش هوا از طریق قرار دادن یک صفحه در شفت و جدا کردن قسمت تر و خشک از یکدیگر به بررسی شفت قائم پرداختند. آنان این شفت را در سه حالت بدون هوادهی، با هوادهی کم (میزان بازشدگی در شفت کم) و با هوادهی زیاد (میزان بازشدگی در شفت زیاد) بررسی و با شفت قائم بدون لوله گردش هوا مقایسه کردند. نتایج به دست آمده از این آزمایش‌ها نشان دادند که شفت بدون صفحه جداکننده دارای ظرفیت آبگذری بیشتری می‌باشد ولی عمل گردش هوا در شفت با صفحه جداکننده کمک بسیاری در کاهش هوای موجود در آب می‌کند و باعث می‌شود هوایی که همراه با آب وارد شفت قائم شده است بدون اختلاط با آب از درون شفت بیرون برود. همچنین نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که شفت با هوادهی زیاد به گردش هوای بهتر شفت کمک می‌کند و باعث کاهش بیشتر میزان هوای درون سازه می‌شود (Wei et al. , 2018).

Ma et al. (2018) با انجام برخی اصلاح‌ها بر روی شفت قائم آزمایش شده توسط کامینو در سال ۲۰۱۴ به بررسی تاثیر این اصلاح‌ها بر روی هوادهی و فشار درون شفت پرداختند. اصلاح‌های آنان در دو بخش صورت گرفت که بخش نخست آن اتصال لوله گردش هوا (شفت هوا) به قطر ۱۵ سانتی‌متر به شفت قائم از پایین دست به بالادست و بخش دوم اصلاح‌های آنان بستن بالای شفت و ایجاد لوله هوادهی به قطر ۱۰ سانتی‌متر در قسمت بالایی شفت بود. آنان سعی کردند که در حین بررسی این موارد، تاثیر وجود و یا نبود دریچه در پایین دست شفت را بررسی و ارزیابی کنند. مشاهده‌هایشان نشان داد که در صورت انجام اصلاح‌های گفته شده در شدت جریان‌های پایین، میزان هوای ورودی به شفت از بیرون تغییری نمی‌کند، این امر بدین معناست که اصلاح‌های گفته شده در شدت جریان‌های پایین نتیجه نداده است، ولی در شدت جریان‌های بالا دیدند که میزان هوای ورودی نزدیک به ۱۹٪ و فشار درون شفت نیز نزدیک به ۲۶٪ کاهش می‌یابد. بنابراین پیش‌بینی‌های ایشان، کارکرد شفت با لوله گردش هوای بزرگ‌تر (قطر بیشتر) بسیار بهتر خواهد بود به طوری که اگر این لوله با قطر ۳۸ سانتی‌متر به کار رود میزان هوای

حلگر و مشاهده‌های آزمایشگاهی و کدهای صحت‌سنجی شده، بیان کردند که این حلگر دارای دقت خوبی برای حل مسئله‌های دوفازی می‌باشد (Deshpande et al., 2012).
 آزمایش‌هایی برای بررسی اثرگذاری متغیرها بر گردش هوا انجام دادند. نتایج به‌دست آمده از تحلیل ابعادی نشان داد که عدد فرود جریان (Fr)، نسبت ارتفاع کل افت به قطر شفت (L/D)، و نسبت عمق به قطر شفت (Hs/D) تأثیر قابل توجهی بر روی تخلیه نسبی هوا (β) دارند. آنان یک معادله مبتنی بر رگرسیون به شکل چند جمله‌ای درجه دوم برای برآورد متغیر β پیشنهاد دادند افزون بر این، طراحی تجربی برای بررسی اثرگذاری‌های همزمان Fr ، L/D و Hs/D بر روی β بود. نتایج مطالعه تجربی نشان داد که متغیر β با افزایش متغیر Fr و نسبت L/D روند صعودی داشته است. تجزیه و تحلیل واریانس برای مدل رگرسیون پیشنهادی نشان داد که اثر همزمان L/D و Hs/D بر متغیر β از نظر آماری معنی‌دار است، در حالی که دیگر اثرگذاری‌های متقابل متغیرها ناچیز است. در نهایت، مکان بهینه برای نصب لوله دریچه هوا از D تا $2.25D$ متغیر بود، به گونه‌ای که لوله دریچه هوا رضایت‌بخش‌ترین سطح کارکرد جریان خروجی هوا را داشت (Mahmoudi-Rad and Najafzadeh, 2021).

۴-۱- هدف‌های تحقیق

در این پژوهش اندازه‌گیری میزان هوای ورودی در دبی‌های مختلف مورد نظر می‌باشد. یافتن کمینه میزان هوای ورودی می‌تواند کمک شایانی در طراحی بهتر شفت پرتابه‌ای کند. با مقایسه رفتار شفت در حالت‌های مختلف می‌توان میزان کارایی اصلاح انجام شده بر روی شفت را بدست آورد.

۲- مواد و روش‌ها

به نرم افزارهایی که به حل معادله‌های در زمینه سیال‌ها می‌پردازند³ CFD می‌گویند. این فوم از قوی‌ترین نرم‌افزارهای موجود در زمینه دینامیک سیالات می‌باشد

ورودی ۷۰٪ و فشار منفی بالای شفت ۹۰٪ کاهش پیدا خواهد کرد (Ma et al., 2018).

Jeager et al. (2016) با مدل‌سازی جریان همراه با اسلاگ^۱ در لوله‌های قائم و افقی به قطر ۹۴ میلی‌متر توسط نرم‌افزار fluent به بررسی ویژگی‌های این جریان پرداختند. مدل‌های آشفتگی مورد استفاده در این تحقیق عبارت‌اند از: $k-\omega$ SST و $k-\epsilon$, $k-\epsilon$ RNG, $k-\omega$. آنان با به‌دست آوردن ضریب حجمی هوا در نقطه‌های مختلف و در طول زمان به این نتیجه رسیدند که جریان در درون این لوله‌ها به صورت جریان تعویضی^۲ می‌باشد (Jaeger et al., 2016).

Wang et al. (2017) با استفاده از نرم‌افزار Fluent به مدل‌سازی دوفازی آب و هوا در شفت قائم سراسره‌ای هلیکوپتری پرداختند. ارتفاع این شفت ۲ متر و طول ورودی و خروجی آن به ترتیب ۰/۳ و ۲ متر بوده و این شفت را با ۴ سرعت ورودی مختلف آزمایش کردند. هیدرولیک این شفت در سرعت‌های ورودی مختلف بررسی شد و آنان در نتایج بیان کردند؛ لازم است طراحی بهینه برای اتصال ورودی و خروجی به شفت برای جلوگیری از به‌وجود آمدن منطقه‌هایی با فشار منفی در نقطه‌های اتصال ورودی و خروجی به شفت انجام شود (Wang et al., 2017).

Lopes (2013) به بررسی اختلاط آب و هوا در یک جریان مغشوش و دوفازی پرداخته است. او با کمک گرفتن از نرم‌افزار openFOAM و حلگر interFoam میزان غلظت هوا در آب را به‌دست آورده و با مشاهده‌های آزمایشگاهی خود مقایسه کرده است. با آزمایش مدل‌های آشفتگی مختلف به این نتیجه رسید که مدل $k-\epsilon$ RNG رفتار هوا در آب را بهتر نشان می‌دهد ولی همه‌ی این مدل‌ها روند تغییر پذیری‌های غلظت هوا را به‌درستی به‌دست می‌آورند (Lopes, 2013).

Deshpande et al. (2012) با بررسی حلگر interFoam در شرایط مختلف دقت حل مسئله‌های مختلف توسط آن را به‌دست آوردند. آنان با مقایسه نتایج بدست آمده از این

1 Slug flow
2 Churn flow

3 Computational Fluid Dynamic

متر قطر می‌باشد. قطر لوله ورودی شفت نصف قطر بدنه اصلی آن (۰/۱۹ متر) و قطر لوله خروجی و طول آن به ترتیب برابر با ۰/۳۸ متر و ۱/۵ متر است و جریان آب خروجی به هوای ازاد تخلیه می‌شود. همان‌طور که گفته شد قسمت بالایی شفت مسدود است و هوای محیطی تنها با یک لوله دایره‌ای به قطر ۰/۱۰ متر واقع در ۰/۲۰ متری بالای شفت، اجازه ورود به شفت را دارد. یک شفت هوا به قطر ۰/۱۵ متر واقع در ۰/۵ متری خروجی شفت برای چرخش هوا قرار داده شده است که به قسمت بالایی شفت متصل می‌شود. فراسنجه‌های تاثیرگذار در جدول ۱ به صورت خلاصه آورده شده‌اند و باقی اندازه‌های یاد شده در شکل ۳ مشاهده می‌شوند.

