

**Z. Mehrabi**

Department of Civil  
Engineering, Faculty of  
Engineering, University of  
Qom, Qom, Iran.

**e-mail:** z.mehrabi@stu.qom.ac.ir

**R. Kamalian**

Department of Civil  
Engineering, Faculty of  
Engineering, University of  
Qom, Qom, Iran.

**e-mail:** ur.kamalian@qom.ac.ir

**M. Babae**

Head of Field Measurement  
Department, Water Researches  
Institute, Tehran, Iran.

**e-mail:** Babae\_mbm@yahoo.com

**E. Jabbari\***

Department of Civil  
Engineering, Faculty of  
Engineering, University of  
Qom, Qom, Iran.

**e-mail:** ehsan.jabbari@gmail.com

**Numerical Study of Local Scour Under the Jet  
Discharging From the Power Plants  
(Case Study: Neka Power Plant)**

*In this paper, the mechanism of scouring caused by turbulent jet out of deep drainage of power plants has been investigated. The flow velocity and discharge flow from these drains are high for fast mixing in the near field area, hence the size of these scours is also vast. Since local sediment may lead to the destruction of coastal structures, as well as the effect of spawning in the near field area, the prediction of a suitable method for estimating the location and depth of these scours in the seabed is very important. The case study is the Neka power plant located in Mazandaran near Neka city. Three-dimensional FLOW-3D model is used for simulation. Comparing and analyzing the results of numerical simulation and field data indicate that the horizontal distance of the deepest scour hole from the discharger is acceptable with a precision of 94% and the maximum depth of the scour hole with a precision of 58% compared to the bathymetry of the Neka substrate.*

**Keywords:** Dewatering marine evacuators; turbulent jet; close field; FLOW-3D numerical model; scouring.

---

\* Corresponding author

Received 20 June 2020, Revised 05 September 2020, Accepted 15 September 2020.

DOI: 10.22091/cer.2021.6541.1225

## زهرا مهربابی

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.  
پست الکترونیک:  
zahra.mehrabi.civil@gmail.com

## رضا کامالیان

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.  
پست الکترونیک:  
ur.kamalian@qom.ac.ir

## محمد بابایی

مدیرگروه اندازه‌گیری میدانی، مؤسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران.  
پست الکترونیک:  
Babae\_mbm@yahoo.com

## احسان جباری\*

دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.  
پست الکترونیک:  
e.jabbari@qom.ac.ir

# مطالعه عددی آبشستگی محلی تحت جت آبگرم خروجی از نیروگاه‌ها (مطالعه موردی: خروجی نیروگاه نکا)

از آنجایی که سرعت جریان و دبی خروجی از تخلیه‌کننده‌های عمقی، جهت ایجاد اختلاط سریع در ناحیه میدان نزدیک، زیاد است در نتیجه ابعاد این آبشستگی‌ها نیز می‌تواند وسیع باشد و از طرفی رسوب محلی ممکن است منجر به تخریب سازه‌های ساحلی شود و همچنین بر نحوه گردش آبگرم در ناحیه میدان نزدیک بسیار تأثیرگذار است، پیش‌بینی یک روش مناسب جهت تخمین محل و عمق این آبشستگی‌ها در بستر دریا بسیار حائز اهمیت می‌باشد. مطالعه موردی این تحقیق خروجی نیروگاه نکا است که با استفاده از مدل عددی سه بعدی FLOW-3D مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است. همچنین نمودارهای توسعه مکانی و زمانی آبشستگی و دما استخراج گردید. مقایسه و تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و داده‌های میدانی نشان می‌دهد که فاصله افقی عمیق‌ترین نقطه حفره آبشستگی از تخلیه‌کننده با دقت ۹۴ درصد و حداکثر عمق حفره آبشستگی با دقت ۵۸ درصد نسبت به هیدروگرافی بستر نکا بدست آمده است.

**واژگان کلیدی:** آبیگری از دریا، تخلیه‌کننده‌های دریایی، جت آشفته، مدل عددی FLOW-3D، آبشستگی.

## ۱- مقدمه

از تخلیه‌کننده‌های مستغرق به محیط دریا باعث به‌وجود آمدن آبشستگی در بستر ماسه‌ای دریا می‌شود. تخلیه آبگرم شده ممکن است به صورت سطحی، عمقی یا تخلیه‌کننده‌های چندتایی<sup>۱</sup> باشد. از آنجاکه ابعاد این آبشستگی‌ها وسیع می‌باشد و ممکن است باعث تخریب سازه‌های ساحلی شود و همچنین بر نحوه گردش آب در

احداث و بهره‌برداری از تأسیساتی همچون نیروگاه‌ها در سواحل، استفاده از آب دریا برای خنک‌کاری دستگاه‌ها و تخلیه جت آب خنک‌کننده گرم شده خروجی

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۳۱، بازنگری: ۱۳۹۹/۰۶/۱۵، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۲۵  
(DOI): 10.22091/cer.2021.6541.1225 شناسه دیجیتال

<sup>۱</sup>- Multiport diffusers

میدان نزدیک بسیار تأثیرگذار است، تخمین محل و عمق این آبخستگی‌ها حائز اهمیت می‌باشد.

روئوز<sup>۲</sup>، دودیه<sup>۳</sup> و همکاران، ایواگاکا<sup>۴</sup>، دکستاین<sup>۵</sup>، لورسن<sup>۶</sup>، ماریون<sup>۷</sup> و همکاران جزو اولین کسانی بودند که پدیده آبخستگی ناشی از جت‌های افقی و عمودی را بررسی نمودند که در نهایت، معیارهای تقریبی مشابهی را از آبخستگی موضعی ناشی از جت‌های دوبعدی و دیگر جریان‌ها تدوین کردند [۱-۶]. ستیو<sup>۸</sup> آزمایش آبخستگی موضعی تحت جت دوبعدی افقی را انجام و مدل‌های پیشنهادی برای انتقال رسوبات را ارائه داده است [۷]. در سال ۱۹۹۲ محققان اظهار داشتند از آنجاکه تحقیقات قبلی عمدتاً با فرمولاسیون‌های تجربی و مدل‌های نسبتاً اولیه آغاز شده است، آنها دیگر برای وضعیت فعلی قابل اجرا نیستند، بلکه پیش‌بینی‌های بسیار دقیق‌تر لازم است. ایشان مدل عددی ارزیابی آبخستگی موضعی به علت تخلیه جت آبگرم خروجی از نیروگاه‌ها را ارائه دادند. در تحقیق ایشان فرآیند پخش و انتشار جت آبگرم با مدلی با مقیاس یک صدم و آبخستگی موضعی به صورت یک بعدی تحت جریان دوبعدی به صورت موازی با جریان بررسی شده است. ایشان نتایج حاصل از آبخستگی را بصورت کیفی بررسی کردند و بیان کردند که آبخستگی تحت تأثیر شناوری می‌تواند رفتارهای مختلفی داشته باشد [۸]. فیروزی (۱۳۹۱) با بررسی آبخستگی ناشی از جت افقی در پایین‌دست دریچه کشویی با مدل FLOW3D نشان داد که حداکثر عمق حفره آبخستگی در حالت بدون کف‌بند بیشترین مقدار خطاها را با نتایج آزمایشگاهی دارد و در اکثر موارد مدل عددی عمق کمتری را نسبت به نتایج آزمایشگاهی برآورد می‌کند [۹]. محمد کاهه (۱۳۹۲) آبخستگی در پایین‌دست جریان

