



Semnan University

# Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>



## Research Article

# Numerical Simulation of Fluid Flow with Real Viscosity in the Centrifugal Pump by SPH Method

Ali Asghar Pirkhalili Varnamkhasti<sup>1</sup>, Mahmood Rostami Varnoosfaderani<sup>1,\*</sup> and Mojtaba Dehghan Manshadi<sup>1</sup>

1. Faculty of Mechanical Engineering, Maleke-ashtar University of Technology, Isfahan, Iran.

\*Corresponding Author: [mrostamivf@gmail.com](mailto:mrostamivf@gmail.com)

---

### PAPER INFO

#### Paper history:

Received: 05 April 2022

Revised: 05 November 2022

Accepted: 01 January 2023

#### Keywords:

SPH,  
pressure and velocity  
correction,  
centrifugal pump.

### ABSTRACT

In this paper, the Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method with dynamic boundary condition has been used to simulate 3D fluid flow in a centrifugal pump. Severe fluctuations in the field of pressure and velocity is one of the major problems in this method. In this paper, the fluctuations have been corrected using Delta and Shift algorithms. The simulation was numerically performed with real fluid viscosity (laminar and turbulence). Validation of this method indicated that in the case of real fluid viscosity, the Delta and Shift algorithms should be used simultaneously to obtain good agreement with the experimental data. To validate the pump results, a comparison was made between the numerical outputs and the performance curves of pump EN 125-315 of Pumpiran Company under relatively similar conditions. The results of this comparison showed that the error of simulation of pump head, consumption power and efficiency values compared with experimental data were about 12, 5.5 and 16 percent, respectively.

© 2023 Published by Semnan University Press.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.26784.2252>

---

### How to cite this article:

Pirkhalili, A. A., Rostami-Varnousfaaderani, M., & Dehghan Manshadi, M. (2023). Numerical Simulation of Fluid Flow with Real Viscosity in a Centrifugal Pump by SPH Method. *Journal of Modeling in Engineering*, 21(73),119-133. doi: 10.22075/jme.2023.26784.2252

## شبیه‌سازی عددی جریان سیال با لزجت واقعی در پمپ گریز از مرکز به روش SPH

علی اصغر پیرخلیلی و رنامخواستی<sup>۱</sup>، محمود رستمی و نوسفادرانی<sup>۲\*</sup> و مجتبی دهقان منشادی<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: پژوهشی            دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۱۶            بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۱۴            پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۱۱</p>	<p>در این مقاله از روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) با شرط مرزی دینامیک، برای شبیه‌سازی سه بعدی جریان سیال در یک پمپ گریز از مرکز استفاده شده است. نوسانات شدید در میدان فشار و سرعت یکی از مشکلات عمده در این روش است. در این مقاله، نوسانات با استفاده از الگوریتم‌های دلتا و شیفت تصحیح شده‌اند. شبیه‌سازی عددی با لزجت واقعی سیال (لایه‌ای و آشفته)، انجام شده است. اعتبارسنجی این روش حاکی از آن بود که در حالت لزجت واقعی سیال باید از الگوریتم‌های دلتا و شیفت به صورت همزمان استفاده کرد تا تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی حاصل شود. برای صحت سنجی نتایج پمپ، مقایسه‌ای بین خروجی‌های عددی با منحنی‌های عملکردی پمپ EN 125-315 شرکت پمپیران در شرایطی نسبتاً مشابه، انجام شد. نتایج این مقایسه حاکی از آن بود که خطای شبیه‌سازی مقادیر هد، توان مصرفی و بازده پمپ نسبت به داده‌های تجربی به ترتیب حدود ۱۲، ۵/۵ و ۱۶ درصد بوده‌اند.</p>
<p><b>واژگان کلیدی:</b>            هیدرودینامیک ذرات هموار،            تصحیح فشار و سرعت،            پمپ گریز از مرکز.</p>	

### ۱- مقدمه

زندگی بشر با پدیده انتقال سیال گره خورده است. از گذشته تا کنون، بشر به فکر ساخت تجهیزاتی برای آسان نمودن کارهای روزمره بوده است. یکی از این تجهیزات که به خصوص برای بهره‌برداری از منابع آبی مورد توجه قرار گرفته پمپ‌ها هستند که به تدریج، تکامل یافته و به شکل امروزی در آمده‌اند. امروزه پمپ‌ها در سطح وسیعی از زمینه‌ها از قبیل کشاورزی، پتروشیمی، پالایشگاه، صنایع نظامی، شبکه‌های انتقال و توزیع آب، پزشکی، انواع ساختمان‌ها و شاخه‌های فراوان دیگر کاربرد دارند. مدل سازی جریان سیال در پمپ‌های گریز از مرکز به روش‌های آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی توسط محققین فراوانی انجام شده است. برای شبیه سازی این مسئله، مدل‌سازی سه بعدی جریان سیال [۱-۴] دارای اهمیت است. از مهم‌ترین

پیشگامان در این زمینه دوهرتی [۵]، استپانوف [۶]، تلو [۷] و ایپن [۸] می‌باشند که همگی جهت یافتن عملکرد پمپ‌های روغن گریز از مرکز بر حسب تابعی از لزجت روغن، گام‌های مهمی را برداشته‌اند و نتایج حاصل از این تحقیقات جهت طراحی و انتخاب این پمپ‌ها کاربرد داشته است. با مطالعه و بررسی تحقیقات صورت گرفته توسط محققین مختلف می‌توان دریافت که از سال ۱۹۲۶ تا اواخر قرن بیستم، بیشتر تحقیقات صورت گرفته بر روی پمپ‌های گریز از مرکز به یک مسئله مشخصی معطوف شده و آن یافتن عملکرد این نوع از پمپ‌ها است. اما پس از مدتی و به خصوص با پیشرفت رایانه‌ها و ظهور روش‌های عددی، مطالعات فراوانی بر روی پارامترهای هندسی پمپ و تأثیر تغییرات آنها بر عملکرد پمپ‌ها جهت بهینه سازی انجام شد [۹]. به عنوان نمونه، احقاقی و وجدی [۱۰] به صورت

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mrostamivf@gmail.com

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، مجتمع مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان

<sup>۲</sup> استادیار، مجتمع مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان

<sup>۳</sup> استاد، مجتمع مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان

این پژوهش، مبنای نظری شبیه سازی سه بعدی جریان داخلی و فرایندهای پمپ گریز از مرکز با روش *SPH* را ارائه می‌دهد. آن‌ها در ابتدا برای اعتبارسنجی مدل عددی و شرایط مرزی، جریان کوئت و پوازیه<sup>۴</sup> را به صورت عددی شبیه سازی کرده و نتایج حاصل از آن را با مقادیر تئوری، مقایسه نمودند که نشان از توانایی مدل عددی در شبیه سازی این دو مسئله داشت.

در این مقاله از روش *SPH* به کار رفته در کد متن باز دوئال اس‌فیزیکس<sup>۵</sup>، برای شبیه سازی سه بعدی جریان آب درون پمپ گریز از مرکز استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی عددی نیز با منحنی‌های عملکردی آزمایشگاهی مربوطه مقایسه شده‌اند. این شبیه سازی در حالت لزجت واقعی سیال (لزجت لایه‌ای و آشفتگی) انجام شده است. به منظور جلوگیری از ایجاد نوسانات و حفره‌ها در میدان حل و نیز اصلاح فشار و سرعت، از الگوریتم‌های دلتا و شیفت<sup>۶</sup> استفاده شده است. نوآوری این مقاله در شبیه سازی عددی جریان سیال درون پمپ گریز از مرکز به روش *SPH* با لزجت واقعی سیال به همراه اعمال الگوریتم‌های دلتا و شیفت بوده است.

## ۲- معادلات حاکم و روش عددی

معادلات حاکم بر جریان سیال عبارت‌اند از معادله بقای جرم و معادله بقای مومنتوم. معادله مومنتوم در یک محیط پیوسته به صورت زیر است:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \mathbf{g} + \mathbf{\Gamma} \quad (1)$$

که در آن  $\mathbf{\Gamma}$  ترم دیفیوژن<sup>۷</sup> و  $\mathbf{g}$  شتاب گرانشی است [۱۸]. برای گسسته سازی معادلات حاکم از روش *SPH* استفاده می‌شود. در این روش، مجموعه‌ای از ذرات ماده، یک محیط پیوسته را مشخص می‌کنند و با توجه به خصوصیات فیزیکی ذرات همسایه، معادلات بقای جرم و مومنتوم در محل هر یک از این ذرات، انتگرال گیری می‌شوند. مجموعه ذرات همسایه توسط تابع کرنل ( $W$ ) و به کمک طول هموارساز ( $h$ ) تعیین می‌شود و داریم:  $h = c_h \sqrt{3dp^2}$  با  $dp$  به عنوان فاصله بین ذرات و  $c_h$  هم یک ضریب ثابت.

