

**EXTENDED ABSTRACT**

## Investigating the Flow Pattern in Baffle Fishway Denil Type

Z. Mahmoudian<sup>1</sup>, S. Baharvand<sup>2</sup> and B. Lashkar-Ara<sup>3\*</sup>

- 1- Master's Degree Student, Civil Engineering Department, Jund-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.
- 2- Master's Degree Student, Civil Engineering Department, Jund-Shapur University of Technology, Dezful, Iran.
- 3\*- Corresponding author, associate professor of civil engineering, Jund-Shapur University of Technology, Dezful, Iran. (*Babak\_Lashkarara@yahoo.com*).

Received: 9 September 2017

Revised: 14 January 2018

Accepted: 16 January 2018

**Keywords:** Turbulent, Denil, Fishway, Baffle, CFD. **DOI:** 10.22055/jise.2019.23693.1689.

### Introduction

Denil fishway contains a direct rectangular channel in different slope rates associated with special baffles inside the channel. The layout of the baffles provides an energy dissipation process which provides an acceptable operating condition for passing the fish in continues path along the channel. Denil fishway divides the current to two different parts, including the main current located at the middle of the channel and lateral currents along the frame position. The interaction between main and lateral currents provides the main process of mass and acceleration movement and concludes a significant energy reduction based on the turbulent process. In the other words, it can be concluded that the frequent baffles make the channel very rough, which results in a suitable condition for migrating fishes to the upstream (Cea et al., 2007).

Rajaratnam and Katapodis (1983) conducted common research on the hydraulic of the fishway structures. They focused on the Denil fishway as one of the most important fishway structures among different types. The result of their study on the Denil fishway is the developed equation for measuring the discharge of the flow in the channel in various geometric scenarios. The physical model of the Denil fishway was constructed in the hydraulic laboratory at Alberta university, and the flow rate and velocity profiles were measured using the electromagnetic flowmeter and miniature velocimeter, respectively. Rajaratnam and Katapodis (1983) introduced six different Denil fishway types. The result of this study has shown that the output data are relatively similar to the Denil type 2. Equations (1), (2) are the main equations of the Denil fishway type 2 based on Rajaratnam and Katapodis (1983) studies.

$$Q_* = 0.94(y_o/b_o)^2 \quad (1)$$

$$U_* = 0.76(Q_*)^{0.6} \quad (2)$$

Where  $Q_*$  shows the dimensionless flow rate, which can be calculated using equation (3),  $y_0$  is the flow depth on the fishway baffles,  $b_0$  is the interior width of the fishway's baffles, and  $U_*$  refers to the dimensionless velocity, which can be calculated using equation (4).

$$Q_* = Q / \sqrt{g S_o b_o^5} \quad (3)$$

$$U_* = u_m / \sqrt{g S_0 b_o} \quad (4)$$

Where  $Q$  is the flow rate,  $S_0$  is the slope of the bed, and  $u_m$  is the maximum velocity, which can be determined using the velocity profile (Rajaratnam and Katapodis, 1983). Wang and Chanson (2017) studied the hydrodynamic of the fishway in different rough and smooth bed scenarios. They were taking series of photos from the fish body in the fishway to figure out the path direction of the swimming fish. They also used the proposed fish swimming path to determine the velocity and acceleration fluctuations. They found that more bed roughness would bring better conditions for fish swimming along its path. In addition, their study showed that fishes have the best reaction against different forces, including drag, hanging, and gravity which led to finding the safest path for migrating upstream of the channel (Wang and Chanson, 2017). Considering hydro environmental issues, and in order to reduce concerns about the implementation of dam construction projects, providing the best condition for fish passing to the upstream should be taken into account for each project. In this study, flow patterns of the Denil fishway type 2 were investigated by the computational fluid dynamics method. Also, the possibility of the safe path for fish swimming in different frame angles was determined.

### Methodology

FLOW-3D was used to simulate different geometries and operating conditions. Several attempts have been made to validate the model with the presented model by Rajaratnam and Katapodis (1983). Mesh independency was investigated in 21 try and error investigations. As a result, the total amount of the mesh in the limited boundary was calculated as 201,400 with aspect ratios close to 1.008 in all three dimensions. A solid model for the fishway was created by AutoCAD 3D modeling software and imported as a main solid file to the FLOW-3D. Figure (1) illustrates the 3-dimensional solid model after the validation process. The solid flume includes a 20% slope surface, 16 baffles with different angles compared to the ramp's bed ( $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ), and a channel width of 1 m and 7.35 m long.

### CFD modeling using FLOW-3D Software

Flow field consists of four main equations, including momentum equations in three dimensions and the continues equation. There is no other theoretical approach to solve the flow field equations other than using approximate solutions. FLOW-3D solves the flow field equations based on the finite volume method which is a highly used type of numerical solution methods (Hirt and Nichols, 1981).

There are different turbulent models which can be applied to the flow field cells, including Spalart-Allmaras, Standard K- $\epsilon$ , RNG K- $\epsilon$ , Realizable K- $\epsilon$ , and Reynolds Stress Model. Based on literature reviews, RNG applied to the model, which is a robust, reasonably accurate, and robust turbulent model for modeling flow in fishway channels (Baharvand and Lashkar-Ara, 2017). RNG turbulent model is completely applicable for modeling flow field with frequent vortices. Based on the physical model data, different inlet volume flow rates were assigned to the model, and the specified pressure was assigned to the outlet boundary. Sidewalls and bed were assigned to the wall boundary condition, and the top surface was assigned to the free surface boundary condition. Measurement stations used in this study can be found in figure (1).

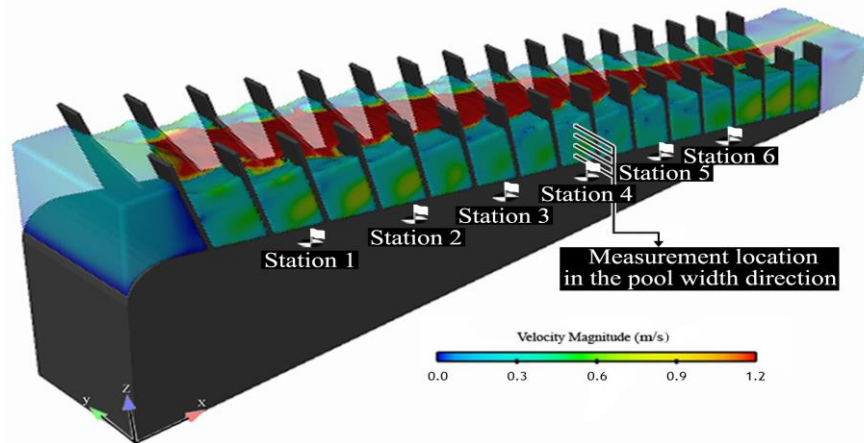


Fig. 1- Isometric view of the model and position of measuring stations

## Results

### Flow discharge during simulation

Based on the volume flow rate distribution among the simulation time, the volume flow rate was relatively consistent after 55 sec. Therefore, 60 seconds was used as the total time of the modeling in different scenarios (Fig. 2).

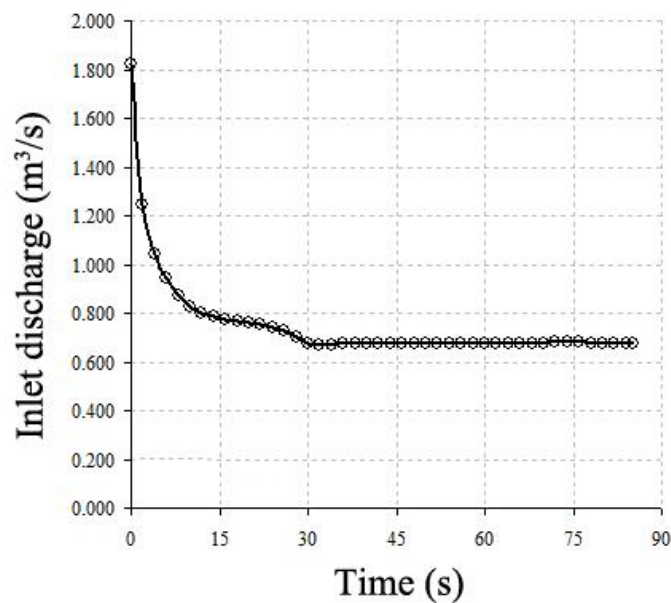


Fig. 2- Volume flow rate changes in the middle section of the structure during flow simulation

### Velocity Profile Result

Velocity distribution in three directions (x,y,z) were exported to figure out the applicability of the rotational currents (vortices) on fish migration. Velocity distribution along the water depth was investigated in 45- and 60-degree baffles in order to find the best geometric scenario for passing fishes to the upstream. Because of the effect of the upstream and downstream pools on the flow field, the middle pool (Station No.4) was selected as the main measurement pool.

### Flow pattern in pools

Figure (3) shows two different angles of the baffles in the modeled Denil fishway. As can be seen, there are two general flow patterns existing inside the Denil fishway channels, including the direct flow and lateral rationing flow back of the baffles. The primary current flowing toward downstream from the center of the channel cone and the openings of the Denil baffles.

Considering the potential of pools in creating standing water, the incoming flow by colliding with standing water in the pools' intervals, creates vortices flow around the transverse axis of the pools.

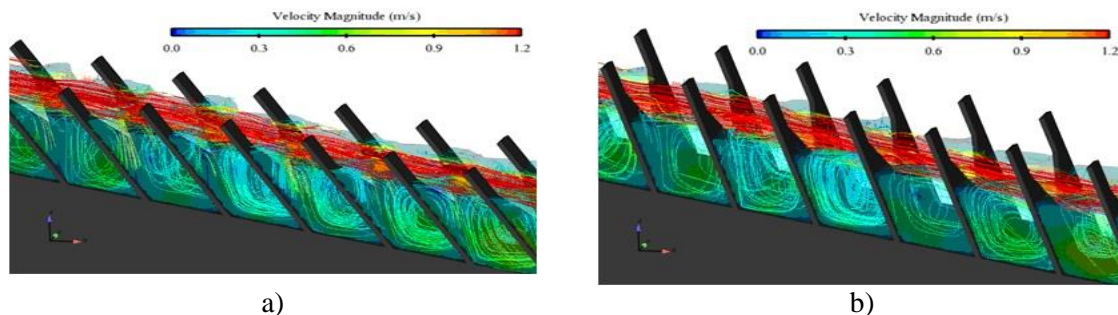


Fig. 3- Flow pattern in Denil fishway by: a) baffle angle 45°, b) baffle angle 60°

### Conclusion

Based on the importance of the fishway structures, especially Denil types, the hydraulic condition of the current at the mentioned structure with 45- and 60-degree Denil baffles was investigated. The results showed a high accuracy of the FLOW-3D to model Denil fishway based on the Rajaratnam and Katapodis (1983) experimental data. The velocity distribution in three different axes for each geometric scenario was proposed. Efforts have been done to figure out the best geometric condition for developing a safe path for swimming. Different comparisons between velocity data proved that Denil fishway with 45-degree baffles provides significantly the safest safe path for fish passage compared to the 60-degree baffles. Also, the turbulent-intensity investigations determined that Denil fishway in both geometric scenarios have significant ability to dissipate the energy of the water. In addition, the existence of the low-velocity areas in 45-degree frame, compared to 60-degree baffles, leads to having more resting pools and safe paths for fish migration.