ترکیبی همزمان از روی سرریز و زیر دریچه با استفاده از مدل عددی FLOW3D را بررسی کرد. طبق نتایج ایشان مدل آشفستگی LES نتایج بهتری برای شبیه‌سازی آبخستگی پایین‌دست سازه ترکیبی سرریز-دریچه ارائه می‌دهد و همچنین از بین پارامترهای مؤثر بر آبخستگی، ضریب دراگ و زاویه ایستایی بیشترین تأثیر را بر آبخستگی دارند [۱۰].

پژوهشگران در سال ۲۰۱۴، به بررسی چند مدل سه بعدی آبخستگی با مدل FLOW3D پرداختند. مدل ته‌نشینی رسوبات معلق در مخزن، آبخستگی در یک فلوم تحت جت افقی، آبخستگی در پایه پل، آبخستگی پایین‌دست دریچه تحتانی سد و آبخستگی در آب‌های کم عمق را بررسی کردند [۱۱]. کرباسی و همکاران در سال ۲۰۱۶ با بررسی آبخستگی ناشی از جت افقی دوبعدی جهت پیش‌بینی حداکثر عمق آبخستگی در پایین‌دست دریچه آبگیر با پنج روش و مقایسه آنها با معادلات تجربی و رگرسیونی نشان دادند که پارامتر مؤثر بر حداکثر عمق آبخستگی پایین‌دست دریچه آبگیر عدد فرود جت می‌باشد [۱۲]. مزروعی و همکاران (۱۳۹۶) آبخستگی موضعی ناشی از جت مستغرق افقی را به صورت عددی با مدل FLOW3D بررسی نمودند. آنان اظهار داشتند که نتایج حاکی از آن است که شبیه‌سازی پدیده فرسایش بستر خوب بوده و تفاوت ایجاد شده در قسمت رسوبگذاری ناشی از عدم درج سرعت سقوط ذرات رسوبی و سرعت برشی جریان در مدل عددی بوده است [۱۳].

مطالعه حاضر، به بررسی مدل سه بعدی آبخستگی، ناشی از جت آبگرم خروجی از تخلیه کننده‌های عمقی نیروگاه‌های ساحلی با مدل آشفستگی RNG به صورت موازی با انتقال حرارت در نرم‌افزار FLOW3D می‌پردازد.

## ۲- معادلات اساسی حاکم

### ۲-۱- معادلات حاکم بر جریان آشفته

<sup>2</sup>- Rouse

<sup>3</sup>- Doddiah

<sup>4</sup>- Iwagaki

<sup>5</sup>- Duckstein

<sup>6</sup>- Laursen

<sup>7</sup>- Marion

<sup>8</sup>- Saito

زیر می‌باشد [۱۴]:

$$k = \frac{1}{2} \left( \overline{u_i^2} + \overline{u_j^2} + \overline{u_k^2} \right) \quad (۵)$$

$$\begin{cases} \delta_{ij} = 0 & i \neq j \\ \delta_{ij} = 1 & i = j \end{cases} \quad (۶)$$

(پ): معادله انرژی سیال

برای مسائل جریان تراکم‌پذیر یا حرارتی، معادله انرژی داخلی به صورت رابطه (۷) است:

$$V_F \frac{\partial}{\partial t} (\rho I) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho I A_x u) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho I A_y v) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho I A_z w) + \xi \frac{\rho I A_x u}{x} = \quad (۷)$$

$$- p \left\{ \frac{\partial u A_x}{\partial x} + R \frac{\partial v A_y}{\partial y} + \frac{\partial w A_z}{\partial z} + \xi \frac{u A_x}{x} \right\} + R I_{DIF} + T_{DIF} + R I_{SOR}$$

که در آن، I انرژی داخلی مخلوط ماکروسکوپی است [۱۵].

## ۲-۲- معادلات حاکم بر مدل انتقال رسوب

(الف): تنش برشی بستر

تنش برشی بستر تنش برشی است که توسط سیال روی سطح بستر اعمال می‌شود که با استفاده از تابع دیوار استاندارد برای جریان آشفته سه بعدی با در نظر گرفتن زبری دیوار محاسبه شده است [۱۶].

$$u = u_\tau \left[ \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{Y}{\frac{v}{u_\tau} + k_s} \right) \right] \quad (۸)$$

که  $u_\tau$  تنش برشی است،  $u_\tau = \sqrt{\tau/\rho}$ ، تنش برشی بستر،  $\rho$  چگالی بالک مخلوط سیال- رسوب،  $Y$  فاصله از دیوار،  $V$  ویسکوزیته سینماتیک جریان بالک،  $\kappa = 0.4$  ثابت ون کارمن و  $k_s$  زبری نیکورادزه است. در این مدل،  $k_s$  با اندازه رسوبات ارتباط مستقیم دارد:

$$k_s = c_s d_{50} \quad (۹)$$

در این رابطه،  $d_{50}$  قطر متوسط مواد بستر و  $c_s$  یک

روابط حاکم بر سیالات در حالت آرام و آشفته

یکسان بوده و از معادلات پیوستگی و ناویر- استوکس پیروی می‌کنند. با این تفاوت که در جریان آشفته معادلات ناویر- استوکس را متوسط‌گیری زمانی می‌کنند که با این عمل یکسری عبارت‌های اضافی از نوع تنش در این معادلات ظاهر می‌شوند و آنها را تنش‌های آشفته (تنش رینولدز) می‌نامند [۱۴].