جدول ۱ ویژگی‌های شفت

Table 1 Geometric parameters of dropshaft

H (m)	D (m)	D _i (m)	D _o (m)	D _a (m)	D _{as} (m)
7.72	0.38	0.19	0.38	0.1	0.15

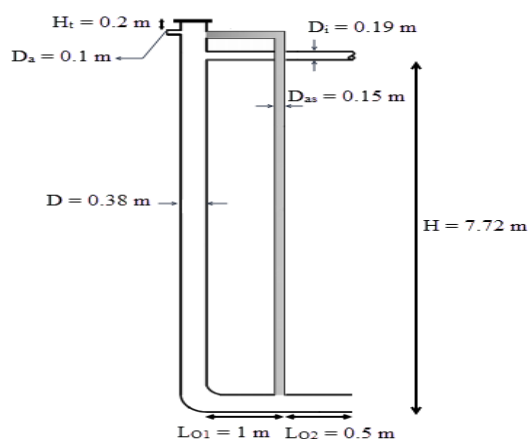


Fig. 3 Geometry parameters of present reaserch shaft

شکل ۳ ویژگی‌های شفت مورد بررسی

۲-۲- شبکه بندی مدل

برای حل سریع‌تر مسئله، به‌دلیل کوچک بودن قطر شفت هوا، فراسنجه‌های شبکه‌بندی در این ناحیه متفاوت با دیگر ناحیه‌ها تعریف شده است. در این شبکه‌بندی در کل ۱۲۱۹۴۷ المان استفاده شده است. در بین المان‌های

که امکان دسترسی به کد و اصلاح و ویرایش معادله‌ها را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. از برتری‌های این نرم‌افزار می‌توان به متن‌باز بودن، رایگان بودن، دارا بودن حلگرهای مختلف و فضای کدنویسی آسان اشاره کرد.

۱-۲- ویژگی‌های هندسی مدل

مدل ساخته شده برای این تحقیق از یک پژوهش آزمایشگاهی انجام شده در دانشگاه آلبرتا اقتباس شده است. شفت ساخته شده در این دانشگاه در شرایط مختلف توسط افراد گوناگون چند مرتبه آزمایش شده است و آخرین آزمایش انجام شده مربوط به Yiyi Ma et al. سال ۲۰۱۸ است که با تکمیل هندسه شفت موجود به تحقیق بر روی کارکرد آن پرداخته است. نمایی از شفت یادشده در شکل ۲ قابل دیدن است. (Ma. et al., 2018)

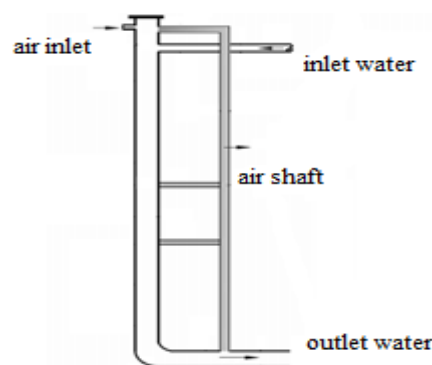


Fig. 2 Schematics of Ma et al. drop shaft

شکل ۲ شمای کلی شفت مورد بررسی توسط ما و همکاران

در شکل بالا دیده می‌شود که آب از قسمت بالایی به صورت افقی وارد شفت می‌شود و به‌صورت ریزشی به پایین می‌ریزد. قسمت بالایی بدنه اصلی شفت نیز پوشانده شده است و برای تامین هوا درون شفت یک ورودی هوا در قسمت بالایی شفت تعبیه شده است. آب با عبور از قسمت قائم به زانویی شفت رسیده و آنگاه در قسمت افقی آن جاری می‌شود. در نزدیکی خروجی شفت یک شفت هوا با قطری کوچک‌تر از قطر شفت اصلی برای چرخش جریان هوا قرار داده شده است. کار این شفت گردش هوای وارد شده به درون شفت اصلی است.

شفت قائم مورد بررسی دارای ۷/۷۲ متر ارتفاع و ۰/۳۸

صورت زیر تعریف می شود.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

(۲) معادله مومنتوم^۶: معادله مومنتوم برای دو فاز به صورت زیر تعریف می شود.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{t_{ij}}) + \rho g_i + f_{ai} \quad (2)$$

در معادله های بالا u سرعت سیال، ρ چگالی، g_i شتاب گرانش، p فشار، τ_{ij} تنش ویسکوز^۷، $\tau_{t_{ij}}$ تنش آشفتگی^۸ و f_{ai} کشش سطحی است. چگالی در این حلگر به صورت زیر تعریف می شود:

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2 \quad (3)$$

در این معادله α فراسنجه ای است که دو سیال را از یکدیگر متمایز می کند. میزان آن بدین گونه تعریف می شود که در درون سیال ۱ با چگالی ρ_1 میزان آن ۱ در نظر گرفته می شود و در درون سیال ۲ با چگالی ρ_2 نیز این میزان ۰ قرار می گیرد. لازم به یادآوری است که در مکان تغییر فاز بین دو سیال، میزان این فراسنجه بین ۰ و ۱ تغییر می کند.

تنش سطحی توسط روش پیوستگی نیروی سطحی^۹ به صورت زیر مدل می شود.

$$f_{ai} = \sigma \kappa \frac{\partial \alpha}{\partial x_i} \quad (4)$$

که در آن σ ثابت کشش سطحی و κ نیز انحنا می باشد که به صورت زیر تعریف می شود.

$$\kappa = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \alpha / \partial x_i}{|\partial \alpha / \partial x_i|} \right) \quad (5)$$

(۳) معادله مرز دو فاز: برای پی بردن به این نکته که مرز بین دو سیال در کجا قرار دارد باید یک معادله دیگر برای α حل شود که این معادله در این حلگر به صورت زیر تعریف شده است:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

این معادله را می توان به عنوان عدم از بین رفتن اجزا اختلاط در طول مرز تعریف کرد.

سه بعدی بیشتر آن ها چهاروجهی^۱ می باشند و چندتایی نیز به صورت المان منشوری^۲ هستند. نکته قابل توجه نبود المان هرمی^۳ در مدل است که در اوپن فوم این المان مورد پذیرش نمی باشد. پس از پایان شبکه بندی اولیه لازم است شبکه بندی لایه ویسکوز بر روی دیواره ها انجام شود. شبکه بندی لایه مرزی در دو لایه به ضخامت مجموع ۱ سانتی متر صورت گرفته است. لازم به یادآوری است که ضخامت لایه دوم به منظور یکپارچه تر شدن شبکه بندی این لایه با شبکه بندی کلی مسئله، دو برابر لایه چسبیده به دیواره های شفت در نظر گرفته شده است.

۲-۳- انتخاب حلگر مناسب

در نرم افزار این فوم برای حل مسئله حلگرهای متنوعی پیش بینی شده است. با توجه به اینکه هدف اصلی این پژوهش اندازه گیری میزان هوای ورودی به آب می باشد، برای حل مسئله، دو سیال جدا از هم (دو فاز) فرض می شود، بنابراین از بین دسته های مختلف دسته Multiphase flow در این پژوهش استفاده شده است. در هر دسته چند حلگر مربوط به خود موجود است که بنا بر شرایط فیزیکی و پدیده مورد نظر، یکی از آن ها انتخاب می شود. در بین این حلگرها، حلگر interFoam برای حل مسئله مناسب است. این حلگر ویژه مسئله ها با دو سیال تراکم ناپذیر و دما ثابت^۴ و اختلاط ناپذیر است. با توجه به اینکه سامانه استفاده شده در این تحقیق سامانه بسته نمی باشد و دلیل کاهش فشار درون شفت و ورودی هوا از بیرون به درون آن افزایش یافتن سرعت انتقال هوا می باشد بنا بر گفته Anderson (2010) می توان هوا را زمانی که عدد ماخ کوچکتر از ۰/۳ است تراکم ناپذیر فرض کرد. لازم به یادآوری است که در این مسئله ها عدد ماخ حداکثر تا حدود ۰/۱ است (Anderson, 2010).

۲-۴- معادله های interFoam

(۱) معادله پیوستگی^۵: معادله چگالی ثابت پیوستگی به

6 Momentum Equation
7 Viscose Stress
8 Turbulent Stress
9 Continuum surface force

1 Tetrahedral Element
2 Prismatic Element
3 Pyramid Element
4 Isothermal
5 Continuity Equation

β_1 و β^* اعداد ثابت معادله می‌باشند که میزان آن‌ها به ترتیب برابر ۲، ۲، ۰/۵۵۳، ۰/۰۷۵ و ۰/۰۹ می‌باشد.

۲-۶- شرایط مرزی اوپن فوم

در این پژوهش شرط‌های مرزی برای فراسنجه‌های سرعت (u)، فشار (p)، شاخص نوع سیال (α) و فراسنجه‌های آشفتگی (k, Omega, nut) تعریف می‌شوند. مرزهای مدل به صورت شکل ۴ هستند.

