



Comparison and Design of Optimal Mesh Size in Computational Fluid Dynamics Model of Well Cleaning

Mohammad Bagher Homayoun^{1*}, Mohsen Dehvedar¹ and Amir Hossein Ashhar²

1. Department of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

2. Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

mb.homayoun@aut.ac.ir

DOI:10.22078/PR.2022.4788.3148

Received: April/25/2022

Accepted: November/10/2022

Introduction

A study by Amaco found that 70% of unintended waiting times are due to drill string sticking, and one-third of these stickings are due to well cleaning problems [1]. Failure to clean the well will cause many problems. These problems include creating excess torque, mechanical trapping, drilling fluid waste, problems in cementing, well surveying, and well control [2]. To identify and study these parameters, and also because the study of parameters at the well site was risky and costly, Flow loop simulators have been developed. The development of mechanical models began in the late 1980s, when the movement pattern was fully understood, and the factors affecting well cleaning were fully explored [3]. Factors affecting well cleaning have A introduced as mud rheology, fluid flow in annular space, particle size, mud density, mud viscosity, and drilling penetration rate [4,5].

Materials and Methods

A flow loop is located in the drilling laboratory of the Department of Petroleum Engineering, Amirkabir University of Technology, which is responsible for simulating the operational wells, and during several experiments, phenomena such as well cleaning and transfer of drilling cuttings have been studied. This flow-loop is a modified model that includes a bit simulator and four nozzles as the fluid entrance path and a relocated hole at the top to simulate in-situ fluid flow situation better. A CFD model with experimental properties has also be made in ANSYS program

with 3 different mesh types: A (~100,000 elements), B (~200,000 elements) and C (~500,000 elements) tetrahedral meshes. The fluid phase was water with a density of 998.2 kg/m³ and viscosity of 0.001003 kg.m/s with CaCO₃ cutting particles with a density of 2800 kg/m³ and a particle diameter of 1 mm. Also, a CFD model named E2-475 (~475,000 mesh elements) had been designed based on previous experimental model that was studied and selected as an optimal CFD model.

Results and Discussion

As a factor for comparison, the remaining mass of CaCO₃ in specified intervals has been recorded in both experimental and CFD models. Due to difficulty of measuring in experimental model, in addition to initial CaCO₃ mass (500 g) ten timing intervals was chosen, and CaCO₃ mass was recorded in each time. For better comparison, the remaining CaCO₃ in each CFD model was also measured by the experimental model time intervals. After analysing and comparing the remaining CaCO₃ mass in all models, the accuracy and also mesh independency of type B model – as the best matching simulation CFD model – have been verified by experimental model. Also, to compare the models based on new experimental model and the models based on previous experimental model, the type B mesh has also been compared to E2-475 and shows that in accordance to shorter runtime and fewer error with respect to its experimental model, type B mesh is more optimal than older E2-475 model.

Conclusions

In this research, in addition to updating a laboratory and experimental model - by adding nozzles to the bit - the old computational fluid dynamics model of Dehvedar et al., corresponding to the experimental model, was also updated through a new CFD model. One of the results of this update is a better simulation of the arrangement and conditions of downhole equipment. After the analysis between the simulation results of models A, B and C, it was found out that the type A model did not have the necessary ability to simulate the operations of cutting transports and its values were associated with a high error compared to the experimental test. The execution of the simulation in model B with about 200 thousand meshes is much faster and more optimal than model C with more than 500 thousand meshes, and in the process of validation and independence from the mesh, it was found out that the difference between the results of models B and C is not significant; But considering the time needed to run the simulation (about 60 hours for model C against 22 hours for model B), it would definitely be reasonable to use model B.

In addition, the results found out in a 2019 article by Dehvedar et al. were used to compare the effect of mesh specifications of CFD models on the simulation of the old experimental model, so that despite the differences such as the mass of the cuttings in the model and physical differences, the behavior prediction performance of type B model was also compared with the selected optimal model E2-475, which in terms of less mesh number and less relative error compared to

the corresponding experimental model, model B was selected as the optimal model in this comparison.

References

1. Zhang F, Miska S, Yu M, Ozbayoglu E, Takach N, Osgouei R E (2015) Is well clean enough? a fast approach to estimate hole cleaning for directional drilling, SPE/ ICoTA Coiled Tubing and Well Intervention Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, March, doi.org/10.2118/173681-MS.
2. Cayeux E, Leulseged A, Kluge R, Haga J (2016) Use of a Transient Cuttings Transport Model in the Planning, Monitoring and Post Analysis of Complex Drilling Operations in the North Sea, IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, March, doi.org/10.2118/178862-MS.
3. Han S M, Woo N S, Kim Y J (2016) A Study of the Particle Transport in the Non-Newtonian Fluid with Inclined Annulus, Asia-Pacific Journal of Modeling and Simulation for Mechanical System Design and Analysis, 1, 1: 23-28.
4. Ayeni O O, Wu C L, Nandakumar K, Joshi J B (2016) Development and validation of a new drag law using mechanical energy balance approach for DEM-CFD simulation of gas-solid fluidized bed, Chemical Engineering Journal, 302: 395-405, doi.org/10.1016/j.cej.2016.05.056.
5. Dehvedar M, Homayoun M B (2021) Drilling Engineering, 1st Vol. Drilling Fluid (In Persian), Amirkabir University of Technology Publication.

مقایسه و طراحی سایز بهینه مش در مدل دینامیک سیالات محاسباتی تمیزکاری چاه

محمدباقر همایون^{۱*}، محسن ده ودار^۱ و امیرحسین اشهر^۲

۱- دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۱

چکیده

تقریباً بیست و پنج درصد زمان انتظار ناخواسته در دکل‌های حفاری ناشی از زمان‌های صرف‌شده برای تمیزکاری چاه است. با فراگیری سیستم‌های کامپیوتری قدرتمند فرآیندهای شبیه‌سازی عملیات تمیزکاری چاه و تهیه مدل از چاه‌های عملیاتی رو به گسترش بوده و این عمل ضمن افزایش دقت و بهره‌وری برای اجرا در میادین عملیاتی، از صرف زمان و هزینه‌های بسیاری جلوگیری می‌نماید. در پژوهش حاضر تلاش شده تا با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مدلی بر پایه آزمایش‌های تجربی انجام پذیرفته در حلقه جریان آزمایشگاه حفاری، طراحی و صحت‌سنجی گردد و با بررسی مدل حاضر با تعدادی مدل مشابه و نتایج آزمایشگاهی، بتوان مش بهینه و اثر آن بر افزایش دقت نتایج و همچنین بازدهی و سرعت شبیه‌سازی را مطالعه نمود. همچنین با مقایسه مدل تجربی جدید و مدل پیشین بهبودهای فیزیکی برای شبیه‌سازی محیط درون‌چاهی مانند افزودن نازل و سرمته و جایگیری خروجی جریان مشاهده و یک مدل CFD طراحی شده بر اساس مدل تجربی قدیمی نیز با این مدل CFD بهینه و طراحی شده بر مبنای مدل تجربی جدید مقایسه شده و با بررسی دقت و زمان اجرای هر یک، مش بهینه انتخاب گردد.

کلمات کلیدی: حمل‌کننده حفاری، تمیزکاری چاه، مکانیک سیالات دوفازی، دینامیک سیالات محاسباتی، استقلال از مش

مقدمه

می‌دهند به دلیل گیر لوله‌ها است و یک سوم از این گیرها به دلیل مشکلات تمیزکاری چاه ایجاد می‌گردند [۱]. عدم تمیزکاری چاه مشکلات متعددی را ایجاد خواهد نمود. این مشکلات عبارت‌اند از ایجاد گشتاور اضافه، گیر مکانیکی، هرزروی سیال حفاری، مشکلات در سیمان‌کاری، چاه‌پیمایی و کنترل چاه [۲-۴]. در ابتدا و از اوایل دهه ۱۹۴۰ میلادی مطالعات تجربی در زمینه حمل‌کننده‌های حفاری آغاز شد [۵].