(الف): معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (۱)$$

(ب): معادلات مومنتم:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij}) \end{aligned} \quad (۲)$$

در معادلات فوق،  $u_i$  مؤلفه سرعت در جهت  $x_i$ ،  $t$  زمان،  $P$  فشار کل،  $\rho$  چگالی،  $g_i$  شتاب ثقل در جهت  $x_i$  و  $t_{ij}$  تانسور تنش ویسکوز<sup>۹</sup> است و در حالت جریان آشفته به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\begin{aligned} \tau_{ij} = \left[ \rho (v + v_\tau) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \\ - \frac{2}{3} \rho (k + v_\tau) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \end{aligned} \quad (۳)$$

در جریان‌های آشفته، تنش برشی شامل دو جمله تنش برشی ناشی از مؤلفه متوسط جریان و تنش برشی ناشی از مؤلفه‌های نوسانی سرعت بوده که به تنش‌های رینولدز معروف است و به صورت رابطه (۴) بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} \tau_{ij} = - \rho \overline{u_i' u_j'} = \\ \rho v_\tau \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \end{aligned} \quad (۴)$$

در معادلات فوق،  $V_\tau$  لزجت گردابه‌ای و  $\delta_{ij}$  دلتای کرونکر<sup>۱۰</sup> جهت کاربردی کردن تعریف لزجت گردابه‌ای (EVMs<sup>۱۱</sup>) است. انرژی جنبشی در واحد جرم به صورت

<sup>۱۰</sup>- Kronecker delta

<sup>۱۱</sup>- Eddy Viscosity Models

<sup>۹</sup>- Viscous stress tensor

بحرانی شیلدز با استفاده از تابع ایگازاروف<sup>۱۵</sup> اصلاح می‌گردد. این تابع با نماد  $\xi_i$  نشان داده می‌شود و به تابع اثر پنهان‌شدگی<sup>۱۶</sup> معروف است و به صورت معادله (۱۳) نمایش داده می‌شود:

$$\xi_i = \frac{1.666667}{\log_{10} \left( \frac{19 d_{s,i}}{d_{50}} \right)^2} \quad (13)$$

پارامتر حاصل به شکل زیر خواهد بود:

$$\theta'_{cr,i} = \theta_{cr,i} \frac{1.666667}{\log_{10} \left( \frac{19 d_{s,i}}{d_{50}} \right)^2} \quad (14)$$

طبق رابطه بالا، هنگامی که مقدار  $d_{s,i}$  خیلی کمتر از  $d_{50}$  باشد، به این معنی که ذرات کوچک توسط ذرات بزرگ احاطه شده باشند، مخرج کسر عدد کوچکی خواهد شد و مقدار  $\theta'_{cr,i}$  افزایش خواهد یافت. برعکس، هنگامی که  $d_{s,i}$  خیلی بزرگتر از  $d_{50}$  باشد، در این صورت، در رابطه (۱۴) مقدار  $\theta'_{cr,i}$  کاهش پیدا خواهد کرد، چون هنگامی که ذرات بزرگ توسط ذرات کوچک احاطه شده باشند، بیشتر در معرض فرسایش خواهند بود.

عدد شیلدز موضعی براساس تنش برشی موضعی ( $\tau$ ) محاسبه می‌گردد:

$$\theta_i = \frac{\tau}{\|g\| d_{s,i} (\rho_{s,i} - \rho_f)} \quad (15)$$

در این رابطه،  $\|g\|$  عبارت است از بزرگی بردار گرانش. تنش برشی موضعی نیز طبق قانون دیواره محاسبه می‌شود [۱۶].

(پ): ضریب تعلیق مواد بستر

سرعت بلند شدن رسوبات از کف با استفاده از رابطه مس‌برگن و ون‌دن‌برگ<sup>۱۷</sup> محاسبه می‌شود:

$$u_{\text{lift},i} = \alpha_i n_s d_s^{0.3} (\theta_i - \theta_{cr,i})^{0.5} \sqrt{\frac{\|g\| d_{s,i} (\rho_{s,i} - \rho_f)}{\rho_f}} \quad (16)$$

ضریب قابل تعریف است. مقدار توصیه شده برای  $C_s$ ، ۲/۵ می‌باشد.

(ب): پارامتر شیلدز بحرانی

برداشت رسوبات از کف و معلق کردن آنها در اثر برش و گرداب‌های کوچک در سطح بستر باعث ورود ذرات از بستر به آبراهه می‌شود. محاسبه دینامیک جریان در مورد ذره منفرد غیرممکن است و از طرفی چون محاسبه لایه مرزی در سطح بستر دشوار است به همین دلیل استفاده از مدل‌های تجربی در این مورد می‌تواند بسیار سودمند باشد. مدلی که به همین منظور در FLOW3D استفاده شده‌است، براساس مدل مس‌برگن و ون‌دن‌برگ<sup>۱۲</sup> است. همچنین جهت پیش‌بینی عدد بحرانی شیلدز معادله شیلدز-راس<sup>۱۳</sup> مورد استفاده قرار می‌گیرد. جهت محاسبه عدد شیلدز بحرانی بایستی ابتدا پارامتر بدون بعد  $R_i^*$  محاسبه گردد:

$$R_i^* = d_{s,i} \frac{\sqrt{0.1(\rho_{s,i} - \rho_f) \rho_f \|g\| d_{s,i}}}{\mu_f} \quad (10)$$

و سپس طبق رابطه (۱۰)، عدد شیلدز بحرانی محاسبه می‌گردد:

$$\theta_{cr,i} = \frac{0.1}{R_i^{*0.5}} + 0.054 \left[ 1 - \exp \left( \frac{-R_i^{*0.52}}{10} \right) \right] \quad (11)$$

همچنین اثر مسلح شدن<sup>۱۴</sup> نیز در مدل لحاظ شده است، بنابراین ذرات بزرگتر مانع ورود ذرات کوچک به داخل جریان می‌شوند. گام اول، محاسبه اندازه متوسط ذرات بستر در سلول محاسباتی می‌باشد:

$$d_{50} = \frac{1}{\sum_{i=1,ns} c_{s,i}} \sum_{i=1,ns} c_{s,i} d_{s,i} \quad (12)$$

در رابطه (۱۲)،  $c_{s,i}$  عبارتست از غلظت جرمی گونه آم ذرات رسوبی.