### References

- 1- Baharvand, S., Lashkar-Ara, B., 2017. Determining the Effective of Resting Pool Area in Vertical Slot Fishways Type 1 to Pass Chinook Salmon. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 48(4), pp.1-12
- 2- Cea, L., Pena, L., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M.E. and Peña, E., 2007. Application of several depth-averaged turbulence models to simulate flow in vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(2), pp.160-172.
- 3- Hirt, C.W. and Nichols, B.D., 1981. Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of computational physics*, 39 (1), pp.201-225.
- 4- Rajaratnam, N., Katapodis, C., (1983). A Review and Laboratory Study of Hydraulic of Denil Fisheries. Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Science 1145, *Fisheries and Oceans, Winnipeg, Canada*, 181 pp.
- 5- Wang, H. and Chanson, H., 2017. How a better understanding of Fish-Hydrodynamics Interactions might enhance upstream fish passage in culverts.



## بررسی الگوی جریان در راه‌ماهی با دیواره‌ی آرام‌کننده از نوع دنیل

زهرا محمودیان<sup>۱</sup>، سامان بهاروند<sup>۲</sup> و بابک لشکرآرا<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی دوره کارشناس ارشد مهندسی عمران دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، ایران.

۲- دانشجوی دوره کارشناس ارشد مهندسی عمران دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، ایران.

۳- نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی عمران دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، ایران. Babak\_Lashkarara@yahoo.com

پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۲۶

بازنگری: ۱۳۹۶/۱۰/۲۴

دریافت: ۱۳۹۶/۶/۱۸

### چکیده

الگوی جریان در دهانه ورودی و مجرای اصلی راه‌ماهی، نقش به‌سزایی بر چگونگی شکل و اندازه معبر امن جهت جذب و صعود ماهی‌ها به بالادست رودخانه بازی می‌نماید. هم‌چنین شناخت کافی از چگونگی توزیع سرعت عرضی و عمقی جهت تشخیص یک دالان امن در راه‌ماهی ضروری است. در این تحقیق با استفاده از شبیه‌سازی عددی به بررسی اثر زاویه قاب راه‌ماهی دنیل بر چگونگی الگوی جریان و نحوه توزیع سرعت عرضی و عمقی جریان پرداخته شده است. برای این منظور از یک فلوم با شیب طولی ۲۰ درصد، عرض یک متر و طول ۷/۳۵ متر استفاده گردید. نحوه‌ی توزیع سرعت در سه راستای طولی، عرضی و عمقی تحت دو سناریو مختلف زاویه قرارگیری قاب با زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که به واسطه وجود جریان‌های چرخشی در اعماق نسبی  $y/y_{max}$  کوچک‌تر از ۰/۵، یک نیروی پیش‌ران بر کالبد ماهی القا می‌شود و شرایط صعود را برای آن‌ها تسهیل می‌نماید. بررسی‌ها نشان داد که به‌واسطه عدم تقارن توزیع عرضی سرعت، ممکن است شرایطی در مسیر عبوری ماهی به‌وجود آید که منجر به برخورد ماهی به دیواره‌های آرام‌کننده شده و آن‌ها را زخمی نماید. هم‌چنین اعمال یک نیروی القایی بالابرنده بر کالبد ماهی ممکن است شرایط خروج ماهی را از دالان پیش‌ران و ورود آن به نواحی پرسرعت فراهم آورد. بررسی‌ها گویای آن است که شرایط تشکیل دالان امن در سناریوی با قاب ۴۵ درجه حدوداً ۴۵ درصد بیشتر از زاویه‌ی قاب ۶۰ درجه می‌باشد.

کلید واژه‌ها: آشفتنگی، دنیل، راه‌ماهی، شبیه‌سازی عددی، قاب.

### مقدمه

می‌باشد. سازه راه‌ماهی را می‌توان در دسته سازه‌های هیدرولیکی-

محیط‌زیستی قرار داد. زیرا این سازه علاوه بر لزوم برخورداری از خصوصیات هیدرولیکی، می‌بایست از تناسب لازم با پارامترهای اکولوژیکی مورد نیاز ماهیان برای صعود به بالادست رودخانه به منظور تأمین مواد غذایی از یک‌سو و دسترسی به محل مناسبی برای تخم‌ریزی نیز برخوردار باشد.

از لحاظ هیدرولیکی سازه‌ی راه‌ماهی جزو سازه‌های مستهلک‌کننده‌ی انرژی محسوب شده که از قابلیت انتقال ماهیان به بالادست نیز برخوردار است (Lashkarara et al., 2016). به همین منظور باید با خصوصیات هیدرولیکی جریان و شرایط بهینه اکولوژیکی ماهیان آشنا بود تا بتوان بهترین سازه راه‌ماهی را با توجه به قیده‌های ذکر شده مورد طراحی و استفاده قرار داد (Rajaratnam and Katapodis, 1984). عدم تناسب شکل هندسی سازه با خصوصیات اکوهیدرولیکی لازم، ممکن است منجر به زخمی‌شدن ماهی‌ها در طول مهاجرت و تلف‌شدن آن‌ها شود. بنابراین طراحی و احداث یک راه‌ماهی ایمن در مجاورت سازه‌های متقاطع با آبراه‌ها ضروری است.

اکوسیستم آب‌های شیرین به‌واسطه وجود طیف گسترده‌ای از موجودات زنده که هر یک از روابط و ضوابط زیست‌محیطی پیچیده‌ای برخوردارند، توسط آبزیان مورد سکونت قرار گرفته است. با توجه به آن‌که اکوسیستم آب شیرین در معرض بیشترین خطر نابودی در سراسر جهان قرار دارد، لذا مدیریت آن نیازمند درک جامعی از روابط زیست‌محیطی می‌باشد. پیچیدگی شرایط جریان از یک‌سو و عدم دسترسی به ابزارهای اندازه‌گیری پیشرفته از سوی دیگر، منجر به ناشناخته‌ماندن بسیاری از خصوصیات هیدرولیکی اکوسیستم‌های آبی گشته است. ماهیان ممکن است در اثر تغییرات زیست‌محیطی و یا به‌طور غریزی برای تخم‌ریزی به بالادست مهاجرت نمایند. در این میان آبشارهای طبیعی و سدهای انحرافی از جمله مواعنی هستند که ممکن است از مهاجرت ماهی‌ها به بالادست جریان جلوگیری کرده و یا مهاجرت آن‌ها را به تأخیر بیندازند (Lashkarara et al., 2016). یکی دیگر از مشکلاتی که سدهای انحرافی برای ماهی‌ها ایجاد می‌کنند، زیر آب بردن محل‌های مناسب تخم‌ریزی ماهیان

استفاده در این تحقیق در دانشگاه آلبرتا کانادا ساخته شد و برای اندازه‌گیری دبی و پروفیل سرعت به‌ترتیب از یک دبی‌سنج مغناطیسی و یک سرعت سنج مینیاتوری استفاده شد. نتایج Katapodis و Rajaratnam (1983) منجر به معرفی شش تیپ از انواع راه‌ماهی دنیل گردید. با توجه به آن‌که نتایج این مقاله با تیپ دو مطالعه‌های این محققین مطابقت دارد، لذا نتایج حاصل از تحقیقات آن‌ها در قالب روابط (۱) و (۲) به شرح زیر گزارش می‌شود:

$$Q_* = 0.94(y_o/b_o)^2 \quad (1)$$

$$U_* = 0.76(Q_*)^{0.6} \quad (2)$$

در این روابط  $Q_*$  دبی مشخصه نام دارد که از رابطه (۳) تعیین خواهد شد،  $y_o$ : عمق جریان روی پره‌های راه‌ماهی،  $b_o$ : عرض داخلی قاب راه‌ماهی و  $U_*$ : سرعت مشخصه می‌باشد که از رابطه (۴) تعیین می‌شود:

$$Q_* = Q / \sqrt{g S_o b_o^5} \quad (3)$$

$$U_* = u_m / \sqrt{g S_o b_o} \quad (4)$$

در این روابط  $Q$  دبی جریان،  $S_o$  شیب کف راه‌ماهی با افق و  $u_m$  حداکثر سرعت جریان می‌باشد که با استفاده از پروفیل سرعت تعیین خواهد شد (Rajaratnam and Katopodis, 1983). Rajaratnam et al. (1986) تحقیقات دیگری را روی راه‌ماهی دنیل انجام دادند. در این پژوهش یک سازه راه‌ماهی دنیل دو طبقه مورد آزمایش قرار گرفت و علاوه بر یافتن منحنی دبی-اشل به این نتیجه رسیدند که عامل اصلی طراحی سازه راه‌ماهی، ارزیابی توان هیدرولیکی و میزان اتلاف انرژی راه‌ماهی می‌باشد. آن‌ها با این رویکرد راه‌ماهی‌ها را به سه دسته راه‌ماهی استخر و سرریز، شکاف قائم و دنیل تقسیم‌بندی کرده‌اند.

Noonan et al. (2012) مطالعاتی را پیرامون ارزیابی راندمان عبور ماهی‌ها از انواع راه‌ماهی ارائه نمودند. آن‌ها برای این منظور از داده‌های مقالات پیشین بهره بردند. نتایج نشان داد که راندمان عبور برای ماهی‌های سالمون از ماهی‌های غیر سالمون موفق‌تر بوده است.

Armstrong et al. (2010) دفترچه راهنمای برای طراحی راه‌ماهی منتشر نموده است. این راهنما با توجه به کارایی و عملکرد هیدرولیکی و اکولوژیکی راه‌ماهی‌ها اقدام به طبقه‌بندی انواع راه‌ماهی شامل دو گروه راه‌ماهی‌های استخری و راه‌ماهی‌های بافل‌دار نموده است. این طبقه‌بندی به عواملی

سازه‌ی راه‌ماهی همراه دیواره آرام‌کننده با چیدمان‌های مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است. در این میان سازه‌ی راه‌ماهی دنیل استاندارد یکی از پرکاربردترین این دسته از سازه‌ها می‌باشد که در کشور کانادا مورد استفاده فراوان قرار گرفته است. طرح راه‌ماهی ایمن مستلزم در نظر گرفتن ملاحظات هیدرولیکی لازم می‌باشد. عدم رعایت شرایط هیدرولیکی، ممکن است به مرور زمان موجبات انقراض گونه‌ای از ماهی را سبب شود. لذا طراحی و احداث راه‌ماهی از نقطه‌نظر زیست‌محیطی بسیار بااهمیت می‌باشد.

به‌منظور مدیریت و حفاظت از محیط زیست، لازم است تا از عکس‌العمل هیدرودینامیکی آرزایی که در معرض این تغییرات قرار می‌گیرند، شناخت جامع و کاملی در دسترس باشد. در این میان می‌توان به عکس‌العمل میزان حداکثر سرعت در مقابل عمق حداقل جریان و هم‌چنین شدت آشفتگی اشاره کرد.

استفاده از ابزار دقیق برای شناسایی مسائل پیرامون آشفتگی با توجه به ماهیت این خصوصیت هیدرودینامیکی گاهی با محدودیت‌هایی روبرو می‌باشد. برای این منظور بهره‌گیری از شبیه‌سازی عددی می‌تواند راه‌گشای مفیدی برای غلبه بر این چالش باشد.