حمل‌کننده‌های حفاری به عنوان یکی از دغدغه‌های مهندسان نفت، سال‌ها است که به عنوان یکی از موضوعاتی که مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است مطرح می‌گردد. مطالعه‌ای که توسط شرکت آماکو صورت گرفته نشان می‌دهد که ۷۰٪ از زمان‌های انتظاری که به صورت ناخواسته رخ

از آنجایی که مطالعه پارامترهای اثرگذار بر حمله کننده‌ها در محل چاه امری خطرناک و هزینه‌بر بودند، مطالعات سرچاهی مباحث مرتبط با تمیزکاری چاه بسیار محدود بوده است. همین امر موجب شده است که دستگاه‌های آزمایشگاهی شبیه‌سازی حمله‌کننده‌های حفاری در سراسر دنیا ساخته و روزبه‌روز بر تعداد آن‌ها افزوده شود. حلقه‌های شبیه‌ساز حفاری بسته به شرایط متفاوت که در عملیات وجود دارد ساخته می‌شوند [۶]. با این اتفاق عملاً دستگاه‌های آزمایشگاهی و بررسی پارامترهای تجربی در رأس امور قرار گرفتند. پارامترهای متعددی در این گونه دستگاه‌ها قابل کنترل می‌باشند مانند زاویه چاه [۶]، دبی سیال [۷]، جنس‌کننده‌ها [۸]، خواص سیال حفاری [۹]، نرخ نفوذ حفاری [۱۰]، سرعت چرخش رشته حفاری [۱۱] و حتی بررسی اثر زمان در این فرآیند [۱۵-۱۲]. مطالعات اولیه در این زمینه در اواخر دهه ۷۰ و اوایل دهه ۸۰ میلادی در مورد انتقال کننده‌ها در رابطه با حفاری انحرافی به‌صورت تجربی در طبیعت به وجود آمده است که این به‌دلیل عدم فهم رفتار حرکت کننده‌ها در قسمت‌های مختلف به ویژه انحرافی چاه بود. در اواخر دهه ۸۰ و زمانی که الگوی حرکت کاملاً فهمیده شد و فاکتورهای مؤثر بر تمیزکاری چاه به‌طور کامل بررسی شد توسعه مدل‌های مکانیکی هم شروع گردید [۱۶]. فاکتورهای مؤثر بر تمیزکاری در دسته‌بندی‌های رئولوژی گل، دبی سیال در فضای دالیزی، اندازه ذرات کنده، چگالی گل، گرانروی گل و نرخ نفوذ حفاری بررسی شده‌اند. هر یک از پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه بررسی پارامترهای اثرگذار بر تمیزکاری چاه و انتقال کننده‌های حفاری را می‌توان از حیث پارامترهای مربوط به ذرات سنگ، پارامترهای مربوط به سیال و پارامترهای مربوط به فیزیک چاه دسته‌بندی نمود. حسین و همکاران، پیگوت و بلاوادی و چوک وو معتقدند گرانروی کم سیال باعث تمیزکاری بهتر می‌شود [۲۲ تا ۲۴] درحالی‌که سیفرمن و همکاران

گرانروی زیاد را باعث تمیزکاری بهتر دانسته [۲۱] و زیدلر معتقد است گرانروی تأثیری بر تمیزکاری ندارد [۲۰]. سیفرمن و همکاران و پیگوت بر خلاف حسین و همکاران و مم و اسکاله جریان آرام را باعث تمیزکاری بهتر فضای دالیزی می‌دانند [۲۱، ۲۳، ۲۴]. بیلگسو و همکاران، دهودار و همکاران، مارتین و همکاران و حاجی پور معتقدند دبی بالا تمیزکاری بهتر و جدایش ذرات کنده بهتری را به همراه دارد، بلاوادی و چوک وو چرخش رشته حفاری را نیز به این مورد اضافه می‌کنند و سیفرمن و همکاران این افزایش بازده تمیزکاری را افزایشی فزاینده که پس از مدتی به ثبات می‌رسد توصیف کردند [۲۲-۱۹، ۲۵، ۲۸، ۳۰]. بلاوادی و چوک وو، واکر و لی، مم و اسکاله، بیلگسو و همکاران و حاجی‌پور کنده کوچک را باعث تمیزکاری بهتر می‌دانند اما سیفرمن و همکاران اندازه ذرات را دارای اثری متوسط بر تمیزکاری عنوان کرده‌اند [۲۲ و ۲۳، ۳۱-۲۸]. در آخر نیز سیبرگ و همکاران، آذر و اوکرانجی و مم و اسکاله بر خلاف حاجی‌پور گرانروی پایین را موجب تمیزکاری بهتر چاه دانستند [۲۶ و ۲۷، ۳۳-۳۰]. از میان افرادی که به آنالیز CFD تمیزکاری چاه و پارامترهای مرتبط پرداخته‌اند، علاوه‌بر نتایج مم و اسکاله، آخشیک و همکاران با بررسی برهم‌کنش سیال-جامد در مدلی با کوپل دینامیک سیالات محاسباتی و روش المان مجزا، با شبیه‌سازی سرعت‌های مختلف ورود سیال و زوایای لوله حفاری، رابطه مستقیم سرعت تمیزکاری با زاویه چاه را نتیجه گرفت [۳۰]. بیرن و همکاران نیز با ارائه تاریخچه مواردی که برتری کاربرد مدل‌سازی دقیق و ابتکاری آسیب‌سازند را بر سیالات و روش‌های مختلف حفاری و تکمیل نشان می‌دهد، به این نتیجه رسیدند که علاوه‌بر مزایای شبیه‌سازی، دقت شبیه‌سازی‌های انجام شده با CFD نیز هم‌ارز با آزمایش‌های واقعی است [۲۹] و دهودار و همکاران با بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر تمیزکاری، محدوده زاویه ۳۰° تا ۵۵°

را محدوده بحرانی برای تمیزکاری معرفی کردند [۲۳]. در پژوهش حاضر تلاش شده است با بهبود دستگاه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی مناسب‌تر شرایط درون چاهی، تغییراتی که در حلقه جریانی آزمایشگاهی به وجود آمده در مدل دینامیک سیالات محاسباتی جدیدی به‌روز شود. این تغییرات شامل اضافه شدن سرتمه حفاری به همراه چهار نازل به جای چهار روزنه خروجی سیال در مدل قبلی و همچنین، تغییر در جانمایی خروجی جریان سیال به دلیل شبیه‌سازی بهتر فضای دالیزی است. با مش‌زنی بر روی مدل شبیه‌سازی در سائزهای گوناگون، نتایج حاصل را با مدل‌های پیشین برای مسئله مشابه بررسی نموده تا اثر طراحی و اجرای مش و سائز بهینه آن بر سرعت و نتایج شبیه‌سازی مشخص شود؛ همچنین برای صحت‌سنجی نتایج به‌دست آمده، نتایج آزمایش‌های تجربی انجام شده برای هر یک نیز ارائه و با نتایج شبیه‌سازی مقایسه شده است.

شبیه‌شناسی و روش کار

از آن‌جا که مطالعات دینامیک سیالات محاسباتی در حوزه حمل‌کننده‌های حفاری در مقایسه با مطالعاتی که مهندسان شیمی به روی محیط‌های مشابه با فضای دالیزی انجام داده‌اند کم است، سعی شده است تمام محیط‌هایی که در این رشته شبیه به فضای دالیزی بوده‌اند نیز مورد مطالعه قرار گیرند. از جمله مهم‌ترین این محیط‌ها که با نام کلی بسترهای سیال مطرح است در مطالعات زیادی مورد توجه قرار گرفته است [۴]. بسترهای سیال مورد استفاده در دستگاه‌های فوق‌اکثر برای محیط‌های حاوی گاز-جامد هستند و مطالعات جامد-مایع سهم کمی را در بین آن‌ها دارند؛ در بعضی هم چندین جامد در یک فاز پیوسته مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۳، ۴، ۷]. با مشاهده نتایج آزمایشگاهی و مطالعات گذشته نتیجه می‌شود که در فضای لوپ‌های حفاری، حرکت جامد-مایع در

حالت عمودی به‌صورت مخلوط و در بقیه موارد به نگاه اویلری-اویلری بسیار نزدیک است. مدل مخلوط برای دو فاز یا بیشتر طراحی شده است. فازها به‌عنوان یک محیط پیوسته در هم نفوذکننده در نظر گرفته شده و روابط مومنتوم برای مخلوط حل و از سرعت‌های نسبی جهت تشریح فازهای پراکنده استفاده می‌شود. جهت مدل کردن جریان‌های چندفازی یکنواخت، می‌توان سرعت نسبی فازهای پراکنده را در نظر نگرفت. در این مدل گرانیروی مخلوط را باید مورد توجه قرار داد [۱۷].

