

Investigation of wall effect simulation methods in saline density currents

Somayyeh Mohammadiyan Lanbaran¹ , Afshin Eghbalzadeh^{2✉}

1.Civil Engineering Dept., Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: water.civil2011@gmail.com

2.Corresponding Author, Civil Engineering Dept., Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: afeghbal@razi.ac.ir.

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received

Received in revised form

Accepted

Available online

Keywords:

Density current,
Numerical simulation,
Fluent software,
Wall functions

ABSTRACT

Density currents induced by salinity gradients are of significant importance in estuarine environments, lakes, and dam reservoirs. This study numerically investigates such flows using Fluent software. The effects of near-wall modeling approaches, including standard and non-equilibrium wall functions, as well as the enhanced near wall treatment, on flow simulation accuracy were evaluated. The results demonstrated that all three methods were reasonably capable of simulating the velocity and density distributions; however, their performance varied across different sections and regions of the flow. The standard wall function approach yielded higher accuracy in regions adjacent to the wall, whereas the enhanced near wall treatment approach produced more accurate results at the interface between the density current and the ambient fluid. Regarding the density distribution, although no major discrepancies were observed among the different methods, the enhanced near wall treatment approach provided slightly better results compared to the other two. Overall, based on the obtained results, it can be recommended that when using coarser computational grids, the standard wall function approach is more appropriate. This recommendation is supported by the ability to position the first grid point at a dimensionless wall distance y^+ of approximately 11.225, eliminating the need for highly refined meshing near the wall. However, when finer grids are employed, the use of a modified near-wall treatment approach may be more suitable. This is because it requires placing the first computational node very close to the wall, such that the y^+ value is around 1, which allows for a more accurate resolution of the near-wall flow behavior.

Cite this article: Mohammadiyan Lanbaran, Somayyeh., & Eghbalzadeh, Afshin. (2025). Investigation of wall effect simulation methods in saline density currents. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 2(1),35-54.

DOI: 10.22126/amcen.2025.11903.1037



© The Author(s).

DOI: 10.22126/amcen.2025.11903.1037

Publisher: Razi University

Introduction

Density currents refer to flows driven by horizontal density differences between two fluids. Salinity-induced density currents specifically result from the presence of two fluids with differing salt concentrations and are commonly observed in a variety of natural and engineered environments, such as estuaries, rivers, dam reservoirs, and lakes.

Extensive laboratory research has been conducted on density currents. However, experimental studies are inherently limited by certain constraints for example, they are typically feasible only at small scales, and the measurement of transient flow characteristics is often challenging and costly. Numerical modeling offers a promising alternative to overcome these limitations. In previous studies, three numerical approaches have been employed to model turbulence in density currents: Direct Numerical Simulation, Large Eddy Simulation, and Reynolds-Averaged Navier–Stokes (RANS) equations. Density currents in real-world environments such as rivers and dam reservoirs typically exhibit high Reynolds numbers. As a result, applying DNS or LES at such large scales is nearly impractical due to their immense computational demands. Under these conditions, the use of RANS equations is more appropriate, as they allow for coarser computational grids and larger time steps, making simulations more computationally efficient.

When density currents propagate along solid boundaries, they are highly influenced by wall boundary conditions. Two strategies are commonly used to model near-wall effects. The first approach involves the use of wall functions, wherein the first computational node near the bed is positioned outside the viscous sublayer. These functions serve to bridge the turbulent flow region above the viscous sublayer with the wall-adjacent flow behavior within it. The second approach involves fully resolving the near-wall region. In this method, several computational nodes are placed within the viscous sublayer to capture the flow behavior in greater detail. While this approach offers increased accuracy near boundaries, it significantly increases computational cost.

Despite numerous studies conducted to date, uncertainties remain regarding the appropriate choice of near-wall models for simulating density currents. Most previous research has primarily focused on the general behavior of density currents and has not examined or compared the influence of different wall treatment methods on the accuracy of simulation results. Accordingly, the present study investigates the effect of various near-wall modeling approaches on the simulation of salinity-driven density currents using the Fluent software. The wall treatment methods considered include the standard wall function, non-equilibrium wall function, and enhanced near wall treatment. To evaluate the accuracy of the numerical results, the model outputs were compared with the experimental data.

Method

The governing equations employed in the Fluent software for simulating saline density currents consist of the Reynolds-averaged continuity and momentum equations (i.e., the

Navier–Stokes equations), along with an equation of state and a conservation equation for the mass fraction of the saline constituent. To model turbulence, the standard k – ε turbulence model was used, which had been modified to account for buoyancy effects. The computational domain included two vertical boundaries at the upstream and downstream ends, a free surface at the top, and a solid bed at the bottom. Symmetry boundary conditions were applied at the free surface, a pressure outlet condition was imposed at the outflow boundary, and a velocity inlet condition was used at the inflow boundary. To model the near-wall region, two general approaches were utilized: the wall function approach and the near-wall modeling approach. For the wall function method, both the standard wall function and the non-equilibrium wall function models available in Fluent were employed. For the near-wall modeling approach, the enhanced near wall treatment method, also available in Fluent, was used. To evaluate the accuracy of the simulation results, outputs from the numerical model were compared with the experimental data reported by Gerber et al.

Results

Following the presentation of longitudinal velocity and density profiles obtained using the standard wall function, non-equilibrium wall function, and enhanced wall treatment approaches for various mesh resolutions, the results were compared against the numerical and experimental data reported by Gerber et al.

Subsequently, the simulation results derived from the enhanced near wall treatment approach were compared with those from the standard and non-equilibrium wall function methods, based on the best-performing configurations of each approach. For this comparative analysis, the statistical error metrics of Mean Absolute Error (MAE) and Root Mean Square Error (RMSE) were utilized.

Regarding the varying performance of different approaches in simulating flow characteristics at different locations, it is noteworthy that the nature of the density current itself changes significantly along its length. Specifically, at the inlet, the flow exhibits lower height but higher velocity and density values, whereas in the downstream region and near the front of the current, the height increases while the velocity and density values decrease.

Conclusions

In the present study, a salinity-induced density current was simulated using the Fluent software. Comparison of the numerical results with experimental data confirmed the reliability of the model in simulating this type of flow. Subsequently, the effects of different near-wall treatment methods—including the standard wall function, the non-equilibrium wall function, and the enhanced near wall treatment on the simulation of the density current were investigated. Overall, all three methods reasonably reproduced the velocity and density profiles. However, it was not possible to definitively identify one single approach as the most suitable for near-wall modeling. Given the complex nature of density currents and the significant spatial variation in their properties, each method yielded more accurate results in specific regions near the wall and at the interface between the dense current and the overlying ambient fluid. Among the methods evaluated, the standard wall function produced better results in terms of simulating the velocity distribution near the bed. Conversely, in the upper

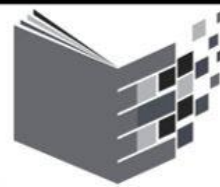
regions of the density current, i.e., near the interface with the ambient fluid, the enhanced near wall treatment provided results that were more consistent with experimental observations. Although no major differences were observed among the methods in simulating the density distribution, the enhanced near wall treatment demonstrated slightly better agreement with the experimental data compared to the other two approaches. Based on these findings, it is recommended that when a coarser computational mesh is used, the standard wall function should be employed. This approach allows the first grid node to be placed at a dimensionless wall distance $y^+ = 11.225$, eliminating the need for a highly refined mesh near the wall. However, if a finer mesh is utilized, the enhanced near wall treatment appears more appropriate due to its requirement for placing the first node at a position close to the wall, with $y^+ = 1$.

Author Contributions

All authors participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



بررسی روش های شبیه سازی اثر جداره در جریان های چگالی ناشی از شوری

سمیه محمدیان لنبران^۱، افشین اقبال زاده^۲✉

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: water.civil2011@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: afeghbal@razi.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت:	جریان های چگالی ناشی از شوری در محل ورود آب رودخانه ها به دریاها، دریاچه ها و مخازن سدها حائز اهمیت می باشند. در این تحقیق این نوع جریان با استفاده از نرم افزار فلوئنت مورد مطالعه عددی قرار گرفته است. اثر توابع مختلف نزدیک جداره شامل توابع جداره ای استاندارد و نامتعادل و نیز روش مدل سازی نزدیک جداره بر اساس رویکرد جداره اصلاح شده، بر شبیه سازی جریان مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد هر سه روش توانایی شبیه سازی توزیع سرعت و چگالی را بصورت قابل قبولی دارند، اما عملکرد آن ها در مقاطع و نواحی مختلف جریان متفاوت است. روش توابع جداره استاندارد در نواحی نزدیک دیواره دقت بالاتری داشت، در حالی که روش رویکرد نزدیک دیواره اصلاح شده در ناحیه مرزی بین جریان چگالی و سیال محیط نتایج دقیق تری ارائه داد. در خصوص توزیع چگالی اگر چه تفاوت عمده ای بین روش های مختلف مشاهده نشد، اما نتایج روش رویکرد نزدیک جداره اصلاح شده مقداری از دو روش دیگر بهتر بود. بطور کلی بر اساس نتایج بدست آمده می توان توصیه نمود در شرایط استفاده از شبکه درشت تر، مناسب تر است از روش توابع جداره استاندارد با توجه به امکان قرار دادن اولین گره در فاصله y^+ در حدود ۱۱/۲۲۵ و عدم نیاز به شبکه بسیار ریز در نزدیکی جداره استفاده نمود. اما در صورتی که شبکه های ریز تر مورد استفاده قرار گیرند شاید استفاده از روش رویکرد نزدیک جداره اصلاح شده بدلیل نیاز به قرار دادن اولین گره در نزدیکی جداره بطوریکه y^+ در حدود ۱ باشد، مناسب تر بنظر می رسد.
تاریخ بازنگری:	
تاریخ پذیرش:	
تاریخ انتشار:	
کلیدواژه ها: جریان چگالی، شبیه سازی عددی، نرم افزار فلوئنت، توابع جداره	

استناد: محمدیان لنبران، سمیه؛ و اقبال زاده، افشین؛ (۱۴۰۴). بررسی روش های شبیه سازی اثر جداره در جریان های چگالی ناشی از شوری. مجله

DOI: 10.22126/amcen.2025.11903.1037

مدل سازی پیشرفته در مهندسی عمران، ۲(۱)، ۳۶-۵۴.



