



## شبیه‌سازی عددی پارامترهای هندسی - هیدرولیکی آبشستگی ناشی از

### جت‌های ریزشی آزاد

شاهرخ امیراصلانی<sup>۱</sup>، محمدرضا پیرستانی<sup>۲</sup>، سید علی اکبر صالحی نیشابوری<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد سازه های هیدرولیکی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب. کارشناس شرکت کارشناس آب منطقه‌ای زنجان

۲- استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

۳- دانشیار گروه مهندسی عمران دانشگاه تربیت مدرس

betonpaye@yahoo.com

خلاصه:

در این مقاله فرآیند شبیه سازی ۳ بعدی آبشستگی در پایین دست یک جت ریزشی آزاد به صورت عددی ارائه شده است. این شبیه‌سازی توسط نرم افزار Flow3D که مبتنی بر روش حجم محدود است، انجام شده است. همچنین برای مدل کردن آشفتنگی جریان از مدل  $k-\epsilon$  استاندارد استفاده شده است. رسوبات از نوع غیرچسبنده و با  $d_{50}=0.127$  در نظر گرفته شده است. نتایج حاصله در یک بازه زمانی معین ۳۰۰ ثانیه با نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته که نتایج حاصل از شبیه سازی عددی مطابقت خوبی را با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: آبشستگی، شبیه سازی عددی، جت ریزشی آزاد، حجم محدود، Flow3D

#### مقدمه:

استفاده از جت‌های ریزشی آزاد در سازه‌های هیدرولیکی یکی از باصرفه ترین روش‌های استهلاک انرژی است. به همین دلیل در بسیاری از سازه‌ها از جمله خروجی کالورت‌ها (درآپ‌ها)، دریچه‌های روزنه‌ای یا سربزهای (overfall) در سدها می‌توان این جت‌ها را مشاهده کرد. اگر چه استفاده از آشفتنگی جریان در محل برخورد جت با پایاب به عنوان یک فاکتور مستهلاک کننده انرژی مفید است. اما در صورتی که پایاب دست جت دارای یک بستر متحرک (کف رودخانه) باشد، احتمال وقوع آبشستگی وجود داشته که پایداری سازه را به مخاطره می‌اندازد. بنابراین تحقیق در این زمینه و فرآیند آن مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است.

از جمله تحقیقات انجام شده توسط افرادی نظیر (Rouse (1938), Laursen (1952), Bohan (1970), Ruffetal (1981), Rajratnam & Beltaos (1977)

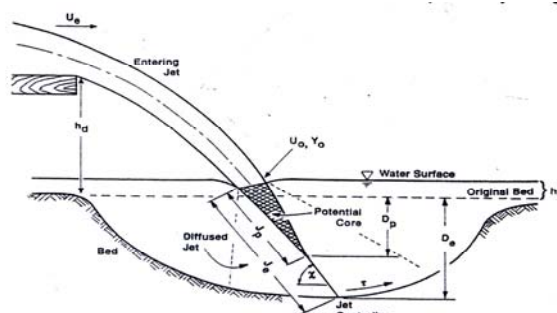
(1983) Milt & Kalin بوده که فرآیند آبشستگی در خروجی کالورت‌ها را به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار داده اند [۱].

Albertson et. al. (1948) جریان ریزشی را می‌توان به دو ناحیه مجزا تقسیم کرده است:

۱- ناحیه استقرار جریان (هسته مرکزی جت)

۲- ناحیه جریان توسعه یافته.

۱- کارشناسی ارشد سازه‌های هیدرولیکی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب. آدرس: زنجان، ضلع شمالی فلکه قائم، شرکت آب منطقه‌ای زنجان  
۲- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب. آدرس: تهران، بلوار ابوذر، ۴۵ متری آهنگ، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران.  
۳- دانشیار دانشگاه تربیت مدرس. آدرس: تهران، بزرگراه جلال آل احمد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران.



شکل ۱- جت ریزشی در لحظه ورود به پایاب [۲].