راه‌ماهی دنیل از یک کانال مستقیم مستطیلی شیب‌دار تشکیل گردیده که درون آن قاب‌هایی قرار گرفته‌اند. نحوه قرارگیری قاب‌ها باعث اتلاف انرژی جریان شده و شرایط نسبتاً مناسبی را برای عبور ماهی در یک مسیر مستقیم و پیوسته فراهم می‌سازد. جریان در راه‌ماهی دنیل، مرکب از دو بخش متقابل است. جریان اصلی در بخش مرکزی کانال و یک سری جریان‌های منظم جانبی که هر کدام از موارد مذکور هم‌سو با مسیر تعیین‌شده توسط پره‌ها عمل می‌کنند. تعامل بین جریان‌های اصلی و جانبی، روند اصلی انتقال جرم و شتاب را فراهم آورده و علاوه بر یک تلاطم قابل ملاحظه، کاهش انرژی چشم‌گیری را رقم می‌زند. با نگاهی ویژه می‌توان چنین بیان نمود که وجود پره‌ها به‌عنوان عناصر بسیار بزرگ زبری، راه‌ماهی‌ها را به فلوم بسیار زبری تبدیل می‌نماید (Cea et al., 2007).

از راه‌ماهی مدل دنیل به‌عنوان یکی از مدل‌های کارآمد مستهلک‌کننده انرژی یاد می‌شود. هنگامی که دبی در حد پایینی باشد جریان در راه‌ماهی حالت غوطه‌وری داشته که با بالاتر رفتن عمق آب به حالت روگذری میل می‌کند. اگر چه در حالت روگذری اصطکاک جریان بالاتر بوده و جریان پایدارتر به نظر می‌رسد؛ اما با این وجود افزایش عمق باعث نمی‌شود که سرعت متوسط جریان به میزان زیادی تغییر کند.

Katapodis و Rajaratnam (1983) تحقیقات مشترکی را روی هیدرولیک جریان در راه‌ماهی آغاز کردند و عمده فعالیت خود را روی راه‌ماهی نوع دنیل معطوف داشتند و نتیجه کار آن‌ها دست‌یابی به ضوابط طراحی بهینه راه‌ماهی دنیل برای دبی و شیب‌های مختلف بوده است. مدل فیزیکی سازه راه‌ماهی مورد

سرعت‌های انفجاری و سرعت حرکت مداوم مانند سایر فاکتورهای زیست‌محیطی بسته به نوع و اندازه ماهی متغیر می‌باشد، بنابراین راه‌ماهی برای عبور ضعیف‌ترین شناگر از انواع مورد نظر طراحی می‌شود. شناخت انواع ماهی‌های مهاجر، میزان فراوانی و فصل مهاجرت آن‌ها، اندازه و ابعاد ماهی‌ها، همچنین سرعت شناکردن و بررسی رفتار آن‌ها از جمله اطلاعات اکولوژیکی لازم برای طراحی است. سرعت‌های شنا، حدودی را برای حداکثر سرعت آب در راه‌ماهی مشخص می‌کند و به طراح اجازه می‌دهد که شرایط جریان را به نحوی برقرار کند که ماهی بدون خستگی یا تأخیر طولانی در مسیری امن شنا کند. مطالعه رفتار ماهی‌ها در انتخاب نوع راه‌ماهی مؤثر است. به‌طوری‌که مشخص شده است، بعضی از انواع ماهی‌ها یک نوع راه‌ماهی را از میان انواع دیگر ترجیح می‌دهند.

با توجه به اهمیت مسائل زیست‌محیطی در جوامع امروزی و همچنین رفع نگرانی در اجرای پروژه‌های سد سازی، فراهم آوردن شرایط صعود ماهیان به بالادست از اهمیت چشم‌گیری برخوردار است. با توجه به اهمیت سازه راه‌ماهی در حفظ بقای گونه‌های مختلف ماهیان، امروزه بهینه‌سازی راه‌ماهی‌ها مورد توجه کارشناسان قرار گرفته است. در این پژوهش تلاش شده است تا با بهره‌گیری از نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی، نسبت به شبیه‌سازی الگوی جریان عبوری از راه‌ماهی دنیل اقدام گردد و همچنین با تغییر در زاویه دیواره‌های آرام‌کننده جریان شرایط ایجاد دالان امن برای غلبه توان ماهی بر سرعت جریان عبوری از آن مورد بررسی قرار گیرد.

### مواد و روش‌ها

برای مدل کردن راه‌ماهی دنیل، نخست از نرم‌افزار اتوکد برای ساخت نمایه‌ی صلب بهره‌گیری شد و رفتار هیدرودینامیکی جریان عبوری از آن به کمک نرم‌افزار Flow-3D مورد ارزیابی قرار گرفت. این نرم‌افزار یک مدل چندجانبه و سازگار با شرایط پیچیده‌ی جریان در حالات دو بعدی و سه بعدی است. هندسه‌ی نمایه‌ی صلب شامل یک فلوم با سطح شیب‌دار تحت شیب ۲۰ درصد، ۱۶ عدد قاب تحت زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به کف رمپ در مجرای به عرض یک متر با اختلاف ارتفاع دو سر رمپ ۱/۵۷ متر و طول رمپ ۷/۳۵ متر با مقیاس ۱:۵ مدل گردید. شرایط اولیه‌ی این مدل نیز بر پایه‌ی سیال آب زلال با دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد انتخاب شد. برای مش‌بندی مدل، تلاش شد تا تعداد مش بهینه از نظر دقت بالا و کاهش زمان هر آزمایش، تعیین گردد. شکل (۱) نمایی از هندسه صلب سازه راه‌ماهی دنیل معرفی شده به مدل را نشان می‌دهد.

همچون توپوگرافی محلی، جریان عبوری از رودخانه و گونه‌های مختلف آبی سازگار با محیط‌زیست وابسته هستند.

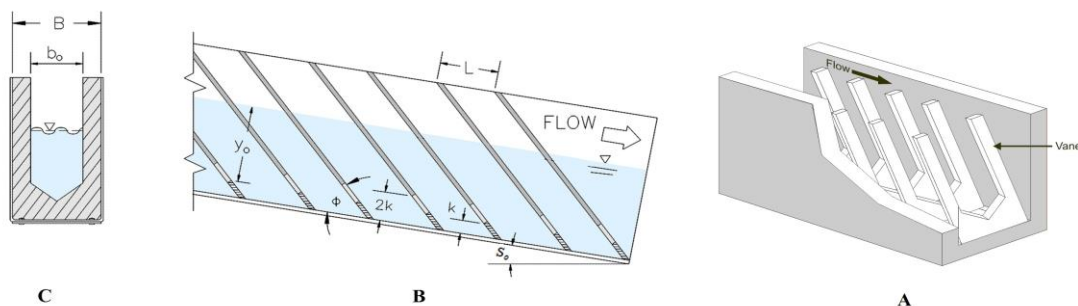
عوامل مؤثر در شناکردن ماهی‌ها فقط به میدان سرعت و عمق آب محدود نمی‌شود، بلکه میزان آشفته‌گی حاصل از اصطکاک و همچنین جریان‌های چرخشی نیز از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند. آشفته‌گی اضافی می‌تواند به‌عنوان یک عامل بازدارنده در حرکت ماهی‌ها محسوب شده و مسیر صعود آن‌ها را صعب‌العبور نماید.

عملکرد شنای ماهی به سه دسته شنای پایدار، شنای مداوم و شنای انفجاری تقسیم‌بندی می‌شود. سرعت پایدار سرعتی است که ماهی می‌تواند به‌طور مستمر و نامحدود شنای خود را برای مدت طولانی بیش از ۲۰۰ دقیقه بدون خستگی عضلانی حفظ کند. در سرعت مداوم ماهی می‌تواند به مدت ۲۰ ثانیه تا ۲۰۰ دقیقه با حفظ خستگی به شنای خود ادامه دهد و عملکرد شنای انفجاری، بالاترین سرعتی است که ماهی می‌تواند فقط برای دوره‌های زمانی کوتاه (کمتر از ۲۰ ثانیه) از آن استفاده کند (Beamish, 1978).

Silva et al. (2011) تاثیر آشفته‌گی جریان روی رفتار شنای ماهی کپور در دو رده مختلف سنی در سه تیپ راه‌ماهی استخری مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق با استفاده از سرعت‌سنج صوتی داپلر (ADV) پارامترهای سینماتیک جریان شامل سرعت، انرژی جنبشی آشفته، تنش برشی رینولدز و شدت آشفته‌گی مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از این نتایج تعداد ماهی و زمان گذر آن‌ها به بالادست مشخص گردید. علاوه بر این آنان تنش برشی رینولدز و اندازه گرداب‌های ایجادشده را بهترین عامل در توضیح رفتارشناسی ماهی دانستند که هر دو عامل به شدت تابع ویژگی‌های هندسی راه‌ماهی می‌باشند، به‌گونه‌ای که ماهی‌های کوچک در برابر آشفته‌گی و سرعت‌های بالا زخمی و از بین می‌روند که این عامل می‌تواند مانعی در برابر مهاجرت آنان به بالادست گردد.

Chanson and Wang (2017) به بررسی آزمایش‌های پیرامون هیدرودینامیک ماهی در محیط با بستر زبر و صاف پرداختند. آن‌ها با تصویربرداری و ضبط ویدئو از یک نقطه از بدن ماهی (چشم) موقعیت ماهی در طول زمان را اندازه‌گیری کرده که با استفاده از آن به نوسانات سرعت و شتاب دست پیدا کردند و به این نتیجه رسیدند که ماهی در محیط زبر بهترین عملکرد را در ارتباط با نیروهای دینامیکی از جمله نیروی (درگ، پیش‌ران و گرانش) دارد و می‌تواند با شناکردن در دالان امن یا مناطقی هم‌چون مجاورت جداره‌ها کانال، گوشه‌ها که کمترین نوسانات سرعت را داراست، خود را به بالادست برساند.

انتظار می‌رود ماهی‌ها هنگام پریدن و گذشتن از روی سرریزها از سرعت انفجاری خود بهره‌گرفته و در درون استخرها از سرعت حرکت مداوم خود برای شناکردن استفاده کنند. با توجه به این‌که



**Fig 1- A view of Denil fishways parts a) The 3D view of the Danish fishway b) The longitudinal profile and technical specifications of the baffles c) Baffles specifications (Rajaratnam and Katopodis, 1983)**

شکل ۱- نمای از اجزای تشکیل دهنده راهمایی دنیل الف) نمای سه بعدی راهمایی دنیل ب) پروفیل طولی و مشخصات فنی نصب قاب ها ج) مشخصات قاب (Rajaratnam and Katopodis, 1983)

### آنالیز ابعادی

که در آن  $y_0/b_0$  عمق متوسط جریان بدون بعد در سازه را نشان می دهد. باتوجه به ایجاد دو نوع جریان مختلف در سازه راهمایی، ضریب  $C_f$  نشان دهنده میزان مقاومت جریان در مرز برخورد جریان گردابه ای و جت جریان خروجی از بازشدگی های قاب های اصلی در سازه Rajaratnam و Katopodis (1983) به صورت روابط (۸) تا (۱۲) تخمین زده شده است:

$$b_0 y_0 \gamma S_0 = \tau_0 (b_0 + 2y_0) = C_f \frac{\rho V^2}{2} (b_0 + 2y_0) \quad (8)$$

$$C_f = \frac{2g S_0 y_0}{V^2 (1 + 2y_0/b_0)} \quad (9)$$

از طرفی با استفاده از رابطه دبی می توان نوشت:

$$Q = b_0 y_0 V \quad (10)$$

$$V = \left[ \frac{2g S_0 b_0 y_0}{b_0 + 2y_0} \right]^{1/2} \frac{1}{\sqrt{C_f}} \quad (11)$$

$$\frac{Q}{\sqrt{g S_0 b_0^5}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{C_f}} \frac{(y_0/b_0)}{\sqrt{(2 + b_0/y_0)}} = f\left(\frac{y_0}{b_0}\right) \quad (12)$$

باتوجه به رابطه نهایی (رابطه ۱۲) پارامتر اصلی طراحی هیدرولیکی سازه راهمایی دنیل علاوه بر تأثیرپذیری از سرعت جریان پنهان در مؤلفه ای دبی جریان، مضربی از نسبت عمق متوسط جریان ایجاد شده درون سازه راهمایی می باشد. در نتیجه دو پارامتر عمق و سرعت نسبی در سازه راهمایی دنیل نقش اساسی در بررسی هیدرولیکی این نوع سازه ایفا می کنند.