جهت لحاظ کردن اثر زرهی شدن بستر، پارامتر

<sup>15</sup> - Egiazaroff

<sup>16</sup> - Hiding-Exposure

<sup>17</sup> - Mastbergen and Van den Berg

<sup>12</sup> - Mastbergen and Van den Berg

<sup>13</sup> - Shields-Rouse

<sup>14</sup> - Armoring

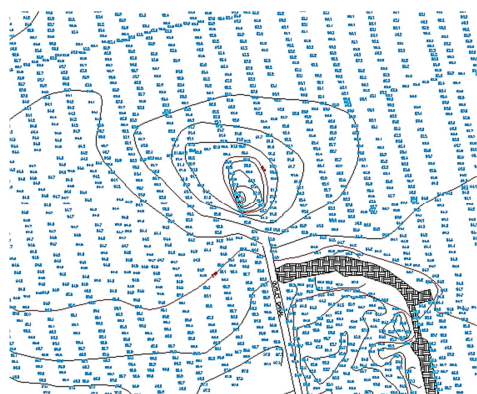
به حجم خالص تمام گونه‌ها است که جمع آنها باید در رابطه زیر صدق کند:

$$\sum_{n=1}^N c_{b,i} = 1.0 \quad (20)$$

البته باید ذکر شود که  $c_{b,i}$  در معادله اصلی Meyer-Peter and Muller وجود ندارد. این مقدار به معادله (۱۳) اضافه شده است تا اثر چندین گونه رسوبات را لحاظ کند [۱۶].

### ۳- معرفی منطقه و اندازه‌گیری‌های میدانی

نیروگاه نکا یکی از مهمترین نیروگاه‌های کشور است که در کنار دریای خزر در ساحل نکا احداث شده و با آب دریا خنک می‌شود. ساخت نیروگاه حرارتی نکا با ظرفیت ۱۴۳۳ مگاوات در سال ۱۳۵۴ به اتمام رسید. در سال‌های اخیر با اضافه شدن سیکل ترکیبی، بر توان تولید نیروگاه افزوده شد و به ۲۳۳۳ مگاوات رسید. شکل ۱ هیدروگرافی چاله ناشی از آبشستگی و شیب دو طرف آن را نشان می‌دهد و شکل ۲ نمای سه بعدی چاله تشکیل شده مقابل تخلیه کننده عمقی نکا است [۱۷].



شکل ۱- شکل چاله آبشستگی مقابل نکا و شیب دو طرف آن

شکل ۳ نشان‌دهنده پروفیل آبشستگی مقابل تخلیه کننده نکا مطابق هیدروگرافی برداشت شده می‌باشد. طبق این شکل، حداکثر عمق حفره ایجاد شده به اندازه ۸/۶ متر و به فاصله ۷۶ متری از تخلیه کننده می‌باشد.

در رابطه فوق  $d_*$  قطر متوسط بدون بعد ذرات است:

$$d_* = d_{50} \left[ \frac{\rho_f (\rho_{s,i} - \rho_f) \|g\|}{\mu^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (17)$$

در معادله (۱۷)، پارامتر ورود<sup>۱۸</sup> است و مقدار آن  $0.18$  توسط Mastbergen and Van den Berg توصیه شده است.  $n_s$  بردار نرمال رو به بیرون بستر متراکم است.  $u_{liff,i}$  برای محاسبه میزان رسوبات متراکم بستر که تبدیل به رسوبات معلق شده‌اند، استفاده می‌شود. ذرات رسوبی که به حالت معلق درآمده‌اند، توسط سیال دچار حرکت و غلتش می‌شوند [۱۶].

(ت): بار بستر

شکل بی‌بعد نرخ انتقال بار بستر برای گونه نام به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Phi_i = \frac{q_{b,i}}{[g(s_i - 1)d_i^3]^{\frac{1}{2}}} \quad (18)$$

به طوری که  $q_{b,i}$  نرخ انتقال بار حجمی بستر بر واحد عرض بستر (در واحد حجم بر زمان بر عرض) است.  $\Phi_i$  با استفاده از معادله می‌یر پیترو و مولر<sup>۱۹</sup> محاسبه می‌شود. مفهوم انتقال بار بستر، حرکت ذرات رسوبی به صورت غلتش و جهش بر روی بستر متراکم است. جهت شبیه‌سازی، انتقال بار بستر در نرم‌افزار FLOW3D با استفاده از مدل Meyer-Peter and Muller به صورت زیر است:

$$\Phi_i = \beta_i (\theta_i - \theta_{cr,i})^{1.5} c_{b,i} \quad (19)$$

$\beta_i$  ضریب بار بستر است و به طور کلی دارای مقدار ۵ تا ۷ برای انتقال کم، حدود ۸ برای انتقال متوسط و تا ۱۳ برای انتقال بار بستر بسیار بالا می‌باشد. مقدار پیش‌فرض این ضریب در نرم‌افزار FLOW3D، ۸ است که بیشترین استفاده را در مقالات دارد.  $c_{b,i}$  کسر حجمی از گونه‌های نام در مواد بستر است و برابر نسبت حجم خالص گونه نام

<sup>18</sup> - Entrainment parameter

<sup>19</sup> - Meyer-Peter and Muller

بکارگیری دو ابزار سودمند تابع حجم سیال ( $VOF^{23}$ ) و روش نماینده کسر مساحت-حجم مانع ( $FAVOR^{24}$ )، شبکه حل به فرم مذکور یک مزیت خواهد بود. در بخش‌های زیر به جنبه‌های مختلف مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار FLOW3D پرداخته می‌شود.

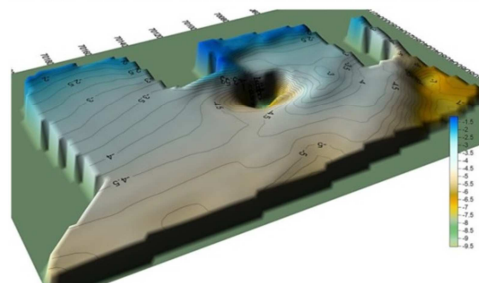
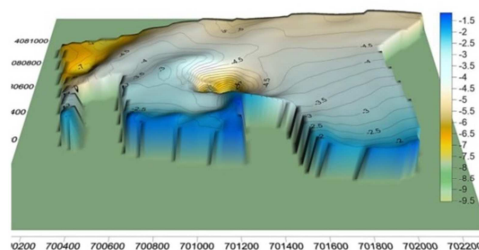
سیال تعریف شده در این مدل آب معمولی با چگالی  $1000 \text{ kg/m}^3$  و ویسکوزیته  $1.014 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  و دمای  $20$  درجه سانتی‌گراد است.