مطابق شکل (۱) ناحیه استقرار جریان قسمت مرکزی و هسته گوه مانند که در آن سرعت جریان برابر با سرعت جت در لحظه برخورد با سطح پایاب بوده و ناحیه توسعه یافته جریان، در اطراف هسته مرکزی بوده که بدلیل بروز آشفتگی دارای سرعت‌های کمتری نسبت به هسته مرکزی جت می‌باشد. میزان استهلاک انرژی ناشی از آشفتگی جریان باعث تغییر شکل در سطح برخورد جت می‌گردد. آشفتگی جریان در حوضچه استغراق (Plungpool) سبب ایجاد تنش برشی در سطح مشترک سیال و رسوب می‌گردد. در صورتی که این تنش برشی از پارامتر بحرانی شیلدز بیشتر شود. آبشستگی در سطح مشترک آغاز می‌گردد [۳].

(Schoklitsch (1932) از جمله اولین محققینی است که رابطه تجربی زیر را برای پیش‌بینی عمق آبشستگی ارائه کرده است [۳].

$$y_{me} + ht = C_s \frac{q^{0.57} H^{0.2}}{d_{90}^{0.32}} \quad (1)$$

که در آن :  $C_s$  : ضریب ابعادی،  $d_{90}$  : ابعاد ذرات که ۹۰ درصد ذرات ابعادشان از آن کمتر است،  $h_t$  : عمق پایاب،  $H$  : ارتفاع بین لبه ریزش و تراز پایاب،  $q$  : دبی در واحد عرض،  $y_{me}$  : عمق آبشستگی در فاز تعادل می‌باشد.

(Pagliara & Hager (2006) با استفاده از پارامترهای عدد فرود ذرات، زاویه برخورد، میزان استغراق، عمق پایاب، ارتفاع ریزش، قطر خروجی جت، یکنواختی ذرات و نوع رژیم جریان در بالادست، با انجام آزمایشاتی رابطه تجربی ارائه کرده است [۴]. بدلیل وجود هزینه‌های بالای ساخت مدل‌های هیدرولیکی و محدودیت‌های آزمایشگاهی و انجام آزمایشات، استفاده از روش‌های عددی و محاسباتی توجیه پیدا می‌کند. در این زمینه محققینی نظیر: Hoffmans & Booij (1993), Olsen & Kjellesvig (1999, 1998), Olsen & Melaaen (1993), Ushijima et. Al. (1992), Wenka (2000) و صالحی نیشابوری (۲۰۰۴) با انجام تشابه‌سازی عددی آبشستگی پایین دست جت ریزشی به صورت 2D, 3D مورد مطالعه قرار داده‌اند [۵].

در این تحقیق فرآیند آبشستگی در پایین دست یک جت ریزشی آزاد (خروجی کالورت) به صورت 3D بوسیله نرم‌افزار Flow 3D برای مدت زمان ۳۰۰ ثانیه شبیه‌سازی شده و مشخصات هندسه چاله آبشستگی شامل عمق، عرض و طول چاله با نتایج آزمایشگاهی بدست آمده در شرایط مشابه مقایسه گردیده است. همچنین روند تغییرات پروفیل بستر در طی زمان مذکور در دو روش آزمایشگاهی و عددی مورد مقایسه قرار گرفته است.

### شبیه سازی عددی و معادلات حاکم بر آن

در این تحقیق از یک نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به نام نرم افزار Flow 3D – V9.0 جهت شبیه سازی عددی استفاده شده است. روش حل معادلات در این نرم افزار براساس حجم محدود می‌باشند. چنانچه می‌دانیم در جریان‌های همراه با تلاطم و آشفتگی از معادلات متوسط‌گیری شده زمانی جهت در نظر گرفتن اثرات آشفتگی استفاده می‌شود. بنابراین از معادلات پیوستگی و معادلات مومنتم (رینولدز) به ترتیب زیر استفاده می‌شود.



$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} (P \delta_{ij} + \overline{\rho u_i u_j}) \quad (3)$$

که در آن:  $\rho$  = دانسیته سیال،  $u_j$  = مؤلفه سرعت جریان با میانگین زمانی،  $P$  = فشار دینامیکی،  $-\overline{\rho u_i u_j}$  = تنش آشفتگی است. تنش آشفتگی به

کمک رابطه Boussinesq (1993) مطابق رابطه ذیل مدل شده است:

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \rho \nu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (4)$$

برای مدل کردن آشفتگی جریان از مدل  $k-\varepsilon$  استاندارد استفاده شده و لزجت جریان آشفته مطابق رابطه زیر است.