عددی و تجربی، تأثیر سه مدل پره جداکننده بر عملکرد پمپ‌های گریز از مرکز با سرعت مخصوص متوسط را بررسی کردند. نتایج عددی و تجربی حاکی از آن بود که حداکثر افزایش هد در نقطه بهترین بازده برای پروانه نوع سوم (طول پره جداکننده ۶۶٪ طول پره‌های اصلی) برابر ۱۰/۵ درصد به دست آمده است. هوانگ و همکاران [۱۱] هم با استفاده از نرم افزارهای اوپن فوم و انسیس فلونت<sup>۱</sup>، عملکرد پمپ تحت مدل‌های محاسباتی، شبکه و شرایط مرزی مشابه را با نتایج آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار دادند. این مقایسه حکایت از دقت بالای اوپن فوم در شبیه سازی و پیش‌بینی عملکرد پمپ داشت. یکی از روش‌های عددی که اخیراً مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته، روش هیدرودینامیک ذرات هموار<sup>۲</sup> است. این روش توسط لوسی [۱۲] و گینگولد و موناگان [۱۳] برای حل مسائل اختریف‌زیک ابداع شد و توسط موناگان برای شبیه سازی جریان‌های سطح آزاد توسعه یافت [۱۴]. روش *SPH* یک روش بدون شبکه لاگرانژی<sup>۳</sup> است که در آن سیال نسبتاً تراکم پذیر در نظر گرفته شده و فشار از معادله حالت به دست می‌آید. از جمله مزایای این روش نسبت به روش‌های عددی مبتنی بر شبکه می‌توان به توانایی در مدلسازی آسان‌تر تغییر شکل‌های زیاد، تعیین سطح آزاد و مرزهای تغییر شکل یافته و همچنین شبیه سازی مسائل فیزیکی دشوارتر با هندسه‌های پیچیده‌تر، اشاره نمود. با توجه به اینکه برای محاسبه اندازه گام زمانی که پایداری حل را تضمین کند، از حداکثر سرعت موجود در میدان حل استفاده می‌شود، اندازه گام زمانی محدود شده و هزینه‌های محاسباتی افزایش می‌یابند. ایجاد نوسانات غیرفیزیکی و اختلال در میدان حل نیز از جمله معایب دیگر این روش عددی به شمار می‌روند که برای مقابله با آنها از طرح‌های تصحیح نتایج استفاده می‌شود [۱۵]. حبیبی [۱۶] با استفاده از روش *SPH* به شبیه سازی عددی جریان خون درون پمپ گریز از مرکز قلب پرداخت. در این پژوهش، مناطق خطرناکی که از بین رفتن سلول‌های خونی یا لخته شدن خون اتفاق می‌افتد، مشخص شدند. پنگ و همکاران [۱۷] هم از روش *SPH* برای شبیه سازی عددی دو بعدی جریان سیال در پمپ گریز از مرکز استفاده کردند.

<sup>5</sup> DualSPHysics open-source code

<sup>6</sup> Delta and Shift algorithms

<sup>7</sup> Diffusion term

<sup>1</sup> penFOAM and Ansys-Fluent

<sup>2</sup> smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

<sup>3</sup> Lagrangian

<sup>4</sup> Couette and Poiseuille flow

بالانویس‌ها نیز به ذرات  $a$  و  $b$  اشاره می‌کنند.

معادله بقای جرم در روش SPH، نیز به صورت زیر گسسته سازی می‌شود [۱۸]:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b \mathbf{v}_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab} \quad (۶)$$

برای محاسبه فشار در معادلات مومنتوم هم از معادله حالت به صورت زیر استفاده می‌شود [۲۳ و ۲۲]:

$$P = b \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (۷)$$

که در آن  $\gamma = 7$ ،  $b = \frac{c_0^2 \rho_0}{\gamma}$ ،  $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$ ،  $c_0 = \sqrt{(\partial P / \partial \rho)}|_{\rho_0}$  سرعت صوت است. سرعت صوت، بیست برابر بیشترین سرعت سیال در نظر گرفته شده تا تغییرات چگالی را کمتر از یک درصد نگه دارد و بنابراین انحراف عمده‌ای از حالت تراکم ناپذیر ایجاد نمی‌شود [۱۸].

## ۲-۱- گام‌بندی زمانی

برای گام بندی زمانی از روش ورلت<sup>۴</sup> [۲۴] استفاده شده است. اگر برای معادلات مومنتوم  $(\mathbf{v}_a)$ ، چگالی  $(\rho_a)$  و موقعیت  $(\mathbf{r}_a)$  داشته باشیم [۱۸]:

$$\frac{d\mathbf{v}_a}{dt} = \mathbf{F}_a, \quad \frac{d\rho_a}{dt} = D_a, \quad \frac{d\mathbf{r}_a}{dt} = \mathbf{v}_a \quad (۸)$$

مرحله پیش بینی در روش ورلت، متغیرها را با توجه به معادلات زیر محاسبه می‌کند [۲۴]:

$$\mathbf{v}_a^{n+1} = \mathbf{v}_a^{n-1} + 2\Delta t \mathbf{F}_a^n; \quad \mathbf{r}_a^{n+1} = \mathbf{r}_a^n + \Delta t \mathbf{v}_a^n + 0.5\Delta t^2 \mathbf{F}_a^n; \quad (۹)$$

$$\rho_a^{n+1} = \rho_a^{n-1} + 2\Delta t D_a^n$$

به طوری که بالانویس  $n$  نشان‌دهنده گام زمانی است. بنابراین بعد از هر ۵۰ گام زمانی برای متغیرها داریم:

$$\mathbf{v}_a^{n+1} = \mathbf{v}_a^n + \Delta t \mathbf{F}_a^n; \quad \mathbf{r}_a^{n+1} = \mathbf{r}_a^n + \Delta t \mathbf{v}_a^n + 0.5\Delta t^2 \mathbf{F}_a^n; \quad (۱۰)$$

$$\rho_a^{n+1} = \rho_a^n + \Delta t D_a^n$$

## ۲-۲- گام زمانی متغیر

با استفاده از طرح‌های گام‌بندی زمانی صریح، گام زمانی

در این مقاله از تابع کرنل اسپیلاین درجه سه<sup>۱</sup> استفاده شده که به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۹]:

$$W(r, h) = \alpha_D \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}q^2 + \frac{3}{4}q^3 & 0 \leq q \leq 1 \\ \frac{1}{4}(2-q)^3 & 1 \leq q \leq 2 \\ 0 & q \geq 2 \end{cases} \quad (۲)$$

طوری که  $\alpha_D$  در حالت سه‌بعدی برابر  $1/\pi h^3$  و  $q = r/h$  خواهد بود. معادله مومنتوم برای حالت لزجت واقعی سیال (لزجت لایه‌ای و آشفته)، به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \mathbf{g} + \mathbf{v}_0 \nabla^2 \mathbf{v} + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \vec{\tau} \quad (۳)$$

که در آن ترم  $\mathbf{v}_0 \nabla^2 \mathbf{v}$  لزجت لایه‌ای، ترم  $\frac{1}{\rho} \nabla \cdot \vec{\tau}$  لزجت آشفته،  $\mathbf{v}_0$  لزجت سینماتیکی (معمولاً  $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ) برای آب) و  $\vec{\tau}$  نیز تانسور تنش زیرذره‌ای<sup>۲</sup> [۲۰] هستند. مقدار  $\vec{\tau}$  از معادله زیر محاسبه می‌شود [۲۱]:

$$\frac{\vec{\tau}_{ij}}{\rho} = \mathbf{v}_t \left( 2S_{ij} - \frac{2}{3}k\delta_{ij} \right) - \frac{2}{3}C_I \Delta^2 \delta_{ij} |S_{ij}|^2 \quad (۴)$$

که در آن  $\mathbf{v}_t = [(C_S \Delta l)]^2 |S|$  لزجت گردابی آشفته،  $k$  انرژی جنبشی آشفته‌گی SPS،  $\delta_{ij}$  دلتای کرونیگر<sup>۳</sup>،  $C_S$  ثابت اسماگورینسکی با مقدار (0.12)،  $C_I = 0.0066$ ،  $\Delta l$  فاصله ذره تا ذره و  $|S| = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$  که  $S_{ij}$  عنصری از تانسور کرنش SPS است. بنابراین معادله (۳) به صورت زیر گسسته‌سازی می‌شود:

$$\frac{d\mathbf{v}_a}{dt} = -\sum_b m_b \left( \frac{P_b + P_a}{\rho_b \cdot \rho_a} \right) \nabla_a W_{ab} + \mathbf{g} + \sum_b m_b \left( \frac{4\mathbf{v}_0 \mathbf{r}_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab}}{(\rho_a + \rho_b)(\mathbf{r}_{ab}^2 + \eta^2)} \right) \mathbf{v}_{ab} + \sum_b m_b \left( \frac{\vec{\tau}_{ij}^b}{\rho_b^2} + \frac{\vec{\tau}_{ij}^a}{\rho_a^2} \right) \nabla_a W_{ab} \quad (۵)$$

که  $\mathbf{v}_{ab} = \mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b$  و  $\mathbf{r}_{ab} = \mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b$ ،  $\eta^2 = 0.01h^2$  و  $\mathbf{r}_k$  و  $\mathbf{v}_k$  که به ترتیب موقعیت و سرعت ذرات هستند؛