#### ۴-۱ آنالیز حساسیت مش

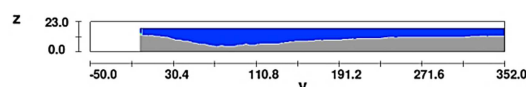
یکی از مسائل اصلی در حل عددی معادلات با مشقات جزئی، ایجاد مش مناسب می‌باشد. با ایجاد یک شبکه‌بندی مناسب می‌توان حل سیستم معادلات دیفرانسیل را تا حد زیادی ساده کرد. انتخاب نامناسب محل نقاط شبکه می‌تواند باعث ناپایداری یا عدم همگرایی در محاسبات گردد. در این مطالعه جهت آنالیز حساسیت مش ابتدا مش یکنواخت و تودرتو با یکدیگر مقایسه شده است سپس در جهت عمق با تغییر اندازه سلول‌ها استقلال جواب‌ها از شبکه مش بررسی گردیده است.

#### ۴-۱-۱-۱ مقایسه مش تودرتو و یکنواخت

ابتدا برای رسیدن به نتیجه کلی از حل، جهت مدل‌سازی جریان آشفته در نرم‌افزار FLOW3D، از مش یکنواخت با ابعاد یک متر استفاده گردید که زمان اجرای برنامه برای مدل‌سازی جریان آشفته، بدون در نظر گرفتن پخش حرارت، حدود ۳۵ ساعت و تعداد کل سلول‌های محاسباتی  $1694085$  گردید، سپس جهت بهینه‌سازی حل، شبکه مش تصفیه گردید و پس از بررسی و شبیه‌سازی چند مدل مختلف همانند شبکه مش یکنواخت با ابعاد دو متری، شبکه مش چند بلوکی و تودرتو، در نهایت از یک شبکه مش تودرتو جهت فرآیند شبیه‌سازی استفاده شد. تعداد بلوک‌های تودرتو شامل



شکل ۲- نمای سه بعدی حفره آبخسته شده [۱۷].



شکل ۳- نمای جانبی پروفیل آبخستگی مقابل تخلیه کننده نکا.

#### ۴-۲ مدل‌سازی انتقال رسوب تحت جت آبگرم

مدل عددی FLOW3D با سیستم مختصات دکارتی برای تحلیل جریان جت آشفته مورد استفاده قرار گرفته است. مدل مورد استفاده فرضیه بوزینسک<sup>20</sup> یا فرض فشار هیدرواستاتیک را برای تجزیه و تحلیل اختلاط اولیه در میدان نزدیک اعمال می‌کند. در این مطالعه، معادلات متوسط گیری شده زمانی ناویر-استوکس (RANS) به عنوان معادله حاکم اعمال شده است که الگوریتم آن در آزمایشگاه ملی لوس آلاموس<sup>21</sup> توسط هرت<sup>22</sup> و همکاران توسعه داده شده است. شبکه حل در این مدل از سلول‌های مکعب مستطیل تشکیل شده است. البته شاید شبکه مکعب مستطیل در نگاه اول یک محدودیت به نظر برسد ولی به علت قابلیت تولید آسان شبکه، نظم مناسب و نیاز به حافظه کمتر و همچنین

20- Boussinesq

21- Los Alamos National Laboratory

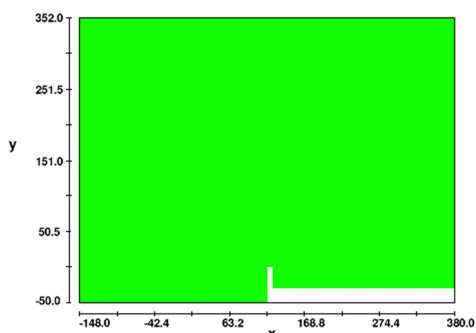
22- Hirt

23- Volume of Fluid

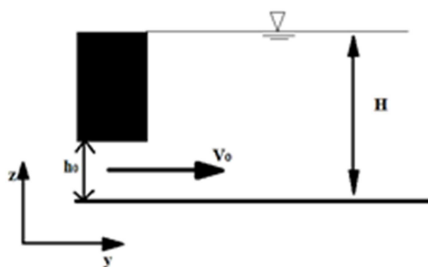
24- Fractional Area-Volume Obstacle Representation

۲-۴- ابعاد هندسی مدل

دامنه مدل سازی دارای ۵۲۸ متر طول، ۴۰۲ متر عرض و ۲۴ متر عمق می باشد. عمق آب ۵ متر، عمق بستر رسوبی ۱۴ متر و ۵ متر هم به عنوان سطح آزاد آب در نظر گرفته شده است. تخلیه کننده از نوع تخلیه کننده عمقی می باشد که توسط یک کانال بتنی تقریباً به طول ۲۶۰ متر به داخل دریا کشیده است. در محل تخلیه آبگرم به دریا، بالای کانال توسط بتن پوشیده شده تا آبگرم از پایین با ارتفاع کمتری تخلیه شود و دبی مورد نظر که حدوداً ۵۴ مترمکعب در ثانیه می باشد را تأمین کند. شکل ۶ پلان محدوده مدل سازی شده و شکل ۷ نمای جانبی تخلیه کننده را نشان می دهند.



شکل ۶- پلان محدوده مدل سازی شده



شکل ۷- نمای جانبی تخلیه کننده

۳-۴- شرایط فیزیکی

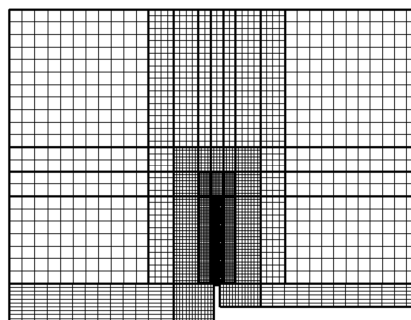
مدل سازی آبستگي ناشی از جت آبگرم با استفاده از معادله تعادل انرژی<sup>۲۵</sup>، ارزیابی چگالی<sup>۲۶</sup>، گرانش<sup>۲۷</sup>،

25- Energy balance equation  
26- Density evaluation  
27- Gravity

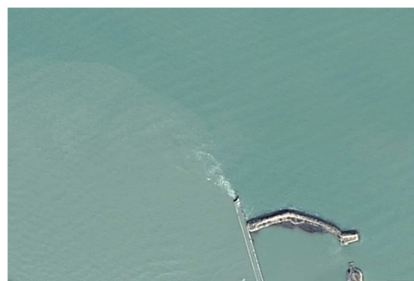
پنج بلوک است و از ابعاد ۱۶ متر شروع و به ۱ متر در نزدیک جت خروجی ختم می شود.

