

بررسی عددی اثر زاویه اصطکاک داخلی رسوبات بر روی ابعاد چاله آبشستگی ناشی از جت ریزشی آزاد

شاهرخ امیراصلانی؛ محمدرضا پیرستانی؛ علی اکبر صالحی نیشابوری

چکیده

در این مقاله فرآیند آبشستگی در پایین دست یک جت ریزشی آزاد بصورت عددی و ۳ بعدی شبیه سازی گردیده است. جهت شبیه سازی از نرم افزار **Flow3D** که مبتنی بر روش حجم محدود است استفاده شده است. برای مدل کردن آشفتگی جریان از مدل $k-\epsilon$ استاندارد استفاده شده است. رسوبات از نوع غیرچسبنده و با $d_{50}=0.127$ و با دوزاویه اصطکاک داخلی ۲۹ و ۳۵ درجه که به ترتیب معرف رسوبات سست و باتراکم متوسط میباشند در نظر گرفته شده است ابعاد حفره آبشستگی شبیه سازی شده در یک بازه زمانی معین با یکدیگر مقایسه گردید. حفره آبشستگی در رسوبات با زاویه اصطکاک داخلی بیشتر دارای طول و عرض کمتری و ارتفاع برآمدگی پایین دست بیشتری نسبت به رسوبات با زاویه اصطکاک داخلی کمتر میباشند.

واژه های کلیدی: آبشستگی، شبیه سازی عددی، جت ریزشی آزاد، زاویه اصطکاک داخلی، **Flow3D**

۱- مقدمه

استفاده از جتهای ریزشی آزاد در سازه های هیدرولیکی یکی از باصرفه ترین روشهای استهلاک انرژی است. به همین دلیل در بسیاری از سازه ها از جمله در خروجی کالورتها (دراپها) دریاچه های روزنه ای یا سرریزهای **overfall** در سدها می توان این جتها را مشاهده کرد. اگر چه استفاده از آشفتگی جریان در محل برخورد جت با پایاب به عنوان یک فاکتور مستهلک کننده انرژی مفید است. اما در صورتیکه بستر پایین دست جت یک بستر متحرک (کف رودخانه) باشد می تواند سبب بروز آبشستگی گردد و پایداری سازه را به مخاطره اندازد. لذا بررسی شرایط بروز این آبشستگی و نظامند کردن فرآیند آن موضوعی است که مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. اکثر مطالعات بصورت آزمایشگاهی بوده است که می توان از تحقیقات

Rouse (1938), Laursen (1952), Bohan (1970), Ruffetal (1981), Rajratnam & Beltaos (1977), Milt & Kalin (1983)

که همگی در زمینه آبشستگی در خروجی کالورتها به مطالعه پرداختند نام برد. [1]

۱- کارشناس ارشد سازه های هیدرولیکی، شرکت آب منطقه ای زنجان betonpaye@yahoo.com

۲- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران.

۳- استاد دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران.

در یکی از جدیدترین پژوهشهایی که بصورت آزمایشگاهی توسط Pagliara & Hager (2006) صورت گرفته معادله عمومی برای حداکثر عمق آبشستگی $Z_m = \frac{z_m}{D}$ بصورت زیر ارائه شده است :

$$Z_m = f_1(F_d) \cdot f_2(\alpha) \cdot f_3(\beta) \cdot f_4(T) \cdot f_5(\delta) \cdot f_6(Fu) \quad (2)$$

عدد فرود ذرات

$$f_1(F_d) = F_d = \frac{V_w}{(g'd_{90})^{1/2}} \quad g' = \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) g$$

زاویه برخورد جت (α)

$$f_2(\alpha) = - [0.38 \sin(\alpha + 22.5)]$$

$$f_3(\beta) = (1 + \beta)^{-m}$$

هوای ورودی به جت (β)

$m=0.75$ برای جریان غیر مستغرق و $m=0.5$ برای جریان مستغرق

اثر عمق پایاب (T)

$$f_4(T) = [0.12 \ln(1/T) + 0.45] / 0.3 \quad T = \frac{h_0}{D}$$

h_0 ارتفاع ریزش و D قطر جت است

$$f_5(\sigma) = - [0.33 + 0.57\sigma] \quad \sigma = \left(\frac{d_{84}}{d_{16}} \right)^{1/2}$$