(۱)
$$\frac{1}{\rho_q} \left(\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) \right) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{V}_q) = \sum_{p=1}^n \left(\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp} \right)$$

در رابطه بالا که از روابط پیوستگی است، نشان داده می‌شود که جرم سیستم در طول زمان ثابت می‌ماند. همچنین دقت شود که رابطه بالا، روی حجم سیستم اعمال می‌شود. حل این رابطه برای هر یک از فازهای ثانویه همراه با این شرایط است که مجموع کسرهای حجمی برابر یک باشد. برای شبیه‌سازی حرکت ذرات جامد توسط سیال (گاز یا مایع) رابطه مومنتوم تغییرات اندکی می‌کند. تنش‌های فاز جامد با ایجاد تشابه میان حرکت تصادفی ذرات ناشی از برخوردی ذره-ذره و حرکت حرارتی مولکول‌ها در یک گاز و در نظر گرفتن غیرالاستیک بودن فاز دانه‌ای به‌دست می‌آیند. همانند یک گاز، شدت نوسانات سرعت ذره تعیین‌کننده تنش، گرانیروی و فشار جامد است. انرژی جنبشی همراه با نوسانات سرعت ذره با یک ترم شبه دمایی یا دمای دانه‌ای، نشان داده می‌شود که متناسب با مربع متوسط حرکت تصادفی ذرات است. رابطه مومنتوم سیال جامد برای فاز کام به‌صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s \vec{V}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{V}_s \vec{V}_s) = & \\ -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \vec{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + \sum_{L=1}^n \left[K_{ls} (\vec{V}_l - \vec{V}_s) + \dot{m}_{ls}^s \vec{V}_l - \dot{m}_{sl}^s \vec{V}_s \right] & \\ + (\vec{F}_s + \vec{F}_{lift,s} + \vec{F}_{vm,s}) & \end{aligned} \quad (2)$$

ارتباط این روابط پیوستگی و مومنتوم، از طریق فشار و ضرایب تبادل بین فازی صورت می‌گیرد. این ارتباط به نوع فازها بستگی دارد. از آنجاکه

مدل تجربی

یک حلقه جریان در آزمایشگاه حفاری وظیفه شبیه‌سازی محیط درون چاهی داخل مناطق عملیاتی را به‌عهده دارد. مطالعه حاضر، از طریق مدل‌سازی حلقه جریان با نام AUT-PET 01 با ابعاد طول کل ۲۲۰ cm، قطر لوله بیرونی (چاه) ۹ cm، قطر مته ۶/۳ cm و قطر لوله درونی (رشته حفاری) ۴/۳ cm انجام شده که مدل بهبود یافته دستگاه مورد مطالعه در پژوهش دودار و همکاران می‌باشد [۱۸ و ۱۹]. در شکل ۱ می‌توان حلقه جریان را در حالت قائم در کنار نمای فنی آن مشاهده کرد. آزمایش انتخاب شده برای مدل‌سازی از سیال آب با دبی جریانی ۲۲/۸۴ gpm برای مجموع نازل‌های چهارگانه به‌عنوان ورودی بهره می‌برد. این دبی جریانی با توجه به قطر ۸ mm دهانه هر یک از نازل‌ها، برابر با سرعتی در حد ۷/۱۵۶۶ m/s برای سیال خروجی از هر نازل می‌باشد.

جریان‌های مایع- جامد را می‌توان جریان دانه‌ای نامید. برای جریان‌های دانه‌ای، خواص با به‌کارگیری تئوری سینتیک به‌دست می‌آیند [۱۸، ۳۱، ۳۳]. رابطه انتقالی که با استفاده از سینتیک گازها به‌دست می‌آید عبارت خواهد بود از:

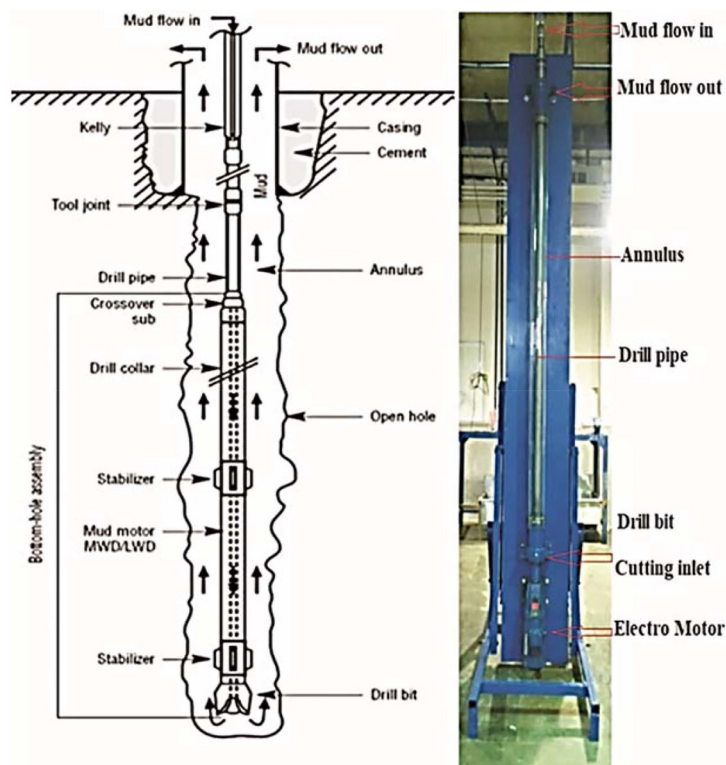
$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho_s \alpha_s \theta_s) + \nabla \cdot (\rho_s \alpha_s \bar{V}_s \theta_s) \right] = (-p_s \bar{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla \bar{V}_s + \nabla \cdot (K_{\theta_s} \nabla \theta_s) - \gamma_{\theta_s} + \phi_{\theta_s} \quad (۳)$$

برای کنده‌های موجود در حلقه جریان نیز رابطه ۴ حاکم است [۲۳].

$$v_x = \left[\frac{4[3\tau_y (\phi + (\frac{\pi}{2} - \phi) \sin^2 \phi - \cos \phi \sin \phi) \tan \phi + d_p (\rho_p - \rho) (\cos \alpha + \sin \alpha \tan \phi)]}{3\rho(C_{Drag} + C_{Lift} \tan \phi)} \right]^{0.5} \quad (۴)$$

که به‌وضوح تابع چگالی کنده، قطر ذرات و هندسه و جهت‌گیری چاه بوده و پارامترهای نیروهای برآ و پسا نیز به آن وارد شده است. به طریق مشابه برای محاسبه سرعت لازم برای غلتش و دوران کنده‌ها نیز رابطه ۵ وجود دارد [۲۳].

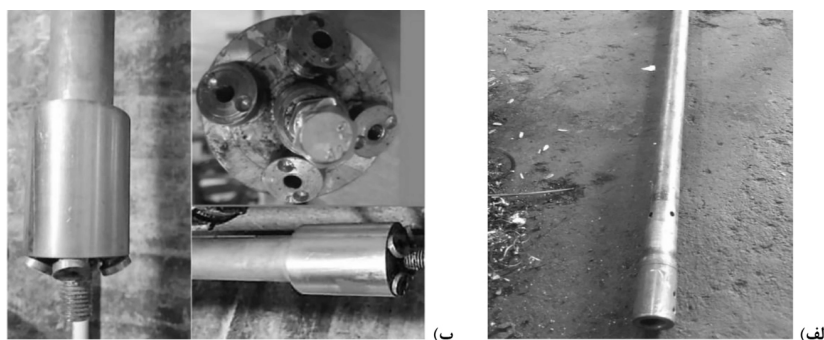
$$v_x = \left[\frac{4[3\tau_y (\phi + (\frac{\pi}{2} - \phi) \sin^2 \phi - \cos \phi \sin \phi) + d_p (\rho_p - \rho)]}{3\rho(C_{Drag} - C_{Lift} \tan \phi)} \right]^{0.5} \quad (۵)$$



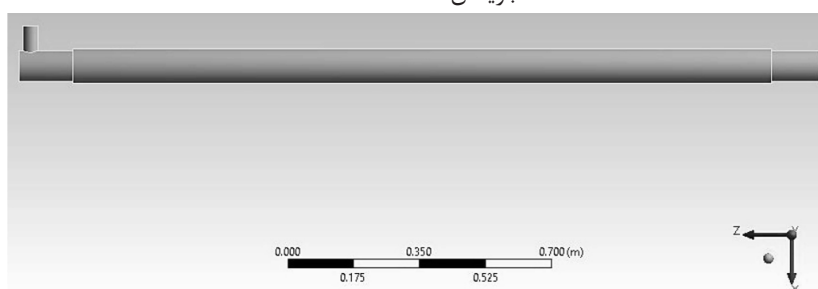
شکل ۱ نمای فنی و بیرونی حلقه جریان (AUT-PET 01) [۱۸، ۱۹].

قطر ذرات برابر با ۱ mm در نظر گرفته شده است. مدل سازی کامپیوتری دستگاه حلقه جریان و مش زنی در اولین قدم در نرم افزار ANSYS Workbench 19.1 و بر روی سیستمی با پردازنده Intel Core i7 2794 HQ و مقدار ۱۲ GB حافظه رم، محیط شبیه سازی با ابعاد واقعی طراحی و مش زنی آن صورت گرفته است (شکل ۳ و ۴).