۲-۱-۴- اندازه لایه های عمقی

جهت مدل سازی سطح آب، تعداد لایه های عمقی و همچنین ابعاد آن بسیار حائز اهمیت می باشد. در ابتدا جهت آنالیز حساسیت شبکه مش، اندازه سلول ها در جهت عمق ( $\Delta z$ ) یک متر انتخاب گردید که سطح آب به درستی مدل نشده و مدل ناپایدار می گردید. در نهایت، در راستای عمق اندازه سلول ها نیم متر و از نوع لایه بندی کارتزین انتخاب شد که سطح آب به درستی مدل گردید و همچنین از نظر هزینه محاسباتی بهینه بود. همچنین جهت بررسی استقلال جواب ها از مش، ابعاد سلول ها در راستای عمق ۰/۲۵ متر در نظر گرفته شد که در این حالت جواب ها در مقایسه با ابعاد سلول ۰/۵ متر تفاوت زیادی نداشت. تعداد کل سلول های محاسباتی برای این مدل سازی ۱۹۵۰۸۴ و زمان تقریبی شبیه سازی نیز حدود چهار ساعت می باشد که در این حالت زمان محاسبات به یک هشتم تقلیل پیدا کرده است. شکل نهایی مش حاصل در شکل ۴ و همچنین نمای منطقه محاسباتی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴- شبکه مش تودرتو



شکل ۵- نمای منطقه محاسباتی [Google Earth]



دانه به قطر ۹ میلی‌متر است. ضرایب مربوط به آبخستگی که بهترین جواب‌ها را ارائه داده‌اند شامل چگالی ذرات رسوبی  $2650 \text{ kg/m}^3$ ، ضریب دراگ  $1/5$ <sup>۳۲</sup>، ضریب تعلیق مواد بستر  $0/35$ <sup>۳۳</sup>، ضریب بار بستر  $8$ <sup>۳۴</sup> و زاویه ایستایی  $32$ <sup>۳۵</sup> درجه می‌باشد.

#### ۵-۱- صحت‌سنجی نتایج

در این بخش به صحت‌سنجی نتایج مدل عددی با هیدروگرافی‌های موجود از بستر مقابل تخلیه کننده نکا پرداخته می‌شود. مطالعات انجام شده در بخش دریایی نیروگاه نکا توسط مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو صورت گرفته است. این صحت‌سنجی شامل دو پارامتر اصلی حداکثر طول افقی و حداکثر عمق می‌باشد. طبق نقشه‌های هیدروگرافی شکل ۸-الف، حداکثر فاصله طولی از تخلیه کننده حدود ۷۶ متر می‌باشد. قبل از کالیبراسیون مدل این فاصله ۳۵ متر به دست آمد در ادامه با ایجاد کف‌بند و همچنین اعمال شیب به جت خروجی، این فاصله طبق شکل ۸-ب به ۶۸/۵ متر رسیده است که این مقدار ۹۰/۱۳ درصد فاصله موجود در نقشه‌های هیدروگرافی می‌باشد. همچنین حداکثر عمق حفره آبخستگی در زمان تعادل نسبی با توجه به داده‌های هیدروگرافی مقابل نکا، ۸/۶ متر می‌باشد حداکثر عمق حفره آبخستگی در زمان تعادل نسبی با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده برابر ۵ متر می‌باشد که این مقدار ۵۸/۱۴ درصد کل عمق حفره آب‌شسته شده می‌باشد.

#### ۵-۲- تحلیل نتایج

##### ۵-۲-۱- زمان اجرای مدل

یکی از مسائل مهم در ارزیابی آبخستگی، زمان اجرای مدل‌سازی تا رسیدن به یک مقدار مناسب از لحاظ

انتقال حرارت<sup>۲۸</sup> و مدل آشفستگی لزوج<sup>۲۹</sup> و آبخستگی رسوبات<sup>۳۰</sup> در FLOW3D صورت گرفته است. شرط مرزی بدون لغزش<sup>۳۱</sup> برای تمام سطوح صلب به کار گرفته شده است. در یک مرز بدون لغزش، فرض بر این است که نوعی از پروفیل دیوار در منطقه مرزی وجود دارد، که می‌تواند برای محاسبه تنش برشی مؤثر در دیوار مورد استفاده قرار گیرد. به طور معمول، این شرط مرزی با استفاده از اصطلاح توابع دیوار تنظیم می‌شود [۱۳].

#### ۴-۴- شرایط مرزی

شرایط مرزی برای هر یک از مرزها در جدول ۱ تعریف شده است.

#### ۴-۵- انتخاب مدل آشفستگی

در این مطالعه به منظور شبیه‌سازی میدان جریان سه‌بعدی ناشی از جت عمقی از معادلات متوسط‌گیری شده در زمان ناویر-استوکس (RANS) که بهترین جواب‌ها را ارائه داد استفاده گردید. نرم‌افزار FLOW3D معادلات RANS را با استفاده از روش حجم محدود/اختلاف محدود در یک شبکه مستطیلی اوپلری حل می‌کند. مدل k-e و LES در این تحقیق، نتایج مورد قبولی را ارائه ندادند؛ زیرا پخش‌شدگی جت در این دو مدل به خوبی صورت نگرفت.

#### ۵- نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی برای آبخستگی موضعی ناشی از جت آبگرم خروجی از نیروگاه ارائه شده است. همانطور که ذکر شد دبی تخلیه شده معادل ۵۴ مترمکعب در ثانیه با سرعت ۴/۵ متر بر ثانیه می‌باشد. قطر رسوبات مورد استفاده در شبیه‌سازی شامل ماسه ریزدانه به قطر ۰/۲ میلی‌متر و ماسه درشت

<sup>32</sup>- Drag Coefficient

<sup>33</sup>- Entrainment Coefficient

<sup>34</sup>- Bed Load Coefficient

<sup>35</sup>- Angle of Repose

<sup>28</sup>- Heat transfer

<sup>29</sup>- Viscosity turbulence

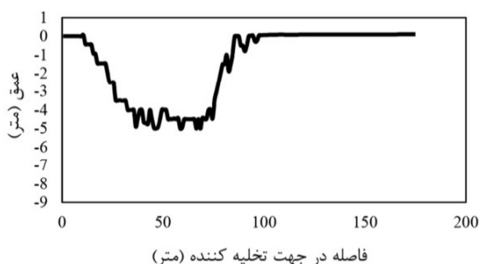
<sup>30</sup>- Sediment scour

<sup>31</sup>- No-slip

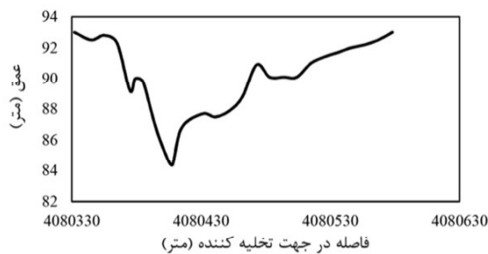
پایداری و ماندگاری جریان و همچنین عمق تعادلی آبخستگی می‌باشد. در تمام شبیه‌سازی‌ها زمان مدل‌سازی روی ۲۴۰۰ ثانیه تنظیم شده است.