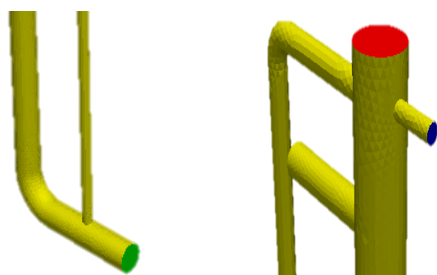


Fig. 4 Model boundaries

شکل ۴ مرزهای مدل

در شکل بالا رنگ زرد نشان‌دهنده دیواره شفت، رنگ آبی، قرمز و سبز نیز به ترتیب نشان‌دهنده ورودی هوا، سقف شفت و خروجی شفت هستند.

۲-۶-۱- شرط‌های مرزی فراسنجه سرعت و فشار

جدول ۲ شرط‌های مرزی فراسنجه سرعت و فشار را نشان می‌دهد.

جدول ۲ شرط‌های مرزی فراسنجه سرعت و فشار

Table 2 Velocity and pressure boundary conditions

(p) pressure	(u) velocity	boundries
fixedFluxPressure	fixedValue	Water inlet
totalPressure	pressureInletOutlet Velocity	Air inlet
fixedFluxPressure	fixedValue	walls
fixedFluxPressure	fixedValue	Shaft roof
totalPressure	inletOutlet	Shaft out let

۲-۵- معادله‌های آشفتگی

مدل آشفتگی KOmegaSST برای حل ترم آشفتگی جریان به کار گرفته شده است. که مخلوطی از دو مدل KOmega و KEpsilon می‌باشد. به گونه‌ای که در نزدیکی دیواره از مدل KOmega و در نقطه‌های دورتر از مدل KEpsilon برای حل استفاده می‌کند. در این پژوهش به دلیل کوچک بودن قطر لوله‌ها (۰/۳۸ متر) تفاوت محسوسی بین مدل KOmegaSST و KOmega در حل مدل وجود ندارد.

۲-۵-۱- مدل KEpsilon

دارای دو معادله یکی برای انتقال انرژی جنبشی آشفتگی (k) و دیگری برای انتقال هدررفت (ϵ) آن است که این دو معادله به صورت زیر نوشته می‌شوند.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + 2\mu_t S_{ij} S_{ij} \rho \epsilon \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t S_{ij} S_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (8)$$

در معادله‌های بالا که اولی برای انرژی جنبشی و دومی برای هدررفت است S نسبت تغییر شکل (کرنش) و ضریب‌های σ_ϵ ، $C_{1\epsilon}$ و $C_{2\epsilon}$ ثابت می‌باشند میزان آن‌ها به ترتیب برابر ۱، ۱/۳۰، ۱/۴۴ و ۱/۹۲ می‌باشد.

۲-۵-۲- مدل KOmega

این مدل دارای دو معادله یکی برای انتقال انرژی جنبشی و دیگری برای انتقال نرخ هدررفت مخصوص (ω) است که معادله‌های آن به صورت زیر نوشته می‌شوند.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \beta^* \rho k \omega \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \gamma_1 \left(2\rho S_{ij} S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \omega \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) - \beta_1 \rho \omega^2 \quad (10)$$

در معادله‌های بالا که اولی برای انرژی جنبشی و دومی برای نرخ هدررفت مخصوص است ضریب‌های σ_ω ، σ_k ، γ_1 ،

و همچنین نرخ هدررفت مخصوص به نرم افزار وارد شود. لازم به یادآوری است که این نرم افزار میزان انرژی جنبشی را توسط فرمول ۱ به دست می آورد:

$$k_p = 1.5I|U|^2 \quad (11)$$

در معادله بالا I شدت آشفتگی و U سرعت جریان در مرز مورد نظر است. رابطه ای تجربی برای جریان های درون لوله، برای به دست آوردن میزان شدت آشفتگی به صورت معادله ۲ آورده شده است (C-Online. 2016).

$$I = 0.16Re^{-\frac{1}{8}} \quad (12)$$

با توجه به سرعت های ورودی آب، میزان های شدت جریان در هر اجرا به صورت جداگانه محاسبه می شود و به نرم افزار وارد می شود.

در دیوارهای شفت نیز از شرط مرزی دیواره برای محاسبه فراسنجه های آشفتگی استفاده شده است. نکته مورد توجه برای استفاده از این شرط مرزی این است که دست کم یک سلول می بایست در لایه بافل قرار داشته باشد به همین دلیل در هنگام شبکه بندی مدل، در نزدیکی دیوارهای شفت از شبکه بندی لایه ویسکوز استفاده شده است. شکل ۵ شبکه بندی لایه ویسکوز در دیواره شفت را نشان می دهد.

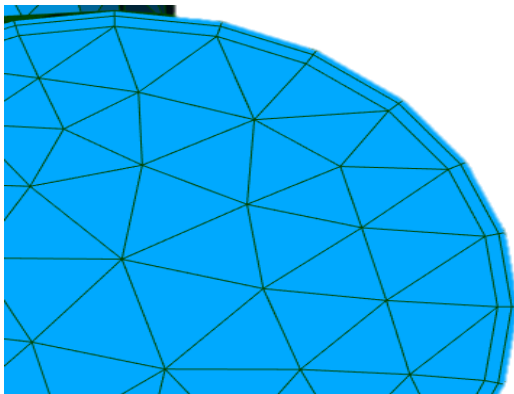


Fig. 5 Viscous layer mesh

شکل ۵ شبکه بندی لایه ویسکوز در دیواره شفت

برای قسمت ورودی آب میزان نرخ هدررفت مخصوص توسط فراسنجه طول اختلاط از رابطه ۳ محاسبه می شود:

$$\omega_p = \frac{k^{0.5}}{C_{\mu}^{0.25} L} \quad (13)$$

لازم به یادآوری است که در ورودی سرعت آب همانند تحقیق (Ma et al. 2018) به نرم افزار وارد شده است که این سرعت ها عبارت اند از: ۰/۱۳۷۶، ۰/۳۹۸۵، ۰/۶۵۶، ۰/۹۱، ۱/۱۸۱۵، ۱/۳۵۰۸، ۱/۵۰۹۵ و ۱/۶۴۲۴ متر بر ثانیه. همچنین همان طور که در جدول بالا مشاهده می شود میزان سرعت ورودی هوا از قسمت مربوط به ورود هوا به شفت توسط نرم افزار محاسبه می شود در سقف و دیواره های شفت سرعت جریان صفر وارد شده و در خروجی نیز سرعت محاسبه می شود.

برای شرایط مرزی فشار نیز دو مرز ورودی هوا و خروجی شفت فشار نسبی صفر وارد شده و در باقی منطقه ها، میزان فشار توسط نرم افزار محاسبه خواهد شد.

۲-۶-۲- شرایط های مرزی فراسنجه های آشفتگی

جدول ۳ شرایط های مرزی فراسنجه آشفتگی را نشان می دهد.

جدول ۳ شرایط های مرزی فراسنجه آشفتگی

Table 3 Turbulence boundary conditions

Turbulence viscosity (nut)	Specific dissipation rate (ω)	Kinetic energy of turbulence (k)	boundries
calculated	turbulent MixingLengthFrequency	turbulentIntensityKinetic Energy	Water inlet
calculated	inletOutlet	inletOutlet	Air inlet
nutWallFunction	omegaWallFunction	kqRWallFunction	walls
calculated	zeroGradient	zeroGradient	Shaft roof
calculated	inletOutlet	inletOutlet	Shaft outlet

با توجه به اینکه در این پژوهش از مدل KOmegaSST برای حل آشفتگی استفاده شده است باید فراسنجه های انرژی جنبشی (k)، نرخ هدررفت مخصوص (ω) و لزجت آشفتگی (nut) برای انجام حل به نرم افزار وارد شود. برای قسمت ورودی آب باید میزان انرژی جنبشی ورودی

مرکز سلول‌ها به مرکز صفحه‌ها درون‌یابی شوند که در اینجا از درون‌یابی خطی استفاده شده است.

۲-۸-۳- ترم‌های دیورژانس

برای هریک از ترم‌های موجود روش مورد نظر برای گسسته‌سازی انتخاب شد بنابراین برای سرعت روش گوس خطی آپویند، برای شاخص نوع سیال روش ون لیبر^۳، برای انرژی جنبشی روش آپویند، برای نرخ هدررفت مخصوص روش خطی محدود شده^۴ استفاده شده است.

۲-۸-۴- ترم‌های لاپلاسین

برای گسسته‌سازی این ترم‌ها از روش گوس خطی اصلاح شده استفاده شد.

برای حل معادله‌ها گسسته‌شده از روش‌هایی استفاده می‌شود که در آن به حل ماتریس‌ها به انواع گوناگون پرداخته می‌شود. با توجه به توصیه‌های راهنمای استفاده از این فوم^۵، برای حل فراسنجه‌های شاخص نوع سیال و آشفتگی و سرعت از روش Smooth Solve استفاده شده است و برای فراسنجه فشار نیز PCG استفاده شد. برای حل کوپل فشار-سرعت نیز روش PISO استفاده شده است.

۲-۹- ویژگی‌های فیزیکی

برای حل معادله‌ها نیاز به وارد کردن شتاب گرانش و جهت آن به نرم‌افزار است. با توجه به مدل ساخته شده می‌توان فهمید که شتاب گرانش در راستای محور Z بوده و جهت آن خلاف جهت این محور است. بنابراین میزان شتاب در جهت Z و برابر با ۹/۸۱- وارد شد.