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی.

۱. مقدمه

جریان‌های چگالی به جریان‌هایی اطلاق می‌شود که در اثر اختلاف چگالی افقی بین دو سیال ایجاد می‌شوند. این اختلاف چگالی می‌تواند در اثر اختلاف درجه‌ی حرارت، غلظت مواد معلق و یا مواد محلول در دو سیال باشد. این نوع جریان، طیف وسیعی از جریان‌ها را در اتمسفر، هیدروسفر و حتی لیتوسفر به خود اختصاص می‌دهد [۱]. جریان‌های چگالی ناشی از شوری بدلیل اختلاف چگالی بین دو سیال با غلظت‌های متفاوت نمک ایجاد شده و در محیط‌های مختلفی مانند مصب‌ها، رودخانه‌ها، مخازن سدها و دریاچه‌ها مشاهده می‌شوند [۲]. تحقیقات متعددی بصورت آزمایشگاهی در خصوص جریان‌های چگالی انجام شده است [۳-۱۰]. محدودیت‌هایی در رابطه با کارهای آزمایشگاهی وجود دارد از جمله اینکه آن‌ها در مقیاس‌های کوچک قابل انجام بوده و اندازه‌گیری خصوصیات غیردائمی جریان چگالی در آن‌ها کار بسیار مشکل و پرهزینه‌ای است. استفاده از مدل‌های عددی می‌تواند امکان برطرف نمودن چنین محدودیت‌هایی را فراهم نماید. در این مدل‌ها امکان شبیه‌سازی جریان چگالی در مقیاس‌های بزرگ از قبیل مطالعات کیفیت آب در رودخانه‌ها و مخازن سدها، ورود آب شور دریا به داخل رودخانه و ... فراهم می‌شود.

در مطالعات انجام شده قبلی برای مدل‌سازی آشفتگی در جریان‌های چگالی از سه روش شبیه‌سازی عددی مستقیم^۱ [۱۱-۱۲]، شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۲ [۱۳-۱۴] و معادلات ناویر استوکس میانگین‌گیری‌شده رینولدز^۳ [۱۵-۲۳] استفاده نموده اند. روش شبیه‌سازی عددی مستقیم اگر چه بیشترین دقت و جامع‌ترین توصیف ساختارهای آشفته را ارائه می‌دهد، اما بدلیل هزینه محاسباتی بسیار بالا تنها برای مقیاس‌های کم و مسائل کوچک مقیاس قابل اجراست. روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ، گردابه‌های با مقیاس بزرگ را حل نموده و تأثیر گردابه‌های کوچک‌تر را از طریق مدل‌های زیرشبکه^۴ در معادلات وارد می‌سازد. این روش نسبت به روش شبیه‌سازی عددی مستقیم از هزینه محاسباتی کمتری برخوردار بوده و می‌تواند بسیاری از ویژگی‌های سه‌بعدی و غیردائمی را در جریان‌های چگالی بازنمایی کند. اما برای رسیدن به نتایج قابل قبول باید شبکه‌بندی ریز و گام زمانی نسبتاً کوچکی بکار برد که بویژه در اعداد رینولدز بالا منجر به

افزایش جدی هزینه محاسباتی خواهد شد، بنابراین این موضوع در کاربردهای مهندسی بزرگ‌مقیاس مانع از استفاده گسترده از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ می‌شود. جریان‌های چگالی در محیط‌های واقعی مانند رودخانه‌ها و مخازن سدها دارای اعداد رینولدز بالایی هستند، بنابراین اجرای روش‌های شبیه‌سازی عددی مستقیم و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ در چنین مقیاس‌هایی تقریباً امکانپذیر نیست. در این حالت استفاده از معادلات ناویراستوکس میانگین‌گیری‌شده رینولدز که امکان بهره‌گیری از شبکه‌های درشت‌تر و گام زمانی بزرگ‌تر وجود دارد مناسب‌تر است.

جریان‌های چگالی که در کنار مرزهای جامد حرکت می‌کنند، به شدت تحت تأثیر شرایط مرزی دیواره هستند. برای شبیه‌سازی اثر جداره دو راهکار مورد استفاده واقع شده‌است. در یک برخورد از توابع دیواره استفاده می‌شود. در این حالت اولین گره نزدیک کف خارج از زیر لایه‌ی لزج قرار داده می‌شود. این توابع ارتباط بین جریان آشفته‌ی بالای زیر لایه‌ی لزج را با زیر لایه‌ی لزج برقرار می‌کنند. در روش دیگر، نزدیک جداره هم بطور کامل شبیه‌سازی می‌شود. در این حالت چند گره هم در داخل زیر لایه‌ی لزج قرار داده می‌شود. این حالت می‌تواند هزینه‌ی محاسباتی را افزایش دهد. از پارامتر y^+ ($y^+ = u_* y / \nu$) که در آن u_* و y به ترتیب سرعت برشی و فاصله‌ی عمودی اولین گره از جداره و y لزجت سینماتیکی می‌باشند. به منظور تعیین محل اولین گره نزدیک کف استفاده می‌شود. برای استفاده از شرایط مرزی مختلف مربوط به دو روش، توصیه‌هایی در خصوص y^+ مناسب در نوشتجات علمی ارائه شده‌است. سلیم و چی با استفاده از مدل‌های آشفتگی مختلف اثر y^+ را بر جریان عبوری از روی یک صفحه، مورد بررسی قرار دادند [۲۴]. آن‌ها نتایج به دست آمده را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمودند. نتایج به دست آمده توسط آن‌ها نشان داد که بین اندازه‌ی شبکه و رفتار نزدیک دیواره در مدل‌های مختلف آشفتگی رابطه‌ای وجود دارد.

با وجود تحقیقات متعدد انجام شده، هنوز ابهاماتی در انتخاب مناسب مدل‌های نزدیک دیواره جهت شبیه‌سازی جریان‌های چگالی وجود دارد. مطالعات پیشین عمدتاً به بررسی کلی رفتار جریان‌های چگالی پرداخته‌اند و به بررسی و مقایسه تأثیر روش‌های مختلف شبیه‌سازی

³ Reynolds averaged Navier stokes⁴ Subgrid-scale models¹ Direct numerical simulation² Large eddy simulation

که در آن k انرژی جنبشی آشفته، ε نرخ اتلاف آشفتگی و C_μ عدد ثابت می‌باشند. k و ε از معادلات زیر به دست می‌آیند:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \left(\frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = & \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) \right] \\ & + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (5)$$

در این معادلات G_k نشان دهنده‌ی تولید انرژی جنبشی آشفتگی در اثر گرادیان سرعت متوسط، G_b تولید انرژی جنبشی در اثر شناوری، σ_k و σ_ε اعداد پرانتل آشفته به ترتیب برای k و ε و μ و μ_t به ترتیب لزجت‌های دینامیکی مولکولی و گردابه‌ای هستند. ثابت‌های مدل نیز به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$C_{1\varepsilon}=1.44, C_{2\varepsilon}=1.9, C_\mu=0.09, \sigma_k=1.0, \sigma_\varepsilon=1.3$$

ضریب تجربی $C_{3\varepsilon}$ مربوط به اثر شناوری است و یک روش یا معیار مشخص برای تعیین مقدار بهینه‌ی آن ارائه نشده‌است. محققین مختلف مقادیر متفاوتی برای آن پیشنهاد نموده‌اند. در نرم افزار فلونت $C_{3\varepsilon}$ از رابطه‌ی ارائه شده زیر محاسبه می‌شود [۲۵]:

$$C_{3\varepsilon} = \tanh \left| \frac{w}{u} \right| \quad (6)$$

معادله‌ی زیر نیز به طور همزمان برای انتقال شوری حل می‌شود.

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial u_i S}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial S}{\partial x_i} \right] \quad (7)$$

که در آن σ_t عدد پرانتل آشفته برای غلظت ناشی از شوری و S غلظت حجمی متوسط‌گیری شده در زمان برای شوری می‌باشد. بعضی از محققین اشاره نموده‌اند که در جریان‌های لایه‌بندی شده عدد پرانتل مربوط به غلظت حجمی بزرگتر از ۱ بوده و یک عدد ثابت نمی‌باشد و

اثر جداره بر نتایج شبیه‌سازی نپرداخته‌اند. بنابراین در تحقیق حاضر با استفاده از نرم افزار فلونت^۵ برای شبیه‌سازی جریان چگالی ناشی از شوری، اثر توابع مختلف نزدیک دیواره شامل توابع جداره استاندارد و نامتعادل و نیز روش مدل‌سازی نزدیک دیواره بررسی شد. به‌منظور ارزیابی دقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی، خروجی مدل عددی با داده‌های آزمایشگاهی گرب^۶ و همکاران [۷] مورد مقایسه قرار گرفتند.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. معادلات حاکم