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

که در رابطه فوق  $K$  عبارت است از انرژی جنبشی آشفتگی و  $\varepsilon$  میزان پخش شدگی و استهلاک  $K$  است. معادلات حاکم بر  $K$  و  $\varepsilon$  به صورت زیر ارائه می گردد.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P - \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{K} \quad (7)$$

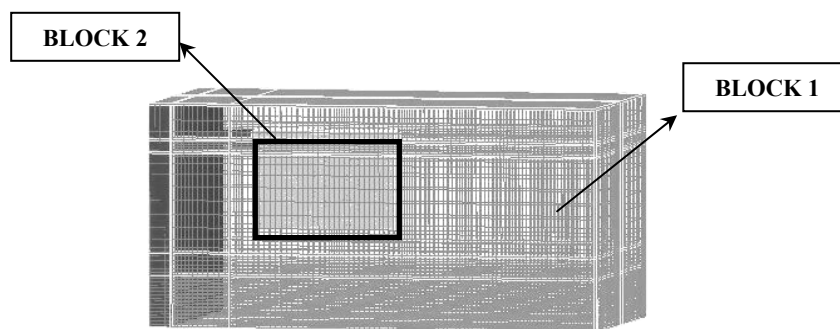
$$P = V_i g = V_i \left[ \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right] \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \quad (8)$$

مقادیر ضرایب بکار رفته عبارتند از:  $C_\mu = 0.09$ ,  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ,  $\sigma_k = 1$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.26$

میدان جریان توسط ۲ بلوک مش بندی شده است. مطابق شکل (۲) بلوک ۱ برای مش بندی کل میدان جریان انتخاب شده است که در آن ۱۴ سانتی متر برای رسوبات کف در پایین دست کالورت لوله ای و ۶ سانتی متر به عنوان عمق پایاب تعریف شده است. برای افزایش دقت در شبیه سازی جریان ریزشی خروجی از کالورت بلوک ۲ نیز تعریف و مش بندی شده است. اندازه سلها در بلوک شماره ۲ ریزتر از اندازه سلها در بلوک شماره ۱ در نظر گرفته شده است (جدول ۱).

جدول ۱- ابعاد و تعداد سلهای بکاررفته در میدان جریان

	X(cm)	Y(cm)	Z(cm)	Ncellx	Ncelly	Ncellz	Ntotal
BLOCK1	136	60	60	97	40	60	232800
BLOCK2	37	5	22	74	10	62	45880



شکل ۲- میدان حل مسئله و شبکه مش بندی شده

مدل آبشستگی (sediment scour) در نرم افزار Flow-3D برای شبیه سازی انتقال رسوب، فرسایش و ته نشینی و تغییر وضعیت استقرار رسوبات در اثر جریان سیال می باشد. مدل آبشستگی از دو میدان غلظت استفاده می کند: ۱- رسوبات معلق، ۲- رسوبات بستر. جابجایی و بلند شدن رسوبات معلق با سیال در اثر تغییرات گرادیان فشار محلی است. این رسوبات معلق ممکن است ناشی از جریان ورودی حاوی ذرات معلق و یا در اثر فرسایش بستر ایجاد گردند. رسوبات بستر بدلیل اینکه توسط ذرات مجاور محدود شده اند براحتی جابجا نمی شوند. رسوبات بستر فقط در صورتی می توانند حرکت کنند که بصورت فرسایش یافته در سطح مشترک بستر و سیال به بار معلق تبدیل شوند و بار معلق در صورتی می تواند به بار بستر تبدیل شود که سرعت ته نشینی بیشتر از سرعت فرسایش بستر باشد. قسمتی از حجم کنترل که توسط ذرات جامد رسوب اشغال شده ( $f_s$ ) و مابقی که از سیال انباشته شده  $f_L$  تعریف می شود به طوری که:

$$f_L + f_s = 1 \quad (9)$$

بار معلق ویسکوزیته واقعی سیال را افزایش می دهد. این افزایش تا زمانی ادامه دارد که جزء حجمی ذرات جامد ( $f_s$ ) به حد جزء حجمی چسبندگی  $f_{sc}$  برسد. پس از آن افزایش بار معلق سبب بالا رفتن ویسکوزیته نمی گردد بلکه سبب می شود ذرات شروع به فعالیت با رفتار جامدگونه ای داشته باشند. در این حالت ویسکوزیته متوسط سیال از رابطه ذیل محاسبه می شود: [۶].

$$\mu^* = \mu_f \left[ 1 - \frac{\text{Min}(f_s, f_{sc})}{f_{sCR}} \right]^{-1.55} \quad (10)$$