برای وارد کردن ویژگی‌های سیال به مدل می‌دانیم که در این تحقیق با دو نوع سیال رو به رو هستیم که یکی آب و دیگری هوا می‌باشد. بنابراین لزجت هر دو سیال و چگالی آن‌ها و همچنین کشش سطحی به مدل وارد شده است. میزان این فراسنجه‌ها در جدول ۴ آمده است.

در رابطه بالا میزان C_{μ} برابر با ۰/۰۹ است و L نشان‌دهنده طول اختلاط می‌باشد (O.S. Consulting, 2014).

برای محاسبه طول اختلاط در درون لوله رابطه تجربی ۴ مورد استفاده است (ANSYS Fluent Inc., 2006).

$$L = f d_h \quad (14)$$

در این رابطه f ضریبی تجربی است که میزان آن از ۳ تا ۷ درصد فرض می‌شود و d_h نیز قطر هیدرولیکی جسم است. در اینجا میزان f ۷ درصد فرض شده است.

۲-۷- میزان‌های اولیه

میزان اولیه سرعت صفر در نظر گرفته شد که این مسئله بدین معناست که در آغاز هیچ سیالی در شفت حرکت نمی‌کند. میزان اولیه فشار نیز صفر وارد شده است که نشان‌دهنده این موضوع است که فشار داخل شفت در لحظه ابتدایی برابر با فشار محیط بیرون از خود است. برای در نظرگیری میزان اولیه شاخص نوع سیال عدد صفر وارد شده است تا این شفت در آغاز خالی از آب باشد.

۲-۸- گسسته‌سازی معادله‌ها

معادله‌هایی که برای حل مسئله موردنظر استفاده می‌شوند هرکدام دارای ترم‌هایی هستند که باید در آغاز گسسته‌سازی شده و پس از آن حل شوند. ترم‌های معادله‌های به انواع مختلفی گسسته‌سازی می‌شوند که برخی از آن‌ها توضیح داده می‌شوند. ترم‌های مختلف گسسته‌سازی به صورت زیر در معادله‌ها وجود دارند.

۲-۸-۱- ترم‌های زمانی

برای گسسته‌سازی ترم‌های زمانی موجود در معادله‌ها از روش اولر^۱ استفاده شد. این روش ضمنی بوده این روش بدون قید پایدار بوده ولی دارای دقت درجه اول است.

۲-۸-۲- ترم‌های گرادیان

برای گسسته‌سازی این ترم‌ها از روش گوس خطی^۲ استفاده شد. برای استفاده از فرضیه گوس باید میزان از

3 Van Leer
4 limitedLinear
5 OpenFoam User Guide

1 Euler
2 Gauss Linear

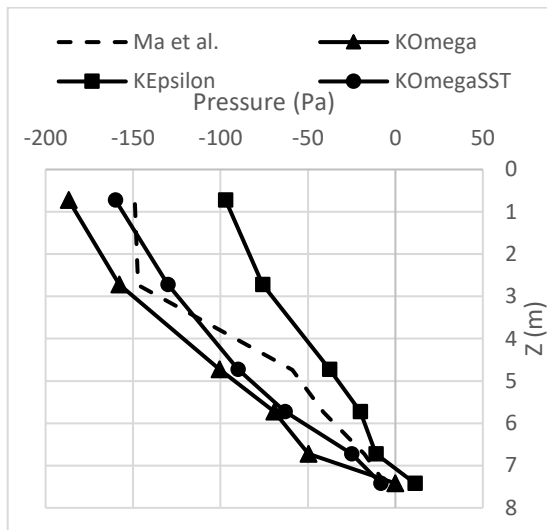


Fig. 6 Internal pressure of the shaft in different turbulence model

شکل ۶ فشار درون شفت در روش‌های آشفتگی مختلف

باشد. پیش‌بینی می‌شود با در نظر گرفتن قطره‌های آب سقوطی نتایج به حالت واقعی نزدیک‌تر شوند. لازم به یادآوری است که فشار منفی درون شفت توسط مدل Kepsilon کمتر از دو مدل دیگر پیش‌بینی شده است که با توجه به فرمول ۵ که توسط Ma et al (2016) آورده شده است، اگر فشار در یک مدل کمتر به دست آید در نتیجه میزان هوای ورودی به شفت نیز کم‌تر به دست می‌آید. فرمول یاد شده به صورت زیر است.

$$P_0 - P_1 = K^I \times 1/2 \rho_a V_a^2 \quad (15)$$

در این رابطه P_0 فشار محیطی، P_1 فشار هوا در درون شفت در ۷۲ سانتی‌متری زیر لوله ورودی، K^I ضریب هدررفت، ρ_a چگالی هوا و V_a^I سرعت هوای ورودی به شفت هستند. همان‌طور که دیده می‌شود سرعت هوای ورودی با فشار درون شفت رابطه مستقیم دارد.

۳-۲- تجزیه و تحلیل استقلال مش

تجزیه و تحلیل استقلال از مش در این تحقیق به منظور اطمینان از کفایت شبکه‌بندی مورد بحث در قسمت پیش صورت پذیرفته است. برای بررسی این موضوع شبکه‌بندی جدیدی به صورت زیر تعریف شد و سپس در دو دبی ورودی منتخب پاسخ‌ها با یکدیگر مقایسه شد.

جدول ۴ ویژگی‌های فیزیکی سیال‌ها

Table 4 Physical parameters of fluids

Physical parameters			Fluid type
Surface tension (Kg/s ²)	(Kg/m ³) density	Kinematic viscosity (m ² /s)	
0.07	1000	1e-6	water
	1	15.1 e-6	air

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مقایسه روش‌های آشفتگی مختلف

سه روش KOmegaSST، KOmega، KEpsilon و KOmegaSST با یکدیگر مقایسه شده‌اند. میزان هوای ورودی به شفت و فشار درون آن برای شدت جریان ورودی ۱۱/۳ لیتر بر ثانیه با نتایج ما و همکاران صحت‌سنجی شد و آنگاه به انتخاب مدل آشفتگی مناسب برای مسئله پرداخته شد.

جدول ۵ مقایسه میزان هوای ورودی در روش‌های آشفتگی مختلف

Table 5 Comparison of air entering in different turbulence model

Test Models	Qair (l/s)		Error (%)
	Present study	Experimental	
Kepsilon	88.6		23.36
Komega	124.4	115.6	7.61
KOmegaSST	124.2		7.44

با توجه به جدول ۵ دیده می‌شود که در این بخش از خروجی‌ها، مدل‌های KOmega بهتر از KEpsilon عمل می‌کنند.

برای مقایسه فشار درون شفت شکل ۶ آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود میزان فشار درون شفت در روش‌های Komega و KOmegaSST با تقریب خوبی با فشار گزارش شده توسط ما و همکاران هم‌خوانی دارد. لازم به یادآوری است که مبدا ارتفاعی این دستگاه مختصات محل اتصال لوله ورودی آب به شفت قائم در نظر گرفته شده و جهت این محور به سمت کف شفت می‌باشد. در دو نقطه بالایی شفت در مدل آزمایشگاهی گرادیان فشاری دیده نشده ولی در همه‌ی مدل‌ها در این ناحیه گرادیان فشار هرچند کمتر از نقطه‌های دیگر وجود دارد که این می‌تواند به دلیل سرعت کم آب در آغاز سقوط

جدول ۵ میزان هوای ورودی به دست آمده در دو حالت شبکه بندی گفته شده را نشان می دهد. لازم به یادآوری است که Error1 میزان خطای نتایج به دست آمده در حالت شبکه بندی اول و Error2 این میزان در حالت شبکه بندی ریز شده را نشان می دهد. همان طور که در این جدول دیده می شود میزان ورود هوا به شفت به دست آمده در هر دو شبکه بندی به نتایج موجود در تحقیق ما و همکاران نزدیکی قابل قبولی دارند با این تفاوت که نتایج بدست آمده توسط شبکه بندی ریزتر دارای دقت بالاتری در دبی های ورودی بالا می باشد؛ ولی این تفاوت در میزان نتایج خیلی محسوس نبوده و میزان خطا در هر دو مدل قابل قبول بوده است بنابراین با توجه به اینکه مدت زمان حل مسئله هوای ورودی به شفت در حالت دوم بسیار بیشتر از شبکه بندی اولیه می باشد، در این تحقیق از شبکه بندی حالت اول استفاده شده است.

۳-۳- تحلیل شفت مورد نظر

برای تحلیل شفت همانند بررسی های (Ma et al. (2018)، ۸ شدت جریان ورودی مختلف به مدل وارد شد و نتایج خروجی مدل با بررسی های آنان مقایسه شد. ارائه نتایج و بحث روی آن ها به سه قسمت تقسیم شده است.