### مدل سازی عددی با استفاده از نرم افزار Flow-3D

Flow-3D نرم افزاری قدرتمند در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی می باشد که برای کمک به تحقیق در زمینه رفتار دینامیکی مایعات و گازها، در موارد کاربردی و وسیع طراحی شده

باتوجه به مطالعه های انجام شده در شرایط آزمایشگاهی مدل سازه راهمایی، مؤلفه های هیدرولیکی اصلی جریان شامل:  $Q$  دبی جریان،  $S_0$  شیب بستر سازه،  $b_0$  عرض داخلی قاب،  $B$  عرض فلوم،  $C_f$  ضریب مقاومت میان جریان اصلی و جریان های گردابه ای،  $y_0$  عمق متوسط جریان،  $a$  فاصله قاب های دنیل از یکدیگر،  $\phi$  زاویه قاب نسبت به کف فلوم و  $g$  شتاب ثقل می باشد. باتوجه به مؤلفه های استخراج شده معادله کلی حاکم بر سازه راهمایی دنیل به صورت رابطه (۵) ارایه می گردد.

$$f(Q, S_0, b_0, B, C_f, y_0, L, \phi, g) = 0 \quad (5)$$

با استفاده از تئوری  $\pi$  باکینگهام و با در نظر گرفتن پارامترهای  $Q$  و  $b$  به عنوان متغیرهای تکراری، معادله بدون بعد حاکم بر راهمایی دنیل به شرح زیر می باشد:

$$f\left(\frac{Q}{\sqrt{g S_0 b_0}}, Fr, C_f, \frac{y_0}{b_0}, \frac{L}{b_0}, \frac{B}{b_0}, \phi\right) = 0 \quad (6)$$

مدل بررسی شده در پژوهش حاضر در شرایط هندسی ثابت  $L/b_0, B/b_0, \phi = cte$  بوده است. هم چنین رژیم جریان عبوری از کانال سازه راهمایی نشان گر شرایط جریان زیربحرانی  $Fr < 1$  است.

با توجه به تحقیقات Rajaratnam و Katopodis (1983) با مهم ترین مؤلفه طراحی هیدرولیکی مؤثر در بررسی سازوکار سازه راهمایی دنیل، دبی مشخصه ای جریان در حالت بدون بعد می باشد. در این تحقیق نیز از  $Q^*$  به عنوان دبی مشخصه ای جریان استفاده شد. پارامتر  $Q/\sqrt{g S_0 b_0}$  در رابطه (۶) بیانگر دبی مشخصه ای جریان  $Q^*$  است. لذا به منظور ساده سازی معادله های ارایه شده می توان معادله فوق را به صورت رابطه (۷) ساده سازی نمود.

$$f\left(\frac{Q}{\sqrt{g S_0 b_0}}, C_f, \frac{y_0}{b_0}\right) = 0 \quad Fr < 1 \quad (7)$$



معادله‌های حاکم بر حرکت سیال عبارتند از معادله پیوستگی و معادله مومنتم که برای جریان آشفتنه تراکم‌ناپذیر با لزجت و چگالی ثابت به صورت معادله‌های (۱۳) و (۱۴) بیان می‌شود:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} S_{ij} \quad (14)$$

در معادله‌های فوق  $u_i$ ،  $u_j$  به ترتیب مولفه سرعت در جهت  $x_i$  و  $x_j$ ، فشار کل،  $P$ ، چگالی سیال،  $\rho$ ، چگالی سیال،  $g_i$  شتاب ثقل در جهت  $x_i$ ،  $S_{ij}$  تانسور تنش بوده که برای جریان آشفتنه به صورت معادله‌ی (۱۵) بیان می‌شود:

$$S_{ij} = \left[ \rho(v_i + v_j) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \left[ \frac{2}{3} \rho(k + v_i) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \right] \quad (15)$$

در معادله‌های فوق  $v_i$  لزجت گردابه‌ای است که تابع خصوصیات جریان و آشفتگی است.  $\delta_{ij}$  برای کاربردی کردن تعریف لزجت گردابه‌ای استفاده می‌شود.  $k$  انرژی جنبشی آشفتگی بر واحد جرم،  $g_i$  شتاب ثقل در جهت  $x_i$ ،  $S_{ij}$  تانسور تنش بوده تنش‌برشی در جریان‌های آشفتنه شامل دو ترم بوده و علاوه بر تنش‌برشی ناشی از مؤلفه متوسط جریان، تنش‌برشی دیگری ناشی از مؤلفه‌های نوسانی سرعت ایجاد می‌شود که به تنش‌های رینولدز معروف بوده و توسط رابطه‌ی (۱۶) بیان می‌شود:

$$S_{ij} = -\rho \overline{u_i u_j} = \rho v_i \left( \frac{\partial u_i}{\partial x} + \frac{\partial u_j}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (16)$$

در معادله‌های فوق انرژی جنبشی آشفتگی بر واحد جرم توسط رابطه‌ی (۱۷) بیان می‌شود:

$$k = \frac{1}{2} \left( \overline{u_i^2} + \overline{u_j^2} + \overline{u_k^2} \right) \quad (17)$$

به‌منظور حل میدان جریان آشفتنه براساس معادله‌های پیوستگی و رینولدز، نیاز است تا تنش‌های رینولدز در معادله‌های به روش خاصی مدل شوند. در این شرایط برای یک جریان سه بعدی با چهار معادله (پیوستگی و حرکت در سه بعد)، چهار مجهول (سرعت در سه جهت عمود و فشار) به‌دست خواهند آمد.

باتوجه به مطالعه‌های صورت‌گرفته مناسب‌ترین مدل آشفتگی جریان برای مدل‌سازی جریان درون سازه‌ی راه‌ماهی دنیل  $k-\varepsilon$  در حالت RNG می‌باشد. مدل آشفتگی RNG باتوجه به تصحیح‌های صورت‌گرفته، مناسب برای بررسی جریان‌های چرخشی درون سازه‌های هیدرولیکی شناخته شده است.

#### مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ (RNG)

مدل آشفتگی  $k-\varepsilon$  (RNG) نخستین بار توسط Yakhot et

است. این برنامه برای حل معادله‌های میانگین رینولدزی ناویر-استوکس از روش حجم محدود استفاده کرده و سطح آزاد را به روش حجم سیال (VOF) به کار می‌برد. (Hirt and Nichols, 1981).

روش (VOF) براساس بخش کسری حجم سلول در هر شبکه محاسباتی است که توسط سیال پر شده است. از آنجایی که کسر حجمی  $F$  بیان‌کننده مقدار سیال در هر سلول می‌باشد، مقداری بین صفر و یک را اختیار می‌کند. در نواحی داخلی سیال مقدار کسر حجمی یک است و در خارج از آن و در نواحی گازی مقدار صفر را دارد. موقعیت سطح آزاد جایی است که کسر حجمی بین صفر و یک تغییر می‌کند.

مانع موجود در محدوده محاسباتی به روش FAVOR شناخته می‌شود. در این روش که توسط Hirt و Sicilian (1985) ارائه شده است برای تشخیص وجود مانع در هر سلول از اعدادی بین صفر و یک استفاده می‌شود. یک مربوط به حالتی است که تمام سلول توسط مانع پر شده و صفر مربوط به حالتی است که تمام سلول فضای خالی است. سلول‌هایی که فقط قسمتی از آن‌ها توسط مانع پر شده است، عددی بین صفر و یک دارند. استفاده از بخش سازنده مش بسیار آسان و در عین حال قدرتمند می‌باشد. Flow-3D از مش‌های راست‌گوشه در مختصات کارتزین و استوانه‌ای استفاده می‌کند. اشکال هندسی پیچیده هنگامی که در مش‌های راست‌گوشه قرار می‌گیرند، به روش FAVOR با اشغال کردن بخش یا تمام حجم و یا سطح سلول مدل می‌شوند. این موضوع اجازه تعریف هندسه و مش مستقل از هم را به کاربر می‌دهد و می‌توان هندسه ایجادشده را با ریز کردن ابعاد مش اصلاح نمود و خیلی راحت‌تر و سریع‌تر به جسم مطلوب رسید. در این بررسی برای تعریف شبکه محاسباتی از روش چند بلوک (Multi block) با بلوک‌های تو در تو (Nested block) استفاده شد. در این روش انتقال داده‌ها بین هر دو بلوک توسط سلول‌های مرزی ویژه انجام می‌شود. مقادیر فشار و سرعت در نقاط مورد نظر برای تحلیل نتایج با حفظ گرادیان‌ها به‌صورت خطی درونیابی استخراج می‌شود و ترکیبی از شرایط مرزی دیریکله و نیومن برای حل معادله پواسون فشار مورد استفاده قرار می‌گیرد. زمانی که برای فشار معادله پیوستگی حل می‌شود، دو نوع شرط مرزی را می‌توان برای مرزهای مشترک بلوک‌ها تعریف نمود. شرط نیومن زمانی که گرادیان فشار تعریف می‌شود و شرط دیریکله زمانی که فشار تعریف می‌شود. در Flow-3D شرط نوع نیومن در واقع سرعت را در مرز تعریف می‌کند. هر کدام از شرایط ذکر شده موافقان و منتقدان خود را دارند. شرط نیومن بقا جرم بهتری دارد ولی کندتر هم‌گرا شده و می‌توان از آن در میدان‌های فشار گسسته استفاده نمود. روش استفاده شده در این تحقیق هر دو روش را در هم‌زمان و در تمام مرزهای مشترک به کار می‌برد. با استفاده از این روش فرایند حل ساده و مختصر شده و زمان محاسبات را کاهش می‌دهد.

نیز به دلیل برخورداری از شرایط عمق نرمال در پایاب نیز از فشار ثابت استفاده شد. در سطح آزاد از شرط مرزی سطح آزاد (Symmetry) و برای دیوار از شرط مرزی دیوار (Wall) استفاده گردید. همچنین برای هم‌گرایی مسئله از روش هم‌گرایی RMS (Root mean square) (ریشه متوسط جذر باقی‌مانده‌ها) استفاده شد. در شکل (۲) نمای ایزومتریک مدل و موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری نمایش داده شده است.

### نتایج صحت‌سنجی

به‌منظور صحت‌سنجی نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده در این تحقیق از نتایج مطالعه‌های Katapodis و Rajaratnam (1983) که در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه آلبرتا اجرا گردید استفاده شد. برای این منظور با اجرای مدل مطابق با جدول (۱) تلاش گردید تا روند تغییرات دبی مشخصه در مقابل با پارامتر نسبت ظاهری  $y_o/b_o$  و سرعت مشخصه  $U^*$  مورد بررسی قرار گیرد. مقایسه فرم توابع برازش داده‌شده از بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی، امکان بررسی عملکرد شبیه‌سازی هیدرولیکی را فراهم می‌آورد. در شکل‌های (۳) و (۴) روند تغییرات دبی مشخصه در مقابل با پارامتر نسبت ظاهری  $y_o/b_o$  و سرعت مشخصه  $U^*$  به‌تصویر کشیده شد.

al. (1992) ارائه شده است. روابط (۱۸) و (۱۹) روابط مربوط به  $k$  و  $\varepsilon$  را در این مدل آشفتگی نشان می‌دهند.