معادلات به کار رفته در نرم‌افزار فلونت برای مدل‌سازی جریان چگالی شور شامل معادلات پیوستگی و مومنتوم متوسط‌گیری شده‌ی رینولدز (معادلات ناویراستوکس) به همراه یک معادله‌ی حالت و پایستاری برای جزء جرمی می‌باشند. در این تحقیق با فرض اینکه اختلاف چگالی کم است از تقریب بوزنيسک استفاده می‌شود. بر اساس این فرض از تغییرات چگالی در تمام عبارتها به غیر از شناوری در معادله‌ی مومنتوم صرف نظر می‌شود. بنابراین معادلات حاکم جریان که شامل معادلات ناویراستوکس متوسط‌گیری شده رینولدز می‌باشند به صورت زیر ارائه می‌شوند:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = - \frac{(\rho - \rho_0)}{\rho_0} g \delta_{2i} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

که در آن $u_i = u, w$ به ترتیب برای $i=1, 2$ مولفه‌های سرعت متوسط - گیری شده رینولدز به ترتیب در جهات x و z ، P فشار، ρ_0 چگالی سیال اطراف، g شتاب ثقل، ν و ν_t به ترتیب لزجت‌های سینماتیکی مولکولی و گردابه‌ای، ρ مقدار چگالی موضعی می‌باشند. δ_{2i} تابع دلتای کرونکر است که به ترتیب برای $i=1, 2$ ، برابر ۰ و ۱ می‌باشد. لزجت گردابه‌ای با استفاده از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ استاندارد که جهت در نظر گرفتن اثر شناوری اصلاح شده است، بر اساس رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\nu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

⁶ Gerber

⁵ Fluent software

مختصر ناحیه‌ی جداره نامیده می‌شود به سه قسمت کلی تقسیم می‌شود. نزدیک‌ترین ناحیه به جداره که به آن ناحیه‌ی زیر لایه‌ی لزج اطلاق می‌شود، پارامتر لزجت بر جریان حاکم است. در این ناحیه لزجت مولکولی نوسانات مماسی سرعت را مستهلک می‌کند. در این ناحیه مانعی که جداره در مقابل جریان ایجاد می‌کند موجب کاهش نوسانات عمود بر جداره می‌شود. در قسمت بالای ناحیه‌ی جداره، لایه کاملاً آشفته وجود دارد. در این لایه به خاطر تولید انرژی جنبشی آشفته در نتیجه گرادیان‌های زیاد سرعت، آشفتگی حاکم بر وضعیت جریان است. بین دو ناحیه‌ی زیر لایه‌ی لزج و ناحیه‌ی کاملاً آشفته ناحیه‌ی میانی واقع شده که در آن هردو پارامتر لزجت و آشفتگی از اهمیت عمده‌ای برخوردار هستند.

مدل‌سازی صحیح ناحیه‌ی نزدیک دیواره تأثیر مهمی بر دقت شبیه‌سازی عددی جریان‌های آشفته تحت تأثیر جداره خواهد داشت. برای مدل‌سازی ناحیه‌ی نزدیک به جداره در جریان‌های آشفته به طور کلی می‌توان از دو روش توابع جداره و مدل‌سازی نزدیک جداره استفاده نمود. در روش توابع جداره نواحی داخلی تحت تأثیر لزجت، شامل زیر لایه‌ی لزج و لایه‌ی میانی، حل نمی‌شوند. در عوض با استفاده از فرمول‌های نیمه تجربی که به آن‌ها توابع جداره اطلاق می‌شود به مانند پلی ارتباط بین جداره و ناحیه‌ی کاملاً آشفته را از روی ناحیه تحت تأثیر لزجت برقرار می‌سازند. در حالت استفاده از روش توابع جداره، دیگر نیازی به اصلاح مدل‌های آشفتگی به منظور لحاظ نمودن اثر جداره نیست. در روش مدل‌سازی نزدیک جداره در مدل‌های آشفتگی اصلاحاتی اعمال می‌شود تا بتواند ناحیه‌ی تحت تأثیر لزجت را بر روی شبکه‌ای که حتی زیر لایه‌ی لزج را نیز در برگیرد، حل نمایند. شکل ۲ به طور شماتیک نحوه شبکه بندی این دو روش را که در نرم افزار فلوئنت مورد استفاده قرار گرفته‌اند، نمایش می‌دهد.

هر یک از این دو روش مزایا و معایبی دارند. استفاده از روش توابع جداره، هزینه‌ی محاسباتی را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. چرا که در این روش به دلیل عدم حل ناحیه‌ی تحت تأثیر لزجت که تغییرات شدید متغیرها در آن رخ می‌دهد، این ناحیه شبکه‌بندی نمی‌شود. بنابراین به طور کلی روش توابع دیواره در جریان‌های با رینولدز بالا روش اقتصادی، قوی و با دقت مناسب است. اما در موقعیت‌هایی که در میدان جریان نواحی با اعداد رینولدز پایین غالب هستند. ممکن

به نوع لایه‌بندی جریان بستگی دارد [۲۶ و ۲۷]. در تحقیق حاضر مقدار σ_t برابر $1/3$ انتخاب شده است.

آخرین معادله‌ی مورد نیاز برای شبیه‌سازی جریان چگالی معادله‌ی حالت می‌باشد که بر اساس آن چگالی به مقدار غلظت حجمی متوسط مربوط می‌شوند.

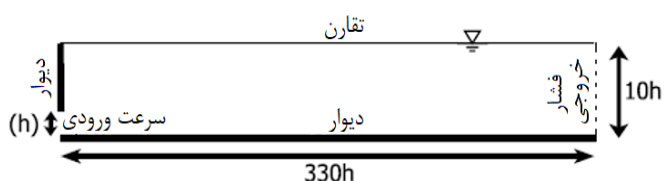
$$\rho = 711.81818 * S + 998.2364 \quad (8)$$

۲-۲. شرایط مرزی

میدان محاسباتی در نظر گرفته‌شده که در شکل ۱ نمایش داده شده است، دارای دو مرز قائم در بالادست و پایین دست، سطح آزاد در بالا و بستر صلب در کف می‌باشد. در سطح آزاد از شرط مرزی تقارن، در خروجی از شرط مرزی فشار خروجی و در ورودی از شرط مرزی سرعت ورودی استفاده می‌شود. مقادیر k و ε در مرز ورودی براساس رابطه‌ی زیر محاسبه و اعمال می‌شوند [۲۸]:

$$k_{in} = (0.1 u_{in})^2, \quad \varepsilon_{in} = \frac{10 k_{in}^{3/2} C_\mu^{3/4}}{h_{in}} \quad (9)$$

که در آن u_{in} ، h_{in} و k_{in} به ترتیب سرعت متوسط، عمق، انرژی جنبشی آشفته و ضخامت جریان چگالی در ورودی هستند. در بالای قسمت ورودی جریان همچنین در کف از شرط مرزی دیواره استفاده می‌شود.



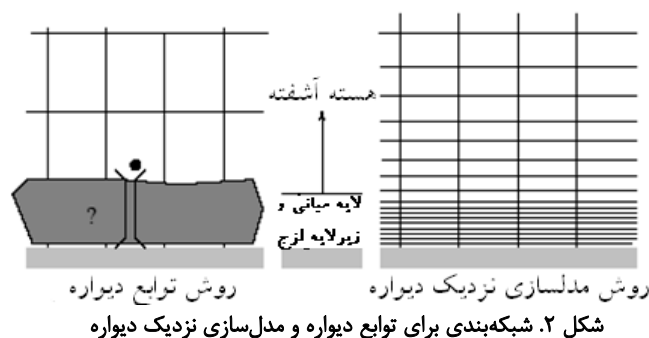
شکل ۱. شرایط مرزی و ابعاد میدان محاسباتی

۳-۲. مدل‌سازی نزدیک جداره در شرایط استفاده از مدل آشفتگی $k-\varepsilon$

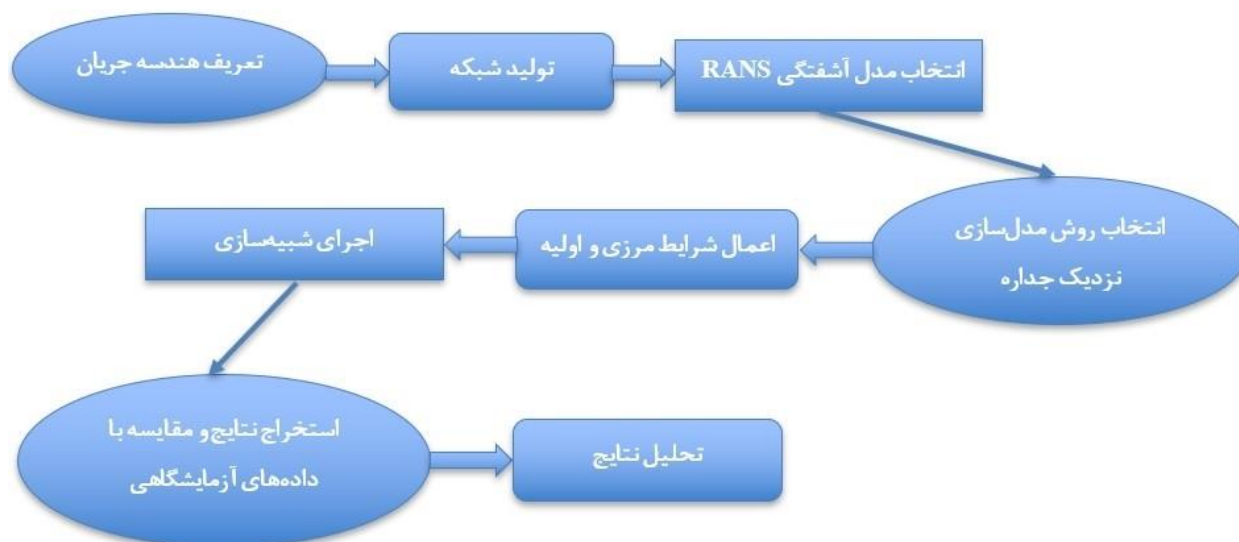
وجود مرز جامد به طور جدی بر وضعیت جریان‌های آشفته اثرگذار است. شرط عدم لغزش حاکم بر میدان سرعت متوسط جریان در جداره برقرار است. از طرفی وضعیت آشفتگی هم در نزدیکی جداره به شدت تحت تأثیر جداره قرار دارد. ناحیه‌ی نزدیک جداره که به طور

در تحقیق حاضر هر دو روش مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. برای روش توابع جداره از حالت‌های تابع جداره‌ی استاندارد و تابع جداره‌ی غیر-متعادل و برای روش مدل‌سازی نزدیک جداره از رویکرد جداره‌ی اصلاح‌شده که در نرم افزار فلوئنت وجود دارند، استفاده می‌شود. به جزئیات کامل این روش‌ها در راهنمای نرم افزار فلوئنت اشاره شده است [۲۹]. در حالت‌های توابع جداره‌ی استاندارد و غیرمتعادل توصیه شده که اولین گره در فاصله‌ی y^+ بیشتر از ۱۱/۲۲۵ واقع شود، اما در حالت رویکرد جداره‌ی اصلاح‌شده بایستی y^+ اولین گره کمتر از ۱ باشد. در این حالت به دلیل مدل‌سازی ناحیه‌ی تحت تاثیر لزجت لازم است تا ناحیه‌ی زیر لایه‌ی لزج نیز شبکه‌بندی شود. در شکل ۳ روند انجام تحقیق حاضر نمایش داده شده است.