۳-۳-۱- میزان هوای ورودی به شفت

در این قسمت میزان هوای ورودی به شفت و همچنین هوای تامین شده توسط شفت هوا بررسی و مقایسه شده است. لازم به توضیح است که همزمان با اجرای مدل، بررسی روی خروجی ها انجام شده است تا تعیین زمان پایان حل روی نتایج خروجی میسر گردد. در این تحقیق به دو فراسنجه اساسی برای تعیین زمان پایان حل مسئله توجه شده است که اولی ثابت شدن روند جریان در درون شفت و دومی ثابت شدن سرعت هوای ورودی از روزنه تعبیه شده برای ورود هوا می باشد. شرط اول با توجه به ثابت بودن میزان شدت جریان آب ورودی به شفت در طول زمان در هر یک از آزمایش های انجام شده، به محض رسیدن جریان آب به انتهای بازه کارهای آزمایشی روند تغییرپذیری های جریان آب ثابت می ماند؛ ولی برای تأمین

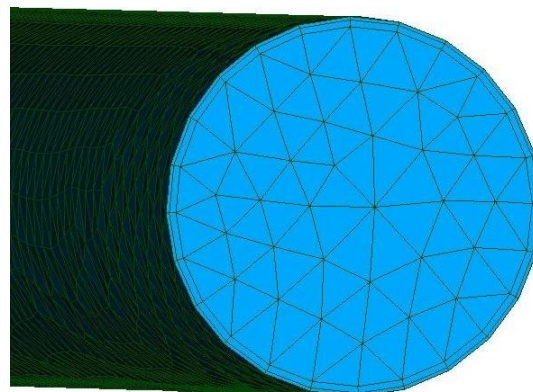


Fig. 7 Primal mesh model
شکل ۷ شبکه بندی اولیه

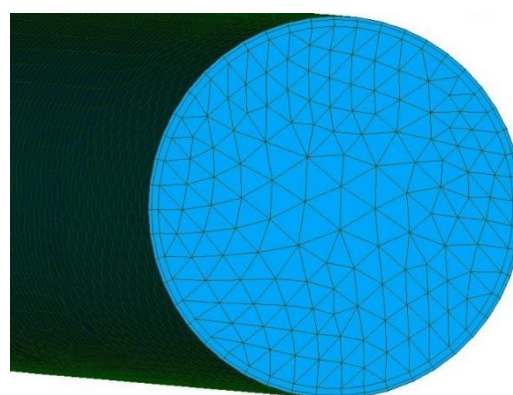


Fig. 8 Fine mesh model
شکل ۸ شبکه بندی حالت دوم

همان طور که در شکل های ۷ و ۸ مشخص است اندازه سلول ها در نقطه های میانی شفت و همچنین در راستای طولی آن کوچک تر شده ولی تفاوتی در شبکه بندی لایه ویسکوز صورت نگرفته است. لازم به یادآوری است که شمار سلول های شبکه بندی مسئله با کوچک کردن فراسنجه های شبکه بندی بیش از سه برابر شبکه بندی پیشین می باشد و به عدد ۴۳۲۶۱۵ عدد رسیده است. نتایج بررسی ها به صورت زیر خلاصه می شود:

جدول ۵ مقایسه میزان هوای ورودی به دست آمده در دو حالت شبکه بندی اولیه و ثانویه

Table 5 Comparison of air entrainment of primary and fine mesh model

Test Models	Q _{air} (l/s)		Experimental	Error 1 (%)	Error 2 (%)
	Normal Mesh	Fine Mesh			
Q _w =11.3	118.88	118.23	115.58	2.86	2.29
Q _w =38.3	150.12	148.36	144.16	4.13	2.91

به دست آمده برای شدت جریان هوای ورودی به شفت با نتایج بررسی های ما و همکاران دیده می شود که نتایج به دست آمده از این فوم با تقریب قابل قبولی نشان دهنده مشاهده های آنان می باشد.

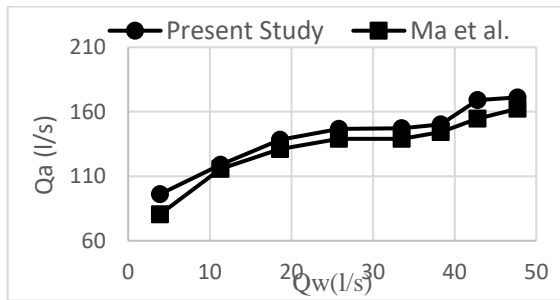


Fig. 10 Air flow rate induced from the air inlet
شکل ۱۰ میزان هوای ورودی به شفت از محیط پیرامون

با توجه به فرمول ۵ پیش بینی می شود که به دلیل بیشتر بودن شدت جریان ورودی هوا نسبت به مطالعات ما و همکاران در همه ی آزمایش ها، میزان فشار درون شفت نیز از میزان های به دست آمده توسط آنان بیشتر باشد یعنی گرادیان فشار بین درون شفت و محیط پیرامونی، بیشتر از آزمایش های ما و همکاران به دست بیاید.

میزان تقاضای نسبی هوا (air demand) در شفت های قائم فراسنجه مهمی تلقی می شود. این فراسنجه در واقع نسبت شدت جریان هوای ورودی به شدت جریان آب ورودی به شفت (Q_a/Q_w) است. واضح است که هرچه میزان این فراسنجه کمتر باشد شفت کارکرد بهتری از خود نشان داده است. در شفت حاضر میزان تقاضای نسبی هوا در قبال شدت جریان های ورودی آب مختلف به صورت نمودار زیر تغییر می کند.

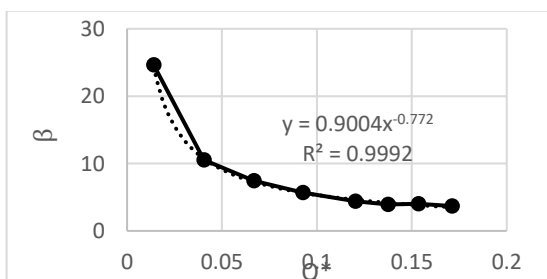


Fig. 11 Air demand as a function of water dimensionless discharge

شکل ۱۱ نمودار تقاضای نسبی هوا در شدت جریان های مختلف

شرط دوم پس از یافتن اطمینان از شرط اول به بررسی تغییرپذیری های سرعت ورودی در زمان پرداخته شد که نمونه ای از این نمودار در شکل ۹ قابل رویت است.

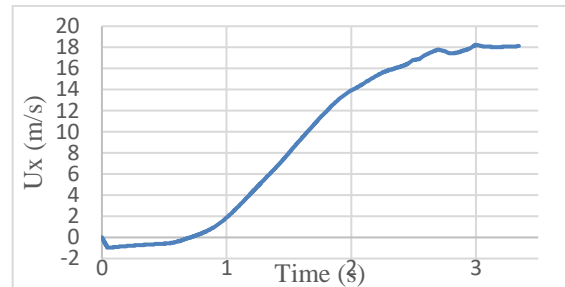


Fig. 9 Air velocity at air inlet in different times
شکل ۹ سرعت هوای ورودی در زمان های مختلف

شکل ۹ سرعت هوای ورودی به شفت با شدت جریان جریان ورودی $18/6 \text{ Lit/s}$ را نشان می دهد. همان طور که دیده می شود با گذشت $2/7$ ثانیه از آغاز حل مسئله، میزان سرعت هوای ورودی به شفت تا حدودی ثابت شده و حالت پایدار به خود گرفته است. بنابراین در این مدل، با اجرای چند گام زمانی پس از ثابت شدن میزان سرعت، حل مسئله در ثانیه $3/3$ متوقف شده است. لازم به یادآوری است که هر کدام از اجزای انجام شده در زمان متفاوتی به پایداری رسیده اند. با توجه به شکل ۶ دیده می شود که در آغاز جریان هوا از درون شفت به سمت بیرون آن بوده ولی میزان آن بسیار کم و نزدیک به صفر است. پس از حدود $0/7$ ثانیه جهت حرکت هوا به سمت درون شفت تغییر یافته که این مسئله نشان دهنده کاهش فشار هوا در درون شفت و کمتر شدن آن نسبت به محیط بیرونی است. در واقع با بالا رفتن سرعت، فشار به شدت کاهش می یابد که باعث می شود فشار درون شفت منفی شده و هوا از محیط بیرونی به درون شفت کشیده شود.

۳-۲-۳- میزان ورود هوا از بیرون شفت

میزان هوای ورودی به شفت در شدت جریان های مختلف به صورت نمودار شکل ۱۰ به دست آمده است.

با توجه به این نمودار دیده می شود که هرچه شدت جریان ورودی آب بیشتر شود میزان هوای بیشتری از محیط پیرامون به درون شفت ورود می کند. با مقایسه میزان های

افزایش شدت جریان ورودی، گرادیان فشار بین این دو نقطه افزایش می‌یابد که باعث افزایش هوای گردش یافته می‌شود.

با افزایش شدت جریان ورودی در شدت جریان‌های پایین میزان هوای تامین شده توسط شفت هوا افزایش می‌یابد ولی در شدت جریان‌های بالاتر این میزان تاحدودی ثابت است. با توجه به این نمودار می‌توان نتیجه گرفت که شفت هوا در شدت جریان‌های بالاتر کارکرد بهتری دارد.