غیر یکنواختی ذرات رسوب

جریان بالادست (Fu)

$$f_6(Fu) = 1 + Fu^{0.5}$$

علاوه بر مطالعات آزمایشگاهی که صورت گرفته بدلیل هزینه های بالای ساخت مدل‌های هیدرولیکی در آزمایشگاه و محدود بودن دامنه و تنوع آزمایشات استفاده از متدهای عددی و محاسباتی اهمیت ویژه ای بخود گرفت به محققینی چون :

Hoffman & Booij(1993), Olsen & Kjellesvig (1999, 1998) , Olsen & Melaaen (1993) , Ushijima & Shimizu & Sakasi (1992) , Wu.w.RoDi L Wenka (2000) و صالحی نیشابوری

(۲۰۰۴) می توان اشاره کرد که بروی آبشستگی پایین دست جت ریزشی به صورت 2D , 3D تحقیق کردند همه روابط ارائه شده وابستگی اساسی با پارامترهایی نظیر سرعت جت ، عمق پایاب ، دبی جت ، ارتفاع ریزش ، زاویه برخورد جت ، قطر مصالح و یکنواختی و غیریکنواختی مصالح بستر دارند و در بعضی تحقیقات پارامترهایی نظیر مقدار حجم هوای ورودی به جت و استغراق و یا عدم استغراق جت برخوردی نیز مورد توجه قرار گرفته است [2]

در این مقاله فرآیند آبشستگی در پایین دست یک جت ریزشی آزاد (خروجی کالورت) به صورت 3D بوسیله نرم افزار Flow 3D برای مدت زمان $t = 100s$ شبیه سازی گردیده است و مشخصات هندسه چاله آبشستگی شامل عمق ، عرض و طول چاله برای رسوبات با زوایای اصطکاک ۲۹ و ۳۵ که به ترتیب نماینده رسوبات شل و سست و رسوبات با

۲- شبیه سازی عددی و معادلات حاکم بر آن

۱-۲ معادلات حاکم

برای شبیه سازی عددی از نرم افزار Flow 3D – V9.0 که یک نرم افزار برای دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است، استفاده شده است. متد حل معادلات در این نرم افزار براساس روش حجم محدود می باشند. چنانچه می دانیم در جریانهایی همراه با تلاطم و آشفتگی از معادلات متوسط گیری شده زمانی جهت در نظر گرفتن اثرات آشفتگی استفاده می شود. بنابراین از معادلات پیوستگی و معادلات مومنتم (رینولدز) استفاده می شود. [3]

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} (P\delta_{ij} + \overline{\rho u_i u_j}) \quad (6)$$

که در آن ρ دانسیته سیال، u_j مؤلفه سرعت جریان با میانگین زمانی، p فشار دینامیکی، $\rho u_i u_j$ تنش آشفتگی است. تنش آشفتگی به کمک رابطه *Boussinesq* مطابق رابطه ذیل مدل شده است :

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \rho v_t + \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (7)$$

برای مدل کردن آشفتگی جریان از مدل $k - \epsilon$ استاندارد استفاده شده و لزجت جریان آشفته مطابق رابطه ذیل :

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (8)$$

که در رابطه فوق k عبارت است از انرژی جنبشی آشفتگی و ϵ میزان پخش شدگی و استهلاک k است. معادلات حاکم بر k و ϵ را می توان چنین بیان کرد. [3]

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \overline{u_i} \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P - \epsilon \quad (9)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \overline{u_i} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (10)$$