<sup>۳</sup> Kronecker delta

<sup>۴</sup> Verlet

<sup>۱</sup> Cubic spline kernel function

<sup>۲</sup> Sub-Particle Scale (SPS) stress tensor

الگوریتم شیفت اولیه ایجاد کردند:

$$J = -D_F \nabla C \quad (13)$$

که در آن  $J$  شار،  $C$  غلظت ذرات و  $D_F$  نیز ضریب انتشار است. با استفاده از غلظت ذرات، فاصله انتقال ذرات  $\delta r_s$  توسط عبارت زیر داده می‌شود [۲۷]:

$$\delta r_s = -D \nabla C_i \quad (14)$$

که در آن  $D = Ah \|u\|_i dt$  [۲۸]،  $A$  یک ثابت بی بعد در محدوده ۱ تا ۶ با مقدار ۲ به عنوان مقدار پیش فرض،  $dt$  گام زمانی فعلی و  $u$  نیز سرعت محلی در محاسبه این گام زمانی است. گرادیان غلظت ذرات هم از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$\nabla C_i = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} \nabla W_{ij} \quad (15)$$

برای مقابله با ایجاد خطا و ناپایداری‌های غیر فیزیکی در سطح آزاد به دلیل نبود پشتیبانی کامل تابع کرنل، لیند و همکاران [۲۷] تصحیح سطح آزاد را پیشنهاد دادند که انتشار در جهت عمود بر سطح را محدود می‌کند اما اجازه می‌دهد تا انتقال در جهت مماس بر سطح آزاد انجام شود. این اصلاح توسط مقدار واگرایی ذرات تعیین می‌شود؛ پارامتری که اولین بار توسط لی و همکاران [۲۹] به صورت معادله زیر ارائه شده است:

$$\nabla \cdot \mathbf{r} = \sum_j \frac{m_j}{\rho_j} \mathbf{r}_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij} \quad (16)$$

این ایده با ضرب فاصله انتقال ذرات یعنی معادله (۱۴) در ضریب تصحیح سطح آزاد  $A_{FSC}$  انجام می‌شود [۲۷]:

$$A_{FSC} = \frac{\nabla \cdot \mathbf{r} - A_{FST}}{A_{FSM} - A_{FST}} \quad (17)$$

که در آن  $A_{FST}$  یعنی آستانه سطح آزاد در حالت سه بعدی برابر ۲/۷۵ و  $A_{FSM}$  که حداکثر مقدار واگرایی ذرات است، در حالت سه بعدی برابر ۳ است. نهایتاً الگوریتم شیفت اصلاح شده به این شکل است [۳۰]:

$$\delta r_s = \begin{cases} -A_{FSC} Ah \|u\|_i dt \cdot \nabla C_i & (\nabla \cdot \mathbf{r} - A_{FST}) < 0 \\ -Ah \|u\|_i dt \cdot \nabla C_i & (\nabla \cdot \mathbf{r} - A_{FST}) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

وابسته به عدد کورانت<sup>۱</sup>، ترم‌های نیرویی و ترم انتشار لزج<sup>۲</sup> خواهد بود و داریم [۲۲]:

$$\Delta t = CFL \cdot \min(\Delta t_f, \Delta t_{cv})$$

$$\Delta t_f = \min_a (\sqrt{h/|f_a|}) \quad (11)$$

$$\Delta t_{cv} = \min_a \frac{h}{c_0 + \max_b \left| \frac{h v_{ab} \cdot r_{ab}}{(r_{ab}^2 + \eta^2)} \right|}$$

به صورتی که  $\Delta t_f$  براساس نیرو در واحد جرم ( $|f_a|$ ) و  $\Delta t_{cv}$  نیز ترکیبی از شرط کورانت و کنترل‌های گام زمانی لزج است. عدد کورانت نیز برابر ۰/۲ در نظر گرفته شده است [۱۸].

### ۳-۲- شرط مرزی دینامیک

در این شرط مرزی، ذرات مرزی همان معادلات ذرات سیال را برآورده می‌کنند، با این تفاوت که یا ثابت می‌مانند و یا فقط با توجه به یک تابع حرکتی از پیش تعریف شده حرکت می‌کنند. وقتی فاصله یک ذره سیال تا ذرات مرزی از  $2h$  کمتر شود، چگالی ذرات مرزی افزایش یافته و موجب افزایش فشار می‌شود؛ این هم به نوبه خود باعث می‌شود یک نیروی دافعه بر روی ذره سیال، به دلیل ترم فشار موجود در معادله مومنتوم، وارد شود [۲۵].

### ۴-۲- الگوریتم دلتا

الگوریتم دلتا در معادله بقای جرم برای کاهش نوسانات چگالی به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b v_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab}$$

$$+ 2\delta_\phi h c_0 \sum_b (\rho_b - \rho_a) \frac{\mathbf{r}_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab} m_b}{r_{ab}^2 \rho_b} \quad (12)$$

ضریب  $\delta_\phi$  یا همان ضریب دلتا با مقدار ۰/۱ در بیشتر کاربردها توصیه شده است [۲۶].

### ۵-۲- الگوریتم شیفت (انتقال)

الگوریتم شیفت برای مقابله با فاصله ذرات ناهمسانگرد و جلوگیری از ناپایداری‌ها استفاده می‌شود. لیند و همکاران [۲۷] برای کنترل اندازه و جهت انتقال ذرات، بهبودی در

<sup>2</sup> Viscous diffusion term

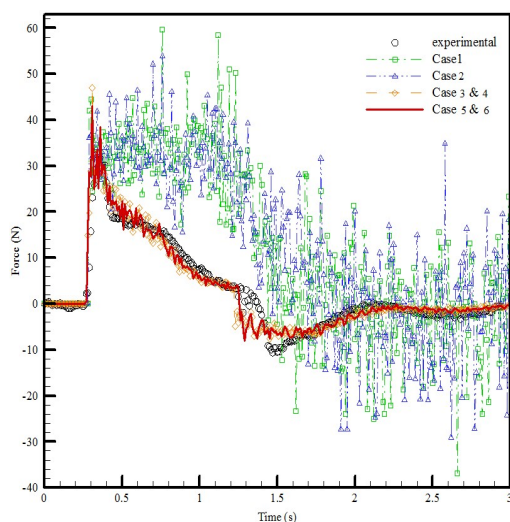
<sup>1</sup> Courant Friedrichs Lewy (CFL)

جدول ۲- انواع حالت‌های الگوریتم شیفت

نوع شیفت	۰	۱	۲	۳
توضیح	بدون شیفت	ذرات مرزی	صرف نظر از ذرات ثابت	شیفت کامل

### ۳-۱- اعتبارسنجی نیرو

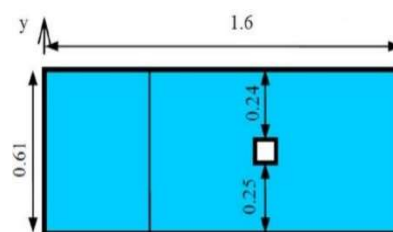
نتایج نیروی افقی وارد بر مانع مربوط به حالت‌های شبیه سازی عددی جدول ۱، با داده‌های آزمایشگاهی [۳۱] مورد مقایسه قرار گرفتند. نمودار نیروی افقی وارد بر ستون برای این حالت‌های مدلسازی در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی در شکل (۲) آورده شده است. تا مدت زمان بسیار کوتاهی از شروع حل برای هیچکدام از مدل‌ها، جریان سیال هنوز به مانع نرسیده است و هیچ نیرویی به ستون وارد نمی‌شود. پس از برخورد موج حاصل از شکست سد، نیروی شدیدی به ستون وارد می‌شود. این پدیده در یک زمان یکسان برای همه روش‌ها اتفاق نمی‌افتد. این اختلاف زمانی اگرچه که بسیار کم است، اما ناشی از استفاده از الگوریتم‌های تصحیح مختلف است. پس از این برخورد، نیروی وارد بر ستون کاهش می‌یابد. این کاهش تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که موج منعکس شده از دیواره پایین دست مخزن به ستون برخورد کرده و روی نمودار، یک قعر ایجاد شود که البته مقدار این نیرو کمتر از یک سوم نیروی اولیه وارد بر ستون (قله) است. در نهایت، حرکت جریان سیال، میرا شده و نیروی حاصل از آن روی ستون به نزدیکی صفر می‌رسد.



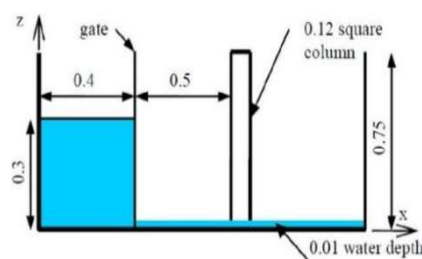
شکل ۲- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی [۳۱] نیرو، برای حالت لزجت واقعی سیال (جدول ۱)

### ۳- معبرسازی روش عددی

به منظور اعتبارسنجی روش عددی، یک آزمایش شکست سد سه بعدی شبیه سازی شده و نتایج حاصل از آن با نتایج آزمایشگاهی یه و پتروف [۳۱] مقایسه می‌شوند. این آزمایش در یک مخزن به طول ۱/۶ متر، عرض ۰/۶۱ متر و ارتفاع ۰/۷۵ متر انجام شد. دیگر جزئیات این آزمایش در شکل (۱) نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱- (الف) نمای از بالا و (ب) نمای از کنار آزمایش یه و پتروف [۳۲]

خلاصه‌ای از مدلسازی‌های انجام گرفته در مسئله شکست سد در جدول ۱ آورده شده است. در جدول ۲ نیز شماره-هایی برای حالت‌های مختلف الگوریتم شیفت که در جدول (۱) از آنها استفاده شده، بیان شده است. شبیه سازی‌ها با تعداد ۱۸۱۲۸۰ ذره و فاصله بین ذرات  $dp=0.0085$  (m) صورت گرفته‌اند.