است این روش مناسب نباشد. در چنین موقعیت‌هایی توصیه می‌شود از روش مدل‌سازی نزدیک جداره استفاده شود.



شکل ۲. شبکه‌بندی برای توابع دیواره و مدل‌سازی نزدیک دیواره



شکل ۳. فرآیند انجام تحقیق حاضر

مترمکعب به طول ۹/۹ متر می‌شود. سرعت جریان عبوری از روزنه معادل ۰/۰۷۹ متر بر ثانیه است. در جدول ۱ جزئیات مربوط به اجراهای مختلف عددی و مقادیر y^+ مربوط به اولین گره در نزدیکی جداره در زمان نهایی اجرا ($t=300$ sec) به طور کامل ارائه شده‌اند. گربر و همکاران نتایج آزمایشگاهی مربوط به سرعت و چگالی را در مقاطع ۰/۹ و ۲/۴ متر از ورودی کانال ارائه داده‌اند. آن‌ها پس از دائمی شدن جریان در این مقاطع، اندازه‌گیری را انجام داده بودند. بنابراین در تحقیق حاضر زمان اجرای برنامه به نحوی انتخاب شد که در مقاطع

۳. نتایج و بحث

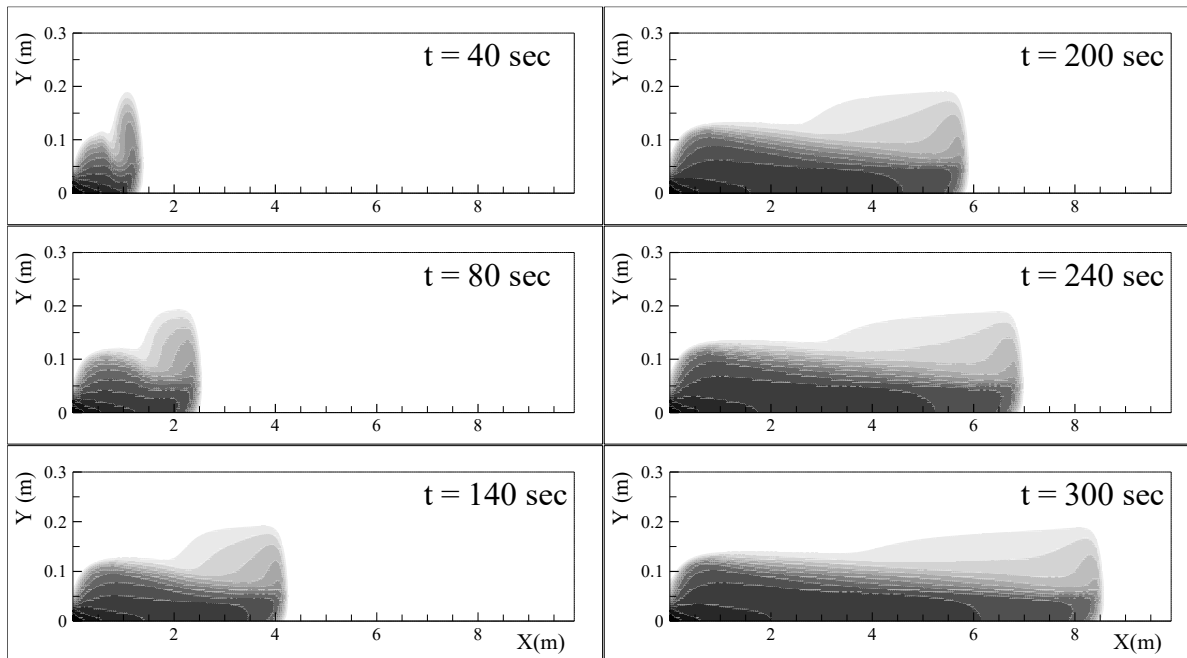
در تحقیق حاضر به منظور بررسی و مطالعه در خصوص اثر روش‌های برخورد مختلف با ناحیه‌ی نزدیک جداره در مدل‌سازی عددی جریان‌های آشفته، یکی از آزمایشات انجام شده توسط گربر و همکاران شبیه‌سازی می‌شود [۷]. در شکل ۱ میدان محاسباتی مورد استفاده نمایش داده شده است. در آزمایش انجام شده آب شور با چگالی ۱۰۰۰/۲۳۷ کیلوگرم بر مترمکعب از یک روزنه به ارتفاع ۳ سانتی‌متر وارد یک مخزن پر از آب شیرین با چگالی ۹۹۸/۲۳۶۴ کیلوگرم بر

SWF2 نمایش داده شده‌اند. همانطور که در این شکل مشخص است نتایج سرعت در زمان‌های ۲۴۰ و ۳۰۰ ثانیه نسبتاً مشابه می‌باشند. در شکل ۶ نتایج مربوط به پروفیل سرعت طولی و چگالی بر اساس روش تابع جداره‌ی استاندارد برای شبکه‌های مختلف نشان داده شده‌اند. در این شکل نتایج به دست آمده از مدل عددی با سه شبکه‌بندی مختلف با نتایج عددی و آزمایشگاهی گربر و همکاران مقایسه شده‌اند.

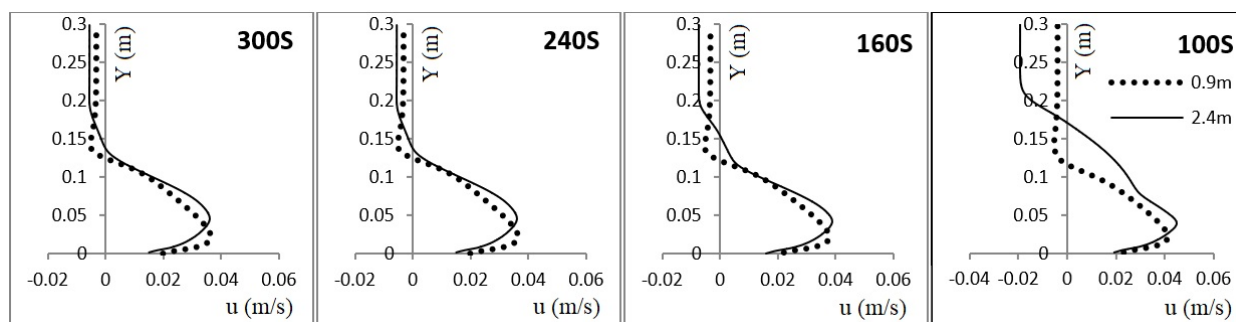
مربوط به اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی جریان دائمی شده باشد. برای این منظور زمان ۳۰۰ ثانیه که توزیع سرعت در این مقاطع ثابت شده و با زمان تغییر نمی‌کرد، به عنوان زمان اجرای برنامه انتخاب شد. در شکل ۴ براساس نتایج اجرای SWF2 نحوه‌ی پیشروی جریان چگالی نشان داده شده است. در شکل ۵ نحوه‌ی تغییر پروفیل سرعت در زمان در مقاطع ۰/۹ و ۲/۴ متر بر اساس نتایج به دست آمده از اجرای

جدول ۱. شرایط شبیه‌سازی‌های مختلف و مقادیر y^+ مربوط به اولین گره نزدیک جداره در زمان نهایی اجرا ($t=300 \text{ sec}$)