که در آن:  $\mu_f$  = ویسکوزیته سیال،  $\mu^*$  = ویسکوزیته متوسط،  $f_{sCR}$  = جزء بحرانی ذرات رسوب (Critical Solid fraction)، دانسیته ظاهری  $\bar{\rho}$  به صورت یک تابع خطی از حجم رسوبات فرض می گردد. [۶].

$$\bar{\rho} = \rho_L + f_s (\rho_s - \rho_L) \quad (11)$$

که در آن  $\rho_s$  و  $\rho_L$  دانسیته ظاهری رسوب و سیال می باشند. طبق تعریف (Drift) عبارت از ته نشینی ذرات رسوب تحت اثر نیروهای شناوری مؤثر بر ذره رسوب می باشد. در مدل آبشستگی در نرم افزار flow 3D ذرات رسوب بصورت کروی شکل فرض شده بگونه ای که تحت اثر ویسکوزیته سیال قرار دارند. لذا مطابق رابطه زیر ضریب ته نشینی ( $D_f$ ) بدست می آید.

$$D_f = \frac{d_{50}^2 (\rho_s - \rho_L)}{18\mu} \quad (12)$$

بنابراین برای محاسبه سرعت ته نشینی خواهیم داشت. [۶].

$$u_{drift} = D_f \times f_L \frac{\nabla P}{\rho} = \frac{f_L \times d_{50}^2}{18\mu} \frac{\nabla P}{\rho} (\rho_s - \rho_L) \quad (13)$$



که در رابطه فوق  $\frac{\nabla P}{\rho}$  عبارت است از گرادیان پتانسیل مکانیکی یا شتاب، به  $\frac{\nabla P}{\rho}$  به ۱۰ برابر وزن ذره محدود شده و باعث حذف نوسانات عددی در مقدار فشار می‌گردد. در نزدیکی سطح آزاد سیال مقدار  $\frac{\nabla P}{\rho}$  با شتاب ثقل (g) جایگزین می‌گردد. ضریب  $f_L$  بکار رفته در معادله فوق بدلیل این است که رسوبگذاری فقط با حضور ذرات جامد (رسوب) امکان پذیر بوده بنابراین در صورتی که حجم کنترل از رسوبات پر باشد  $f_L = 0$  گردیده و بنابراین  $u_{drift} = 0$  خواهد شد. در سطح رسوبات بستر تنش برشی فعال بوده و سبب فرسایش و جابجا شدن رسوب در سطح بستر می‌شود. این فرسایش تابعی از تنش برشی سیال در سطح، تنش برشی بحرانی و دانسیته سیال و رسوب است. پارامتر شیلدرز بحرانی حداقل تنش برشی موردنیاز برای بلند کردن ذرات رسوب از سطح مشترک سیال و بستر فعال را نشان می‌دهد.

$$\theta_{crit} = \frac{\tau_{crit}}{g(\rho_L - \rho_s)d} \quad (14)$$

که در رابطه فوق:  $\theta_{crit}$  = پارامتر شیلدرز بحرانی،  $\tau_{crit}$  = تنش برشی جریان در آستانه حرکت ذره رسوب است. هدف از بسط و تشریح این مدل تخمین و پیش بینی مقدار جریان رسوباتی است که از روی بستر مشترک فرسایش یافته‌اند به همین منظور پارامتر سرعت برشی  $\sqrt{\tau/\rho}$  برای اندازه‌گیری قدرت کف کنی جریان تعریف می‌گردد بنابراین می‌توان سرعت کنده شدن رسوبات از بستر ( $u_{lift}$ ) را مطابق رابطه (۱۵) ارائه کرد [۶].

$$U_{lift} = \alpha n_s \sqrt{\frac{\tau - \tau_{crit}}{\rho}} \quad (15)$$

که در آن:  $n_s$  = بردار نرمال سطح بستر،  $\alpha$  = پارامتر بی بعدی که احتمال کنده شدن ذرات رسوب از بستر را نشان می‌دهد که معمولاً برابر با ۱ یا کمتر است.

در جریان ساکن زاویه اصطکاک داخلی ذرات رسوب میزان حداقل شیبی را که طی آن دیواره‌های حفره آبستنگی می‌تواند پایدار بماند، تعیین می‌کند. زاویه اصطکاک داخلی بالای رسوبات نشان از پایدار بودن شیب دیواره در شیبهای تند دارد مانند رس. در زاویه‌های پایین دیواره، تمایل بسیار برای ریزش و حرکت به سمت جلو دارد، مانند (ماسه).