جدول ۱- شرایط مدل‌سازی شکست سد با لزجت واقعی

نوع لزجت	ردیف	الگوریتم اصلاح
لزجت واقعی (لایه‌ای و آشفته)	۱	-
	۲	شیفت (۲)
	۳	دلتا
	۴	دلتا + شیفت (۲)
	۵	دلتا + شیفت (۱)
	۶	دلتا + شیفت (۳)

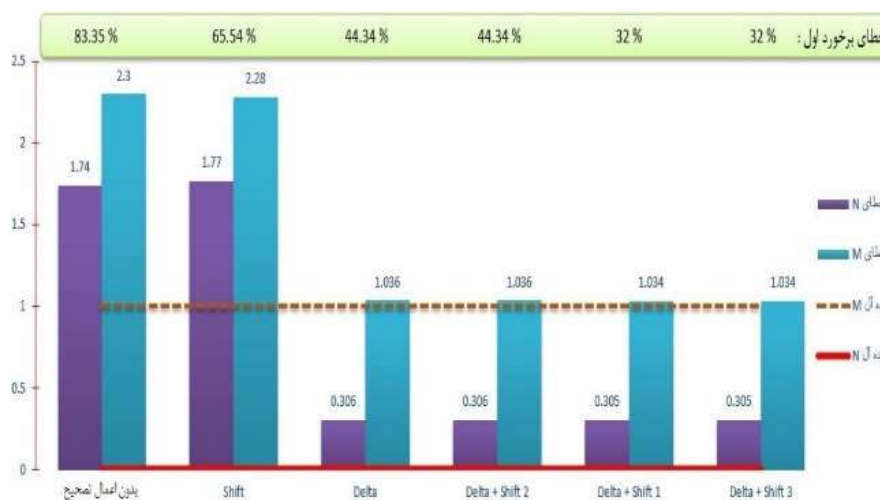
که عبارت‌های  $Val_i^{sim}$ ،  $Val_i^{exp}$  و  $ne$  به ترتیب بیانگر مقدار شبیه سازی، مقدار آزمایشگاهی و تعداد کل مقادیر است. به عنوان یک جمع بندی برای انتخاب مناسب‌ترین مدل عددی، می‌توان به شکل (۳) مراجعه کرد؛ جایی که برای حالت لزجت واقعی سیال، مقدار خطای روش‌های مختلف شبیه‌سازی نیرو از روابط  $M$  و  $N$  و همچنین مقدار خطای برخورد اول موج با مانع به صورت همزمان در آن مورد مقایسه قرار می‌گیرد. نتایج حاکی از آن است که در حالت لزجت واقعی (لزجت لایه‌ای با اغتشاش  $SPS$ )، الگوریتم دلتا به همراه الگوریتم شیفت (حالت ۱ یا ۳ الگوریتم شیفت) بایستی مورد استفاده قرار گیرد تا بتوان به دقیق‌ترین شبیه‌سازی عددی، دست پیدا کرد.

### ۳-۲- بررسی خطا

برای محاسبه خطای هر شبیه‌سازی از روابط  $M$  و  $N$  استفاده شده و حالت ایده‌آل زمانی رخ می‌دهد که  $N \rightarrow 0$  و  $M \rightarrow 1$  برقرار شود. نتایج بررسی خطا نیز در جدول ۳ آورده شده است.

$$N = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{ne} (Val_i^{sim} - Val_i^{exp})^2}{\sum_{i=1}^{ne} (Val_i^{exp})^2}} \quad (19)$$

$$M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{ne} (Val_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^{ne} (Val_i^{exp})^2}} \quad (20)$$



شکل ۳- خطای برخورد اول،  $M$  و  $N$  با حالت‌های جدول ۱

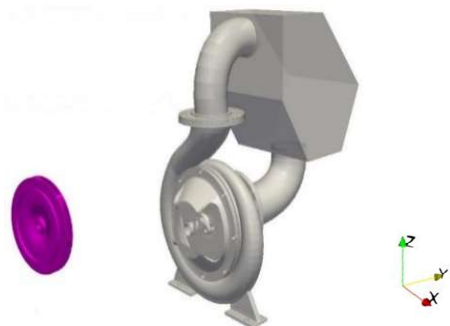
شده‌اند. با توجه به نمودارها، تمامی نمودارهای حل عددی تا مدت زمان بسیار کوتاهی مقدار صفر را نشان می‌دهند که بیانگر این است که جریان سیال، هنوز به نقطه مورد نظر برای اندازه‌گیری نرسیده است. پس از افزایش ناگهانی سرعت، سرعت سیال در این نقطه رفته رفته کاهش پیدا کرده تا اینکه با منعکس شدن موج سیال از دیواره انتهایی، جهت مؤلفه افقی سرعت در این نقطه هم عوض شده و در انتهای زمان حل نیز بر اثر میرا شدن جریان سیال، به نزدیکی صفر میل می‌کند. همان‌طور که از نمودارها مشخص است، حالت ۵ جدول ۱ توانسته است به خوبی سرعت سیال را نیز مدلسازی کند (همانند مدلسازی دقیق نیرو) و نتایج عددی با داده‌های آزمایشگاهی تطابق بسیار خوبی دارد.

جدول ۳- خطای شبیه‌سازی نیرو، حالت‌های ۱ تا ۶ جدول ۱

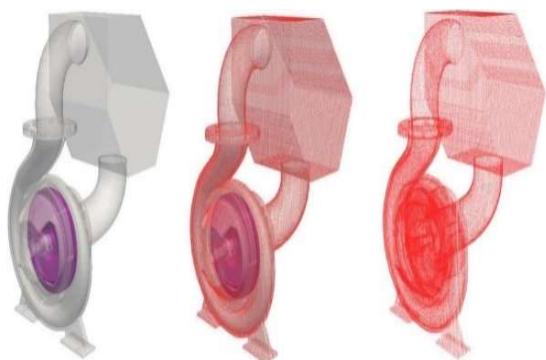
شبه سازی	خطا از $N$	خطا از $M$
۱	۱/۷۴	۲/۳۰
۲	۱/۷۷	۲/۲۸
۳	۰/۳۰۶	۱/۰۳۶
۴	۰/۳۰۶	۱/۰۳۶
۵	۰/۳۰۵	۱/۰۳۴
۶	۰/۳۰۵	۱/۰۳۴

### ۳-۳- اعتبارسنجی سرعت

با استفاده از روش‌های تشریح شده در جدول ۱، مؤلفه افقی سرعت جریان در نقطه‌ای با مختصات طول ۰/۷۵۴ متر، عرض ۰/۳۱ متر و ارتفاع ۰/۰۲۶ متر (شکل ۱) محاسبه شده و در شکل (۴) با نتایج آزمایشگاهی [۳۱] مقایسه



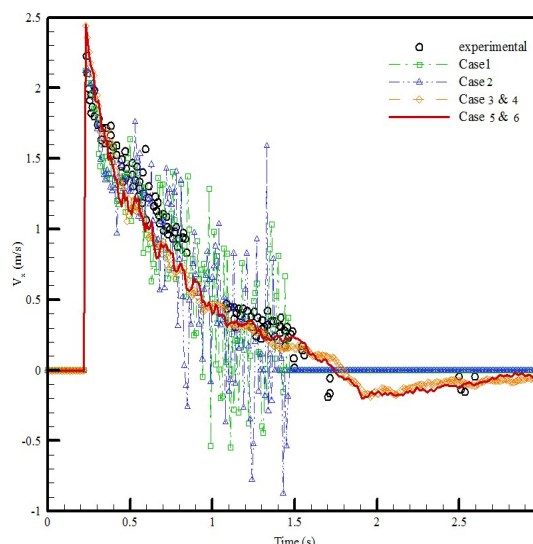
شکل ۵- نمایی از قسمت ثابت و چرخان پمپ گریز از مرکز



شکل ۶- فرآیند تبدیل هندسه پمپ به ذرات

شکل (۷-الف) شرایط اولیه مسئله در زمان صفر ثانیه را نشان داده است. نحوه چرخش پروانه پمپ نیز به این صورت است که تا نیم ثانیه هیچ حرکتی ندارد که در شکل (۷-ب)، وضعیت مسئله در نیم ثانیه نشان داده شده است. بعد از آن و به مدت دو ثانیه، حرکتی شتابدار را شروع کرده که نمایی از حل در پایان این مدت یعنی  $2/5$  ثانیه در شکل (۷-ج) نمایش داده شده است. از لحظه  $2/5$  ثانیه تا  $6$  ثانیه هم با سرعت دورانی ثابت چرخش می‌کند. شکل (۷-د) نیز وضعیت نهایی مسئله در زمان پایان مدل‌سازی یعنی  $6$  ثانیه را نمایش داده است. سطح مقطع جریان سیال در فلنج‌های ورودی و خروجی پمپ نیز به ترتیب سطح مقطع ورودی و خروجی سیال برای اندازه‌گیری سرعت و فشار در نظر گرفته شده‌اند.