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (18)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3c} G_b) - C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (19)$$

$G_k$  و  $G_b$  ترم‌های چشمه‌ی معادله‌ی  $k$  می‌باشند که همانند مدل استاندارد تعیین می‌شوند.  $C_{1\varepsilon}^*$  و  $C_{2\varepsilon}^*$  ضرایب تجربی،  $\alpha_k$  و  $\alpha_\varepsilon$  عکس عدد پراوتل برای معادلات  $k$  و  $\varepsilon$  هستند.

این مورد امکان شبیه‌سازی دقیق در اعداد رینولدز کم و جریان نزدیک دیواره را فراهم می‌آورد. در این تحقیق جریان از نوع دایمی و اغتشاشی و سیال تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شد. مدل آشفتگی مورد استفاده در این تحقیق  $k-\varepsilon(RNG)$  می‌باشد. دلیل استفاده از این مدل علاوه بر توصیه‌های تحقیقات پیشین، هم‌خوانی خوب مدل با جریان‌های چرخشی و انحنا دار و جریان‌های با کرنش‌های بزرگ می‌باشد. در مدل Flow-3D مش‌بندی با استفاده از المان‌های مکعبی قائم انجام می‌شود. شرایط مرزی مدل شامل مقطع ورودی، مقطع خروجی، دیوار و سطح آزاد جریان می‌باشد. در شرط مرزی ورودی از نرخ جریان استفاده شد، شرط مرزی خروجی مدل

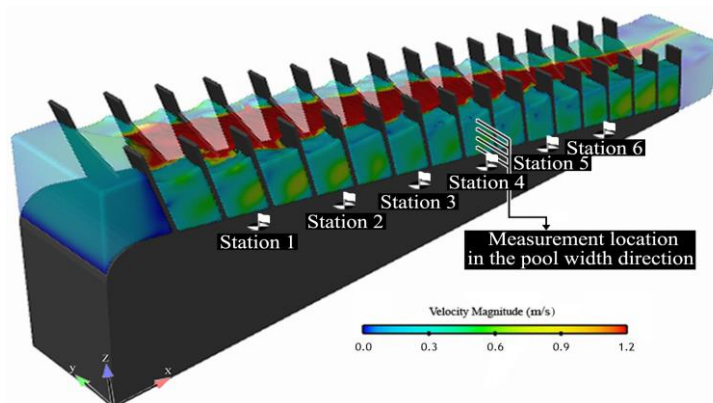


Fig. 2- Isometric view of the model and position of measuring stations

شکل ۲- نمای ایزومتریک مدل و موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری

جدول ۱ - محدوده داده‌های مورد آزمون در تحقیق حاضر

Table 1- Range of the test data in this study

Parameters	Dimension	Range
bed( $S_0$ ) Slope Structural	-	%20
Flume width B	m	1
Interior frame width $b_o$	m	0.64
Ratio of flume width to the internal width of the frame $B/b_o$	-	1.56
Flow discharge	Lit/s	4.1-67
Characteristic discharge $Q^*$		2.08-29.5
Maximum velocity $u_m$	m/sec	0.98-5.69
Characteristic velocity $U^*$	-	1.1-6.36

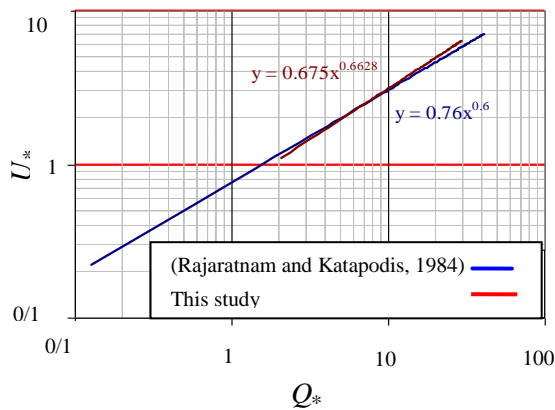


Fig. 4- Discharge characteristic  $Q^*$  changes versus characteristic of velocity  $V^*$

شکل ۴- روند تغییرات دبی مشخصه  $Q^*$  در مقابل سرعت مشخصه  $V^*$

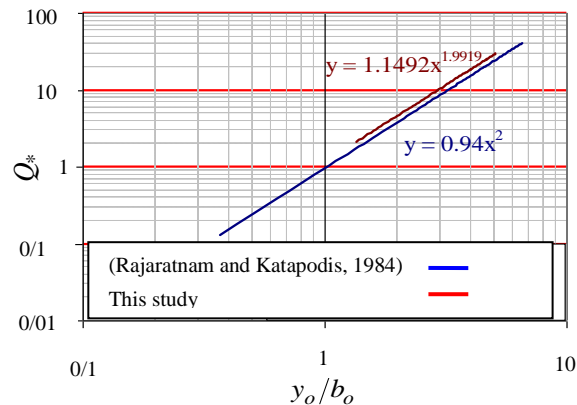


Fig. 3- Aspect ratio  $y_0/b_0$  changes versus discharge characteristic  $Q^*$

شکل ۳- روند تغییرات نسبت ظاهری  $y_0/b_0$  در مقابل دبی مشخصه  $Q^*$

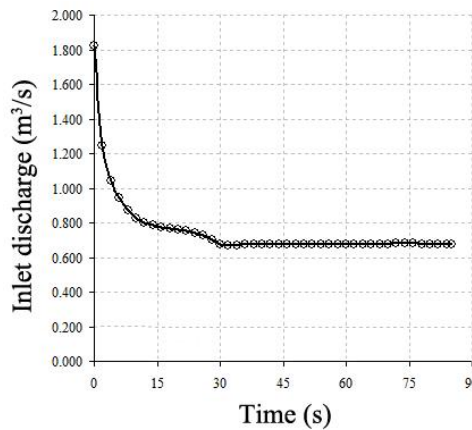


Fig. 5- Discharge changes in the middle section of the structure during the flow simulation

شکل ۵- تغییرات دبی جریان در مقطع میانی سازه در مدت شبیه سازی جریان

$$Q_* = 1.149(y_0/b_0)^{1.99} \quad (20)$$

$$U_* = 0.675(Q_*)^{0.66} \quad (21)$$

مقایسه‌ی نتایج روابط (۲۰) و (۲۱) با نتایج Rajaratnam و Katapodis (1983) توسط روابط (۱) و (۲)، در شکل‌های (۳) و (۴) به تصویر کشیده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، نتایج این شبیه‌سازی نیز از فرم توانی تبعیت نموده و نزدیکی ضرایب و توان‌های توابع مذکور حاکی از تطبیق نتایج این تحقیق با محققین پیشین می‌باشد.

#### نتایج پروفیل سرعت

با توجه به مباحث بیان شده، روند بررسی پژوهش حاضر دو دیدگاه اصلی هیدرولیکی و بیولوژیکی سازه راه‌ماهی دنیل در سناریوهای هندسی ارائه شده را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. پس از

با توجه به اهمیت دبی جریان در سازه‌ی راه‌ماهی، شکل (۵) بیانگر نحوه تثبیت اختلافات دبی در سازه‌ی راه‌ماهی دنیل شبیه‌سازی شده در مدل سازه راه‌ماهی دنیل با زاویه قرارگیری قاب ۴۵ درجه از لحاظ زاویه‌ی قرارگیری قاب‌های میانی می‌باشد. با بررسی سیر تغییرات حاصل شده در نمودار ارائه شده در شکل (۵) تغییرات دبی جریان پس از زمان تقریبی ۵۰ ثانیه به کمترین دامنه‌ی نوسانات رسیده و با تأمل در سایر نمودارها زمان تقریبی ۶۰ ثانیه به‌عنوان زمان مطمئن برای شبیه‌سازی سازه راه‌ماهی دنیل در نرم‌افزار Flow-3D انتخاب گردید.

شبیه‌سازی جریان در راه‌ماهی به ازای دبی‌های مختلف در محدوده‌ی نمایش داده شده در جدول (۱) تحت شرایط عمق پایاب یکسان به اجرا درآمد. روند تغییرات نسبت ظاهری  $y_0/b_0$  در مقابل دبی مشخصه  $Q^*$  و همچنین روند تغییرات دبی مشخصه در مقابل با سرعت مشخصه به ترتیب توسط روابط (۲۰) و (۲۱) نمایش داده شده‌اند:

به‌منظور نمایش چگونگی توزیع سرعت در راه ماهی دنیل و بررسی عملکرد جریان‌های چرخشی بر صعود ماهی‌ها، پروفیل سرعت در راستای طولی، عرضی، عمقی و متوسط در سناریوهای مختلف استخراج گردید. برای این منظور در دبی مشخصه ۲۹/۵ در ایستگاه‌های شماره ۱ تا ۶ استخراج گردید و نتایج در شکل‌های (۶) الی (۱۳) به‌تصویر کشیده شده‌اند.

صحت‌سنجی نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی شده سازه‌ی مذکور با زاویه قرارگیری قاب ۴۵ درجه نسبت به افق، با استفاده از پارامتر دبی مشخصه  $Q^*$ ، نتایج شبیه‌سازی با نتایج پژوهش آزمایشگاهی حاصل از بررسی‌های Rajaratnam و Katapodis (1983) مقایسه شد.

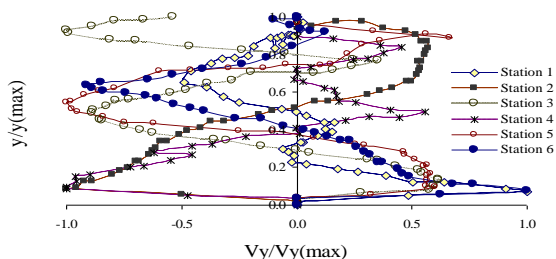


Fig. 7- Transverse velocity at different depths with a 45 degree baffle angle and a characteristic discharge of 29.5

شکل ۷- تغییرات عرضی سرعت در اعماق مختلف با زاویه قاب ۴۵ درجه در دبی مشخصه ۲۹/۵

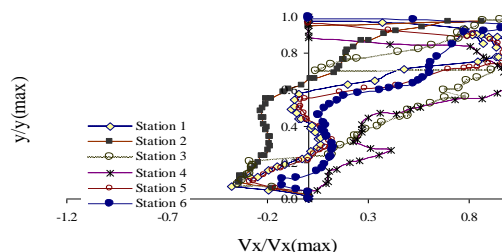


Fig. 6- Longitudinal velocity at different depths with a 45 degree baffle angle and a characteristic discharge of 29.5

شکل ۶- تغییرات طولی سرعت در اعماق مختلف با زاویه قاب ۴۵ درجه در دبی مشخصه ۲۹/۵

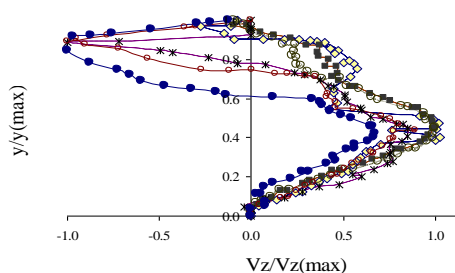


Fig. 8- The velocity variations at different depths with a 45 degree baffle angle and a characteristic discharge of 29.5