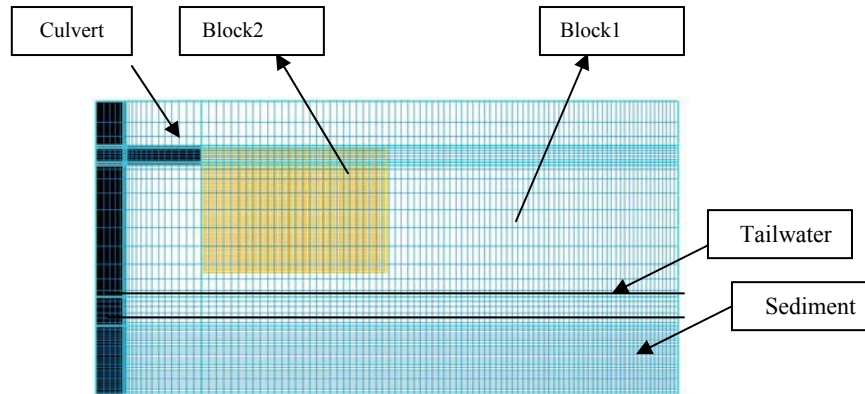
$$P = v_t g = v_t \left[\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right] \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \quad (11)$$

مقادیر ضرایب بکار رفته عبارتند از :

$$C_\mu = 0.09, \quad C_{1\epsilon} = 1.44, \quad C_{2\epsilon} = 1.92, \quad \sigma_k = 1, \quad \sigma_\epsilon = 1.26$$

۲-۲ میدان حل مسئله

میدان جریان توسط ۲ بلوک مش بندی شده است. مطابق شکل ۳ 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 به عنوان ارتفاع 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 بسیار ریزتر از اندازه سلها در بلوک شماره ۱ در نظر گرفته شده است. مشخصات هر یک از بلوکها در ذیل ارائه شده است.



شکل ۲- میدان حل مسئله و شبکه مش بندی شده

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 |

زاویه اصطکاک داخلی رسوبات به نحوه دانه بندی، جنس دانه ها، اندازه ذرات، و میزان تراکم واقعی آنها بستگی دارد. رسوبات با زاویه اصطکاک داخلی ۲۹ درجه به نمایندگی از رسوبات سست و شل (با تراکم نسبی کم) و رسوبات با زاویه اصطکاک داخلی ۳۵ درجه به نمایندگی از رسوبات با تراکم نسبی متوسط انتخاب شده است. شبیه سازی برای مدت زمان ۱۰۰ ثانیه صورت گرفته است. [4]

۲-۳ روش حل نرم افزار Flow-3D

آبشستگی رسوبات (sediment scour) در نرم افزار Flow-3D برای شبیه سازی انتقال، فرسایش، ته نشینی و تغییر وضعیت استقرار رسوبات در اثر جریان سیال می باشد.

مدل آبشستگی از دو میدان غلظت استفاده میکند: 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 بطوریکه:

$$f_L + f_s = 1 \quad (12)$$

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_{sco} 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 بنمایند. در این حالت ویسکوزیته متوسط سیال از رابطه ذیل محاسبه می شود: [5]

$$\mu^* = \mu_f \left[1 - \frac{\text{Min}(f_s, f_{sco})}{f_{sCR}} \right]^{-1.55} \quad (13)$$

که در آن μ_f ویسکوزیته سیال، μ^* ویسکوزیته متوسط، f_{sCR} جزء بحرانی ذرات رسوب (Critical Solid fraction) می باشد. دانسیته ظاهری $\bar{\rho}$ به صورت یک تابع خطی از حجم رسوبات فرض می گردد. [5]

$$\bar{\rho} = \rho_L + f_s (\rho_s - \rho_L) \quad (14)$$

که در آن ρ_s ، ρ_L دانسیته ظاهری رسوب و سیال می باشند. عبارت Drift است از ته نشینی ذرات رسوب تحت اثر نیروهای شناوری مؤثر بر ذره رسوب. در مدل آبهستگی در نرم افزار flow 3D ذرات رسوب بصورت کروی شکل فرض می شوند بگونه ای که تحت اثر ویسکوزیته سیال قرار دارند لذا ضریب ته نشینی (D_f) بصورت اتوماتیک مطابق رابطه ذیل محاسبه می گردد:

$$D_f = \frac{d_{50}^2 \times (\rho_s - \rho_L)}{18\mu} \quad (15)$$

بنابراین سرعت ته نشینی از رابطه:

$$u_{drift} = D_f \times f_L \frac{\nabla P}{\rho} = \frac{f_L \times d_{50}^2}{18\mu} \frac{\nabla P}{\rho} (\rho_s - \rho_L) \quad (16)$$