در شکل‌های (۸ و ۹)، اثر تعداد ذرات روی مقادیر فشار در سطح مقطع‌های ورودی و خروجی پمپ بررسی شده است. فاصله بین ذرات  $10$ ،  $7/5$ ،  $5$ ،  $4$ ،  $3$  و  $2/8$  میلی‌متر لحاظ شده‌اند که به ترتیب تعداد  $83061$ ،  $181347$ ،  $537789$ ،  $1009607$  و  $2244811$  و  $2750966$  ذره را مدل‌سازی کرده‌اند. با توجه به این شکل‌ها، با کاهش فاصله بین ذرات از  $3$  میلی‌متر به  $2/8$  میلی‌متر، تعداد ذرات متناظر از

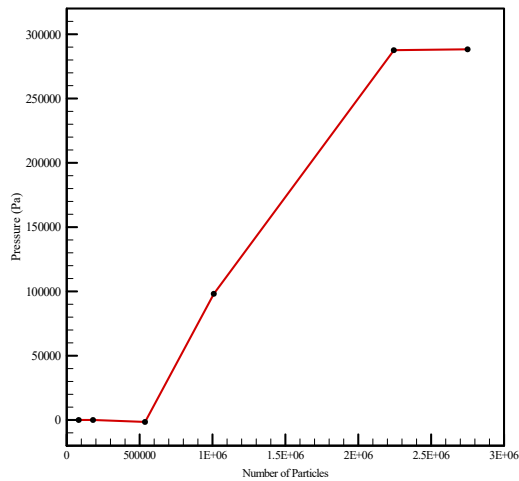


شکل ۴- مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی [۳۱] سرعت برای حالت لزجت واقعی سیال (جدول ۱)

#### ۴- شبیه‌سازی پمپ گریز از مرکز

در این قسمت به شبیه‌سازی عددی یک پمپ گریز از مرکز پرداخته شده است. با توجه به نتایج اعتبارسنجی نیرو و سرعت، از حالت ۵ جدول ۱ برای شبیه‌سازی عددی پمپ استفاده شده است. برای این هدف، از هندسه پمپ پیشنهادی خود نرم افزار استفاده شده است. این هندسه شامل یک قسمت ثابت (مخزن آب، لوله و اتصالات و پوشش ثابت پمپ) و یک قسمت متحرک (پروانه پمپ) می‌باشد که توسط نرم افزارهای کامپیوتری طراحی شده‌اند و به قسمت پیش پردازش کد دوئال اس فیزیکس وارد می‌شوند. قسمت ثابت پمپ مجموعاً دارای ابعادی برابر با  $0/55$  متر طول،  $0/79$  متر عرض و  $0/94$  متر ارتفاع است. همچنین قسمت متحرک پمپ یا همان پروانه پمپ نیز از نوع پروانه بسته بوده و دارای تعداد ۷ پره و قطر خارجی  $0/319$  متر می‌باشد. قطر ورودی پمپ و خروجی از انتهای حلزونی نیز به ترتیب  $0/15$  متر و  $0/125$  متر اندازه‌گیری شده‌اند. در شکل (۵)، نمایی از قسمت ثابت و متحرک پمپ نمایش داده شده است. پس از وارد شدن هندسه قسمت ثابت و چرخان پمپ گریز از مرکز به کد دوئال اس فیزیکس، این هندسه‌ها توسط قسمت پیش پردازش این کد به ذرات تبدیل می‌شوند. در شکل (۶) نیز فرآیند تبدیل هندسه پمپ گریز از مرکز به ذرات، جهت شبیه‌سازی عددی قابل مشاهده می‌باشد. صحنه‌هایی از شبیه‌سازی عددی این پمپ در شکل (۷) ارائه شده است.





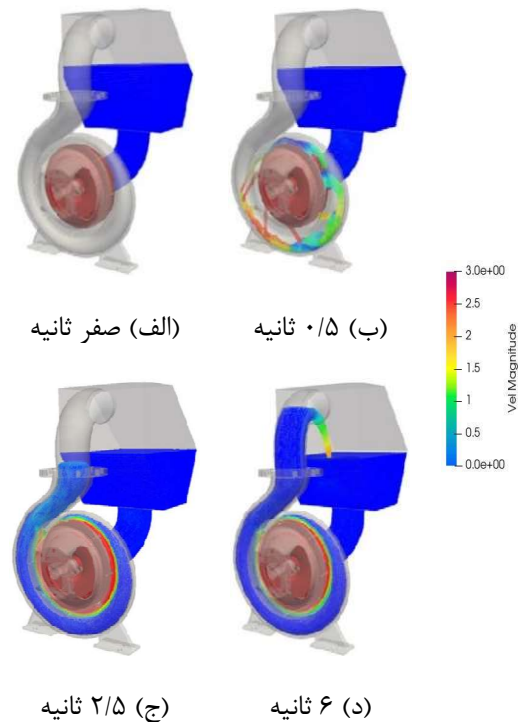
شکل ۹- فشار محاسبه شده در سطح مقطع خروجی پمپ به ازای تعداد ذرات مختلف

جدول ۴- جزئیات شبیه‌سازی پمپ گریز از مرکز

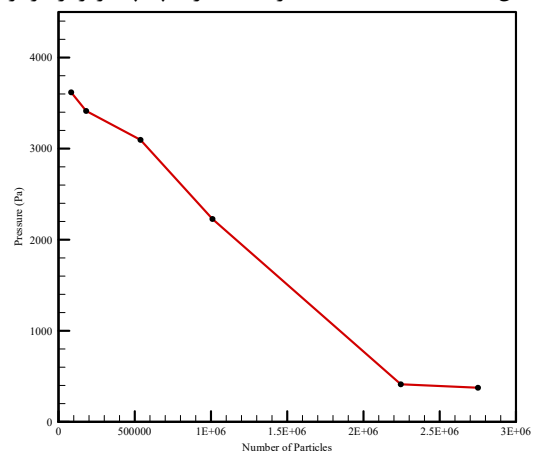
مقدار	مشخصه
۳	فاصله بین ذرات (میلی‌متر)
۲۲۴۴۸۱۱	تعداد ذرات
سه بعدی	دامنه محاسباتی مسئله
۶	زمان فیزیکی مسئله (ثانیه)
۰/۲	عدد CFL
۱۴۵۰ (rpm) ۳۱۹ (mm)	سرعت دورانی و قطر خارجی پروانه

در شکل (۱۰) و شکل (۱۱) نیز به ترتیب، تغییرات فشار در سطح مقطع ورودی و خروجی پمپ در طول زمان شبیه‌سازی و به ازای فاصله بین ذرات مختلف به نمایش درآمده است. همان‌طور که در شکل (۱۰) نیز مشخص است، با کاهش فاصله بین ذرات و به تبع آن افزایش تعداد ذرات، نوسانات نمودار تغییرات فشار در سطح مقطع ورودی پمپ در طول مدت زمان شبیه‌سازی رو به کاهش بوده است. همچنین شکل (۱۱) بیان کرده است که فاصله بین ذرات ۱۰، ۷/۵ و ۵ میلی‌متر نتوانسته‌اند پیوستگی بین ذرات سیال را حفظ کرده و فشار در سطح مقطع خروجی پمپ را مدلسازی کنند. با کاهش فاصله بین ذرات و به تبع آن افزایش تعداد ذرات، نوسانات نمودار تغییرات فشار در سطح مقطع خروجی پمپ نیز در طول مدت زمان شبیه‌سازی کاهش یافته است. همچنین محاسبه فشار سیال در سطح مقطع خروجی پمپ به ازای فاصله بین ذرات ۲/۸ و ۳ میلی‌متر در مقایسه با فاصله بین ذرات ۴ میلی‌متر، زودتر

۲۲۴۴۸۱۱ به ۲۷۵۰۹۶۶ ذره افزایش می‌یابد اما فشار در سطح مقطع‌های ورودی و خروجی پمپ به ازای این دو تعداد ذره بسیار نزدیک به هم هستند که به ترتیب در شکل (۸) و شکل (۹) نمایش داده شده‌اند. پس فاصله بین ذرات ۳ میلی‌متر، انتخاب شده است که تعداد ۲۲۴۴۸۱۱ ذره را مدلسازی می‌کند. این تعداد ذره شامل ۳۹۶۶۰۴ ذره مرزی ثابت، ۵۱۰۰۱ ذره مرزی متحرک (پروانه پمپ) و ۱۷۹۷۲۰۶ ذره سیال بوده است. خلاصه‌ای از مشخصات شبیه‌سازی پمپ گریز از مرکز نیز در جدول ۴ آورده شده است.