در قسمت پایین دست حفره که رسوبات به روی هم انباشته می‌گردند و توده‌ای از رسوبات ایجاد می‌کنند وضعیت استقرار رسوبات زاویه‌ای با سطح افق می‌سازند که بیانگر زاویه اصطکاک داخلی می‌باشد. در مدل Flow - 3D این زاویه ( $\zeta$ ) با درجه بیان می‌گردد. زاویه استقرار طبیعی رسوبات در شرایط مختلف مکانی و زمانی مطابق رابطه ذیل محاسبه می‌گردد.

$$\varphi = \frac{n_{interface} \cdot g}{|g|} \quad (16)$$

که در آن  $n_{interface}$  برابر با بردار نرمال سطح و g شتاب ثقل می‌باشد.

تنش برشی بحرانی که در سطح شیب‌دار رخ می‌دهد مطابق رابطه ذیل برای هر سطح بعد از بروز آبستنگی در آن سطح محاسبه می‌گردد.

$$\tau_{crit} = \tau_{crit}^0 \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \varphi}{\sin^2 \zeta}} \quad (17)$$

مطابق رابطه فوق در مواقعی که شیب طبیعی رسوبات با زاویه اصطکاک داخلی آنها برابر می‌گردد ( $\varphi = \zeta$ ) تنش برشی بحرانی برابر صفر شده ( $\tau_{crit} = 0$ ) و این بدان معنی است که سطح بستر در اثر هر نوع تنش برشی وارده دچار فرسایش می‌گردد. همچنین در مواقعی که  $\varphi > \zeta$  مقدار  $\tau_{crit} < 0$  و بدین معنی است که رسوبات بدون وجود تنش برشی هم دچار فرسایش می‌شوند.



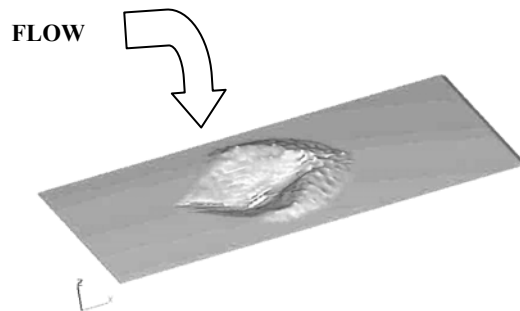
حرکت رسوبات معلق در سیستم بوسیله معادله همرفت - پخش بیان می‌گردد بگونه‌ای که با اضافه کردن ترم‌های ته نشینی (Drifting) و بلند شدن (Lifting) رسوب، معادله مذکور مطابق رابطه ذیل می‌باشد. [۶].

$$\left(\frac{\partial c_s}{\partial t}\right)_x + u \cdot \nabla c_s = D \nabla^2 c_s - u_{lift} \cdot \nabla c_s - u_{drift} \cdot \nabla c_s \quad (18)$$