با توجه به روند صعودی میزان هوای تامین شده توسط شفت هوا نسبت به شدت جریان ورودی، این‌طور برداشت می‌شود که با بالا رفتن شدت جریان ورودی آب، فشار در شفت کاهش می‌یابد زیرا فشار در نقطه پایینی شفت ثابت بوده و تاحدودی برابر با فشار محیط بیرونی است، بنابراین با بالا رفتن میزان هوای گردش یافته توسط این شفت، انتظار می‌رود گرادیان فشار بین این نقطه و قسمت بالایی شفت افزایش یافته باشد. با بالاتر رفتن سرعت ورودی آب دیده می‌شود که با افزایش بیشتر شدت جریان ورودی، هم میزان هوای تامین شده توسط شفت هوا و هم میزان هوا ورودی از بیرون شفت تغییر چندانی نمی‌کنند که دلیل آن می‌تواند ایجاد یک منطقه نیمه مسدود در قسمت بالایی شفت برای جریان یافتن هوا و حرکت به سمت پایین آن باشد.

با توجه به خروجی‌های بالا می‌توان تقاضای کلی هوای^۱ شفت را به‌دست آورد. میزان این فراسنجه برابر است با نسبت مجموع هوای وارد شده به شفت توسط شفت هوا و محیط پیرامونی به میزان شدت جریان ورودی آب. روند تغییرپذیری‌های این فراسنجه نسبت به افزایش شدت جریان بی بعد به صورت شکل ۱۳ است.

فراسنجه تقاضای کلی هوا میزان درخواست هوای شفت را در حالت کلی بیان می‌کند و میزان هوای موجود در شفت را نشان می‌دهد. بدیهی است که هرچه میزان هوای درون شفت بیشتر باشد کارکرد آن بیشتر دچار اختلال می‌شود ولی مشکل اساسی در رویارویی با هوای درون شفت، نفوذ آن به لوله خروجی و ایجاد آسیب در ضربه‌های هولناک در هنگام خروج از آن است بنابراین بزرگ بودن تقاضای کلی

با توجه به شکل ۱۱ دیده می‌شود که با افزایش شدت جریان بی بعد ورودی آب، میزان تقاضای نسبی به میزان ۸۵ درصد کاهش می‌یابد. میزان تقاضای نسبی هوا توسط مدل بین ۳/۷ تا ۲۴/۷ به‌دست آمده است که این فراسنجه در تحقیقات ما و همکاران حدود ۵ تا ۲۰ عنوان شده است (Ma. Y et al., 2016).

$$Q^* = Q_w / \sqrt{gD^5} \quad (16)$$

$$\beta = Q_a / Q_w \quad (17)$$

۳-۳-۳- میزان هوای تامین شده توسط شفت هوا

با قرار دادن شفت هوا در کنار شفت اصلی و اتصال نقطه پایینی شفت به بالای آن، بخشی از هوای مورد نیاز شفت توسط این لوله تامین می‌شود. این نکته بدین معناست که شفت هوا با گردش هوای موجود در شفت قائم و انتقال آن به بالای این شفت، به کاهش میزان ورودی هوا به شفت کمک می‌کند. میزان هوای گردش یافته توسط این شفت همانند روش به‌کار برده شده در بالا به‌دست آمده است. در شکل ۱۲ این میزان‌ها در شدت جریان‌های مختلف نمایش داده شده‌اند.

با توجه به شکل ۱۲ قابل مشاهده است که با افزایش شدت جریان ورودی میزان هوای بازگشتی از طریق شفت هوا به درون شفت قائم افزایش می‌یابد. دلیل انتقال هوا از قسمت پایینی شفت قائم به بالای آن وجود فشار منفی در درون شفت در قسمت عمودی آن است این در حالی است که میزان فشار در قسمت پایینی شفت هوا به فشار محیطی نزدیک است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با

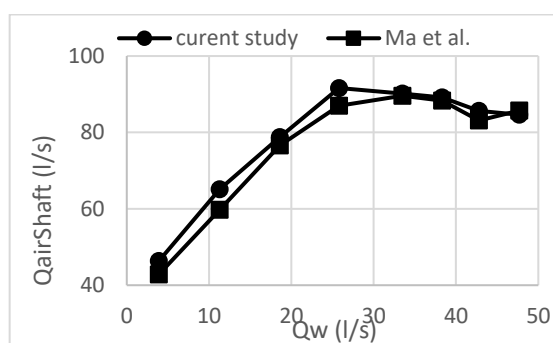


Fig. 12 Air discharge produced by air shaft
شکل ۱۲ شدت هوای تامین شده توسط شفت هوا

1 total air demand

با توجه به شکل ۱۴ دیده می شود که میزان فشار هوا در ثانیه های ابتدایی در درون شفت تاحدودی برابر با صفر است. برای به دست آوردن فشار هوا در درون شفت باید فشار در سطحی که از آب خالی باشد را اندازه گیری کرد. این امر بدین دلیل است که نرم افزار این فوم میزان فشار در درون شفت را از تفریق میزان فشار کل از فشار هیدرواستاتیکی به دست می آورد. می دانیم که فشار هیدرواستاتیکی برابر ρgh می باشد بنابراین در نقطه هایی که آب در آن وجود دارد با توجه به بزرگ بودن میزان چگالی آب میزان این فشار بسیار بزرگ به دست خواهد آمد. مبنای انتخاب سلول های خالی از آب میزان α .water برابر و کمتر از 0.01 در نظر گرفته شد. بنابراین فشار درون شفت در انتهای زمان آزمایش و ارزیابی به صورت شکل ۱۵ به دست خواهد آمد.

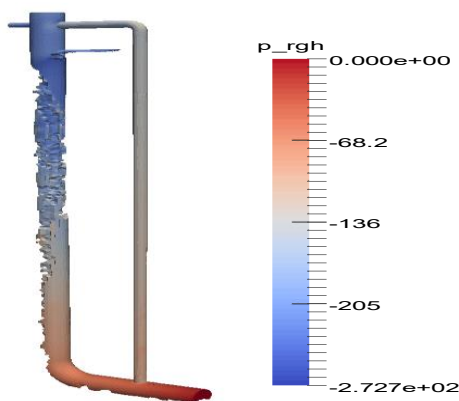


Fig. 15 Air pressure of dropshaft after reaching stable situation ($Q_w=18.6$ lit/s)

شکل ۱۵ فشار هوا درون شفت پس از رسیدن به شرایط پایدار شدت جریان 18.6 lit/s

همان طور که در شکل ۱۵ دیده می شود میزان فشار هوا در درون شفت از بالا به پایین در حال افزایش است. همچنین دیده می شود که ابتدا و انتهای شفت هوا گرادیان فشار زیادی وجود دارد که همان طور که در قسمت های پیشین گفته شد، دلیل گردش هوا در درون شفت می باشد.

میزان فشار درون شفت در شدت جریان های مختلف و در نقطه های مختلف آن به صورت شکل ۱۶ به دست آمده است.

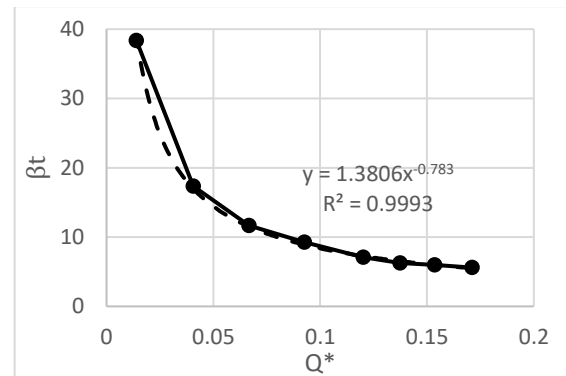


Fig. 13 Total air demand of dropshaft

شکل ۱۳ تقاضای کلی هوای شفت

هوا با اینکه فراسنجه منفی در کارکرد شفت بشمار می آید ولی باید دید آیا باعث بهبود در شرایط خروج آب می شود یا خیر.

۳-۴- فشار درون شفت

با گذر زمان و ورود آب به درون شفت قائم و پس از آن ریزش آن به سمت پایین، سرعت آب به صورت قابل توجهی افزایش پیدا می کند. جریان آب، هوای موجود در شفت قائم را با خود به پایین می کشد در نتیجه در بالای آن میزان فشار هوا کاهش می یابد و به زیر صفر می رسد حال با توجه به اینکه فشار در درون شفت کمتر از فشار محیط بیرونی می شود هوا به سمت درون مکیده شده و به سمت خروجی شفت کشیده می شود. در لحظه های ابتدایی میزان فشار درون شفت به صورت شکل ۱۴ می باشد.