شکل ۷- صحنه‌های مختلف از شبیه‌سازی پمپ گریز از مرکز



شکل ۸- فشار محاسبه شده در سطح مقطع ورودی پمپ به ازای تعداد ذرات مختلف

که در آن  $H_p$  هد پمپ،  $\bar{V}$  سرعت متوسط در سطح مقطع مورد نظر،  $Z$  ارتفاع هیدرواستاتیکی و زیرنویس‌های  $e$  و  $i$  نیز به ترتیب بیانگر مقادیر متناظر با سطح مقطع خروجی (تخلیه) و سطح مقطع ورودی (مکش) پمپ هستند. با جایگذاری مقادیر مورد نیاز از خروجی‌های حاصل از شبیه‌سازی عددی، مقدار هد تولیدی پمپ به ازای این دبی جریان، سرعت دورانی پروانه و سایر مشخصات مذکور، برابر با  $29/755$  متر به دست آمده است. همچنین برای یافتن توان تولیدی، توان مصرفی و بازده پمپ نیز از روابط زیر بهره گرفته شده است [۳۳]:

$$\dot{W}_h = \rho g Q H_p \quad (22)$$

$$\dot{W}_m = \omega T_{shaft} \quad (23)$$

$$\eta_p = \frac{\dot{W}_h}{\dot{W}_m} \quad (24)$$

طوری که  $\dot{W}_h$  توان تولیدی یا توان هیدرولیکی پمپ،  $Q$  دبی جریان،  $\dot{W}_m$  توان مصرفی یا توان ورودی به پمپ،  $\omega$  سرعت دورانی پروانه پمپ،  $T_{shaft}$  گشتاور داده شده به پمپ و  $\eta_p$  نیز بازده پمپ هستند. با استفاده از مقادیر هد پمپ و دبی جریان که پیش از این به دست آمده‌اند، مقدار توان تولیدی پمپ برابر با  $11/597$  کیلووات محاسبه شده است. همچنین برای یافتن توان مصرفی از رابطه زیر استفاده شده است [۳۳]:

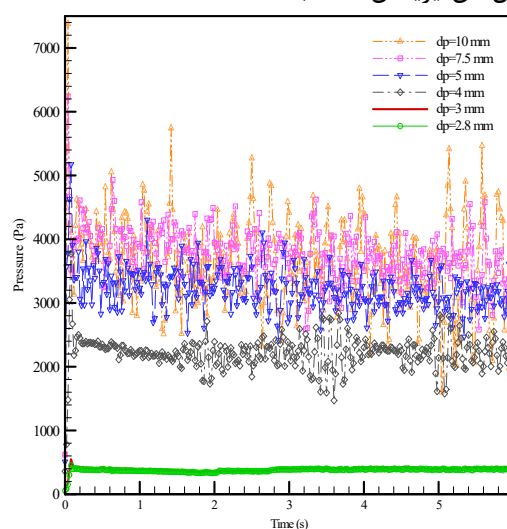
$$\dot{W}_m = (U_2 V_{t_2} - U_1 V_{t_1}) \dot{m} \quad (25)$$

که در آن  $\dot{m} = \rho Q$  دبی جرمی جریان با واحد کیلوگرم بر ثانیه و زیرنویس‌های 1 و 2 نیز به ترتیب بیانگر مقادیر متناظر با ورودی و خروجی پروانه پمپ می‌باشند. همچنین  $U = r\omega$  بیانگر سرعت مماسی چرخ دوار در شعاع  $r$  و  $V_t$  نیز مؤلفه مماسی سرعت مطلق سیال هستند. اگر جریان ورودی به پروانه بدون چرخش باشد، سرعت مطلق سیال کاملاً شعاعی است و با این فرض،  $V_{t_1}$  صفر خواهد بود. برای  $V_{t_2}$  نیز خواهیم داشت [۳۳]:

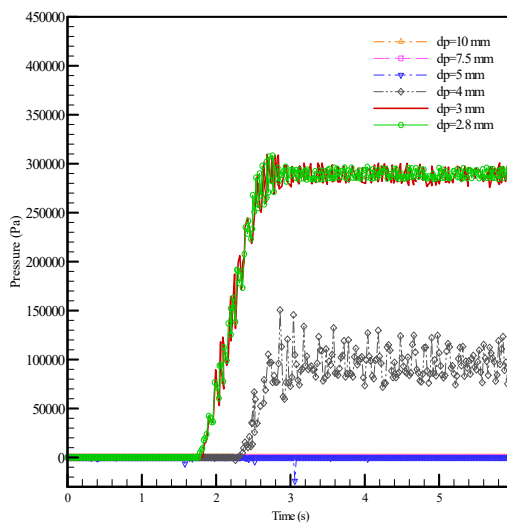
$$V_{t_2} = U_2 - \frac{Q \cot \beta_2}{\pi d_2 b} \quad (26)$$

به این صورت که  $b = 0.019$  m ضخامت یا عرض پروانه،  $d_2 = 0.319$  m قطر خارجی پروانه و  $\beta_2 = 22$  نیز زاویه بین پره و مماس بر سطح پروانه در خروجی آن (بر حسب درجه) است. در شکل (۱۲) نیز جزئیات نماد

و با مقداری بیشتر انجام شده است. حال با جایگذاری مقادیر به دست آمده از شبیه‌سازی عددی پمپ در روابط مربوطه، هد تولیدی پمپ، توان تولیدی، توان مصرفی و بازده آن به دست می‌آیند. مقدار دبی جریان در شبیه‌سازی عددی نیز به ازای مشخصات گفته شده برای مسئله، برابر با  $143/03$  مترمکعب بر ساعت توسط کد دوئال اس‌فیزیکس محاسبه شده است.



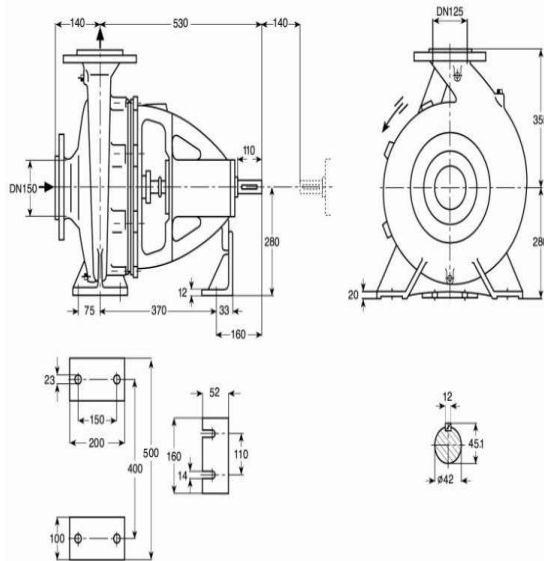
شکل ۱۰- تغییرات فشار در سطح مقطع ورودی پمپ در طول مدت زمان شبیه‌سازی



شکل ۱۱- تغییرات فشار در سطح مقطع خروجی پمپ در طول مدت زمان شبیه‌سازی

هد تولیدی پمپ به صورت زیر محاسبه شده است [۳۳]:

$$H_p = \left( \frac{P}{\rho g} + \frac{\bar{V}^2}{2g} + z \right)_e - \left( \frac{P}{\rho g} + \frac{\bar{V}^2}{2g} + z \right)_i \quad (21)$$



شکل ۱۳- هندسه پمپ EN 125-315 پمپیران [۳۴]

جدول ۵- مقایسه نتایج عددی با مقادیر آزمایشگاهی [۳۴]  
پمپ به ازای دبی مشخص

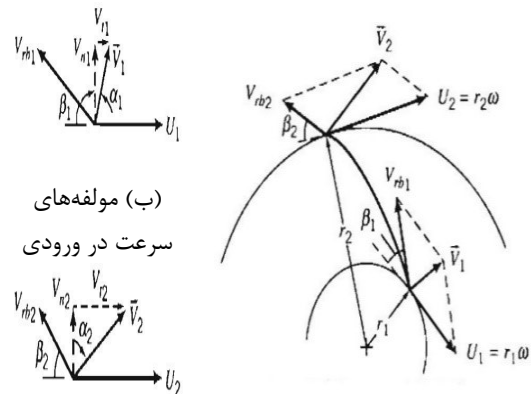
خطا از رابطه (۱۹) (درصد)	مقدار حاصل از		مورد مقایسه
	منحنی‌های عملکردی	شبیه‌سازی عددی	
۱۲/۱۳	۳۳/۸۶۵	۲۹/۷۵۵	هد پمپ ( <i>m</i> )
۵/۵۶	۱۷/۳۷	۱۸/۳۳۵	توان مصرفی ( <i>kW</i> )
۱۶/۰۶	۷۵/۳۵	۶۳/۲۵	بازده (%)

همانطور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، مقدار هد پمپ با تمامی شرایط و فرضیات بیان شده، توسط کد دوئال اس‌فیزیکس و با استفاده از لزجت واقعی سیال در مقایسه با مقدار آزمایشگاهی مربوطه، ۱۲/۱۳ درصد کمتر شبیه سازی شده است. با توجه به اینکه در روند به دست آوردن توان مصرفی، جریان سیال در ورودی به پروانه پمپ کاملاً شعاعی در نظر گرفته شده و فرض بر صفر بودن  $V_{t1}$  گذاشته شد، انتظار می‌رفت که مقدار توان مصرفی در این حالت نسبت به مقدار متناظر آزمایشگاهی خود، بیشتر تخمین زده شده باشد. این موضوع از رابطه (۲۵) نیز برداشت می‌شود.