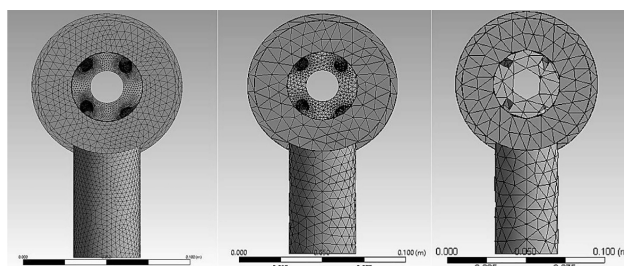
در شکل ۲ نازل های به کارگیری شده در حلقه جریان در قیاس با نمونه قدیمی آن (بدون در نظر گرفتن نازل) قابل مشاهده است. علاوه بر این مقدار کنده ای که در انتهای حلقه جریان به عنوان کنده های ته چاهی در نظر گرفته شد، مقدار ۵۰۰ g از جنس سنگ کربناته (CaCO_3) بوده است. ذرات کربناته چگالی حدود 3280 kg/m^3 داشته و میانگین



شکل ۲ الف) نمای روزنه های خروجی سیال در مدل پیشین و ب) نمای نازل های سر مته از زوایای مختلف در حلقه جریان AUT-PET 01



شکل ۳ مدل طراحی شده از حلقه جریان در نرم افزار Design modeler



شکل ۴ نمای مش زنی از سطح مقطع X-Y برای مش نوع A (سمت راست)، نوع B (وسط) و نوع C (سمت چپ)

داده شود که این حل برای تمام مش ها جوابی یکسان و نزدیک دارد و حل مورد نظر به تعداد مش وابستگی ندارد. این فرآیند با در نظر گرفتن سه نوع مش A، B و C در این پژوهش صورت گرفته است و توضیحات بیشتر در بخش نتایج ذکر گردیده است.

در جدول ۱ انواع مش تولید شده برای مدل و مشخصات هر یک توضیح داده شده است. استقلال از مش به بیان ساده عبارت از بررسی تعداد مش دامنه حل و نمایش عدم وابستگی نتایج به این مش است. به بیان دیگر باید برای دامنه حل با تعداد مش های مختلف حل عددی صورت گیرد و نشان

جدول ۱ مشخصات انواع مش اعمال شده بر مدل

فاکتور	مش نوع A	مش نوع B	مش نوع C
نوع مش	چهار وجهی	چهار وجهی	چهار وجهی
تعداد المان‌ها	۱۰۸/۷۰۲	۱۹۶/۹۰۰	۵۰۱/۸۶۷
سایز المان‌ها	۵	۰/۱۰۶۷	۰/۱۰۶۷
نسبت ابعاد ^۱ (میانگین)	۱/۸۶۷۶	۱/۸۷۸۳	۱/۸۸۴۶
چولگی ^۲ (حداکثر)	۰/۸۴۹۹	۰/۸۴۳۹	۰/۹۸۰۷
کیفیت متعامد ^۳ (حداقل)	۰/۱۵۰۱	۰/۱۵۶۱	۰/۱۹۲۸
کیفیت المان‌ها (میانگین)	۰/۸۳۶۱	۰/۸۲۹۳	۰/۸۲۴۰
لایه مرزی	خیر	خیر	خیر

شبیه‌سازی مدل کامپیوتری با CFD

پس از اتمام فرآیند طراحی و مش‌زنی مدل فیزیکی، فرآیند ورود مشخصات فازهای سیال طبق **جدول ۲** و تعیین نقش دیواره‌ها و روش حل محاسبات انجام می‌پذیرد.

جدول ۲ مشخصات فازهای سیال

خواص	آب	کلسیم کربنات
چگالی (kg/m^3)	۹۹۸/۲	۲۸۰۰
گرانروی (kg.m/s)	۰/۰۰۱۰۰۳	-
قطر ذرات (mm)	-	۱

نتایج و تحلیل آن‌ها

نتایج آزمایش تجربی جدید

مدل تجربی با ابعادی که پیش‌تر ذکر شد، قابلیت اجرای آزمایش‌های دوفازی و سه‌فازی را دارد. ورودی دستگاه شبیه‌ساز از دو بخش تشکیل شده است که یک بخش آن وظیفه تزریق کننده به درون دستگاه را بر عهده دارد؛ این امر به‌وسیله یک می‌کننده که در زیر دستگاه قرار داده شده است صورت می‌گیرد. این دستگاه قابلیت تزریق کننده در دبی‌های مختلف را دارد. این آزمایش بدین صورت انجام می‌شود که ابتدا مخزن ۳۰۰ L از آب پر شده و سپس مجموعه دستگاه برای بستن نازل‌ها باز می‌شود. در مرحله بعد ۵۰۰ g کنده در مخزن

کنده‌ها ریخته شده و پمپ‌مکنده جهت تزریق کنده‌ها به فضای دالیز روشن می‌گردد. پس از پایدارشدن کنده‌ها در فضای دالیز، دوربین و ابزار ثبت داده‌ها فعال و مستقر می‌گردد. در این زمان نیز با روشن کردن موتور گرداننده رشته حفاری و روشن کردن پمپ گریز از مرکز جهت پمپ کردن آب، کنده‌ها در خروجی با توجه به بازه‌های زمانی مورد نظر جمع‌آوری شده و با خشک کردن کنده‌ها و وزن کردن آن‌ها میزان کنده‌های خارج شده گزارش می‌شود. با توجه به مشخصات سیال حفاری آب و ذرات سنگ کربناته CaCO_3 ، زمان اندازه‌گیری شده برای هر مرحله خروج کنده‌ها از حلقه جریان در **جدول ۳** و **شکل ۵** آمده است.

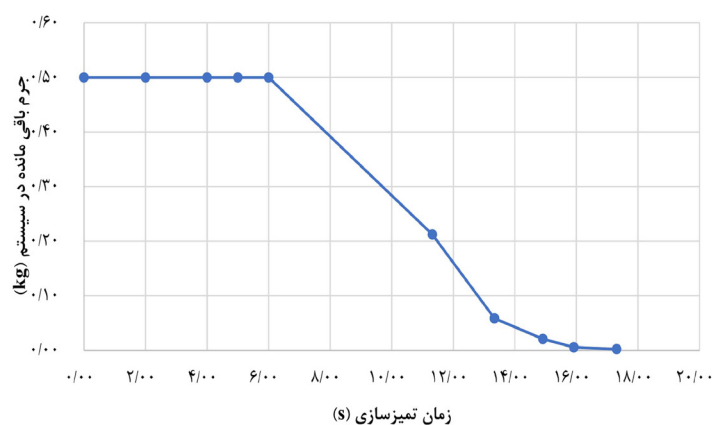
نتایج شبیه‌سازی CFD

پس از انجام شبیه‌سازی برای هر یک از مش‌های نوع A و B و C نیز نمودارهایی مشابه بخش تجربی به‌دست آمد که نشان‌دهنده تغییرات جرم کنده‌های CaCO_3 با زمان در سیستم می‌باشد. برای شروع نتایج جرم CaCO_3 باقی‌مانده در حلقه جریان بر حسب زمان برای مش نوع A در **جدول ۴** آمده است. شمای گرافیکی مراحل تخلیه کنده‌های حفاری از حلقه جریان در مدل A را می‌توان در **شکل ۶** مشاهده کرد.

1. Aspect Ratio
2. Skewness
3. Orthogonal Quality

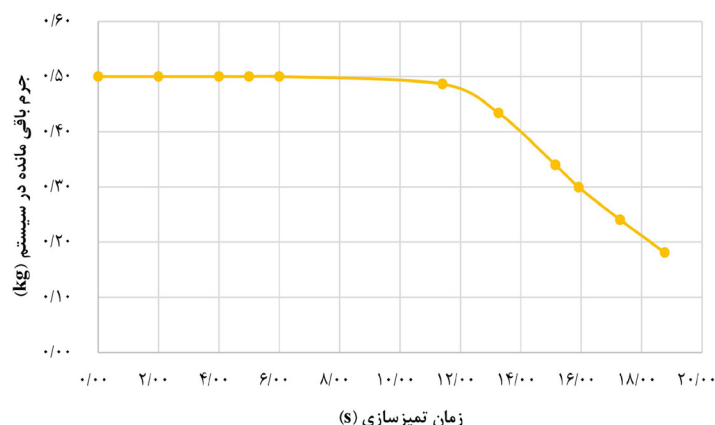
جدول ۳ جرم CaCO_3 باقی مانده در سیستم برحسب زمان در مدل تجربی