جدول ۱- شرایط مرزی مدل عددی.

خروجی کانال تخلیه کننده و ورودی به دریا	مرز خروجی از دریا	کف دریا	سطح آزاد، مرزهای کناری و مرزهای سمت ساحل
Volume flow rate (Q)	Outflow (O)	Wall (W)	Symmetry (S)
شرط مرزی دبی	شرط مرزی خروجی جریان	شرط مرزی دیوار	شرط مرزی تقارن



(ب)

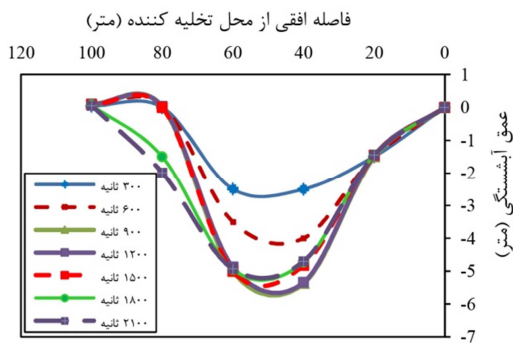


(الف)

شکل ۸- پروفیل بستر آب‌شسته شده، (الف) هیدروگرافی بستر و (ب) نتایج حاصل از شبیه‌سازی

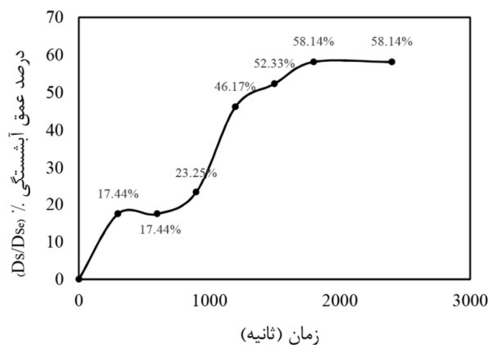
زمان تعادل نسبی، روند پیشرفت عمق آبخستگی ادامه دارد. با گذشت زمان از شدت تغییرات بستر کاسته می‌شود.

این زمان برای پایداری جریان کاهش انتقال حرارت می‌باشد. در بخش مربوط به آبخستگی نیز طبق شکل ۹ تا زمان ۱۸۰۰ ثانیه عمق آبخستگی به میزان ۵۸/۱۴ درصد کل عمق آبخستگی رسیده است و بعد از این مدت تغییرات عمق آبخستگی اندک بوده است. بنابراین در این تحقیق زمان تعادل نسبی ۱۸۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۰- تغییرات زمانی پروفیل طولی آبخستگی

علت این امر این است که با گذشت زمان عمق حفره آبخستگی افزایش یافته و ارتفاع سطح آب نسبت به بستر فرسایش‌پذیر بیشتر شده است و بنابراین عمق جریان در محل حفره آبخستگی در مقایسه با زمان قبل از آن افزایش پیدا می‌کند. طبق قانون پیوستگی جریان، در دبی ثابت با افزایش عمق، سرعت جریان کاهش پیدا می‌کند. در نتیجه، تنش برشی بر روی بستر نیز کاسته شده و نرخ آبخستگی در هر زمان نسبت به قبل کمتر



شکل ۹- تعیین زمان لازم برای شبیه‌سازی عددی

### ۲-۲-۵- تغییرات زمان پروفیل آبخستگی

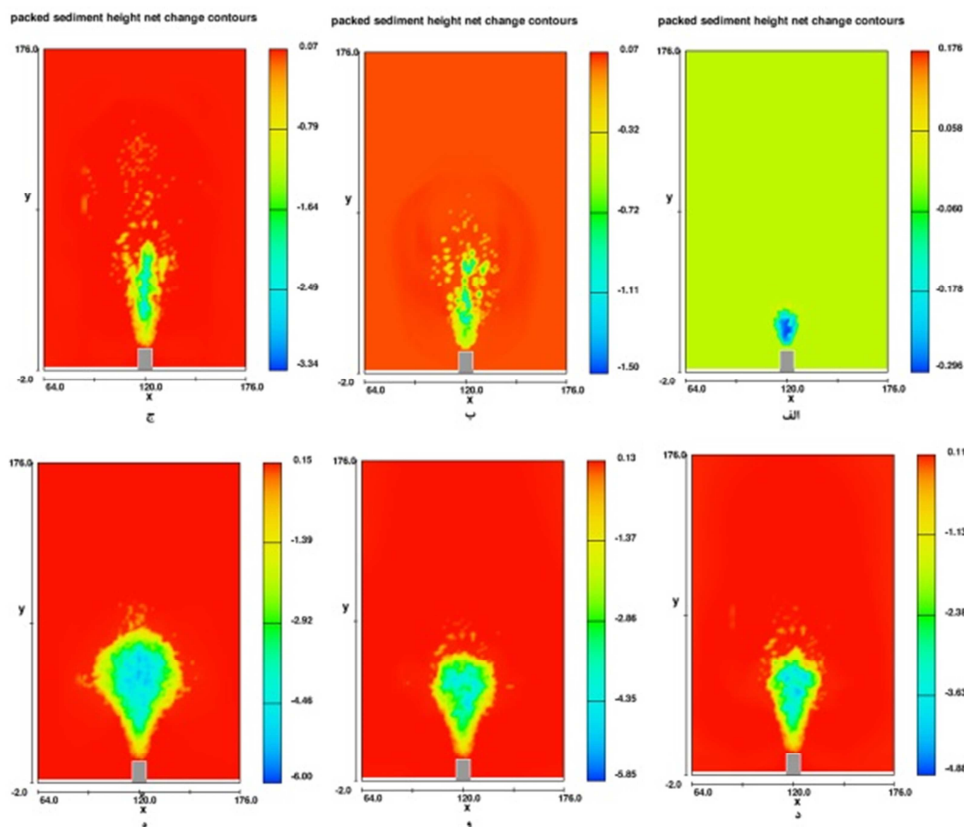
شکل ۱۰ نشان‌دهنده تغییرات زمانی پروفیل آبخستگی می‌باشد. طبق این شکل، قسمت اعظم آبخستگی در ۶۰۰ ثانیه اول رخ داده است و تا رسیدن به

سپس تغییرات در جهت عرضی افزایش پیدا می‌کند. مرحله اول آبخستگی مرحله ابتدایی بوده که ظرفیت آبخستگی بالایی دارد و ایجاد حفره آبخستگی در این مرحله آغاز می‌شود. مرحله دوم مرحله توسعه است که عمق و ابعاد حفره آبخستگی افزایش پیدا می‌کند. در مرحله سوم که تثبیت نام دارد تغییرات نیمرخ بستر کاهش می‌یابد و در مرحله آخر که مرحله تعادل نامیده می‌شود تنها حرکت ذرات درون حفره آبخستگی صورت گرفته بطوریکه ذرات دارای حرکت غلطشی می‌باشند و از درون حفره خارج نمی‌شوند. شکل ۱۱ نشان‌دهنده تغییرات پلان بستر در زمان‌های مختلف بصورت دوبعدی می‌باشد.