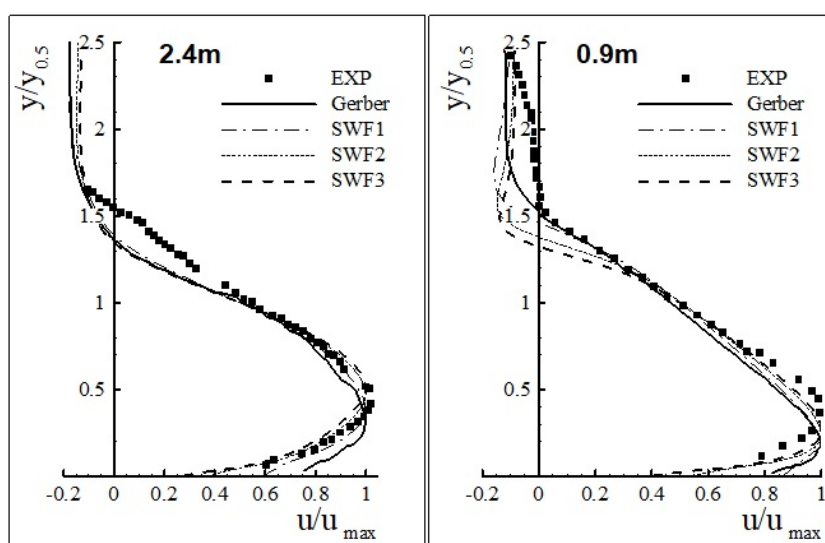
نام شبیه‌سازی	تعداد شبکه قائم * افقی	y^+ در ابتدای کانال	y^+ در $x=0.9 \text{ m}$	y^+ در $x=2.4 \text{ m}$
SWF1	۱۱۷ * ۴۰	۱۷	۱۲	۱۲
SWF2	۲۳۴ * ۸۰	۸/۵۲	۶/۷	۵
SWF3	۳۵۱ * ۱۲۰	۵/۶۸	۴/۹	۳/۹
SWF11	۱۱۷ * ۴۰	۸/۵۲	۵/۶	۴/۷
NE-WF2	۲۳۴ * ۸۰	۸/۵۲	۸	۷
EN-WT1	۱۱۷ * ۴۰	۱	۰/۶	۰/۶۵
EN-WT2	۲۳۴ * ۸۰	۰/۵	۰/۳	۰/۳
EN-WT2b	۲۳۴ * ۸۰	۸/۵۲	۶/۷	۵
EN-WT1b	۱۱۷ * ۴۰	۱۷	۱۲/۵	۱۰



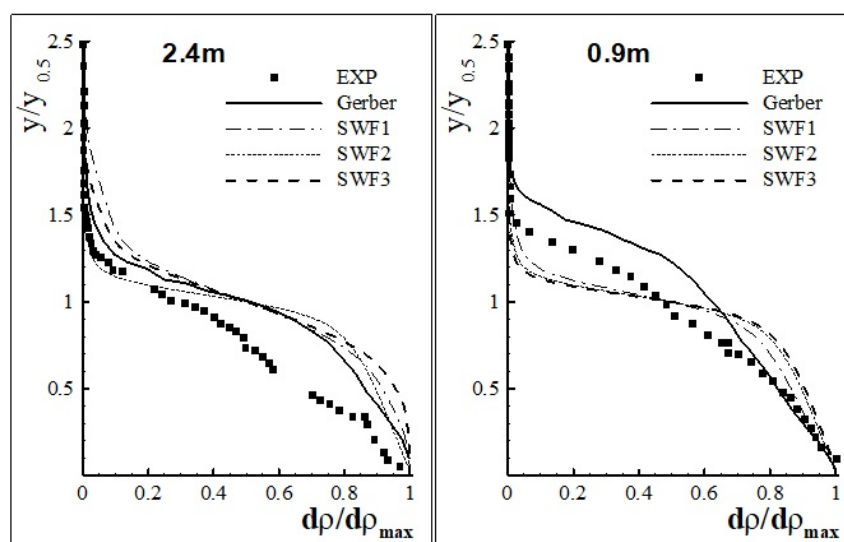
شکل ۴. نحوه‌ی پیشروی جریان در طول زمان بر اساس چگالی



شکل ۵. پروفیل‌های سرعت در مقاطع ۰/۹ و ۲/۴ متر برای زمان‌های مختلف



الف



ب

شکل ۶. توزیع سرعت (الف) و چگالی (ب) در مقاطع ۰/۹ و ۲/۴ متر

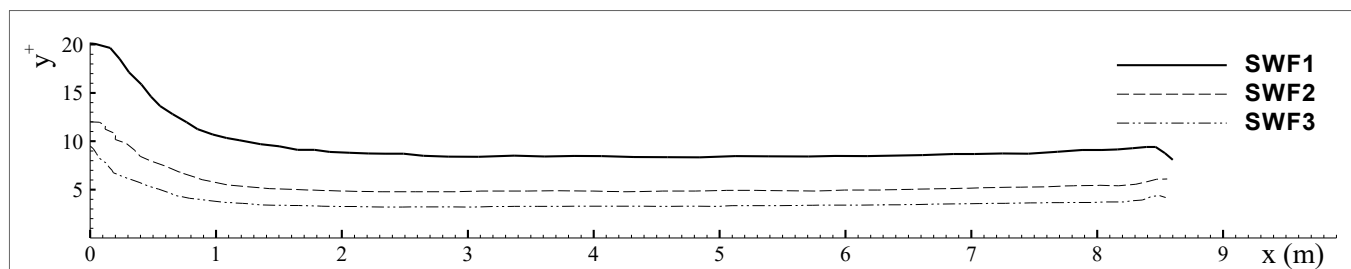
است با این تفاوت که اندازه‌ی اولین سلول طوری تنظیم شد که y^+ آن معادل y^+ مربوط به اجرای SWF2 باشد. در شکل ۸ نتایج اجرای SWF11 با SWF2 و SWF1 و نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، در نزدیکی جداره توزیع سرعت مربوط به دو اجرای SWF2 و SWF11 بسیار به هم نزدیک شده‌اند. اما در بالای جریان چگالی با توجه به این که شبکه‌ی مربوط به اجرای SWF11 درشت‌تر است، دقت اجرای SWF2 که شبکه‌ی آن ریزتر است بیشتر به نظر می‌رسد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بهتر است اولین گره در فاصله‌ی y^+ در حدود ۱۱/۲۲۵ واقع شود تا قسمت بیشتری از جریان در نزدیکی جداره حل شده و نتایج در این ناحیه بهبود یابد.

در شکل‌های ۹ و ۱۰ برای شبکه‌ی SWF2 که بهترین نتایج مدل‌سازی را ارائه داده است، به ترتیب پیشروی دماغه‌ی جریان چگالی نسبت به زمان و سرعت آن مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود نحوه‌ی پیشروی جریان تقریباً خطی است و در خصوص سرعت پیشروی دماغه بر اساس شکل ۱۰ در ابتدا سرعت بصورت خطی با شیب زیاد و در زمان کوتاهی افزایش یافته تا به حداکثر خود برسد. پس در طول زمان این مقدار به صورت نوسانی کاهش یافته و در حدود ۴۰ ثانیه نسبتاً ثابت و برابر ۰/۰۲۸ متر بر ثانیه می‌شود.

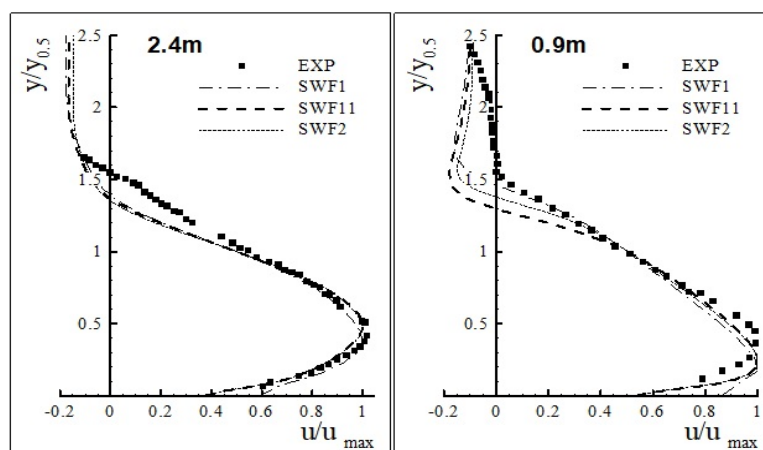
در ادامه‌ی این تحقیق اثر توابع جداره‌ی غیرمتعادل و همچنین رویکرد نزدیک جداره‌ی اصلاح شده بر شبیه‌سازی، مورد مطالعه قرار گرفت. در شکل ۱۱ اجرای NE-WF2 که تعداد سلول‌های آن معادل SWF2 بوده و در نزدیک جداره از تابع جداره‌ی نامتعادل استفاده شده با نتایج SWF2 و نتایج عددی و آزمایشگاهی گربر و همکاران مقایسه شده است.

همانطور که در شکل ۶ مشخص است نتایج شبکه‌های SWF2 و SWF3 تقریباً مشابه می‌باشند. بنابراین می‌توان پذیرفت که با ریز کردن بیشتر نسبت به شبکه 80×234 تغییر چندانی در نتایج ایجاد نمی‌شود. از طرفی با مقایسه‌ی پروفیل‌های سرعت در $x=0.9$ m شبکه‌ی SWF1 در نزدیکی جداره مشابه حل عددی گربر است و به خوبی نتوانسته پروفیل سرعت در نزدیک جداره را شبیه‌سازی نماید. شبکه‌های SWF2 و SWF3 مقادیر سرعت را بهتر مدل‌سازی نموده‌اند. در $x=2.4$ m هر سه شبکه به خوبی پروفیل‌های سرعت را شبیه‌سازی نموده‌اند. نتایج به دست آمده در این خصوص در مقایسه با نتایج گربر بهتر هستند. در شبیه‌سازی‌های تحقیق حاضر از شبکه‌های یکنواخت استفاده شده است. اما در شبیه‌سازی گربر شبکه طوری تنظیم شده است که مرکز اولین سلول نزدیک جداره $y^+ = 20$ می‌باشد و بالای این سلول از شبکه‌بندی ریزتری استفاده شده است. در شکل ۷ مقدار y^+ برای اجراهای مختلف SWF1 و SWF2 و SWF3 نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، y^+ در محل ورود جریان به کانال مقدار بیشتری داشته و در طول فاصله‌ی ۱ متری از دریچه با شیبی تند کاهش می‌یابد و پس از آن به سمت دماغه‌ی جریان چگالی افزایش کاملاً تدریجی را نشان می‌دهد. بنظر می‌رسد کاهش y^+ از ورودی به سمت نواحی جلوتر بدلیل افزایش ارتفاع جریان جلو رونده از ۳ سانتیمتر ضخامت در ورودی تا حدود ۱۳ سانتیمتر و در نتیجه کاهش مقدار سرعت جریان نسبت به سرعت ورودی می‌باشد.