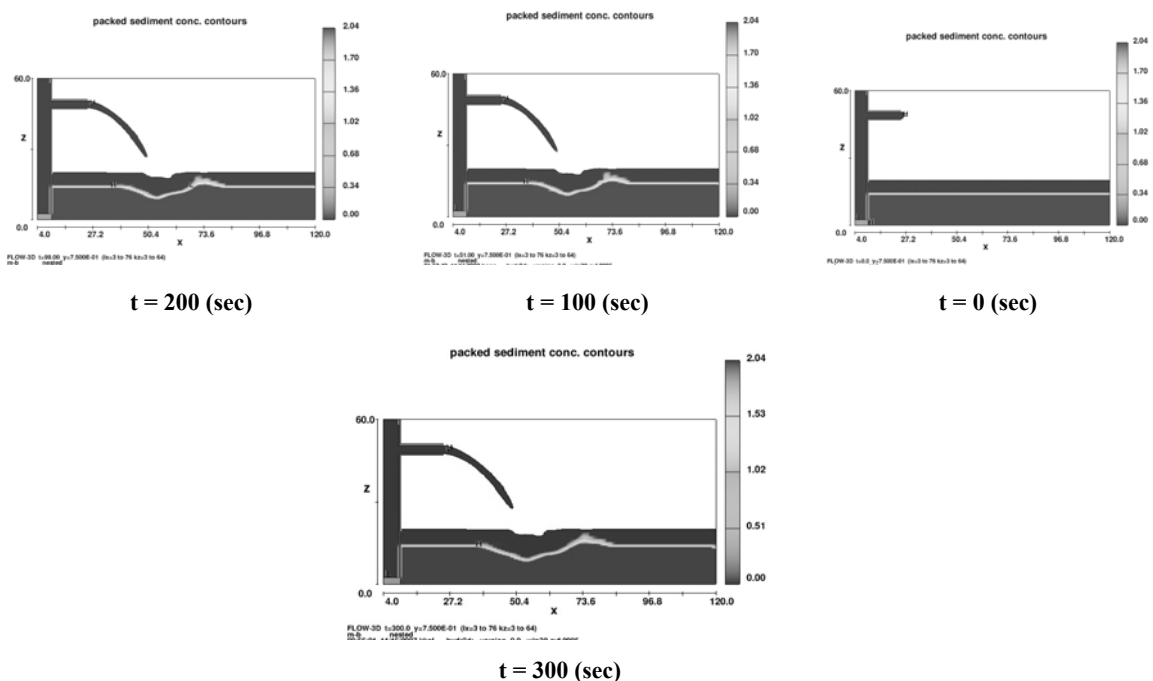
که در آن:  $U$  = سرعت محلی سیال (جریان)،  $U_{lift}$  و  $U_{drift}$  = به ترتیب سرعت‌های مربوطه به بلند کردن و ته نشینی رسوبات می‌باشد.

### نتایج شبیه سازی عددی

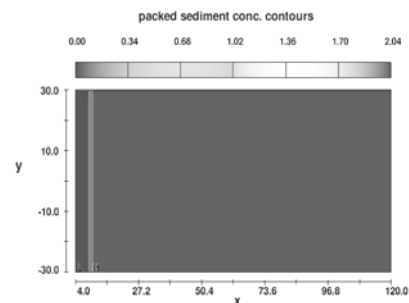
نتایج بدست آمده از شبیه سازی برای مدت ۳۰۰ ثانیه نشان می‌دهد شکل حفره آبستگي حاصل از مدل عددی کاملاً شبیه حفره ایجاد شده در آزمایشگاه بوده که نشان از موفقیت مدل عددی در حل میدان مسئله دارد. نتایج نشان میدهد در ۲۰-۱۵ ثانیه اول آبستگي شدت تغییرات ابعاد حفره (عمق، عرض، طول) بسیار شدید بوده و پس از آن این روند با شدت کمتری دنبال میگردد. در زیر تصاویر و نمودارهای مربوط به حفره تشکیل شده و مقایسه آن با داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده است



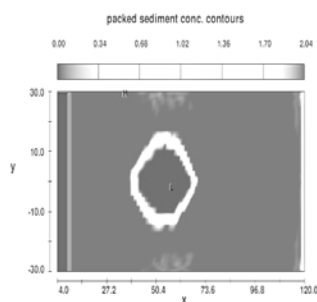
شکل ۳- تصویر ۳ بعدی از حفره آبستگي t=300 sec



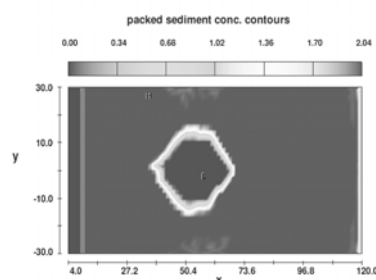
شکل ۴- روند تغییرات عمق آبستگي در زمانهای ۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ ثانیه



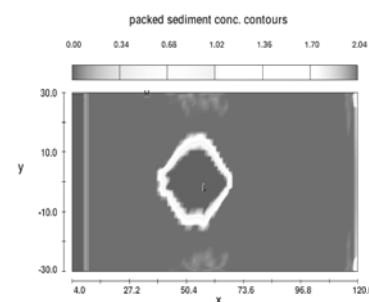
t = 0 (sec)



t = 100 (sec)