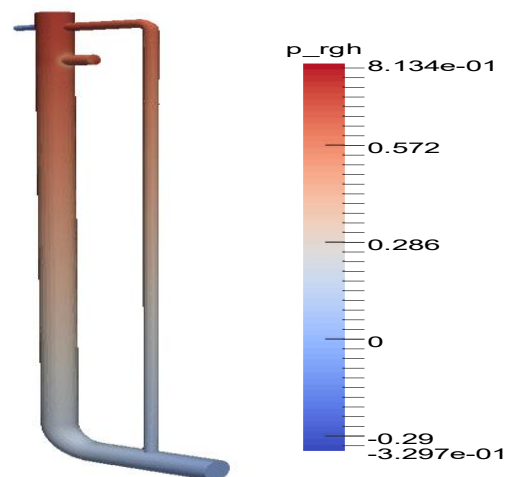


Fig. 14 Internal pressure of dropshaft at 0.25 s after run

شکل ۱۴ فشار هوا در ثانیه 0.25

۳-۵-۱- میزان هوای ورودی

میزان ورود هوا به درون شفت در شکل ۱۸ آورده شده است و مقایسه بین این شفت و شفت قائم همراه با شفت هوا در انجام شده است.

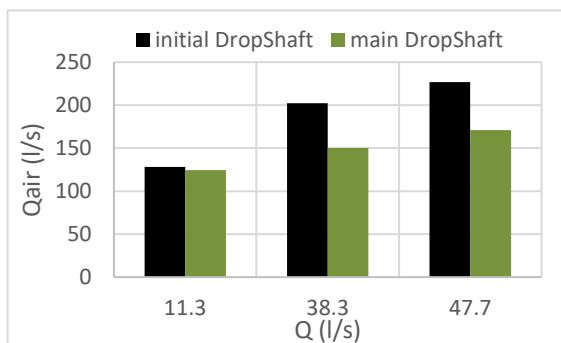


Fig. 18 Comparison of air entrainment into main and initial dropshaft

شکل ۱۸ مقایسه هوای ورودی به دو شفت قائم

با توجه به شکل دیده می شود که در شدت جریان‌های ورودی پایین تفاوت زیادی بین کارکرد دو نوع شفت وجود ندارد ولی با بالا رفتن میزان آب ورودی به شفت، تاثیر وجود شفت هوا بر کاهش میزان هوای ورودی، مشهود می شود به گونه‌ای که در شدت جریان ۱۱/۳، ۳۸/۳ و ۴۷/۷ لیتر بر ثانیه میزان هوا به ترتیب به میزان ۵۲/۲ و ۵۵/۸ لیتر بر ثانیه کاهش یافته است.

با توجه به نتایج به دست آمده در بالا می توان تقاضای کلی هوای این دو شفت را به دست آورد.

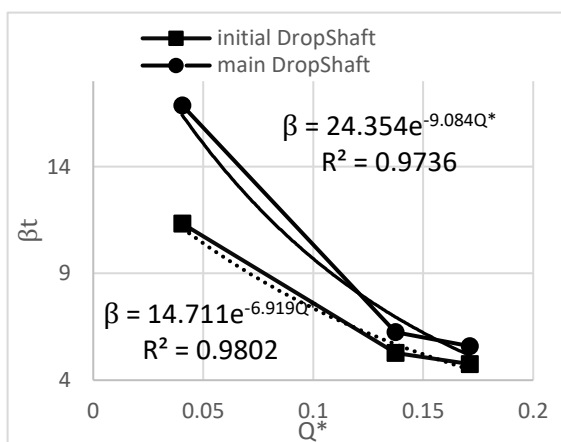


Fig. 19 Total air demand of main and initial dropshaft

شکل ۱۹ میزان تقاضای کلی دو شفت قائم

با توجه به شکل ۱۹ دریافت می شود که میزان هوای موجود

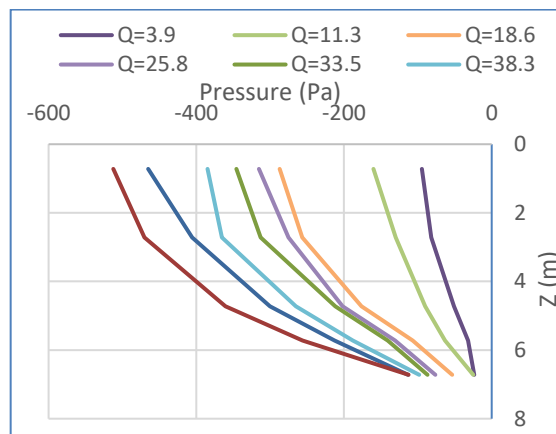


Fig. 16 Air pressure in dropshaft at different water discharges

شکل ۱۶ فشار در شفت قائم در شدت جریان‌های مختلف

شکل ۱۶ نمودار تغییرپذیری‌های فشار درون شفت قائم در شدت جریان‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار بالا دیده می‌شود که فشار درون شفت از قسمت پایینی تا بالای آن رو به افزایش است و بیشترین گرادیان فشار نیز در نقطه‌های میانی آن دیده می‌شود که به این نقطه‌ها، ناحیه بارش باران^۱ گفته می‌شود. در قسمت پایینی شفت فشار در شدت جریان‌های مختلف به یکدیگر نزدیک شده‌اند و می‌دانیم که در خروجی فشار صفر است.

۳-۵- مقایسه دو نوع شفت

در این قسمت از تحقیق، به بررسی و مقایسه شفت قائم همراه با شفت هوا و شفت قائم بدون شفت هوا پرداخته شده است. هندسه این دو شفت به طور کامل همانند هم هستند. مقایسه در ۳ شدت جریان انتخابی (۱۱/۳، ۳۸/۳ و ۴۷/۷) انجام شده است. شکل ۱۷ هندسه شفت قائم بدون شفت هوا را نشان می‌دهد.

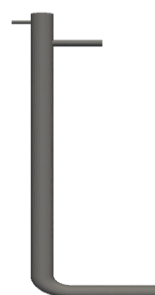


Fig. 17 Dropshaft without airshaft

شکل ۱۷ شفت قائم بدون شفت هوا

ولی روند تغییرپذیری های فشار در هر دو شفت همانند همدیگر است. همانند میزان هوای ورودی به شفت، در این جا نیز فشار داخل شفت در شدت جریان های پایین تا حدودی با یکدیگر برابر هستند و در شدت جریان های بالا از یکدیگر فاصله می گیرند. جریان آب در درون شفت اولیه به صورت شکل ۲۱ است.

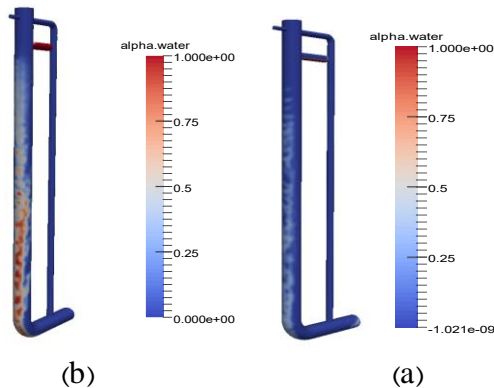


Fig. 21 Water flow in dropshaft. $Q_w =$ (a) 3.9 l/s (b) 33.5 l/s

شکل ۲۱ جریان آب درون شفت. شدت جریان ورودی (a) ۳/۹ لیتر بر ثانیه (b) ۳۳/۵ لیتر بر ثانیه

فراسنجه alpha.water شاخص نوع سیال می باشد که در این مسئله عدد ۱ (رنگ قرمز) نشان دهنده آب و عدد صفر (رنگ آبی) نیز مشخص کننده هوا است. اعداد بین صفر و یک نیز بیانگر این موضوع هستند که در آن سلول قدری آب و قدری هوا وجود دارد که هرچه میزان آب موجود بیشتر باشد این فراسنجه به عدد ۱ نزدیک تر می شود و هرچه میزان هوا در آن سلول بیشتر باشد این فراسنجه به عدد صفر متمایل خواهد شد.

۴- نتیجه گیری

با استفاده از سه مدل آشفتگی KOmega, KEpsilon و KOmega SST حل مسئله هوای ورودی به شفت در شدت جریان منتخب ۱۱/۳ لیتر بر ثانیه انجام شد و پاسخ های مستخرج شده از حل مسئله با نتایج آزمایشگاهی کنترل شدند. مقایسه ها نشان دادند که مدل KEpsilon دارای خطای قابل ملاحظه ای در برآورد میزان هوای ورودی به شفت می باشد و میزان این فراسنجه را

در شفت سامان دهی شده بیش تر از شفت اولیه است و این نکته بدین معناست که میزان هوای گردش یافته توسط شفت هوا برابر با میزان کاهش ورودی هوا از بیرون به درون شفت نیست. همچنین دیده می شود که در شدت جریان های پایین تفاوت تقاضای کل در دو شفت بسیار با یکدیگر فاصله دارد ولی با افزایش شدت جریان ورودی این تفاوت کاهش می یابد. با دقت در نمودار بالا می توان دریافت که بزرگ بودن میزان تقاضای هوا در یک شفت به طور کلی نمی تواند فراسنجه منفی بشمار آید و تنها نشان دهنده هوای کل موجود در شفت است که اگر این هوا به درستی مدیریت شود می تواند موجب بهبود رفتار شفت نیز شود.