گذاری‌ها و مثلث‌های سرعت در ورودی و خروجی پروانه پمپ نمایش داده شده است. نهایتاً توان مصرفی پمپ از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳۳]:

$$\dot{W}_m = \dot{m}U_2 \left[ U_2 - \frac{Q \cot \beta_2}{\pi d_2 b} \right] \quad (27)$$

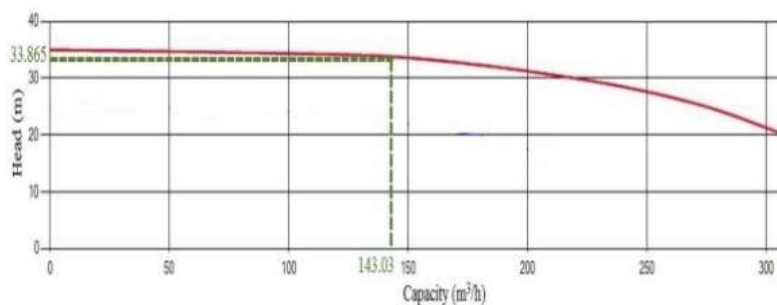
با جایگذاری موارد ذکر شده در رابطه (۲۷)، مقدار توان ورودی به پمپ یا همان توان مصرفی پمپ برابر با ۱۸/۳۳۵ کیلووات محاسبه می‌شود. همچنین با استفاده از رابطه (۲۴) و جایگذاری مقادیر مربوط به توان تولیدی و مصرفی، مقدار بازده پمپ نیز برابر با ۶۳/۲۵ درصد به دست آمده است. برای اطمینان بیشتر از صحت خروجی‌های عددی به دست آمده از شبیه‌سازی، این نتایج با نمودارهای عملکردی پمپ EN 125-315 شرکت پمپیران موجود در وبسایت این شرکت [۳۴]، با قطر پروانه ۳۱۹ میلی‌متر، سرعت دورانی ۱۴۵۰ دور بر دقیقه و به ازای دبی جریان ۱۴۳/۰۳ متر مکعب بر ساعت، مقایسه شده‌اند. هندسه این پمپ در شکل (۱۳) به نمایش در آمده است که پروانه آن از لحاظ هندسی شباهت فراوانی با پمپ مورد استفاده در شبیه سازی عددی دارد. نمودارهای عملکردی موجود در کاتالوگ این نوع پمپ به همراه مقادیر هر کدام به ازای دبی مورد نظر، در شکل (۱۴) مشخص شده است. خطای حاصل از مقایسه نتایج شبیه سازی عددی با مقادیر موجود در منحنی‌های عملکردی نیز با استفاده از رابطه (۱۹) در جدول ۵ آورده شده است.



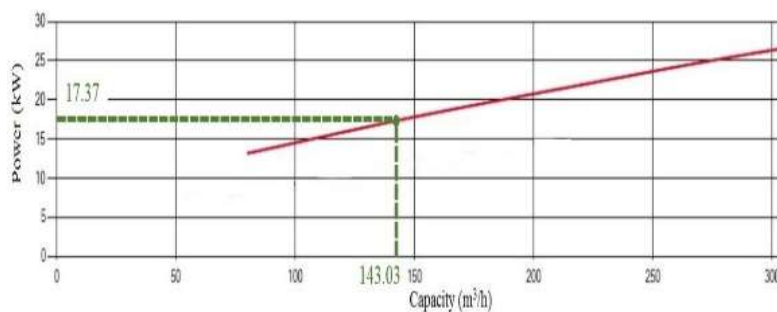
(ب) مولفه‌های  
سرعت در ورودی

(ج) مولفه‌های  
سرعت در خروجی

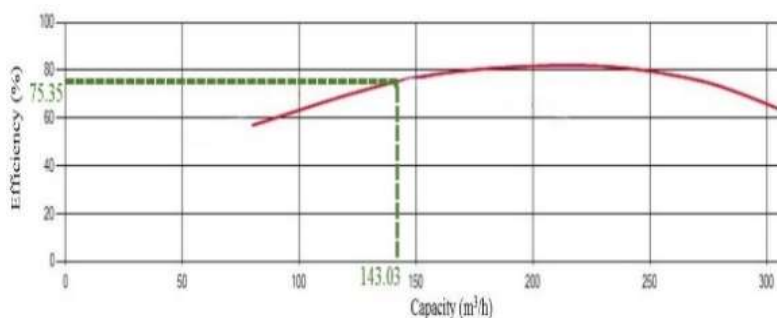
(الف) سرعت مطلق سیال به صورت  
مجموع سرعت نسبت به پره و روتور  
شکل ۱۲- نمادگذاری سرعت در پروانه پمپ [۳۳]



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۴- منحنی‌های عملکردی پمپ *EN 125-315* پمپیران [۳۴] شامل (الف) منحنی هد - دبی، (ب) منحنی توان - دبی و (ج) منحنی بازده - دبی

علاوه بر خطای محاسباتی خود روش عددی *SPH* در گسسته‌سازی معادلات، مقداردهی به پارامترهای هر ذره بر حسب تابع کرنل و انجام پردازش روی داده‌ها، عواملی همچون اندازه‌گیری پارامترهای هندسی، تقریب‌زدن اعشار و در نظر گرفتن فرضیات جهت ساده‌سازی مسائل نیز موجب افزایش خطا شده‌اند. همچنین ذکر این مسئله ضروری است که معادلات مورد استفاده برای محاسبه هد و توان از نوع دو بعدی بوده که برای یک مسئله سه بعدی به کار گرفته شده است. همچنین پمپ مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی دارای جریانی گذرا و گردشی بوده که با پمپی با جریان پایا و شرایط مرزی متفاوت اعتبار سنجی شده است. همگی این تقریب‌ها و فرضیات نیز موجب افزایش خطای

جدول ۵ نیز بیان کرده است که مقدار توان مصرفی حاصل از شبیه‌سازی عددی در مقایسه با داده آزمایشگاهی متناظر خود، ۵/۵۶ درصد بیشتر محاسبه شده که این موضوع را تصدیق کرده است. با توجه به رابطه (۲۴) و موارد بیان شده، صورت این رابطه در شبیه‌سازی عددی کمتر تخمین زده شده و مخرج آن نیز بیشتر محاسبه شده است. پس انتظار می‌رود که مقدار بازده به دست آمده از شبیه‌سازی عددی در مقایسه با بازده موجود در منحنی عملکردی مربوطه، خطای بیشتری نسبت به دو مورد قبل داشته باشد. جدول ۵ نشان داد که بازده حاصل از نتایج عددی، ۱۶/۰۶ درصد کمتر از مقدار متناظر آزمایشگاهی خود محاسبه شده است.

$h$	طول هموارساز ( $m$ )	مدلسازی عددی شده‌اند. با توجه به مطالب ذکر شده می-توان عنوان کرد که مقایسه بین نتایج عددی و تجربی پمپ فقط از لحاظ شباهت هندسی پروانه پمپ و به منظور اطمینان نسبی از صحت نتایج، انجام شده است.
$H_p$	هد پمپ ( $m$ )	
$\dot{m}$	دبی جرمی جریان ( $\frac{kg}{s}$ )	
$m_b$	جرم ذره ( $kg$ ) $b$	<b>۵- نتیجه گیری</b>
$p_b$	فشار ذره ( $pa$ ) $b$	در این مقاله و در ابتدا با شبیه سازی عددی آزمایش شکست سد یه و پتروف، به اعتبارسنجی روش عددی با اعمال لزجت واقعی سیال پرداخته شد. برای رفع مشکل نوسانات میدان فشار (نیرو) و سرعت از الگوریتم دلتا و برای جلوگیری از ایجاد اختلال در آنها از الگوریتم شیفیت بهره گرفته شده است. نهایتاً از مدل عددی بهینه (استفاده همزمان از الگوریتم دلتا و شیفیت)، در حضور لزجت واقعی سیال جهت شبیه سازی جریان سیال درون یک پمپ گریز از مرکز استفاده شد. خروجی های این شبیه سازی شامل هد، توان مصرفی و بازده پمپ نیز با نمودارهای عملکردی پمپ EN 125-315 شرکت پمپیران در شرایطی نسبتاً مشابه، مقایسه شدند. نتایج این مقایسه نشان دادند که مقدار هد پمپ نسبت به مقدار آزمایشگاهی مربوطه، ۱۲/۱۳ درصد کمتر محاسبه شده است. همچنین شبیه سازی عددی مقادیر توان مصرفی و بازده پمپ نیز در مقایسه با داده های آزمایشگاهی مربوطه، به ترتیب با ۵/۵۶ و ۱۶/۰۶ درصد خطا همراه بوده‌اند.
$\dot{W}_h$	توان هیدرولیکی پمپ ( $kW$ )	
$\dot{W}_m$	توان مصرفی یا توان ورودی به پمپ ( $kW$ )	
$\beta_2$	زاویه بین پره و سطح پروانه در خروجی	
$\Gamma$	ترم دیفیوژن در معادله مومنتوم	
$\gamma$	گاما - ثابت پلی تروپیک در معادله حالت	
$\Delta l$	فاصله ذره تا ذره ( $m$ )	
$\Delta t$	گام زمانی متغیر ( $s$ )	
$\nabla \cdot r$	واگرایی ذرات	
$\delta_{ij}$	دلتای کرونیکر	
$\delta \phi$	ضریب الگوریتم دلتا	
$\delta r_s$	فاصله انتقال ذرات	
$\eta_p$	بازده پمپ (%)	
$u_0$	لزجت سینماتیکی ( $m^2/s$ )	<b>۶- فهرست علائم</b>
$u_t$	لزجت گردابی آشفته	$A$ ثابت بی بعد الگوریتم شیفیت
$\rho_b$	چگالی ذره ( $\frac{kg}{m^3}$ ) $b$	$A_{FSC}$ ضریب تصحیح سطح آزاد
$\tau$	تانسور تنش SPS	$A_{FSM}$ حداکثر مقدار واگرایی ذرات
$\omega$	سرعت دورانی پروانه پمپ ( $rad/s$ )	$A_{FST}$ آستانه سطح آزاد
		$b$ ضخامت یا عرض پروانه ( $m$ )
		$c_0$ سرعت صوت به ازای چگالی مرجع ( $m/s$ )
		$C_s$ ثابت اسماگورینسکی
		$d_2$ قطر خارجی پروانه ( $m$ )
		$D_F$ ضریب انتشار
		$dp$ فاصله اولیه بین ذرات ( $m$ )
		$ f_a $ نیرو در واحد جرم برای ذره $a$
		$g$ شتاب گرانشی ( $m/s^2$ )