شکل ۸- تغییرات عمقی سرعت در اعماق مختلف با زاویه قاب ۴۵ درجه در دبی مشخصه ۲۹/۵

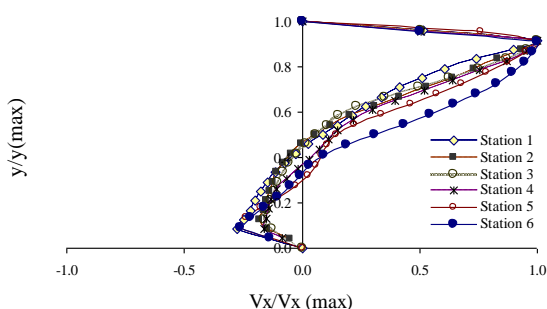


Fig. 10- Longitudinal velocity at different depths with a 60 degree baffle angle and a characteristic discharge of 29.5

شکل ۱۰- تغییرات طولی سرعت در اعماق مختلف با زاویه قاب ۶۰ درجه در دبی مشخصه ۲۹/۵

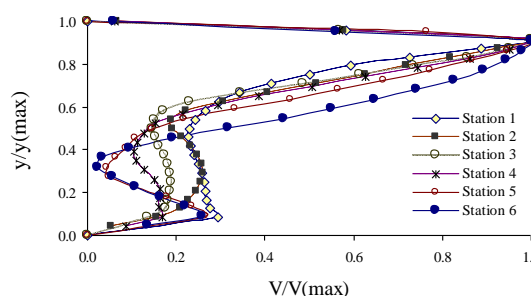
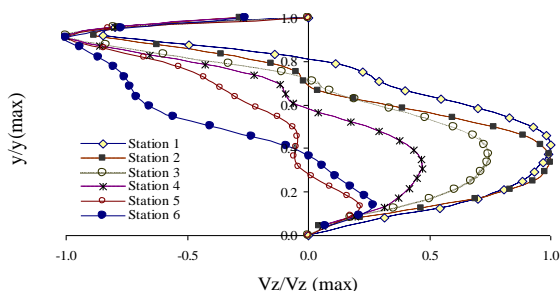


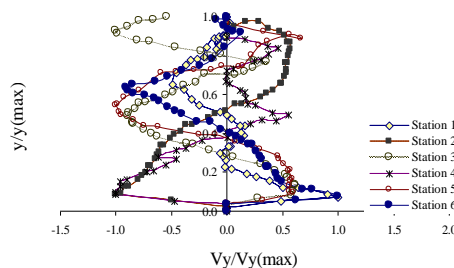
Fig. 9- The magnitude of change in velocity at different depths with a 45 degree baffle angle and a characteristic discharge of 29.5

شکل ۹- تغییرات سرعت برآیند در راستاهای مختلف با زاویه قاب ۴۵ درجه در دبی مشخصه ۲۹/۵



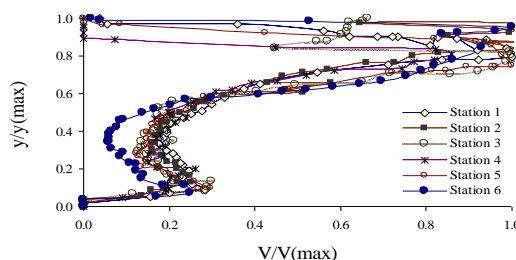
**Fig. 12- The velocity variations at different depths with a 60 degree baffle angle and a characteristic discharge of 29.5**

شکل ۱۲- تغییرات عمقی سرعت در اعماق مختلف با زاویه قاب ۶۰ درجه در دبی مشخصه ۲۹/۵



**Fig. 11- Transverse velocity at different depths with a 60 degree baffle angle and a characteristic discharge of 29.5**

شکل ۱۱- تغییرات عرضی سرعت در اعماق مختلف با زاویه قاب ۶۰ درجه در دبی مشخصه ۲۹/۵



**Fig. 13- The magnitude variation of velocity at different depths with a 60 degree baffle angle and a characteristic discharge of 29.5**

شکل ۱۳- تغییرات برآیند سرعت در راستاهای مختلف با زاویه قاب ۶۰ درجه در دبی مشخصه ۲۹/۵

تلاطم جریان، شرایط برخورد به پره‌ها و زخمی شدن آنها را فراهم آورد (شکل ۱۴). لذا به منظور تعیین دالان امن، بررسی چگونگی توزیع سرعت در راستای عرض و عمق نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای این منظور مشابه روشی که در خصوص پروفیل طولی اعمال گردید کلیه مقادیر سرعت‌های عرضی و عمقی بدون بعد به ازای مقدار حداکثر خود به صورت سرعت نسبی در عرض  $V_y/V_{y\ max}$  و سرعت نسبی در عمق  $V_z/V_{z\ max}$  و کلیه مقادیر مربوطه در مقابل عمق نسبی جریان  $y/y_{\max}$  در شکل های (۶) الی (۱۳) نمایش داده شدند. ذکر این نکته ضروری است که پیشی گرفتن بزرگی اندازه سرعت‌های نسبی عرضی  $V_y/V_{y\ max}$  و عمقی  $V_z/V_{z\ max}$  از سرعت نسبی طولی  $V_x/V_{x\ max}$  ناشی از تقسیم شدن هر یک از آنها بر حداکثر مقدار مشاهده شده در همان راستا می باشد. این امر صرفاً به دلیل تعیین موقعیت دالان امن صورت پذیرفته است. بدون شک مقایسه‌ی اندازه‌ی این سرعت‌ها تحت شرایط بدون بعد از نتایج متفاوتی برخوردار خواهند بود. بررسی نتایج ناشی از چگونگی توزیع پروفیل عمقی سرعت حاکی از آن است که در اکثر ایستگاه‌های اندازه‌گیری در محدوده‌ای بین ۰/۲ الی ۰/۴ عمق جریان میزان سرعت عرضی از شرایط مطلوبی برای برقراری حفظ تعادل ماهی برخوردار است. این موضوع در ایستگاه شماره دو به میانه جریان منتقل شده است که علت آن نیز می‌توان تقرب ایستگاه شماره دو به بخش خروجی

به منظور عمومیت بخشیدن به نتایج این تحقیق، کلیه مقادیر سرعت با استفاده از حداکثر مقدار آنها در هر یک از ایستگاه‌های اندازه‌گیری به صورت بدون بعد تبدیل شدند. همچنین موقعیت عمقی کلیه مقادیر سرعت استخراج شده نیز با استفاده از عمق کلی جریان به صورت پارامتر عمق نسبی  $y/y_{\max}$  تبدیل گردید. بدون شک اصلی‌ترین عامل بازدارنده صعود ماهی‌ها با بالادست سرعت طولی جریان می‌باشد. از بررسی شکل‌های (۶) و (۱۰) ملاحظه می‌گردد که پروفیل طولی سرعت نسبی  $V_x/V_{x\ max}$  نمایش داده شده در کلیه ایستگاه‌ها به ازای مقادیر عمق نسبی  $y/y_{\max}$  کوچک‌تر از ۰/۵ نه تنها نقش بازدارنده بازی نمی‌نماید بلکه به واسطه وجود جریان‌های برگشتی، نقش مؤثری در راستای کمک به ارتقای نیروی پیش‌ران ماهی‌ها بازی نموده و شرایط صعود آنها را تسهیل می‌نماید. این موضوع بدان مفهوم است که اعماق نسبی  $y/y_{\max}$  کوچک‌تر از ۰/۵ می‌تواند به عنوان یک دالان امن برای صعود ماهی‌ها معرفی گردد. بدون شک قضاوت در ارتباط با میزان رقوم ارتفاعی دالان امن ایجاد شده به عملکرد سرعت‌های عرضی  $V_y$  و عمقی  $V_z$  نیز وابسته است. چگونگی توزیع سرعت عرضی می‌تواند در بر هم زدن تعادل ماهی به هنگام صعود مؤثر باشد. همچنین سرعت عمقی توانایی اعمال نیروی بالابرنده به کالبد ماهی را دارا بوده و ایجاد یک نیروی القایی ممکن است منجر به خروج ماهی از دالان امن شده و

دالان امن عبوری برای ماهیان قزل‌آلارنگین کمان بررسی شد. با افزایش تدریجی نسبت عمق از بستر سازه تا نسبت عمقی ۰/۱ افزایش نسبی سرعت جریان مشاهده گردید. فرورفتگی ایجادشده میان نسبت عمقی ۰/۱ تا ۰/۵۵ نشان از دالان امن عبوری ماهیان با کاهش چشم‌گیر نسبت سرعت کل جریان در استخر سازه با قاب ۴۵ درجه داشت. دالان امن ایجادشده در حالت مذکور تأییدی بر موقعیت دالان امن در کد ارتفاعی ۰/۲ تا ۰/۵ برابر عمق جریان در استخر سازه می‌باشد.

به‌منظور دستیابی به زاویه بهینه قرارگیری قاب‌های سازه‌ی دنیل در میان دو زاویه‌ی پرکاربرد ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به افق، داده‌های سرعت عمقی برای سازه شبیه‌سازی شده با قاب‌های ۶۰ درجه در اشکال (۱۰) تا (۱۳) ارائه‌شد. روند نمودارهای ارائه‌شده با نسبت تشابه زیاد به نمودارهای ارائه‌شده برای سازه با قاب‌های ۴۵ درجه حاکی از صحت روند شبیه‌سازی صورت‌گرفته در پژوهش می‌باشد. سرعت‌های طولی نشان داده‌شده در شکل (۱۰) روندی افزایشی در نسبت سرعت طولی به سرعت طولی حداکثر را نشان داد. در مقایسه شکل (۱۰) با شکل (۶)، روند تغییرات سرعت طولی در سازه با زاویه‌ی قرارگیری ۴۵ درجه تا نسبت عمقی ۰/۵۵ در مجاورت ناحیه‌ی سرعت نسبی صفر نوسان داشت که در حدود ۱۷ درصد ناحیه پوششی ایمن بیشتری نسبت به نمودار ارائه‌شده در شکل (۱۰) را پوشش می‌دهد. شکل (۱۲) نمایانگر تغییر جهت سرعت عمقی جریان در بازه عمقی با کد ارتفاعی میان ۰/۲ تا ۰/۴ می‌باشد. بازه‌ی مذکور کاهش ۳۵ درصدی در مقدار بازه‌ی کد ارتفاعی ایجادشده تا سرعت عمقی حداکثر در حالت سازه با زاویه ۶۰ درجه نسبت به سازه با زاویه قاب ۴۵ درجه را ارائه نمود. در ادامه سرعت کل جریان با استفاده از قانون جمع برداری سرعت‌ها در سه راستای عنوان شده در قالب شکل (۱۳) نشان داده شده است.

ماهی‌ها از سازه (یا ورود جریان به آن) و وجود جریان‌های شیرجه‌ای در این نواحی جستجو نمود. بررسی در خصوص اندازه‌ی نیروهای وارده بر کالبد ماهی نیازمند بررسی میدانی و یا آزمایشگاهی دارد.

در شکل‌های (۶)، (۷) و (۸) روند تغییرات عمقی سرعت در سه راستای مختلف دکارتی به‌صورت بدون‌بعد برای سازه راه‌ماهی دنیل با زوایای قرارگیری قاب ۴۵ درجه ارائه‌شد. با توجه به مقادیر ناچیز سرعت در راستای محور  $y$  نسبت به سرعت در دو راستای  $x$  و  $z$  بررسی تغییرات مؤلفه‌ی سرعت در راستای عرض استخر تنها در محاسبه‌ی سرعت کل جریان لحاظ شده است. با دقت در شکل (۶) در هر شش ایستگاه اندازه‌گیری سرعت عمقی در راستای محور  $x$ ، ابتدا سرعت روندی افزایشی با شیب نسبی تند تا نسبت عمقی  $y/y_{max}$  برابر با ۰/۸ داشته است و نسبت عمقی مذکور بیشترین سرعت در راستای طول سازه را بر پیکر ماهی وارد می‌کند.