زمان (s)	جرم CaCO_3 باقی مانده (kg)
۰	۰/۵۰۰۰۰
۲	۰/۵۰۰۰۰
۴	۰/۵۰۰۰۰
۵	۰/۵۰۰۰۰
۶	۰/۵۰۰۰۰
۱۱/۳۲	۰/۲۱۲۲۸
۱۳/۳۴	۰/۰۵۸۵۶
۱۴/۹۱	۰/۰۲۰۸۴
۱۵/۹۲	۰/۰۰۵۵۳
۱۷/۳۱	۰/۰۰۲۲۱
۱۸/۶۹	۰/۰۰۰۹۸

شکل ۵ نمودار تغییرات جرم CaCO_3 موجود در سیستم برحسب زمان در آزمایش تجربیجدول ۴ جرم CaCO_3 باقی مانده در سیستم برحسب زمان در مش نوع A

زمان (s)	جرم CaCO_3 باقی مانده (kg)
۰	۰/۵۰۰۰۰
۲	۰/۵۰۰۰۰
۴	۰/۵۰۰۰۰
۵	۰/۵۰۰۰۰
۶	۰/۵۰۰۰۰
۱۱/۴۱	۰/۴۸۶۴۹
۱۳/۲۶	۰/۴۳۴۰۲
۱۵/۱۵	۰/۳۳۹۹۱
۱۵/۹۲	۰/۲۹۹۴۸
۱۷/۲۹	۰/۲۴۰۶۸
۱۸/۷۷	۰/۱۸۱۱۵

* با توجه به در دسترس نبودن مقادیر زمان‌های دقیق و منطبق بر آزمایش تجربی در این مش، نزدیک‌ترین زمان‌ها به عنوان مرجع انتخاب شده‌اند.



شکل ۶ نمودار تغییرات جرم CaCO_3 موجود در سیستم برحسب زمان‌های مدل تجربی در مش نوع A

صحت‌سنجی مدل‌سازی با داده‌های تجربی

برای مقایسه مش نوع B با مدل تجربی مقدار تفاضل مقادیر مدل CFD و مدل تجربی نیز به‌عنوان خطای محاسبه در هر نقطه تهیه گردیده که در **جدول ۷** آمده است.

مقایسه نتایج و ارائه تحلیل

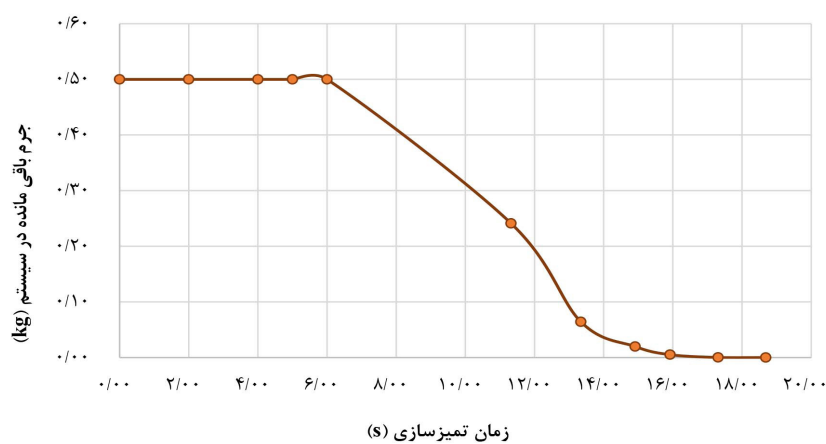
در **جدول ۸** نتایج مدل B و C با یکدیگر مقایسه و تفاوت مقادیر آن‌ها نسبت به یکدیگر گزارش شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر به غیر از یک نقطه که در تمام زمان‌ها بالاترین تفاوت را دارند (۱۱/۳۲ s) در سایر نقاط با تفاوتی کمتر از ۰/۰۴ نسبت به یکدیگر قرار گرفته‌اند و به‌خوبی به هدف پژوهش در بخش بررسی استقلال مش از ۲۰۰ هزار به ۵۰۰ هزار دست یافته‌ایم. نمودارهای همه موارد نیز در یک نمودار تجمعی در **شکل ۹** آمده است. همان‌طور که گفته شد و در **شکل ۹** قابل مقایسه است، در مش نوع A با توجه به عدم دقت کافی مدل، در زمانی که مدل تجربی و مش نوع B و C تقریباً تمام CaCO_3 موجود در سیستم را خارج کرده‌اند حدود ۳۶٪ (۱۸۱ g) از ذرات کنده همچنان در سیستم باقی است. در این نمودار نیز داده‌های عددی به‌صورت گرافیکی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند و به غیر از خطای اندازه‌گیری در بخش مدل تجربی که تعداد نقاط کمی ارائه داده شده، مدل CFD به‌خوبی نتایج همسویی با نتایج آزمایشگاهی ارائه داده است.

در مرحله بعدی شبیه‌سازی مذکور بدون تغییر برای مدل B با تعداد مش‌های بیشتر (حدود ۲۰۰/۰۰۰ مش) صورت پذیرفت که مقدار جرم CaCO_3 باقی‌مانده در هر زمان در **جدول ۵** و نمای گرافیکی مراحل خروج کنده‌ها در **شکل ۷** آمده است.

جدول ۵ جرم CaCO_3 باقی‌مانده در سیستم برحسب زمان در مش نوع B

زمان (s)	جرم CaCO_3 باقی‌مانده (kg)
۰	۰/۵۰۰۰۰
۲	۰/۵۰۰۰۰
۴	۰/۵۰۰۰۰
۵	۰/۵۰۰۰۰
۶	۰/۵۰۰۰۰
۱۱/۳۲	۰/۲۴۱۰۸
۱۳/۳۴	۰/۰۶۴۰۷
۱۴/۹۱	۰/۰۱۹۷۷
۱۵/۹۲	۰/۰۰۵۰۷
۱۷/۳۱	۰/۰۰۰۱۶
۱۸/۶۹	۰/۰۰۰۰۱

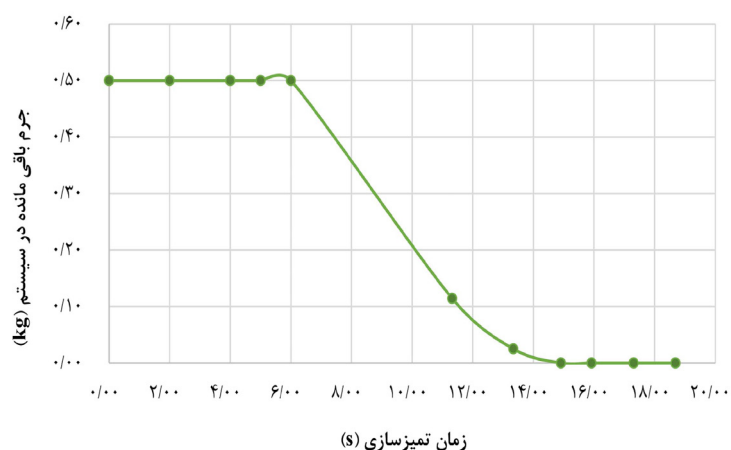
در آخرین شبیه‌سازی در این بخش نیز برای مدل C با حدود ۵۰۰/۰۰۰ مش شبیه‌سازی خروج کنده‌های CaCO_3 انجام گردید که داده‌های جرم بر حسب مقدار در **جدول ۶** و نمودار **شکل ۸** قابل مشاهده است.



شکل ۷ نمودار تغییرات جرم CaCO_3 موجود در سیستم برحسب زمان‌های مدل تجربی در مش نوع B

جدول ۶ جرم CaCO_3 باقی مانده در سیستم برحسب زمان در مش نوع C

زمان (s)	جرم CaCO_3 باقی مانده (kg)
۰	۰/۵۰۰۰۰
۲	۰/۵۰۰۰۰
۴	۰/۵۰۰۰۰
۵	۰/۵۰۰۰۰
۶	۰/۵۰۰۰۰
۱۱/۳۲	۰/۱۱۴۳۴
۱۳/۳۴	۰/۰۲۵۱۲
۱۴/۹۱	۰/۰۰۰۱۳
۱۵/۹۲	۰/۰۰۰۰۱
۱۷/۳۱	۰/۰۰۰۰۰
۱۸/۶۹	۰/۰۰۰۰۰