می‌شود. با عمیق شدن حفره آبخستگی، گسترش جت خروجی افزایش پیدا می‌کند و از عدم تقارن پروفیل سرعت در امتداد قائم تا حدی کاسته می‌شود. در نتیجه، سرعت جت در مجاورت بستر در زمان‌های پایانی، کمتر از سرعت جت در زمان‌های آغازین مدل‌سازی بوده و قدرت آبخستگی کمتری خواهد داشت.

#### ۵-۲-۳- توسعه آبخستگی در پلان

در جت‌های افقی، جریان موازی بستر اولیه بوده و معمولاً حفره آبخستگی در جهت عرضی متقارن است. روند تغییرات آبخستگی با زمان بدین ترتیب است که ابتدا آبخستگی در جهت طول جت گسترش پیدا می‌کند و بعد از گذشت ۲۷۰ ثانیه از روند تغییرات طولی کاسته شده و



شکل ۱۱- تغییرات پلان بستر در زمان‌های مختلف

به‌صورت عمقی، از لحاظ عددی، مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این مطالعه، از مدل سه بعدی دینامیک سیالات محاسباتی مشهور FLOW-3D استفاده شده است. از داده‌های میدانی برای ارزیابی و صحت‌سنجی

#### ۶- نتیجه‌گیری

مکانیزم ایجاد آبخستگی در ناحیه میدان نزدیک، ناشی از جریان جت آشفته گرم‌شده خروجی از نیروگاه

۴- حداکثر فاصله حفره آبشستگی از جت خروجی در مقایسه با هیدروگرافی بستر با اعمال شیب ۲۰ درجه به جت در جهت بالا و همچنین حفاظت بستر به اندازه ۱۰ متر به دست آمد.

### تقدیر و تشکر

اطلاعات مطالعه موردی این مقاله از سوی مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو فراهم گردیده است. نویسندگان به این وسیله مراتب تقدیر و تشکر فراوان خود از همکاری مسئولین و کارشناسان محترم این مؤسسه را تقدیم می‌دارند.

۱- از بین مدل‌های آشفتگی موجود در نرم‌افزار FLOW-3D، مدل RNG بهترین جواب‌ها را ارائه داد.

۲- نرخ آبشستگی در دقایق ابتدایی بسیار زیاد بوده و به مرور زمان از نرخ آن کاسته می‌شود، به طوری که در ۳۰۰ ثانیه اول ۴۰ درصد عمق آبشستگی در زمان تعادل نسبی (۱۵۰۰ ثانیه) رخ داد.

۳- مدل FLOW-3D فاصله افقی عمیق‌ترین نقطه حفره آبشستگی از دریچه را با دقت بیشتری نسبت به عمق این نقطه تخمین می‌زند.

### مراجع

- [1] Rouse, H. (1940). "Criteria for similarity in the transportation of sediment", University of Iowa Studies in Engineering, Vol, 20, pp: 33-49.
- [2] Doddiah, D., Albertson, M. L., and Thomas, R. K. (1953). "Scour from jets", CER; 54-4.
- [3] Iwagaki, Y., Smith, G. L., and Albertson, M. L. (1958). "Analytical study of the mechanics of scour for three-dimensional jet", CER; 60-9.
- [4] Duckstein, L., Iwagaki, Y., Smith, G. L., and Albertson, M. L. (1960). "Analytical study of the mechanics of scour for two-dimensional jet", CER; 60-12.
- [5] Laursen, E. M. (1952). "Observations on the nature of scour. Proceedings of 5th Hydraulics Conference., state University of Iowa", Bulletin, Vol, 34, pp: 179-197.
- [6] Carstens, M. R. (1966). "Similarity laws for localized scour", Journal of the Hydraulics Division, Vol, 92, Issue. 3, pp: 13-36.
- [7] SAITOU, T. "Studies on the scour from submerged plane jet" in Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers, 1979, pp. 53-63.
- [8] Ushijima, S., Shimizu, T., Sasaki, A., and Takizawa, Y. (1992). "Prediction method for local scour by warmed cooling-water jets", Journal of hydraulic engineering, Vol, 118, Issue. 8, pp: 1164-1183.
- [9] Firouzi, S.M. (2012) "Numerical simulation of local scour due to horizontal submerged jet in downstream of slide gate using Flow3d", MSc thesis, Shahid Abbaspour Water and Power University.
- [10] Kaheh, M. (2013) "Numerical modeling of flow hydraulics and scour in downstream of combined simultaneous over weir and under gate flow using Flow-3D" MSc thesis, Gorgan University of agricultural sciences and natural resources.
- [11] Wei, G., Brethour, J., Grünzner, M., and Burnham, J. (2014). "Sedimentation scour model", Flow Science Report, Vol, 7, pp: 1-29.
- [12] Karbasi, M. and Azamathulla, H. M. (2017). "Prediction of scour caused by 2D horizontal jets using soft computing techniques", Ain Shams Engineering Journal, Vol, 8, Issue. 4, pp: 559-570.
- [13] Mazrouei, M., Majdzadeh Tabatabaei, M., Ghoreishi Najafabadi, H. (2017) "Numerical modeling of local scour due to horizontal submerged jet" 12<sup>th</sup> symposium on advances in science & technology.
- [14] Rodi, W. (1984). "Turbulence models and their application in hydraulics: A state of the art review", Vol.
- [15] Science, F. (2008) "FLOW-3D User Manual", Vol. New Mexico USA.
- [16] Hirt, C. (2011). "FLOW-3D user manual version 10", Flow Science.
- [17] Water Researches Institute (1995) Marine part optimization studies of Neka power plant cooling system.