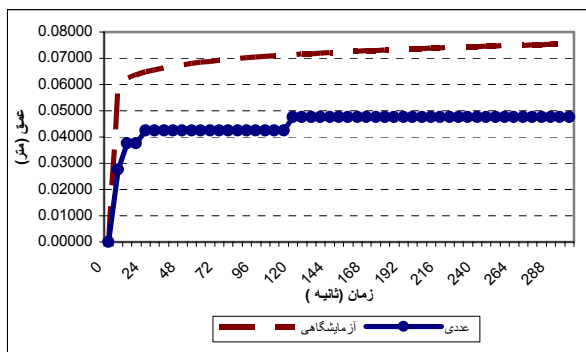


t = 200 (sec)

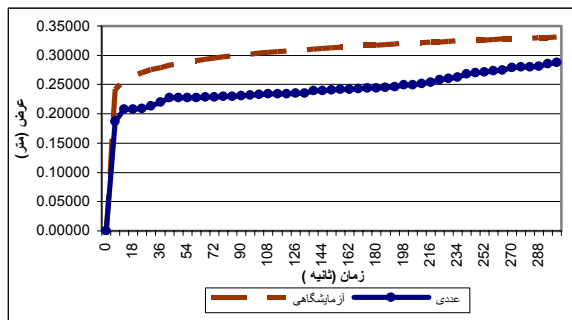


t = 300 (sec)

شکل ۵- روند تغییرات عرض و طول حفره آبستگي در زمانهای ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ ثانیه

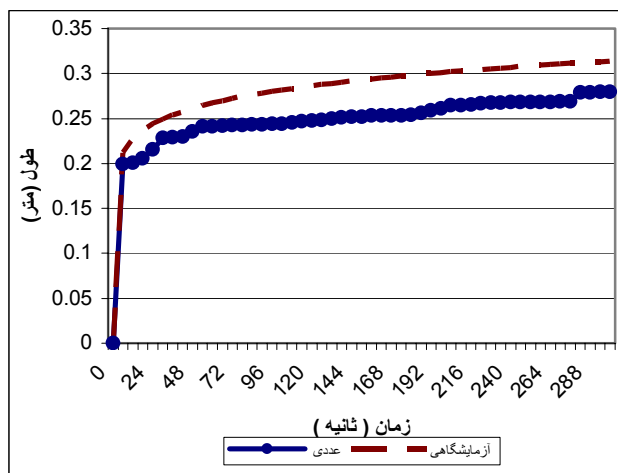


شکل ۶- نمودار تغییرات عمق حفره برای داده های آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی





شکل ۷- نمودار تغییرات عرض حفره برای داده های آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی



شکل ۸- نمودار تغییرات طول حفره برای داده های آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی

### نتیجه گیری

با توجه به نمودارهای ارائه شده برای عمق، عرض و طول چاله آبستگي، شبیه سازی عددی صورت گرفته می تواند نتایج نسبتاً قابل قبولی را برای پیش بینی ابعاد حفره آبستگي ارائه دهد. اجرای مدل عددی نشان می دهد در صورتی که حساسیت مدل افزایش یافته و از بلوکهایی با تعداد سللهای بیشتر و اندازه های کوچکتری استفاده شود نتایج بدست آمده دقیق تر شده ولی زمان اجرای مدل افزایش می یابد. همچنین تغییرات زمانی حفره ایجاد شده ناشی از جت ریزشی آزاد نشان می دهد آبستگي ابتدا به صورت عمقی گسترش یافته و در زمان کوتاهی به مقدار ثابتی می رسد در صورتی که گسترش طولی و عرضی آن ادامه می یابد.

### مراجع

- 1- F.K.Doehring ,Steven R.Abt “ Drop Height influence on outlet scour “journal of hydraulic engineering ASCE , Vol 120,No.12,December ,1994,pp 1470-1476
- 2-O.R.Stein, P.Y.Julien,”Sediment Concentration Blow Free Overfall” “journal of hydraulic engineering , Vol. 120 No.9,September 1994 ,pp 1043-1059
- 3-Gijs J.C.M.Hoffmans (1998) “Jet scour in equilibrium phase “journal of hydraulic engineering, April 1998, PP 430-437
- 4- Stefano Pagliara :Willi H.Hager , (2006) “ Hydraulic of plane plunge pool scour” , “ journal of hydraulic engineering ASCE , MAY 2006 PP 450-461
- 5-A.A. Salehi Neyshabouri , A.M. Ferreira Da Silva “ Numerical simulation of scour by a free falling jet “ J. of hydraulic research Vol 41 No.5 (2003) ,pp533-539
- 6- James Brethour “Modeling Sediment Scour “FLOW Science, Inc. 03-TN62