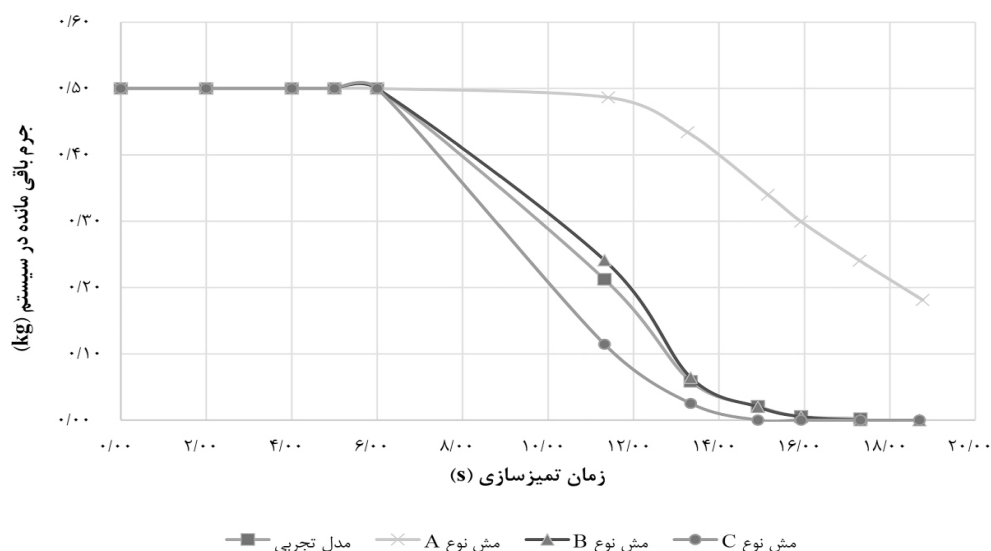
شکل ۸ نمودار تغییرات جرم CaCO_3 موجود در سیستم برحسب زمان‌های مدل تجربی در مش نوع C

جدول ۷ مقایسه مقادیر CaCO_3 باقی مانده در سیستم در مدل تجربی و مدل CFD نوع B و تفاضل آن‌ها

تفاضل مدل CFD از مدل تجربی	جرم CaCO_3 باقی مانده در مدل CFD نوع B (kg)	جرم CaCO_3 باقی مانده در مدل تجربی (kg)	زمان (s)
۰/۰۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰۰	۰
۰/۰۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰۰	۲
۰/۰۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰۰	۴
۰/۰۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰۰	۵
۰/۰۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰۰	۶
۰/۰۲۸۸۱	۰/۲۴۱۰۸	۰/۲۱۲۲۸	۱۱/۳۲
۰/۰۰۵۵۱	۰/۰۶۴۰۷	۰/۰۵۸۵۶	۱۳/۳۴
-۰/۰۰۱۰۷	۰/۰۱۹۷۷	۰/۰۲۰۸۴	۱۴/۹۱
-۰/۰۰۰۴۶	۰/۰۰۵۰۷	۰/۰۰۵۵۳	۱۵/۹۲
-۰/۰۰۲۰۵	۰/۰۰۰۱۶	۰/۰۰۲۲۱	۱۷/۳۱
۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۹۸	۱۸/۶۹

جدول ۸ مقایسه مقادیر CaCO_3 باقی مانده در سیستم در مدل‌های CFD نوع B و C تفاضل آن‌ها

تفاضل مدل CFD نوع B و C	جرم CaCO_3 باقی مانده در مدل CFD نوع C (kg)	جرم CaCO_3 باقی مانده در مدل CFD نوع B (kg)	زمان (s)
۰/۰۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰۰	۰
۰/۰۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰۰	۲
۰/۰۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰۰	۴
۰/۰۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰۰	۵
۰/۰۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰۰	۰/۵۰۰۰۰	۶
۰/۱۲۶۷۴	۰/۱۱۴۳۴	۰/۲۴۱۰۸	۱۱/۳۲
۰/۰۳۸۹۵	۰/۰۲۵۱۲	۰/۰۶۴۰۷	۱۳/۳۴
۰/۰۱۹۶۷	۰/۰۰۰۱۳	۰/۰۱۹۷۷	۱۴/۹۱
۰/۰۰۵۰۶	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۵۰۷	۱۵/۹۲
۰/۰۰۰۱۶	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۱۶	۱۷/۳۱
۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۱	۱۸/۶۹



شکل ۹ نمودار تجمعی CaCO_3 باقی مانده در سیستم بر حسب زمان برای مدل تجربی، مدل CFD نوع A، نوع B و نوع C

تفاوت‌های موجود در پیش‌بینی مدل CFD از نحوه تخلیه کنده‌های حفاری از فضای دالیزی به‌خوبی مشاهده شود. در شکل ۱۳ نمای گرافیکی غلظت CaCO_3 در زمان ۳۰ s در مقاطع xy و xz از حلقه جریانی طراحی شده در مدل E2-475 قابل مشاهده است که نمایانگر کاهش تدریجی غلظت در ابتدای حلقه و حرکت ذرات به سمت خروجی مدل است. لازم به ذکر است، که تفاوت‌های موجود در داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها صرفاً ناشی از دو عامل اصلی (۱) تفاوت در جرم کنده‌های حفاری اختصاص داده شده به فضای دالیزی در زمان اولیه شروع شبیه‌سازی و (۲) تفاوت‌های ساختاری عملکرد نازل سرمت در دو مدل تجربی و شبیه‌سازی قدیمی و جدید بوده است. در جدول ۱۰ مقایسه‌ای از درصد CaCO_3 باقی مانده در سیستم در مدل‌های CFD نوع B و E2-475 نسبت به یکدیگر و نسبت به هر یک از آزمایش‌های تجربی صورت گرفته با حلقه قدیمی و جدید ذکر گردیده است. که به‌طور کلی می‌توان نمودار گرافیکی درصد جرم مواد جامد باقی مانده در سیستم را بر حسب زمان برای هر دو مش بهینه و آزمایش‌های تجربی متناظرشان در شکل ۱۴ به نمایش گذاشت. مجدداً یادآوری می‌گردد.

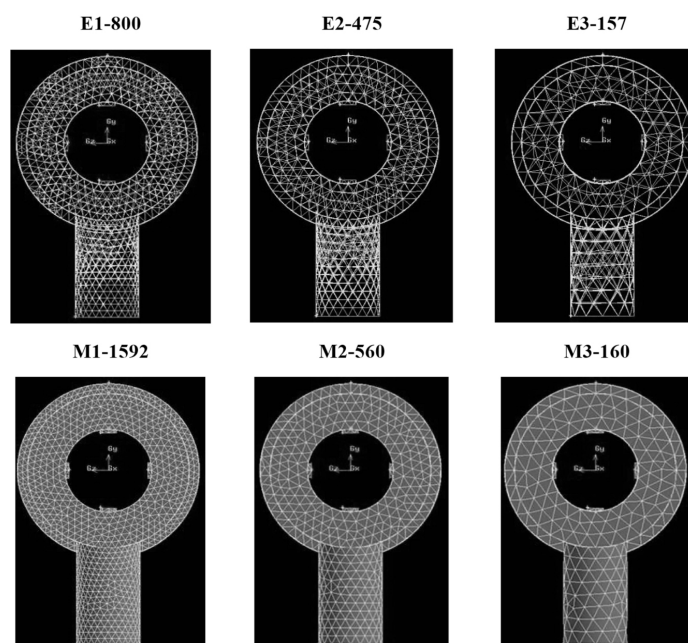
برای تطبیق داده‌های عددی حاصل شده با تجربه واقعی از نمونه، شکل ۱۰ به مقایسه نمای مقطع xz حلقه جریانی در زمان ۸ s برای هر سه شبیه‌سازی پرداخته است تا غلظت نقطه‌ای CaCO_3 در هر بخش از محدوده خروجی حلقه قابل مشاهده باشد. دودار و همکارانش، با انجام فرآیندی مشابه بر روی مدل تجربی قدیمی شکل ۲ الف به مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی مدل مذکور پرداخته و از بین مش‌های جدول ۹ مش E2-475 را به‌عنوان مش بهینه انتخاب نمودند [۱۹]. در شکل ۱۱ می‌توان مقایسه‌ای که بین اندازه و چینش مش‌های مدل مذکور به نمایش گذاشته شده است را مشاهده نمود. با استفاده از نمودارهای رسم شده در شکل ۱۲ بررسی استقلال از مش و صحت‌سنجی داده‌های حاصل از شبیه‌سازی CFD فوق با نتایج حاصل از آزمایش مدل تجربی قدیمی انجام گرفته است [۱۹]. حال که مدل دینامیک سیالات محاسباتی E2-475 به‌دلیل پیش‌بینی نزدیک به داده‌های آزمایش تجربی قدیمی به‌عنوان مش بهینه انتخاب شده است؛ با انتخاب مش B به‌عنوان مش بهینه در شرایطی که نازل‌های سرمت جدید در مدل تجربی کار گرفته شده باشد، مقایسه‌ای خواهیم داشت تا