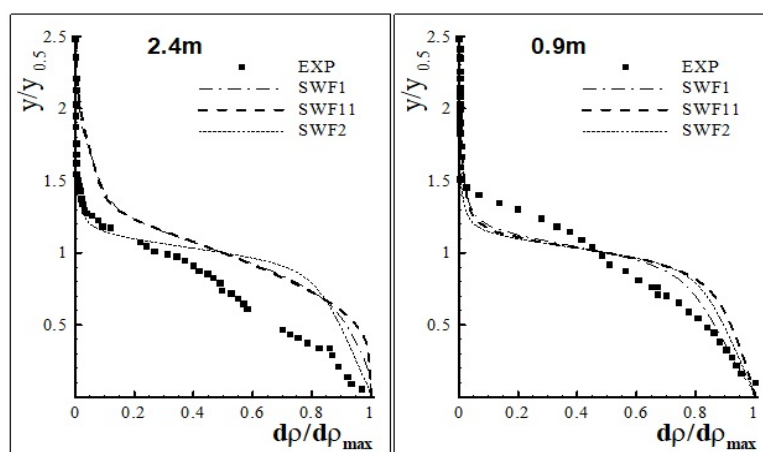
به نظر می‌رسد بهتر شدن پیش‌بینی مقادیر سرعت بخصوص در نزدیکی جداره در شبکه‌های ریز به علت کاهش مقدار y^+ باشد. این حالت در اجرای SWF11 با استفاده از شبکه‌ی غیر یکنواخت در راستای قائم مورد بررسی قرار گرفت. این اجرا همان اجرای SWF1



شکل ۷. مقدار y^+ در طول جریان برای سه مدل SWF1، SWF2 و SWF3

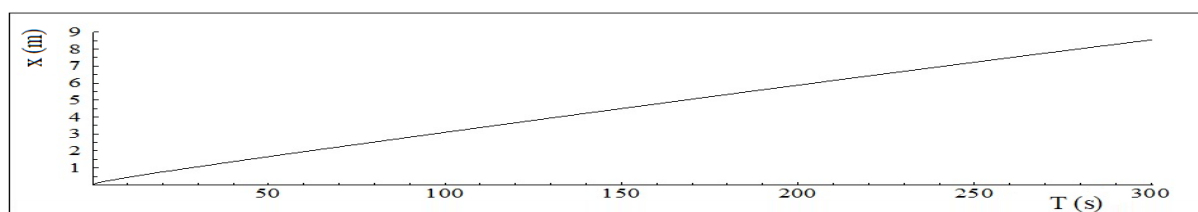


الف

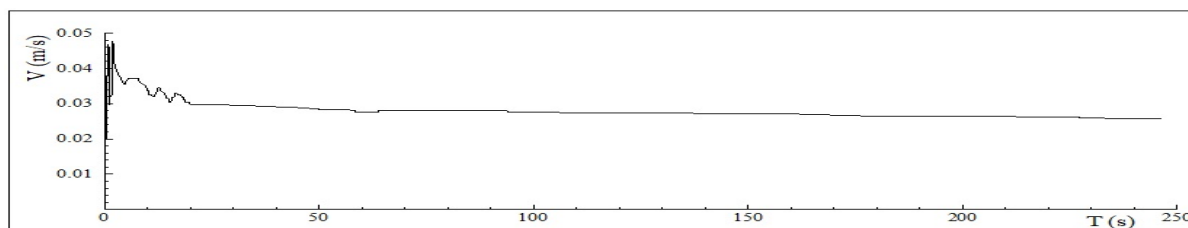


ب

شکل ۸. توزیع سرعت (الف) و توزیع چگالی (ب) برای شبکه بندی‌های SWF1، SWF11 و SWF2



شکل ۹. پیشروی دماغه‌ی جریان چگالی نسبت به زمان

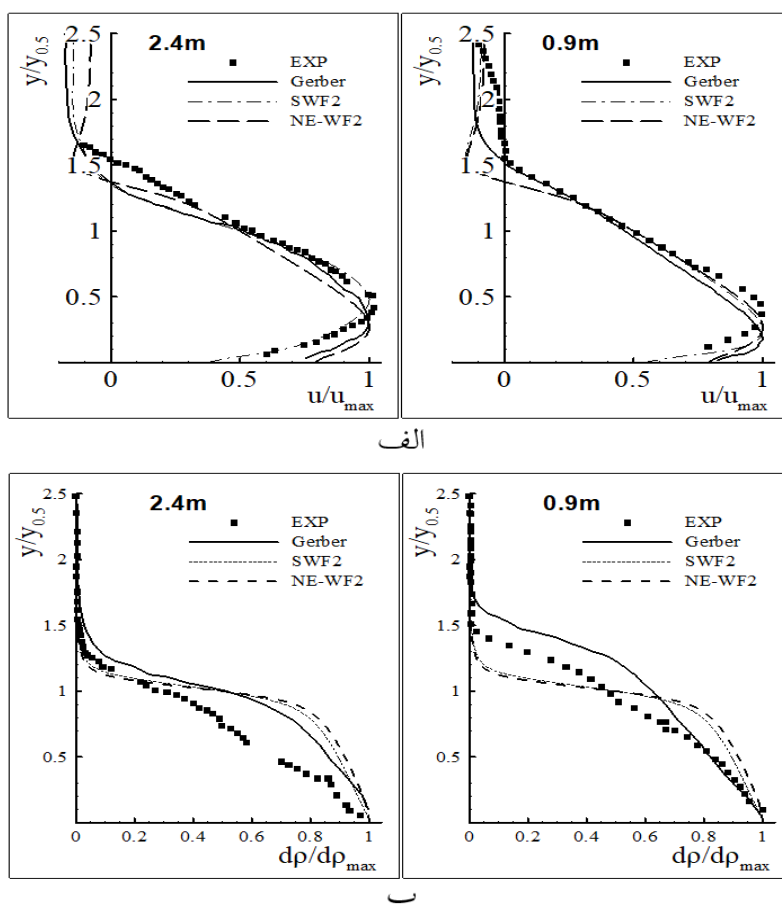


شکل ۱۰. سرعت پیشروی دماغه‌ی جریان نسبت به زمان

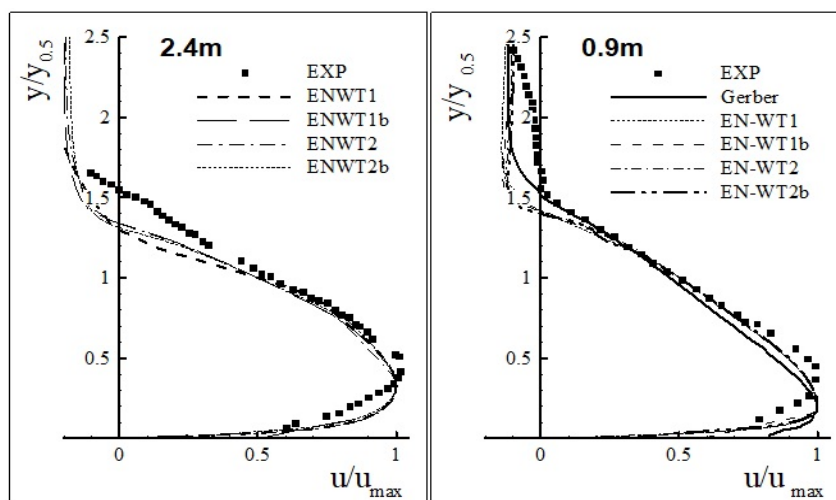
y^+ در اولین گره نزدیک جداره حداکثر برابر با یک باشد. در حالت‌های EN-WT1 و EN-WT2 شبکه غیر یکنواخت در راستای قائم طوری تنظیم شده که این شرط برقرار باشد. در شبیه‌سازی‌های EN-WT1b و EN-WT2b بترتیب از همان تعداد سلول‌های EN-WT1 و EN-WT2 استفاده شده، با این تفاوت که در آن‌ها شبکه‌بندی یکنواخت انجام شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، در شبیه‌سازی‌های انجام شده توزیع سرعت و چگالی تفاوت مهمی مشاهده نمی‌شود. البته در حالت EN-WT1b که از ۴۰ شبکه یکنواخت در راستای قائم استفاده شده و y^+ در طول جریان مقداری بیشتر از ۱۰ داراست، توزیع سرعت در نزدیک کف با سه حالت دیگر که در آنها برای EN-WT2b، y^+ کمتر از حدود ۷ و برای EN-WT1 و EN-WT2، y^+ کمتر از ۱ است، متفاوت می‌باشد.

طبق نتایج به دست آمده توزیع سرعت بدست آمده در $x=0.9\text{ m}$ در نزدیک جداره در حالت SWF2 نسبت به NE-WF2 تطابق بهتری با نتایج آزمایشگاهی دارد. اما در نواحی دور از جداره از محل وقوع ماکزیمم سرعت به سمت بالا هر دو روش نتیجه‌ی نسبتاً یکسانی ارائه داده‌اند. در $x=2.4\text{ m}$ نتیجه‌ی به دست آمده در خصوص توزیع سرعت از اجرای SWF2 نسبت به NE-WF2 بسیار بهتر و در تطابق نزدیک‌تری با نتایج آزمایشگاهی است. در خصوص توزیع چگالی هر دو روش نتایج نسبتاً مشابهی ارائه داده‌اند.