با حرکت به سمت سطح تراز آب از شدت سرعت جریان طولی کاسته می‌شود. مؤلفه‌ی عمقی سرعت، نقش قابل‌توجهی را در شنای ماهی در راستای عمقی کانال امن سازه ایفا می‌کند. با توجه به شکل (۸)، سرعت عمقی جریان تا نسبت عمقی ۰/۴۵ افزایش قابل توجهی داشته است و جهت سرعت در راستای مثبت محور عمق به پیکره‌ی ماهی وارد می‌شود. در فاصله‌ی نسبت عمقی ۰/۴۵ تا ۰/۸ سرعت جریان در راستای مثبت محور عمق کاسته شده و با افزایش عمق تا نسبت عمقی ۰/۹ سازه‌ی راه‌ماهی دنیل با زاویه قاب‌های ۴۵ درجه، بیشترین مقدار سرعت عمقی جریان در راستای شتاب گرانش مشاهده می‌شود. با استفاده از رابطه‌ی جمع برداری  $V_T = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$ ، سرعت نسبی کل در ایستگاه‌های ارائه‌شده در شکل (۲) محاسبه و روند تغییرات پارامتر استخراج‌شده در شکل (۹) ارائه گردید. با بهره‌گیری از شکل (۹)، روند تغییرات سرعت کل به‌منظور تخمین ارتفاع



Fig. 14- Collision with vanes and injuries fish

شکل ۱۴- برخورد با پره‌ها و زخمی شدن ماهی‌ها

جریان‌های گردابه‌ای به‌صورت مزدوج در دو طرف جت جریان اصلی در استخرهای سازه وظیفه‌ی استهلاک انرژی جریان و در نتیجه فراهم‌سازی فضای ایمن استراحت‌گاهی در استخر را عهده‌دار می‌باشند.

ترسیم خطوط جریان در سناریوهای مختلف نمایان‌گر تراکم بالاتر خطوط جریان در سازه با زاویه‌ی قرارگیری قاب ۴۵ درجه می‌باشد. لذا انتظار می‌رود که عمل استهلاک انرژی در سازه‌ی راه‌ماهی دنیل با قاب‌های ۴۵ درجه نسبت به زاویه‌ی ۶۰ درجه‌ی بیشتر باشد. استهلاک انرژی بیشتر در سازه‌ی راه‌ماهی منجر به ایجاد فضای ایمن و همچنین جریان با سرعت کمتر در کانال سازه خواهد شد و شرایط را برای مهاجرت ماهیان به سراب بهبود می‌بخشد.

اشکال (۱۸) و (۱۹) نمای فوقانی از خطوط جریان ایجاد شده در سازه‌ی راه‌ماهی پژوهش حاضر در دو سناریو مختلف سازه‌ای را نشان می‌دهد. سه ناحیه‌ی بیان شده به‌وضوح در این اشکال قابل رویت می‌باشند. ناحیه‌ی جت جریان میانی جداکننده‌ی زوج ناحیه‌ی گردابه‌ای دوطرف در این نوع سازه‌ی راه‌ماهی است. در ادامه با استفاده از شدت آشفتگی ایجادشده به بررسی فضای ایمن استراحت‌گاهی در استخرهای هر دو نوع از سازه پرداخته می‌شود.

#### توزیع سرعت و شدت آشفتگی جریان در راستای عرض استخر

توزیع سرعت لحظه‌ای جریان و میزان انرژی آشفتگی در راستای عرض سازه تا حد بسیار زیادی بر شرایط عبور ماهیان تأثیرگذار است. برای این منظور نسبت به بررسی اثر مقادیر توزیع سرعت و شدت آشفتگی در عرض استخر میانی سازه به‌عنوان نماینده‌ی استخرهای سازه اقدام گردید. شکل (۲۰) توزیع سرعت کل جریان در راستای عرضی استخر سازه را در شیب بحرانی ۲۰ درصد و دبی مشخصه‌ی ۲۹/۵ در چهار کد ارتفاعی نسبت به عمق جریان ایجادشده در استخر میانی سازه نشان می‌دهد.

از مقایسه‌ی شکل (۱۲) با نمودار ارایه‌شده در شکل (۸) می‌توان پتانسیل بالای یکسان‌سازی جریان در سازه با زاویه‌ی قاب‌های ۴۵ درجه را مشاهده کرد. در شکل (۸) در تمامی ایستگاه‌های اندازه‌گیری سرعت جریان تقریباً روند ثابتی مشاهده شد. هم‌چنین با توجه به نمودارهای ارایه‌کننده‌ی نسبی سرعت کل در بازه‌ی عمق نسبی ۰/۲ تا ۰/۵۵ در شکل (۱۲)، علارغم ایجاد ناحیه‌ی ایمن عبوری ماهی، به‌علت شیب تند حاصل از مقدار بسیار کم اختلاف سرعت کل لحظه‌ای جریان نسبت به سرعت حداکثر، فضای ایمن ایجادشده درصد اطمینان کمتری نسبت به حالت سازه با قاب ۴۵ درجه را نشان داد. باتوجه به تأثیر بالای جریان در سراب و پایاب بر جریان و ماند آب ایجاد شده در استخرهای اولیه و انتهایی سازه راه‌ماهی دنیل در پژوهش حاضر ایستگاه شماره‌ی چهار به‌عنوان ایستگاه میانی برای مقایسه و بررسی مؤلفه‌های هیدرولیکی انتخاب شد.

شکل (۱۵) نمایانگر مقایسه میان نسبت سرعت بدون بعد عمقی در دو مدل سازه‌ای مذکور در پژوهش حاضر می‌باشد. با توجه به روند تغییرات ارایه‌شده، مدل سازه‌ای دنیل با قاب‌های ۴۵ درجه ناحیه امن با سرعت کل کمتری نسبت به سازه با زاویه قاب ۶۰ درجه ایجاد می‌کند.

#### بررسی الگوی جریان درون استخرهای سازه

به‌منظور بررسی الگوی جریان ایجادشده درون استخرهای سازه، خروجی‌های خطوط جریان در دو هندسه‌ی مختلف سازه راه‌ماهی دنیل از لحاظ زاویه‌ی قرارگیری قاب‌ها در اشکال (۱۶) و (۱۷) به‌ترتیب نشان داده شده است. با دقت در الگوی جریان ایجاد شده در هر دو شکل مذکور، دو نوع جریان در کانال اصلی سازه راه‌ماهی دنیل ایجاد می‌گردد. جریان پر قدرت اولیه که به صورت جت جریان از میانه‌ی کانال سازه و دهانه‌ی قاب‌های دنیل با سرعت زیاد به پایین دست سرایز شده‌است. با توجه به پتانسیل استخرهای سازه در ایجاد ماند آب، جت جریان ورودی از بالادست هر استخر با برخورد به ماند آب موجود در استخر، جریان‌های گردابه‌ای حول محور عرضی استخرهای سازه ایجاد می‌کند.

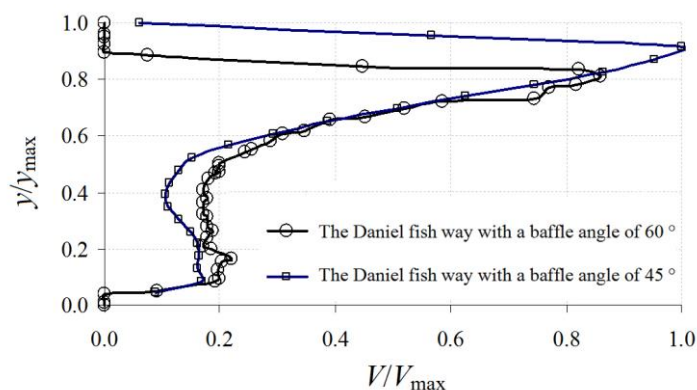


Fig. 15- Comparison of the velocity variation in different scenarios with a discharge of 29.5 in station 4

شکل ۱۵- مقایسه تغییرات برآیند سرعت در سناریوهای مختلف با دبی مشخصه ۲۹/۵ در ایستگاه شماره چهار

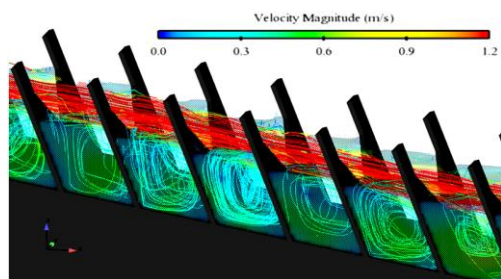


Fig. 17- The flow pattern in the Daniel fish way with a baffle angle of 60 °

شکل ۱۷- خطوط جریان ایجاد شده در سازه راه‌ماهی دنیل با زاویه‌ی قاب ۶۰ درجه

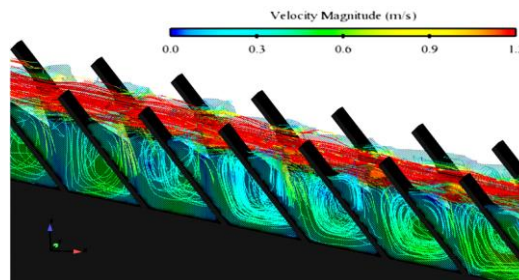


Fig. 16- The flow pattern in the Daniel fish way with a baffle angle of 45 °

شکل ۱۶- خطوط جریان ایجاد شده در سازه راه‌ماهی دنیل با زاویه‌ی قاب ۴۵ درجه



Fig. 19- The top view of flow pattern in the Daniel fishway with a baffle angle of 60 °

شکل ۱۹- نمای بالایی از خطوط جریان ایجاد شده در سازه راه‌ماهی دنیل با زاویه‌ی قاب ۶۰ درجه



Fig. 18- he top view of flow pattern in the Daniel fishway with a baffle angle of 45 °

شکل ۱۸- نمای بالایی از خطوط جریان ایجاد شده در سازه راه‌ماهی دنیل با زاویه‌ی قاب ۴۵ درجه

می‌باشد که از اهمیت کمتری نسبت به سرعت جریان پیش‌روی ماهیان برخوردار است. در شکل (۲۱) با حرکت از جداری استخر به سمت مرکز استخر ابتدا افزایش تند در شیب نمودار شدت آشفتگی جریان مشاهده می‌گردد. پس از عبور از ایستگاه با نسبت عرضی ۰/۲، از شدت آشفتگی جریان به تدریج کاسته شده و در مرکز استخر به کمترین درصد آشفتگی جریان که ناشی از سرعت بالای جت جریان خروجی می‌باشد رسید. باتوجه به شکل (۲۱) کمترین درصد آشفتگی جریان بین بازه‌ی ۰/۱۵ تا ۰/۲۵ برابر عمق جریان حاصل می‌گردد. بنابراین باتوجه به برتری نسبی ایستگاه عمقی ۰/۲۵ برابر عمق جریان در ایجاد دالان امن از لحاظ نسبت سرعت و شدت آشفتگی در برابر سایر ایستگاه‌های عمقی، این عمق به‌عنوان عمق مطمئنه‌ی عبور ماهیان انتخاب گردید.

نمودارهای مذکور برای مدل سازه‌ی راه‌ماهی دنیل با قاب‌های ۶۰ درجه در اشکال (۲۲) و (۲۳) ارائه گردیده است. روند تغییرات نسبت سرعت و درصد آشفتگی جریان در راستای عرض استخرمیان‌ی نسبتاً مشابه با اشکال (۲۰) و (۲۱) بوده است.