که در رابطه فوق $\frac{\nabla P}{\rho}$ عبارت است از گرادیان پتانسیل مکانیکی یا شتاب، $\frac{\nabla P}{\rho}$ به ۱۰ برابر وزن ذره محدود می شود و باعث حذف نوسانات عددی در مقدار فشار می گردد. در نزدیکی سطح آزاد سیال مقدار $\frac{\nabla P}{\rho}$ با شتاب ثقل (g) جایگزین می گردد. [5]

ضریب f_L بکار رفته در معادله فوق بدلیل این است که رسوبگذاری فقط با حضور ذرات جامد (رسوب) امکان پذیر است بنابراین در صورتی که حجم کنترل از رسوبات پر باشد $f_L = 0$ گردیده و بنابراین $u_{drift} = 0$ می گردد. در سطح رسوبات بستر تنش برشی فعال است و سبب فرسایش و جابجا شدن رسوب در سطح بستر می گردد. این فرسایش تابعی از تنش برشی سیال در سطح، تنش برشی بحرانی و دانسیته سیال و رسوب است. پارامتر شیلدر بحرانی حداقل تنش برشی موردنیاز برای بلندکردن ذرات رسوب از سطح مشترک سیال و بستر فعال را نشان می دهد.

$$\theta_{crit} = \frac{\tau_{crit}}{g(\rho_L - \rho_s)d} \quad (17)$$

که در رابطه فوق θ_{crit} پارامتر شیلدر بحرانی، τ_{crit} حداقل تنش برشی لازم در طول بستر جهت بلند کردن ذرات رسوب هدف از بسط و تشریح این مدل تخمین و پیش بینی مقدار جریان رسوباتی است که از روی بستر مشترک فرسایش یافته اند به همین منظور پارامتر سرعت برشی $\sqrt{\tau/\rho}$ برای اندازه گیری قدرت کف کنی جریان تعریف می گردد بنابراین می توان سرعت کنده شدن رسوبات از بستر (ulift) را مطابق رابطه (۱۸) چنین ارائه کرد: [4]

$$U_{lift} = \alpha n_s \sqrt{\frac{\tau - \tau_{crit}}{\rho}} \quad (18)$$

که در آن ns بردار نرمال سطح بستر، α پارمتر بی بعدی که احتمال کنده شدن ذرات رسوب از بستر را نشان می دهد که معمولاً برابر با ۱ یا کمتر است. در جریان ساکن زاویه اصطکاک داخلی ذرات رسوب میزان حداقل شیبی که طی آن دیواره های حفره آبستگمی می توان پایدار بماند را تعیین می کند. زاویه اصطکاک داخلی بالای رسوبات نشان از پایدار بودن شیب دیواره در شیبهای تند دارد مانند رس. در زاویه های 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 می گردند و توده ای از رسوبات ایجاد می کنند وضعیت استقرار رسوبات زاویه ای با سطح افق می سازند که بیانگر زاویه اصطکاک داخلی می باشد. در مدل Flow – 3D این زاویه (ζ) با درجه بیان می گردد. زاویه استقرار طبیعی رسوبات در شرایط مختلف مکانی و زمانی مطابق رابطه ذیل محاسبه می گردد:

$$\varphi = \frac{n_{interface} \cdot g}{|g|} \quad (19)$$

که در آن $n_{interface}$ برابر با بردار نرمال سطح و g شتاب ثقل می باشد. تنش برشی بحرانی که در سطح شیبدار رخ می دهد مطابق رابطه ذیل برای هر سطح بعد از بروز آبستگمی در آن سطح محاسبه می گردد

$$\tau_{crit} = \tau_{crit}^0 \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \varphi}{\sin^2 \zeta}} \quad (20)$$