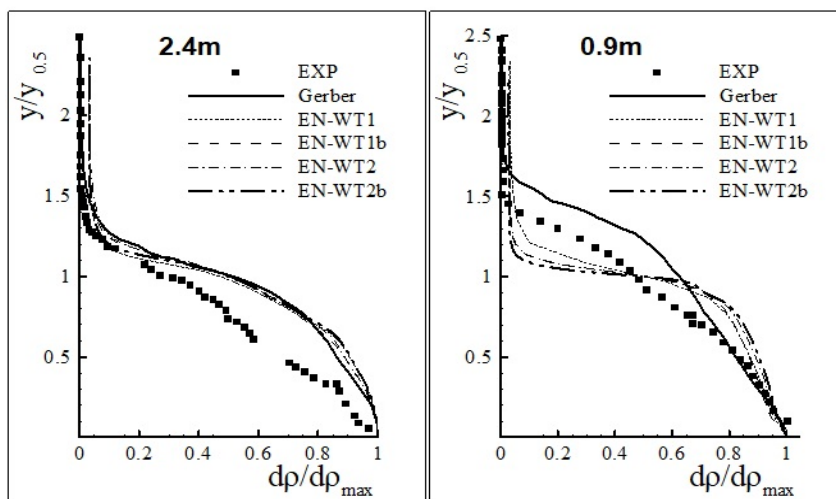
در شکل ۱۲ نتایج مربوط به روش مدل‌سازی نزدیک جداره که از رویکرد جداره اصلاح‌شده در نرم افزار فلوئنت استفاده شده، نمایش داده شده است. مشخصات اجراهای مربوط به این حالت نیز در جدول ۱ آورده شده است. برای این روش برخورد با جداره با توجه به اینکه مدل‌سازی در نزدیک جداره نیز انجام می‌شود، توصیه شده که مقدار



شکل ۱۱. توزیع سرعت (الف) و توزیع چگالی (ب) برای شبکه توابع دیواره ی استاندارد و نامتعادل



الف



ب

شکل ۱۲. پروفیل‌های سرعت (الف) و چگالی (ب) برای روش رویکرد نزدیک دیواره اصلاح شده

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_{i \text{ sim}} - P_{i \text{ exp}}| \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{i \text{ sim}} - P_{i \text{ exp}})^2} \quad (11)$$

که در آن $P_{i \text{ exp}}$ و $P_{i \text{ sim}}$ به ترتیب مقادیر بدست آمده از شبیه‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی هستند.

در شکل ۱۳ شبیه‌سازی ENWT2 مربوط به رویکرد نزدیک جداره اصلاح شده با توابع جداره غیرمتعادل و استاندارد بر اساس بهترین نتایج بدست آمده از هر کدام از این روش‌ها یعنی شبیه‌سازی‌های NE-WF2 و SWF2 مقایسه شده است.

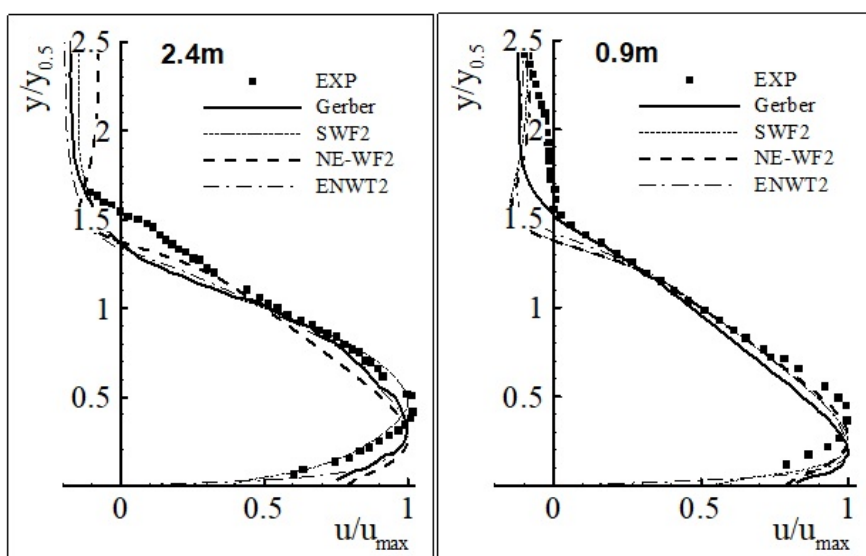
مقادیر معیارهای آماری خطای میانگین مطلق، MAE و ریشه میانگین مربعات، RMSE، که به کمک روابط ۱۰ و ۱۱ محاسبه می‌شوند، برای هر کدام از روش‌ها برای سرعت و چگالی در $x=0.9 \text{ m}$ و $x=2.4 \text{ m}$ در جداول ۲ و ۳ ارائه شده‌اند.

جدول ۲. مقادیر معیارهای آماری شبیه‌سازی برای سرعت در مقاطع

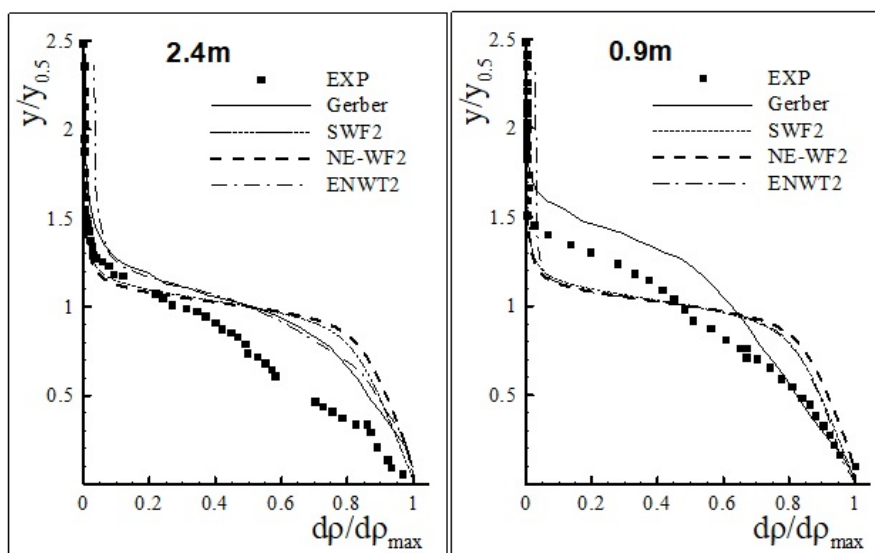
x=2.4 m		x=0.9 m		نام شبیه‌سازی
RMSE	MAE	RMSE	MAE	
۰/۰۲۸۶	۰/۰۰۶۷	۰/۰۳۵۱	۰/۰۱۱۶	SWF2
۰/۰۴۰۶	۰/۰۱۱۴	۰/۰۳۳۶	۰/۰۱۰۶	NE-WF2
۰/۰۳۵۲	۰/۰۰۹۶	۰/۰۳۰۹	۰/۰۱۰۲	ENWT2

جدول ۳. مقادیر معیارهای آماری شبیه‌سازی برای چگالی در مقاطع

x=2.4 m		x=0.9 m		نام شبیه‌سازی
RMSE	MAE	RMSE	MAE	
۰/۰۵۲۰	۰/۰۱۱۴	۰/۰۲۹۳	۰/۰۰۵۱	SWF2
۰/۰۵۶۶	۰/۰۱۲۳	۰/۰۳۴۰	۰/۰۰۶۳	NE-WF2
۰/۰۴۵۰	۰/۰۱۰۷	۰/۰۳۰۵	۰/۰۰۵۴	ENWT2



الف



ب

شکل ۱۳. پروفیل‌های سرعت (الف) و چگالی (ب) مقایسه‌ی توابع دیواره و روش رویکرد نزدیک دیواره اصلاح شده

بیشتر هستند و به سمت پایین دست و دماغه جریان ضمن افزایش ارتفاع مقادیر سرعت و چگالی کاهش می‌یابند.

۴. نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت جریان چگالی ناشی از شوری شبیه‌سازی شده است. با مقایسه نتایج بدست آمده از نرم‌افزار با نتایج آزمایشگاهی، از عملکرد صحیح مدل در شبیه‌سازی این جریان اطمینان حاصل شد. سپس اثر توابع جداره استاندارد و غیرمتعالی و همچنین رویکرد نزدیک جداره اصلاح‌شده بر شبیه‌سازی جریان مورد مطالعه قرار گرفت. بطور کلی هر سه روش بطور قابل قبولی مقادیر سرعت و چگالی را شبیه‌سازی نمودند، اما نمی‌توان بطور قاطع یک روش را بعنوان بهترین روش برخورد با شبیه‌سازی نزدیک جداره معرفی نمود. بنظر می‌رسد با توجه به پیچیده بودن جریان چگالی و تغییرات جدی مقادیر در طول آن، در مقاطع مختلف و در محل‌های نزدیک جداره و یا مرز بین جریان چگالی و سیال بالایی یکی از روش‌ها نتایج بهتری ارائه می‌داد. بر اساس مقایسه انجام شده، روش توابع جداره استاندارد نتایج بهتری در خصوص شبیه‌سازی جریان چگالی بر اساس توزیع سرعت در نواحی نزدیک جداره ارائه داد. اما در بالای جریان چگالی یعنی در محدوده‌ی مرز بین جریان چگالی و سیال اطراف نتایج روش رویکرد نزدیک جداره اصلاح‌شده در تطابق نزدیک‌تری با نتایج آزمایشگاهی قرار داشت. در خصوص توزیع چگالی اگر چه تفاوت عمده‌ای بین روش‌های مختلف مشاهده نشد، اما نتایج روش رویکرد نزدیک جداره اصلاح‌شده مقداری از دو روش دیگر بهتر بود. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان توصیه نمود در صورتیکه برای شبیه‌سازی از شبکه درشت‌تر استفاده شود، بهتر است از روش توابع جداره استاندارد با توجه به امکان قرار دادن اولین گره در فاصله‌ی y^+ در حدود ۱۱/۲۵ و عدم نیاز به شبکه بسیار ریز در نزدیکی جداره استفاده شود. اما در صورتی که از شبکه‌های ریزتر استفاده شود شاید استفاده از روش رویکرد نزدیک جداره اصلاح‌شده بدلیل نیاز به قرار دادن اولین گره در نزدیکی جداره بطوریکه y^+ در حدود ۱ باشد، مناسب‌تر بنظر می‌رسد.

همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود در $x=0.9$ m توزیع سرعت بدست آمده از رویکرد نزدیک جداره اصلاح شده و توابع جداره استاندارد در نزدیکی بستر و در قسمت‌های میانی ارتفاع جریان چگالی نسبتاً مشابه است. در نزدیکی جداره روش توابع جداره غیرمتعالی بخوبی دو روش دیگر، سرعت را شبیه‌سازی نکرده است. نتیجه این روش نسبتاً مشابه با نتیجه شبیه‌سازی عددی گربر و همکاران است. آنها نیز از روش توابع جداره غیرمتعالی استفاده نموده بودند. در قسمت بالای جریان تشابه بیشتری بین نتایج روش‌های توابع جداره استاندارد و توابع جداره غیرمتعالی وجود دارد. بر اساس مقادیر MAE و RMSE در جدول ۲ اگر چه تفاوت جدی در روش‌های مختلف وجود ندارد، اما نتایج رویکرد نزدیک جداره اصلاح شده نسبت به دو روش دیگر مقداری بهتر بوده است. در $x=2.4$ m در نواحی نزدیک جداره روش توابع جداره استاندارد پیش‌بینی توزیع سرعت را بهتر از دو روش دیگر انجام داده است. در جدول ۲ مقادیر MAE و RMSE این روش نسبت به دو روش دیگر مقدار کمتری نشان می‌دهد. اما در بالای جریان چگالی یعنی در محدوده مرز بین جریان چگالی و سیال اطراف روش توابع جداره غیرمتعالی در تطابق نزدیک‌تری با نتایج آزمایشگاهی قرار دارد. در خصوص توزیع چگالی در $x=0.9$ m تفاوت عمده‌ای بین روش‌های مختلف مشاهده نمی‌شود. البته بر اساس مقادیر MAE و RMSE در جدول ۳ نتایج روش‌های توابع جداره استاندارد و رویکرد نزدیک جداره اصلاح شده تقریباً یکسان بوده و نسبت به روش توابع جداره غیرمتعالی نتایج نسبتاً بهتری داشته‌اند. در $x=2.4$ m، رویکرد نزدیک جداره اصلاح شده توزیع چگالی را در نزدیکی جداره تا $y/y_{0.5}=1$ نسبت به دو روش دیگر نسبتاً بهتر پیش‌بینی نموده است. اما بالاتر از حدود $y/y_{0.5}=1.1$ نتایج توابع دیواره تطابق بهتری با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند. علت این امر می‌تواند درشت‌تر شدن مش در این ناحیه برای روش مدل‌سازی نزدیک دیواره باشد. بطور کلی مقادیر MAE و RMSE در جدول ۳ عملکرد نسبتاً مناسب‌تر رویکرد نزدیک جداره اصلاح شده را نسبت به روش‌های توابع جداره تایید می‌کنند. در خصوص تغییر رفتار روش‌های مختلف در شبیه‌سازی مشخصات جریان در موقعیت‌های متفاوت می‌توان اشاره نمود که ماهیت این جریان نیز در طول تغییرات عمده‌ای نشان می‌دهد، بطوریکه در ورودی ارتفاع آن کمتر بوده و مقادیر سرعت و چگالی

- [12] J. S. Salinas, S. Balachandar, S. L. Zúñiga, et al., "On the definition, evolution, and properties of the outer edge of gravity currents: A direct-numerical and large-eddy simulation study," *Physics of Fluids*, vol. 35, p. 016610, 2023.
- [13] S. Venuleo, D. Pokrajac, T. Tokyay, G. Constantinescu, A. J. Schleiss, and M. J. Franca, "Parameterization and Results of SWE for Gravity Currents Are Sensitive to the Definition of Depth," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 147, no. 5, p. 04021016, 2021.
- [14] M. Brito, R. M. L. Ferreira, A. Sousa, R. Farias, G. Di Lollo, A. M. Ricardo, and L. Gil, "LES validation of lock-exchange density currents interacting with an emergent bluff obstacle," *Environmental Fluid Mechanics*, vol. 22, pp. 1055–1079, 2022.
- [15] J. Kechiche, H. Mhiri, G. Le Palec, and P. Bournot, "Application of low Reynolds number k-epsilon turbulence models to the study of turbulent wall jets," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 43, pp. 201–211, 2004.
- [16] H. Huang, J. Imran, and C. Pirmez, "Numerical study of turbidity currents with sudden-release and sustained-inflow mechanism," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 134, pp. 1199–1208, 2008.
- [17] H. Afshin, B. Firoozabadi, and M. Rad, "Hydrodynamics analysis of density currents," *IJE Transactions B: Applications*, vol. 21, no. 3, 2008.
- [18] A. Eghbalzadeh, M. M. Namin, S. A. A. Salehi, and B. Firoozabadi, "URNS simulation of 2D continuous and discontinuous gravity currents," *Journal of Applied Sciences*, vol. 8, pp. 2801–288, 2008.
- [19] A. Eghbalzadeh, M. Namin, S. A. A. Salehi Neishaboury, and M. Javan, "Two-dimensional numerical simulation of discontinuous saline density currents," *International Journal of Engineering Sciences*, vol. 19, no. 8, pp. 9–19, 2008.
- [20] A. Mehdizadeh and B. Firoozabadi, "Simulation of a density current turbulent flow employing different RANS models: A Comparison Study," *Mechanical Engineering*, vol. 16, pp. 53–63, 2009.
- [21] J. Paik, A. Eghbalzadeh, and F. Sotiropoulos, "Three-dimensional unsteady RANS modeling of discontinuous gravity currents in rectangular domain," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 135, no. 6, 2009.
- ## References
- [1] J. E. Simpson, *Gravity Currents in the Environment and the Laboratory*, Ellis Harwood, Chichester, U.K., 1987.
- [2] M. Rasmussen, S. Dutta, B. T. Neilson, and B. M. Crookston, "CFD Model of the Density-Driven Bidirectional Flows through the West Crack Breach in the Great Salt Lake Causeway," *Water*, vol. 13, no. 17, p. 2423, 2021.
- [3] G. Parker, M. Garcia, Y. Fukushima, and W. Yu, "Experiments on turbidity currents over an erodible bed," *Journal of Hydraulic Research*, vol. 25, pp. 123–147, 1987.
- [4] M. Garcia, "Hydraulic jumps in sediment-driven bottom currents," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 119, pp. 1094–1117, 1993.
- [5] L. P. Thomas, S. B. Dalziel, and B. M. Marino, "The structure of the head of an inertial gravity current determined by particle-tracking velocimetry," *Experiments in Fluids*, vol. 34, pp. 708–716, 2003.
- [6] R. L. Fernandez and J. Imberger, "Bed roughness induced entrainment in a high Richardson number underflow," *Journal of Hydraulic Research*, vol. 44, pp. 725–738, 2006.
- [7] G. Gerber, G. Diedericks, and G. R. Basson, "Particle image velocimetry measurements and numerical modeling of a saline density current," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 137, pp. 333–342, 2011.
- [8] C. Buckee, B. Kneller, and J. Peakall, "Turbulence structure in steady, solute-driven gravity currents," in *Particulate Gravity Currents*, W. McCaffrey, B. Kneller, and J. Peakall, Eds. Blackwell, Oxford, UK, pp. 173–187, 2009.
- [9] Y. Jiang and X. Liu, "Experimental and numerical investigation of density current over macro-roughness," *Environmental Fluid Mechanics*, vol. 18, pp. 97–116, 2018.
- [10] M. Hosseini, M. H. Fattahi, and S. Eslamian, "Experimental investigation of density current patterns using dynamic fractal analysis," *International Journal of Sediment Research*, vol. 36, no. 2, pp. 165–176, 2021.
- [11] F. Necker, C. Härtel, L. Kleiser, and E. Meiburg, "High-resolution simulations of particle-driven gravity currents," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 28, pp. 279–300, 2002.

- [22] S. Mahmodinia and M. Javan, "Vortical structures, entrainment and mixing process in the lateral discharge of the gravity current," *Environmental Fluid Mechanics*, vol. 21, pp. 1035–1067, 2021.
- [23] E. Vahed, M. Khosravi, and M. Javan, "Entrainment and mixing of unsteady gravity currents in compound channels," *International Journal of Modern Physics C*, vol. 35, no. 2, p. 2450129, 2024.
- [24] S. M. Salim and S. C. Cheah, "Wall y^+ Strategy for Dealing with Wall-bounded Turbulent Flows," *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, vol. 2175, pp. 2165–2170, 2009.
- [25] R. A. Henkes, F. van der Flugt, and C. Hoogendoorn, "Natural convection in a square cavity with low-Re turbulent fluids," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 34, pp. 1543–1557, 1991.
- [26] Y. Fukushima and N. Hayakawa, "Analysis of inclined wall plume by the k - ϵ turbulence model," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 57, pp. 455–465, 1990.
- [27] W. Rodi, *Turbulence Models and Their Applications in Hydraulics*, 2nd ed., IAHR, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 1993.
- [28] Y. Fukushima and M. Watanabe, "Numerical simulation of density underflow by the k - ϵ turbulence model," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 8, pp. 31–40, 1990.
- [29] Fluent Inc., *FLUENT 6.3 User's Guide*, 2006.