باتوجه به اهمیت بسیار بالای سرعت کل در سازه راه‌ماهی به‌منظور بررسی توانایی ماهیان مهاجر نمودار مقایسه‌ای سرعت میان دو مدل مذکور در عمق مطمئنه‌ی دالان امن ۰/۲۵ برابر عمق جریان در شکل (۲۴) نشان داد.

روند تغییر داده‌های ارائه‌شده در شکل (۲۰) حاکی از آن است که در اعماق کمتر از ۰/۷۵ برابر عمق جریان روند تغییرات سرعت جریان نسبت به سرعت کل برداشت‌شده روند نسبتاً ثابتی را طی می‌کند. به‌دلیل جریان‌های گردابه‌ای ایجادشده در دوطرف استخر، نسبت سرعت کل جریان در نزدیکی جداریه‌های استخر مقدار قابل توجهی را بین ۰/۵ تا ۰/۹۵ به خود اختصاص داد. با حرکت به سمت مرکز استخر ابتدا کاهش نسبتاً سریع نسبت سرعت کل به سرعت حداکثر  $V/V_{max}$  و سپس افزایش تدریجی این مؤلفه تا نزدیکی ۰/۲۵ برابر عرض استخر سازه ادامه پیدا کرد. با توجه به ایستگاه‌های عمقی مطرح‌شده نسبت سرعت جریان در بازه‌ی میان ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ برابر عرض سازه، روندی کاهنده و متعادل با نقاط افزایشی کمتر نسبت به سایر نواحی نشان داد. برخلاف ایستگاه‌های اندازه‌گیری سرعت جریان عنوان‌شده، داده‌های نسبی سرعت ارائه‌شده در شکل (۲۰) برای ایستگاه عمقی ۰/۷۵ برابر عمق جریان روندی متفاوت را نشان داد. روند تغییرات در خط عمقی مذکور حاکی از قدرت بالای جت جریان خروجی در قسمت فوقانی عمق جریان داشته و همچنین با توجه به سرعت حداکثر حاصل‌شده، ناحیه شنا با سرعت حداکثر ماهی را طلب می‌کند.

شکل (۲۱) نشان‌دهنده‌ی شدت آشفتگی در راستای عرض استخر میان‌ی سازه می‌باشد. شدت آشفتگی جریان دیگر مؤلفه‌ی مهم هیدرولیکی به‌منظور بررسی نواحی ایمن استراحتی ماهیان



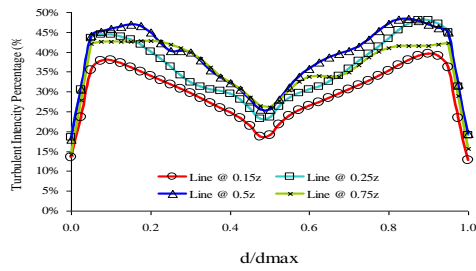


Fig. 21- variations of intensity turbulence at different relation depths along the width of the pool (baffle angle degrees of 45)

شکل ۲۱- تغییرات شدت آشفتگی در چهار کد ارتفاعی در راستای عرض استخر (قاب ۴۵ درجه)

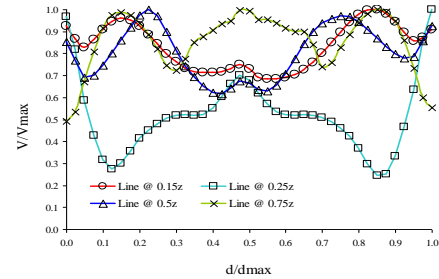


Fig. 20- The magnitude variation of velocity at different relation depths along the width of the pool (baffle angle degrees of 45)

شکل ۲۰- تغییرات سرعت کل در اعماق نسبی مختلف در راستای عرض استخر (قاب ۴۵ درجه)

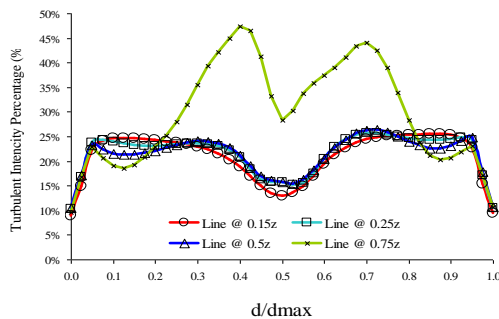


Fig. 23- variations of intensity turbulence at different relation depths along the width of the pool (baffle angle degrees of 60)

شکل ۲۳- تغییرات شدت آشفتگی در چهار کد ارتفاعی در راستای عرض استخر (قاب ۶۰ درجه)

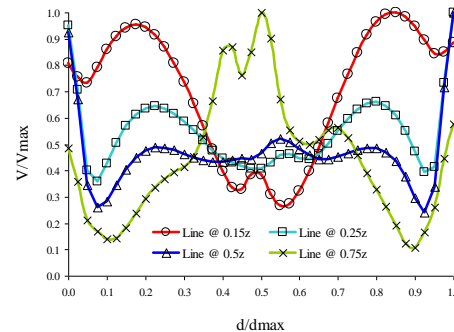


Fig. 22- The magnitude variation of velocity at different relation depths along the width of the pool (baffle angle degrees of 60)

شکل ۲۲- تغییرات سرعت کل در اعماق نسبی مختلف در راستای عرض استخر (قاب ۶۰ درجه)

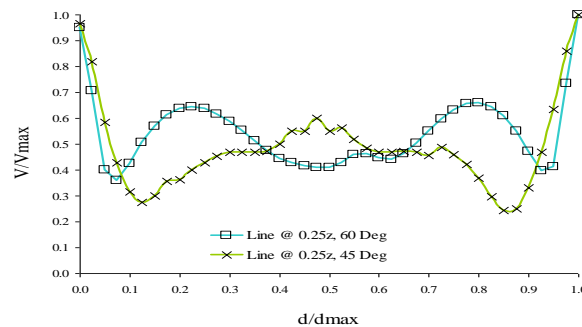


Fig. 24- The magnitude variation of velocity in optimal elevation code of 0.25 along the width of the pool in two baffle angle scenarios

شکل ۲۴- تغییرات سرعت کل جریان در کد ارتفاعی بهینه ۰/۲۵ در راستای عرض استخر در دو سناریو زاویه قاب

### نتیجه گیری

در پژوهش حاضر با توجه به اهمیت بالای سازه‌ی راه‌ماهی بالاخص نوع دنیل در زاویه‌های پرکاربرد ۴۵ و ۶۰ درجه قرارگیری قاب‌های میانی، شبیه‌سازی جریان در بحرانی‌ترین حالت هیدرولیکی انجام گردید. داده‌های مستخرج برای

باتوجه به شکل (۲۴) دالان امن ایجادشده در دوطرف استخر سازه در نسبت ۰/۲۵ برابر عمق جریان در سازه راه‌ماهی دنیل با زاویه‌ی قاب ۴۵ درجه، ۴۵ درصد توانایی بیشتری در ایجاد دالان امن نسبت به حالت ۶۰ درجه نشان داد. لذا سازه راه‌ماهی دنیل با زاویه‌ی قاب ۴۵ درجه از لحاظ ایجاد دالان امن عبوری ماهیان نسبت به زاویه ۶۰ درجه برتری دارد.

خصوص شدت آشفتگی جریان در هر دو سناریو نشان داد که سازه راه‌ماهی دنیل به‌عنوان یک سازه‌ی مستهلک‌کننده انرژی به خوبی ایفای نقش می‌نماید. از طرفی تشکیل نواحی کم سرعت در زاویه قاب ۴۵ درجه نسبت به ۶۰ درجه منجر به توسعه‌ی دالان امن شده و شرایط صعود آبزیان را در راستای طولی راه‌ماهی تسهیل می‌نماید.

### تقدیر و تشکر

این مطالعه با حمایت دانشگاه صنعتی جندی شاپوردزفول انجام شده است، بدینوسیله نگارندگان از دانشگاه به پاس فراهم آوردن امکان این تحقیق قدردانی می‌نمایند.

صحت‌سنجی کاربرد نرم‌افزار Flow-3D در شبیه‌سازی سازه‌ی راه‌ماهی دنیل با آشفتگی و جریان‌های چرخشی بالا نشان از قدرت بالای این نرم‌افزار در مدل‌سازی هیدرولیکی این نوع سازه می‌باشد. نتایج حاصل‌شده به‌صورت نمودارهای سرعت در سه راستای طولی، عرضی و عمقی برای هر سناریو هندسی سازه ارائه شد. مقایسه میان داده‌های سرعت کل در استخر میانی سازه نشان از برتری ۴۵ درصدی سازه‌ی راه‌ماهی دنیل با زاویه قاب ۴۵ درجه برای تشکیل دالان امن نسبت به زاویه قاب ۶۰ درجه دارد. بررسی‌های صورت‌گرفته پیرامون توان شنای ماهیان در دالان امن حاکی از برتری نسبی سازه‌ی راه‌ماهی دنیل با زوایای قاب ۴۵ درجه نسبت به ۶۰ درجه می‌باشد. همچنین نتایج حاصل از ارزیابی‌های به‌عمل‌آمده در

### References

- 1- Armstrong, G., Aprahamian, M., Fewings, G., Gough, P., Reader, N. and Varallo, P., 2010. Environment agency fish pass manual. *Environment Agency: Bristol, UK*.
- 2- Beamish, F.W.H., 1978. Swimming capacity. *Fish Physiology*, 7, pp.101-187.
- 3- Cea, L., Pena, L., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M.E. and Peña, E., 2007. Application of several depth-averaged turbulence models to simulate flow in vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(2), pp.160-172.
- 4- Hirt, C.W. and Nichols, B.D., 1981. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1), pp.201-225.
- 5- Hirt, C.W. and Sicilian, J.M., 1985. A porosity technique for the definition of obstacles in rectangular cell meshes. In *4th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics*, . Washington, DC.
- 6- Lashkarara, B., Ghalavand, F. and Zakermoshfegh, M., 2016. Environmental evaluation of Denil type fishway. *Water Resources Engineering Journal*, 9(30), pp.13-24. (In Persian).
- 7- Noonan, M.J., Grant, J.W. and Jackson, C.D., 2012. A quantitative assessment of fish passage efficiency. *Fish and Fisheries*, 13(4), pp.450-464.
- 8- Rajaratnam, N. and Katopodis, C., 1984. Hydraulics of Denil fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(9), pp.1219-1233.
- 9- Rajaratnam, N. and Katopodis, C., 1983. A Review and laboratory study of hydraulic of Denil Fisheries. Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Science 1145, *Fisheries and Oceans, Winnipeg, Canada*, 181 pp.
- 10-Rajaratnam, N., Van der Vinne, G. and Katopodis, C., 1986. Hydraulics of vertical slot fishways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 112(10), pp.909-927.
- 11-Silva, A.T., Santos, J.M., Ferreira, M.T., Pinheiro, A.N. and Katopodis, C., 2011. Effects of water velocity and turbulence on the behaviour of Iberian barbel (*Luciobarbus bocagei*, Steindachner 1864) in an experimental pool-type fishway. *River Research and Applications*, 27(3), pp.360-373.
- 12-Wang, H. and Chanson, H., 2017. How a better understanding of fish-hydrodynamics interactions might enhance upstream fish passage in culverts. *Civil Engineering Research Reports series, CE162*. School of Civil Engineering, The University of Queensland.
- 13- Yakhot, V.S.A.S.T.B.C.G., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.B. and Speziale, C.G., 1992. Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 4(7), pp.1510-1520.