مطابق رابطه فوق در مواقعی که شیب طبیعی رسوبات با زاویه اصطکاک داخلی آنها برابر می گردد ($\varphi = \zeta$) 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 می گردد. همچنین در مواقعی که $\varphi > \zeta$ مقدار $\tau_{crit} < 0$ و بدین معنی است که رسوبات بدون وجود تنش برشی هم دچار فرسایش می شوند. رابطه فوق همچنین نشان میدهد هرچقدر زاویه اصطکاک داخلی ذرات رسوب بیشتر باشد برای اینکه دیواره حفره آبستگمی بدون وجود تنش برشی دچار فرسایش شود ($\tau_{crit} = 0$) باید شیب دیواره (φ) بیشتر گردد و این فرضیه ای است که در این مقاله با شبیه سازی عددی در پی اثبات آن می باشیم

حرکت رسوبات معلق در سیستم بوسیله معادله همرفت - بخش بیان میگردد [3]

$$U_j \frac{\partial c_s}{\partial x_j} - \omega_s \left(\frac{\partial c_s}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial c_s}{\partial x_j} \right) \quad (21)$$

که در آن c_s غلظت رسوبات معلق، ω_s سرعت سقوط ذرات رسوب، Γ ضریب پخش میباشد که برابر است با $(\Gamma = \nu)$

سرعت سقوط ذرات رسوب (ω_s) برابر است با

$$\omega_s = u_{lift} - u_{drift} \quad (23)$$

در نتیجه معادله (21) مطابق رابطه ذیل در حل مسئله شرکت می کند: [5]

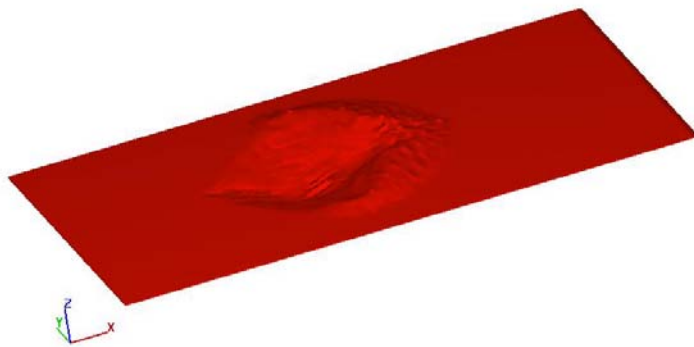
$$\left(\frac{\partial c_s}{\partial t} \right) + u \cdot \nabla c_s = \Gamma \nabla^2 c_s - u_{lift} \cdot \nabla c_s - u_{drift} \cdot \nabla c_s \quad (24)$$

غلظت رسوبات معلق در سطح مشترک بستر رسوبات و آب در قبل از شروع آبشستگی $(t=0)$ برابر است با:

$$C_{so} = f_s \cdot \rho \quad (25)$$

۳- نتایج شبیه سازی عددی

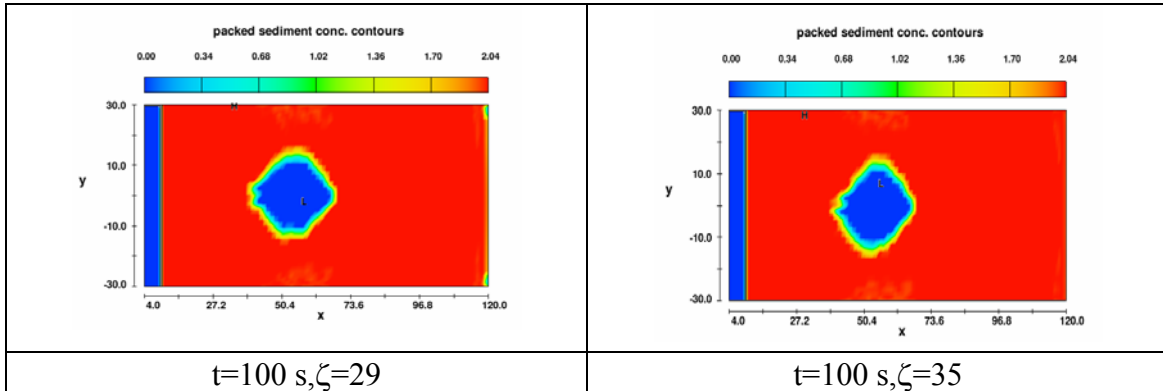
با اجرای برنامه و پس از گذشت ۱۰۰ ثانیه سطح بستر رسوبات تغییر شکل داده و اشفتگی جریان سبب کنده شدن ذرات و جابجایی و در نهایت ته نشست آنها می گردد. شکل ۳ نحوه تغییر و شکل گیری رسوبات را نشان می دهد.