۳-۵-۲- میزان فشار درون شفت

در این قسمت میزان فشار درون این دو شفت در ارتفاع های مختلف استخراج شده است و به مقایسه این میزان ها با یکدیگر پرداخته شده است. شکل ۲۰ فشار درون شفت ها را نشان می دهد.

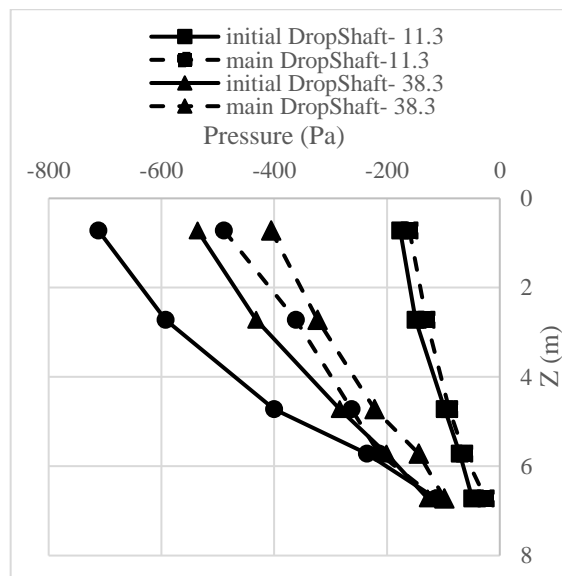


Fig. 20 Comparison of air pressure in main and initial dropshaft

شکل ۲۰ مقایسه فشار داخل شفت ها

همان طور که در قسمت های پیشین گفته شد فشار هوا در ۵ نقطه مختلف در درون شفت، از مدل استخراج شده است. با توجه به شکل ۲۰ می توان دریافت که فشار منفی در درون شفت سامان دهی شده کمتر از شفت اولیه است

کمتر از واقعیت به دست می‌آورد. نتایج در دو مدل دیگر نزدیک به میزان‌های مشاهده شده به دست آمد ولی با اختلاف کمی قابل توجه است که مدل KOmega SST حل دقیق‌تری نسبت به مدل دیگر دارد.

برای بررسی کارکرد شفت در شدت جریان‌های ورودی مختلف، ۸ شدت جریان مختلف انتخاب شد و به عنوان ورودی به مسئله معرفی شد. با توجه به نتایج به دست آمده دیده شد که میزان هوای ورودی با افزایش شدت جریان ورودی آب افزایش می‌یابد. همچنین با مقایسه میزان تقاضای هوای شفت در شدت جریان‌های مختلف دیده شد که با افزایش شدت جریان بی بعد از ۰/۱۴ به ۰/۱۷، میزان تقاضای هوا به اندازه ۸۵ درصد کاهش می‌یابد.

برای بررسی کارکرد شفت هوا به اندازه‌گیری میزان هوای گردش یافته توسط این شفت پرداخته شد. نتایج نشان داد که با افزایش شدت جریان ورودی میزان هوای بازگشتی از طریق شفت هوا به درون شفت قائم افزایش می‌یابد بنابراین می‌توان گفت که شفت هوا در شدت جریان‌های بالاتر کارکرد بهتری دارد. با بالاتر رفتن سرعت ورودی آب دیده می‌شود که با افزایش بیش‌تر شدت جریان ورودی، هم میزان هوای تامین شده توسط شفت هوا و هم میزان هوای ورودی از بیرون شفت تغییر چندانی نمی‌کنند که دلیل آن می‌تواند ایجاد یک منطقه نیمه مسدود در قسمت بالایی شفت برای جریان یافتن هوا و حرکت به سمت پایین آن باشد.

به‌منظور پی بردن به کارکرد شفت هوا به بررسی و مقایسه شفت قائم اصلاح شده با شفت هوا و شفت قائم بدون شفت هوا پرداخته شد. نتایج نشان داد که در شدت جریان‌های ورودی پایین تفاوت زیادی بین کارکرد دو نوع شفت وجود ندارد ولی با بالا رفتن میزان آب ورودی به شفت، تاثیر وجود شفت هوا بر کاهش میزان هوای ورودی، مشهود می‌شود به گونه‌ای که در شدت جریان ۱۱/۳، ۳۸/۳ و ۴۷/۷ لیتر بر ثانیه میزان هوا به ترتیب به میزان ۳/۹، ۵۲/۲ و ۵۵/۸ لیتر بر ثانیه کاهش یافته است. همچنین با مقایسه میزان فشار هوای درون شفت، دیده شد که میزان این فراسنجه در شفت اصلاح شده آشکارا

کاهش می‌یابد.

با مقایسه فشار هوای درون شفت در شدت جریان‌های مختلف، دیده شد که با افزایش شدت جریان ورودی، میزان فشار منفی درون شفت افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که بیشترین گرادیان فشار نیز در نقطه‌های میانی آن دیده می‌شود که به این نقطه‌ها، ناحیه برآش باران^۱ گفته می‌شود. در قسمت‌های پایینی میزان فشار هوا در شدت جریان‌های مختلف به یکدیگر نزدیک می‌شود.

۵- فهرست نشانه‌ها

β	تقاضای هوا
Qa	شدت جریان هوا (lit/s)
Qw	شدت جریان آب (lit/s)
Ds	قطر شفت قائم (m)
Q*	شدت جریان بی بعد آب
Das	قطر شفت هوا (m)
Da	قطر ورودی هوا (m)
Do	قطر لوله خروجی (m)
Di	قطر لوله ورودی آب (m)
H	ارتفاع شفت (m)
ρ	چگالی (Kg/m^3)
g	شتاب گرانش (m/s^2)
fai	کشش سطحی
u	سرعت سیال (m/s)
P	فشار (Pa)
ij τ	تنش ویسکوز
α	شاخص نوع سیال
t μ	لزجت آشفتگی (Kg/m.s)
ϵ	هدررفت انرژی
S	کرنش
ω	نرخ هدررفت مخصوص
I	شدت آشفتگی
Re	عدد رینولدز
Dh	قطر هیدرولیکی (m)
Qair	شدت جریان هوا ورودی (lit/s)

1 Rain Falling zone

Lopes, P. (2013). Free-surface flow interface and air-entrainment modelling using OpenFOAM, Thesis Project in Hydraulic, Water Resources and Environment Doctoral Program in Civil Engineering, The Department of Civil Engineering FCTUC accepts no responsibility for the use of information presented.

Ma, Y., Zhu, D.Z. and Rajaratnam, N. (2016). Air entrainment in a tall plunging flow dropshaft, *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(10), 04016038.

Ma, Y., Zhu, D.Z., Yu, T. and Liu, Y. (2018). Assessing the effectiveness of an airshaft for dropshaft air re-circulation and depressurization, *Journal of Hydro-Environment Research*, 18, 49-62.

Mahmoudi-Rad, M. and Najafzadeh, M. (2021). Air entrainment mechanism in the vortex structure: Experimental study. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 147(5), 04021007.

O.S. Consulting. (2014). Boundary Conditions-OpenFOAM: NESTfoam, p. 129. [Online].

Wang, X., Zhang, J., Yu, X. and Chen, S. (2017). Numerical Study on Two-Phase Flow Patterns in Vortex Dropshaft, in ASME 2017 Fluids Engineering Division Summer Meeting, pp. V01CT16A008-V01CT16A008: American Society of Mechanical Engineers.

Wei, J., Ma, Y., Zhu, D.Z. and Zhang, J. (2018). Experimental study of plunging-flow dropshafts with an internal divider for air circulation, *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(9), 06018011.

Va^l سرعت هوا ورودی (m/s)
K انرژی جنبشی (J)

۶- منابع ها

Anderson Jr., J.D. (2010). *Fundamentals of aerodynamics*, Tata McGraw-Hill Education.

ANSYS Fluent Inc. (2006) *Fluent 6.3 User's Manual*. Fluent Inc. Centerra Resource Park, 10 Cavendish Court, Lebanon, USA.

Camino, A.G., Zhu, D.Z., and Rajaratnam, N. (2014). Flow observations in tall plunging flow dropshafts, *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(1), 06014020.

Carvalho, I., Heitor M.V. and Santos, D. (2002). Liquid film disintegration regimes and proposed correlations, *International Journal of Multiphase Flow*, 28(5), 773-789.

C. Online. (2016). Available: <http://www.cfd-online.com>

Deshpande, S.S., Anumolu, L. and Trujillo, M.F. (2012). Evaluating the performance of the two-phase flow solver interFoam, *Computational Science & Discovery*, 5(1), 014016.

Falvey, H. (1980). *Air-water Flow in Hydraulic Structures*. ASA STI/Recon Technical Report I.

Jaeger, J., Santos, C.M., Rosa, L.M., Meier, H.F. and Noriler, D. (2018). Experimental and numerical evaluation of slugs in a vertical air-water flow, *International Journal of Multiphase Flow*, 101, 152-166.