## مراجع

- [۱] محمد شریفی اصل، داود طغرایبی و احمدرضا عظیمیان، «شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت جابه‌جایی در جریان مغشوش غیرنیوتنی نانوسیال در یک لوله افقی مدور»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۳، ۱۳۹۷، صفحه ۱۲۰-۱۱۳.
- [۲] محمدمحسن شاه مردان، محمود نوروزی و امین شهبانی ظهیری نسایی، «بررسی عددی تأثیر گردابه‌ها بر روی افت فشار و تلفات جریان در داخل کانال با انبساط تدریجی صفحه‌ای»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۴۸، ۱۳۹۶، صفحه ۶۰-۴۵.
- [۳] قربان مهتابی، میترا ملازاده و فرزین سلماسی، «کاربرد شبیه‌سازی عددی در تعیین موقعیت و ابعاد سوراخ آب (Hole Weep) کانال بتنی تحت ترازهای مختلف آب‌زیرزمینی»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۵، ۱۳۹۷، صفحه ۲۷۸-۲۶۷.
- [۴] داود طغرایبی سمیرمی و شیرین میرفروغی، «بررسی عددی انتقال حرارت آمیخته نانوسیال با خواص متغیر داخل حفره مستطیلی کم‌عمق با درپوش متحرک»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۵، ۱۳۹۷، صفحه ۳۷۷-۳۵۰.
- [5] R. L. Dauherty, "A Further Investigation of Performance of Centrifugal Pumps When Pumping Oils" Bulletin, vol. 130, 1926.
- [6] A. Stepanoff, "Pumping Viscous Oils with Centrifugal Pumps" Oil and Gas Journal, vol. 4, 1940, pp. 123-126.
- [7] N. Tetlow, "A Survey of Modern Centrifugal Pump Practice for Oilfield and Oil Refinery Services" Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, vol. 150, no. 1, 1943, pp. 121-134.
- [8] A. T. Ippen, "The influence of viscosity on centrifugal pump performance", Trans. ASME, Vol. 68 (1946), 1946, pp. 823-848.
- [۹] امجد احسنی/دکتر حسن کریمی، مدل‌سازی منحنی‌های مشخصه یک پمپ گریز از مرکز دور بالا با استفاده از روش‌های عددی، پایان‌نامه مقطع کارشناسی ارشد رشته مهندسی هوافضا (آیرودینامیک)، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۹۰.
- [10] M. B. Eghghahi and M. Vajdi, "Numerical and Experimental Study of splitter blades effect on the centrifugal pump performance" Modares Mechanical Engineering, vol. 15, no. 3, (In Persian), 2015, pp. 398-410.
- [11] S. Huang, Y. Wei, C. Guo, and W. Kang, "Numerical Simulation and Performance Prediction of Centrifugal Pump's Full Flow Field Based on OpenFOAM" Processes, vol. 7, no. 9, 2019, p. 605.
- [12] L. B. Lucy, "A numerical approach to the testing of the fission hypothesis" The astronomical journal, vol. 82, 1977, pp. 1013-1024.
- [13] R. A. Gingold and J. J. Monaghan, "Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars" Monthly notices of the royal astronomical society, vol. 181, no. 3, 1977, pp. 375-389.
- [14] J. J. Monaghan, "Simulating free surface flows with SPH" Journal of computational physics, vol. 110, no. 2, 1994, pp. 399-406.
- [۱۵] یاسر جعفری، «روش شبیه‌سازی هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) و کاربردهای آن در هوافضا»، مجله فناوری در مهندسی هوافضا، سال اول، شماره ۲، پاییز ۱۳۹۶، صفحه ۱۵-۱.
- [16] H. Habibi, "Numerical simulation of blood flow in centrifugal heart pump by utilizing meshless smoothed particles hydrodynamic method" International Journal of Bio-Science and Bio-Technology, vol. 7, no. 3, 2015, pp. 73-82.
- [17] G. Peng, G. Zhou, S. Fu, J. Ma, X. Huang, and Q. Zhu, "Preliminary study on internal flow simulation of centrifugal dredge pump by SPH algorithm" in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 163, no. 1: IOP Publishing, 2018, p. 012118.
- [18] A. J. Crespo et al., "DualSPHysics: Open-source parallel CFD solver based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)" Computer Physics Communications, vol. 187, 2015, pp. 204-216.
- [19] J. J. Monaghan and J. C. Lattanzio, "A refined particle method for astrophysical problems" Astronomy and astrophysics, vol. 149, 1985, pp. 135-143.
- [20] H. Gotoh, S. Shao, and T. Memita, "SPH-LES model for numerical investigation of wave interaction with partially immersed breakwater" Coastal Engineering Journal, vol. 46, no. 1, 2004, pp. 39-63.
- [21] R. A. Dalrymple and B. Rogers, "Numerical modeling of water waves with the SPH method" Coastal engineering, vol. 53, no. 2-3, 2006, pp. 141-147.

- [22] J. J. Monaghan, R. A. Cas, A. Kos, and M. Hallworth, "Gravity currents descending a ramp in a stratified tank" *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 379, 1999, pp. 39-69.
- [23] G. Batchelor, "Introduction to Fluid Dynamics", Cam. Univ. Press, Cambridge, UK, 1974.
- [24] L. Verlet, "Computer experiments on classical fluids. I. Thermodynamical properties of Lennard-Jones molecules" *Physical review*, vol. 159, no. 1, 1967, p. 98.
- [25] A. J. Crespo, M. Gómez-Gesteira, and R. A. Dalrymple, "Boundary conditions generated by dynamic particles in SPH methods" *Computers, materials and continua*, vol. 5, no. 3, 2007, pp. 173-184.
- [26] D. Molteni and A. Colagrossi, "A simple procedure to improve the pressure evaluation in hydrodynamic context using the SPH" *Computer Physics Communications*, vol. 180, no. 6, 2009, pp. 861-872.
- [27] S. J. Lind, R. Xu, P. K. Stansby, and B. D. Rogers, "Incompressible smoothed particle hydrodynamics for free-surface flows: A generalised diffusion-based algorithm for stability and validations for impulsive flows and propagating waves" *Journal of Computational Physics*, vol. 231, no. 4, 2012, pp. 1499-1523.
- [28] A. Skillen, S. Lind, P. K. Stansby, and B. D. Rogers, "Incompressible smoothed particle hydrodynamics (SPH) with reduced temporal noise and generalised Fickian smoothing applied to body-water slam and efficient wave-body interaction" *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 265, 2013, pp. 163-173.
- [29] E.-S. Lee, C. Moulinec, R. Xu, D. Violeau, D. Laurence, and P. Stansby, "Comparisons of weakly compressible and truly incompressible algorithms for the SPH mesh free particle method" *Journal of computational Physics*, vol. 227, no. 18, 2008, pp. 8417-8436.
- [30] A. Mokos, "Multi-phase modelling of violent hydrodynamics using smoothed particle hydrodynamics (SPH) on graphics processing units (GPUs)": Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the Faculty of Engineering and Physical Sciences, The University of Manchester (United Kingdom), 2014.
- [31] P. E. Raad and R. Bidoae, "The three-dimensional Eulerian-Lagrangian marker and micro cell method for the simulation of free surface flows" *Journal of Computational Physics*, vol. 203, no. 2, 2005, pp. 668-699.
- [32] T. B. Silvester and P. W. Cleary, "Wave-structure interaction using smoothed particle hydrodynamics" a a, vol. 2, 2006, p. 2.
- [33] R. W. Fox, A. T. McDonald, and P. J. Pritchard, "Introduction to fluid mechanics", John Wiley & Sons, sixth edition, 2004.
- [34] Pumpiran, "EN 125-315 pump performance curve", [http://pumpselect.ir/chart\\_en.aspx?name=EN%20125-315&flag\\_nafti=false](http://pumpselect.ir/chart_en.aspx?name=EN%20125-315&flag_nafti=false)