شکل ۳ سطح بستر رسوبات پس از ۱۰۰ ثانیه ناشی از جت ریزشی آزاد

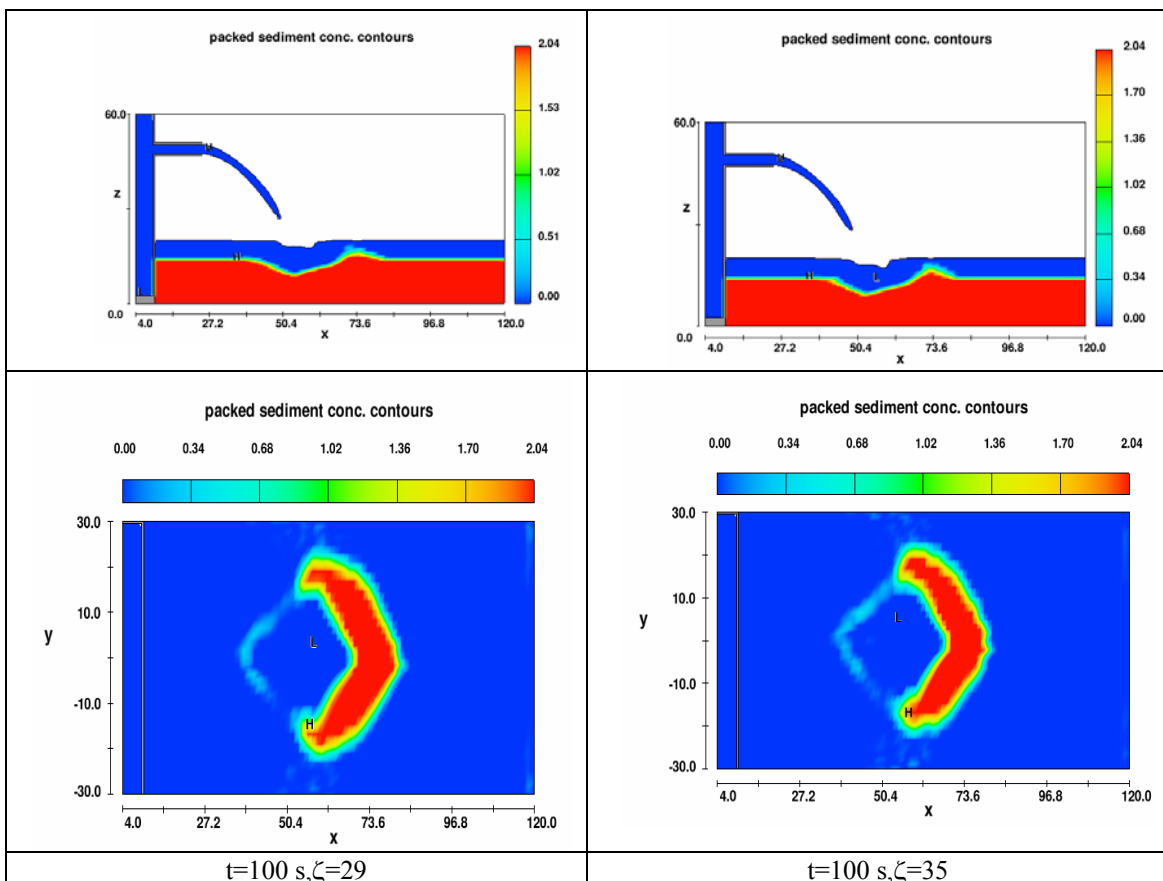
نتایج نشان می دهد شیب دیواره های حفره آبشستگی در رسوبات متراکم $(\zeta=35)$ تندتر از شیب دیواره های حفره در رسوبات سست $(\zeta=29)$ است. طول و عرض حفره آبشستگی با $(\zeta=35)$ کمتر از طول و عرض حفره با

رسوبات ($\zeta=29$) میباشد .