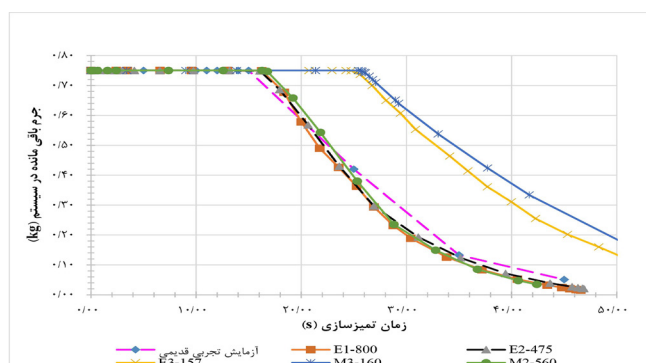
شکل ۱۰ مقایسه غلظت CaCO_3 باقی مانده در مدل و الگوی خروج آن به عنوان پایلوت در زمان $t=8s$ در مش‌های مختلف نوع A، B و C (از راست به چپ)

جدول ۹ خصوصیات انواع مش‌های در نظر گرفته شده برای مدل تجربی قدیمی توسط دودار و همکارانش [۱۹]

فاکتور	E ۱-۸۰۰	E ۲-۴۷۵	E ۳-۱۵۷	M ۳-۱۶۰	M ۲-۵۶۰
نوع مش	چهار وجهی	چهار وجهی	چهار وجهی	چهار وجهی	چهار وجهی
تعداد المان‌ها	۸۰۰/۰۰۰	۴۷۵/۰۰۰	۱۵۷/۰۰۰	۱۶۰/۰۰۰	۵۶۰/۰۰۰
نسبت ابعاد (میانگین)	۱۵/۹۹	۱۵/۲۴	۲۵/۹۵	۲۵/۹۵	۱۴/۵۳
چولگی ^۱ (حداکثر)	۰/۷۵۵	۰/۷۱۰	۰/۸۳۲	۰/۸۳۲	۰/۷۲۱
کیفیت متعامد (حداقل)	۰/۱۸۰	۰/۲۵۰	۰/۶۴۱	۰/۶۴۰	۰/۲۲۵
لایه مرزی	بله	بله	بله	خیر	خیر



شکل ۱۱ مقایسه نمایش مش‌های مدل CFD دودار و همکارانش از صفحه XY [۱۹]



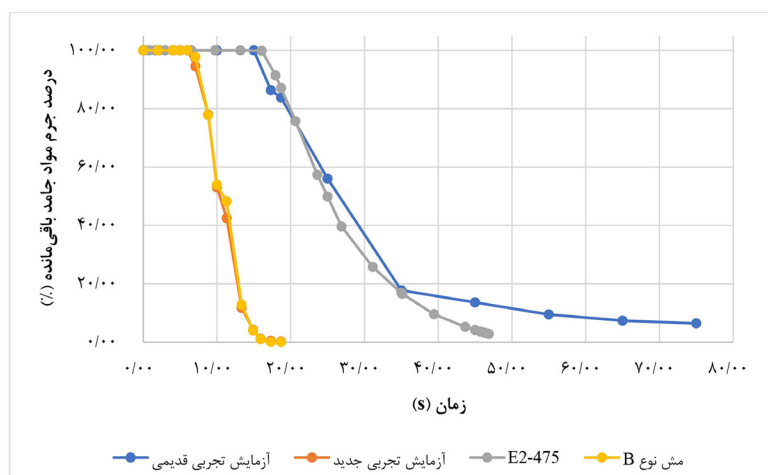
شکل ۱۲ نمودار تجمعی CaCO_3 باقی مانده در سیستم برحسب زمان برای مدل تجربی قدیمی و مدل های CFD دهودار و همکارانش [۱۹]



شکل ۱۳ نمودار مقدار CaCO_3 باقی مانده در سیستم در زمان $t=30s$ برای مدل E2-475 [۱۹]

جدول ۱۰ مقایسه درصد CaCO_3 باقی مانده در سیستم در مدل های CFD نوع B و E2-475 با نتایج تجربی متناظر

زمان (s)	درصد CaCO_3 باقی مانده در مدل CFD نوع B	درصد CaCO_3 باقی مانده در مدل تجربی جدید	درصد CaCO_3 باقی مانده در مدل E2-475 CFD	درصد CaCO_3 باقی مانده در مدل تجربی قدیمی
۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۲	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۴	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۶	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۷/۰۸	۹۷/۷۰	۹۴/۴۷	۱۰۰	۱۰۰
۸/۸۲	۷۷/۸۳	۷۸/۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۰	۵۳/۹۰	۵۳/۰۶	۱۰۰	۱۰۰
۱۱/۳۲	۴۸/۲۲	۴۲/۴۶	۱۰۰	۱۰۰
۱۳/۳۴	۱۲/۸۱	۱۱/۷۱	۹۹/۹۳	۱۰۰
۱۴/۹۱	۳/۹۵	۴/۱۷	۹۹/۹۰	۱۰۰
۱۵/۹۲	۱/۰۱	۱/۱۱	۹۹/۸۷	۱۰۰
۱۷/۳۱	۰/۰۳	۰/۴۴	۹۱/۴۶	۸۶/۳۴
۱۸/۶۹	۰/۰۰	۰/۱۹	۸۷/۱۱	۸۳/۷۶
۲۵/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۴۹/۸۷	۵۶/۰۰
۳۵/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۶/۸۳	۱۷/۷۳
۴۵/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۴/۱۵	۱۳/۶۰
۵۵/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	—	۹/۴۷
۶۵/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	—	۷/۳۳



شکل ۱۴ نمودار مقایسه درصد جرمی مقدار CaCO_3 باقی مانده در سیستم برحسب زمان برای مش‌های بهینه

می‌پذیرد و در فرآیند معتبرسازی و استقلال از مش مشخص شد که تفاوت میان نتایج حاصل از مدل B و C نیز چشم‌گیر نیست؛ اما با توجه به زمان لازم برای اجرای شبیه‌سازی (حدود ۶۰ h برای مدل C در برابر ۲۲ h برای مدل B) قطعاً استفاده از مدل B منطقی خواهد بود. علاوه‌بر این از نتایج موجود در مقاله‌ای به سال ۲۰۱۹ که توسط دودار و همکارانش به مقایسه تاثیر مشخصات مش مدل‌های CFD بر روی شبیه‌سازی مدل تجربی قدیمی پرداخته شده بود نیز استفاده شد، تا علی‌رغم تفاوت‌هایی چون جرم کنده‌های موجود در مدل و تفاوت‌های فیزیکی مدل‌ها، عملکرد پیش‌بینی رفتار مدل نوع B با مدل بهینه انتخابی E2-475 نیز مقایسه گردد که از لحاظ تعداد مش کمتر و خطای نسبی کمتر در مقایسه با مدل تجربی متناظر، مدل B در این مقایسه نیز به‌عنوان مدل بهینه انتخاب شد.

علائم و نشانه‌ها

α : زاویه چاه

ϕ : زاویه بستر کنده

ρ : چگالی سیال

ρ_p : چگالی کنده

q_s : دمای دانه‌ای در دیواره چاه

P_s : فشار جامد

به دلیل تفاوت در ساختار لوله جریان آزمایش جدید با قدیمی، زمان‌بندی خروج کنده‌ها متفاوت بوده که در نمودار با تبدیل جرم باقی مانده به درصد جرم باقی مانده از اختلاف جرم اولیه موجود در سیستم صرف‌نظر شده است. همچنین برای ثانیه‌های ۵۵ و ۶۵، درصد جرم باقی مانده در مش E2-475 محاسبه نشده و آخرین زمان برای این مدل ۴۶/۸۷ s است؛ بنابراین داده‌ای درج نشده است.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر تلاش شد تا علاوه‌بر به‌روزرسانی یک مدل آزمایشگاهی و تجربی- با اضافه نمودن نازل‌هایی به سرمت- مدل دینامیک سیالات محاسباتی قدیمی دودار و همکاران نیز متناظر با مدل تجربی، از طریق مدل CFD جدیدی به‌روز گردد. یکی از نتایج این به‌روزرسانی، شبیه‌سازی بهتر آرایش و شرایط تجهیزات درون‌چاهی است. پس از بررسی که بین نتایج شبیه‌سازی مدل‌های A، B و C انجام پذیرفت، مشخص شد مدل نوع A توانایی لازم برای شبیه‌سازی عملیات انتقال کنده‌ها را نداشت و مقادیر آن با خطای بالایی نسبت به آزمایش تجربی همراه بود. اجرای شبیه‌سازی در مدل نوع B با حدود ۲۰۰ هزار مش بسیار سریع‌تر و بهینه‌تر از مدل C با بیش از ۵۰۰ هزار مش انجام

$\overline{\tau}_s$: تانسور تنش-کرنش	d_p : قطر کنده
$\overline{F}_{vms}$: نیروی جرم مجازی	K_θ : ضریب انتشار برای انرژی دانه‌ای
τ_y : نقطه واروی سیال حفاری	$\vec{g}$: تابع توزیع شعاعی
τ : تنش برشی	θ_s : دمای دانه‌ای
ρ_c : چگالی جریانی معادل	γ_{θ_s} : انرژی تلف‌شده در برخورد
v_x : سرعت سیال در جهت جریان	τ_s : زمان آسایش
C_{Drag} : ضریب کشش	ϕ_{ls} : تبادل انرژی بین فازی
C_{lift} : ضریب برآ	$\alpha_{p/s}$: کسر حجمی کنده/سیال
	K_{ls} : ضریب تبادل بین فازی

مراجع

- [1]. Zhang F, Miska S, Yu M, Ozbayoglu E, Takach N, Osgouei R E (2015) Is well clean enough? a fast approach to estimate hole cleaning for directional drilling, SPE/ ICoTA Coiled Tubing and Well Intervention Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, March, doi.org/10.2118/173681-MS.
- [2]. Cayeux E, Leulseged A, Kluge R, Haga J (2016) Use of a transient cuttings transport model in the planning, monitoring and post analysis of complex drilling operations in the north sea, IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, March, doi.org/10.2118/178862-MS.
- [3]. Han S M, Woo N S, Kim Y J (2016) A study of the particle transport in the non-newtonian fluid with inclined annulus, Asia-Pacific Journal of Modeling and Simulation for Mechanical System Design and Analysis, 1, 1: 23-28.
- [4]. Ayeni O O, Wu C L, Nandakumar K, Joshi J B (2016) Development and validation of a new drag law using mechanical energy balance approach for DEM-CFD simulation of gas-solid fluidized bed, Chemical Engineering Journal, 302: 395-405, doi.org/10.1016/j.cej.2016.05.056.
- [5]. Li J, Luft B (2014) Overview solids transport study and application in oil-gas industry-theoretical work, International Petroleum Technology Conference, doi.org/10.2523/IPTC-17832-MS.
- [6]. Falcone G (2009) Flow loops for validating and testing multiphase flow meters, Developments in Petroleum Science, 54: 295-302, doi.org/10.1016/S0376-7361(09)05409-0.
- [7]. Duan M, S M, Yu M, Takach N, Ahmed R, Zettner C (2007) Critical conditions for effective sand-sized solids transport in horizontal and high-angle wells, Paper Presented at the SPE 106707, Oklahoma, U.S.A., 24: 2, doi.org/10.2118/106707-PA.
- [8]. Corredor F E R, Bizhani M, Kuru E (2016) Experimental investigation of cuttings bed erosion in horizontal wells using water and drag reducing fluids, Journal of Petroleum Science and Engineering, 147: 129-142, doi.org/10.1016/j.petrol.2016.05.013.
- [9]. Egenti N B (2014) Understanding drill-cuttings transportation in deviated and horizontal wells, Paper presented at the SPE-172835-MS, Lagos, Nigeria, doi.org/10.2118/172835-MS.
- [10]. Nazari T, Hareland G, Azar J J (2010) Review of cuttings transport in directional well drilling- systematic approach, Paper Presented at the SPE, Anaheim, California, U.S.A., doi.org/10.2118/132372-MS.
- [11]. Bizhani M, Rodriguez-Corredor F E, Kuru E (2015) Hole cleaning performance of water vs. polymer-based fluids under turbulent flow conditions, Paper presented at the SPE, Alberta, Canada, doi.org/10.2118/174404-MS.
- [12]. Baldino S, R E O, Ozbayoglu E, Miska S, Takach N, May R, Clapper D (2015) Cuttings settling and slip velocity evaluation in synthetic drilling fluids, Paper presented at the 12th Offshore Mediterranean Conference and Exhibition, Ravenna, Italy, ISBN: 0788894043648.
- [13]. Valluri S G, Miska S Z, Yu M, Ahmed R M, Takach N (2007) Experimental study of effective hole cleaning using sweeps in horizontal wellbores, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, doi.org/10.2118/101220-MS.
- [14]. Duan M S M, Yu M, Takach N, Ahmed R, Zettner C (2008) Transport of small cuttings in extended-reach drilling, Society of Petroleum Engineers, doi.org/10.2118/104192-MS.

[۱۵]. دودار م، همایون م (۱۴۰۰) مهندسی حفاری، جلد یکم: سیال حفاری، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر،

تهران، ۱-۳۷۴، ISBN: ۹۷۸۹۶۴۴۶۳۸۲۹۹.

[۱۶]. انوری، ح (۱۳۸۷) مدل سازی عددی انتقال کنده های حفاری به همراه مطالعه پارامتری عوامل موثر بر آن در یکی از میادین نفتی جنوب ایران؛ پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱-۹۲.

[۱۷]. دهودار م، معارفوند، پ، فضائلی زاده م، مروجی کشاورز م (۱۳۹۶) مروری بر پارامترهای اثرگذار در مطالعات تجربی و دینامیک سیالات محاسباتی حمل کنده های حفاری در فضای دالیزی چاه، اکتشاف و تولید نفت و گاز، ۱۴۵: ۵۹-۶۷.

- [18]. Dehvedar M, Moarefvand P (2019) Detecting and drilling in critical inclination window in slant wells by means of a two-phase liquid-solid CFD model and experimental study, *Kuwait Journal of Science*, 46, 2: 74-84.
- [19]. Dehvedar M, Moarefvand P, Kiyani A R (2019) A liquid-solid two-phase flow computational fluid dynamic modelling of the operational characteristics effects on the cleaning time of a circulating flow loop, *South African Journal of chemistry*, 72: 67-79, dx.doi.org/10.17159/0379-4350/2019/v72a10.
- [20]. Zeidler H Udo (1970) An experimental analysis of the transport of drilled particles, SPE 3064 presented at the SPE 45th Annual Meeting, Houston, 12, 01: 39-48, doi.org/10.2118/3064-PA.
- [21]. Sifferman R T (1979) Drill cutting transport in full scale vertical annuli, SPE 4514 presented in the 48th Annual Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers held in Las Vegas, Nevada, 26, 11: 1295-1302, doi.org/10.2118/4514-PA.
- [22]. Belavadi M N, Chukwu G A (1994) Experimental study of the parameters affecting cuttings transportation in a vertical wellbore annulus, SPE Western Regional Meeting, Long Beach, California, doi.org/10.2118/27880-MS.
- [23]. Waker S, J Li (2000) The effect of particle size, fluid rheology, and pipe eccentricity on cutting transport, SPE 60755 Presented at the 2000 SPE, ICTA Coiled Tubing Roundtable held in Houston, TX, doi.org/10.2118/60755-MS.
- [24]. Pigott R J S (1941) Mud Flow in Drilling", *Drilling and Production Practice*, API.
- [25]. Martin M (1987) Transport of cuttings in directional wells, paper SPE / IADC 16083 presented at the SPE / IADC Drilling Conference, New Orleans, Louisiana, doi.org/10.2118/16083-MS.
- [26]. Seeberger M H, Matlock R W, Hanson P M (1989) Oil muds in large - diameter, highly deviated wells: solving the cuttings removal problems, paper SPE / IADC 18636 Presented at the SPE / IADC Drilling Conference, New Orleans, Louisiana, doi.org/10.2118/18635-MS.
- [27]. Okranji S S, Azar J J (1985) Mud cutting transport in directional well drilling, paper SPE 14178 presented at the annual meeting in Las Vegas, Nevada, doi.org/10.2118/25871-MS.
- [28]. Bilgesu H I (2002) Computational Fluid Dynamics (CFD) as a tool to study cutting transport in wellbores, SPE 78716 paper Eastern Regional Meeting, Society of Petroleum Engineers, doi.org/10.2118/78716-MS.
- [29]. Byrne M T (2011) Computational fluid dynamics for reservoir and well fluid flow performance modelling, SPE European Formation Damage Conference. Society of Petroleum Engineers, doi.org/10.2118/144130-MS.
- [30]. Akhshik S, Behzad M, Rajabi M (2016) CFD-DEM simulation of the hole cleaning process in a deviated well drilling: the effects of particle shape, *Particuology*, 25: 72-82, doi.org/10.1016/j.partic.2015.02.008.
- [31]. Mme U, Skalle P (2012) CFD calculations of cuttings transport through drilling annuli at various angles, *International Journal of Petroleum Science and Technology*, 6: 129-141, ISSN 0973-6328.
- [32]. Hajipour M (2020) CFD simulation of turbulent flow of drill cuttings and parametric studies in a horizontal annulus, *SN Applied Sciences* 2: 1-12.

[۳۳]. مشعشی س ح، ابراهیم آبادی آ، امامزاده ا (۱۳۹۷) ارائه ابزار گرافیکی به منظور پیش بینی نرخ نفوذ حفاری با استفاده از شبکه های هوشمند. پژوهش نفت، ۲۸، (۴-۹۷)، ۱۱۲-۱۲۵.