شکل ۴- حفره آبشستگی پس از ۱۰۰ ثانیه

ارتفاع برآمدگی در پایین دست حفره نیز در دو حالت با یکدیگر متفاوت است این ارتفاع برای رسوبات با ($\zeta=35$) بیشتر است و برای رسوبات با ($\zeta=29$) کمتر .



شکل ۵- تغییرات عمق و ارتفاع برآمدگی پایین دست

علیرغم تفاوتی که برای هر یک از پارامترهای هندسی چاله آبشستگی دیده شد، عمق حفره آبشستگی تقریباً برای هر دو نوع رسوبات یکسان بدست آمد دلیل این امر را میتوان چنین عنوان کرد در آبشستگی با رسوبات سست ($\zeta=29$) میزان فرسایش دیواره و حرکت رسوبات به سمت مرکز حفره بقدری است که آشفتگی جریان قدرت کافی برای آبشستگی ندارد و در آبشستگی با رسوبات متراکم ($\zeta=35$) شیب دیواره ها مانع از خروج ذرات رسوب از حفره می شود در نتیجه عمق حفره تغییر محسوسی نمیکند .

جدول ۲ ابعاد حفره آبشستگی برای رسوبات با زاویه اصطکاک ۲۹ و ۳۵ درجه

| t(s) | $\zeta=35$ | | | $\zeta=29$ | | |
|------|------------|--------|--------|------------|--------|--------|
| | hs(cm) | Ws(cm) | Ls(cm) | hs(cm) | Ws(cm) | Ls(cm) |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 3.25 | 18.68 | 20.16 | 3.25 | 16.68 | 18.39 |
| 20 | 4.25 | 18.68 | 20.16 | 4.25 | 20.73 | 19.77 |
| 30 | 4.25 | 20.73 | 22.84 | 4.25 | 20.73 | 22.4 |
| 40 | 4.25 | 20.73 | 22.84 | 4.25 | 22.78 | 22.4 |
| 50 | 4.25 | 22.78 | 22.84 | 4.25 | 22.78 | 22.4 |
| 60 | 4.25 | 22.78 | 22.84 | 4.25 | 22.78 | 22.55 |
| 70 | 4.25 | 22.78 | 24.26 | 4.25 | 24.93 | 22.55 |
| 80 | 4.25 | 24.06 | 24.26 | 4.25 | 27.08 | 23.05 |
| 90 | 4.75 | 24.06 | 25.53 | 4.75 | 27.08 | 23.8 |
| 100 | 4.75 | 24.75 | 25.53 | 4.75 | 27.08 | 23.8 |

۴- نتیجه

زاویه اصطکاک داخلی رسوبات را به عنوان یک پارامتر مهم در تعیین ابعاد حفره آبشستگی ناشی از جت ریزشی در خروجی کالورت می توان در نظر گرفت . نتایج این پژوهش نشان می دهد هرچه قدر زاویه اصطکاک داخلی ذرات رسوب بیشتر باشد می توان انتظار داشت حفره آبشستگی ابعاد (طول ، عرض ، عمق) کوچکتری داشته باشد و ارتفاع برآمدگی رسوبات در پایین دست حفره بیشتر باشد. شیب دیواره ها تندتر بوده و مانعی برای خروج ذرات رسوب از حفره به حساب می آید.

۵- مراجع

- [1]-Gijs J.C.M.Hoffmans (1998) “*Jet scour in equilibrium phase*” journal of hydraulic engineering ,April 1998, PP 430-437
- [2]- Stefano Pagliara :Willi H.Hager , (2006) “ *Hydraulic of plane plunge pool scour*” , “ journal of hydraulic engineering ASCE , MAY 2006 PP 450-461
- [3]-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
- [۴] [۴] پراجا ام داس ، " اصول ژئوتکنیک و مهندسی پی " انتشارات پارسا آئین ، تهران ، جلد ۲ ، نوبت چهارم سال ۷۷
- [5]- James Brethour “*Modeling Sediment Scour*” FLOW Science , Inc. 03-TN62