

معیار آستانه‌ی حرکت ذرات رسوبی در مجاری بسته با مقطع مربع شکل

حسین خزیمه نژاد^{۱*}، محمود شفاعی بجمستان^۲

*۱- دانشجوی دوره دکتری سازه‌های آبی دانشگاه شهید چمران اهواز hkh_59@yahoo.com

۲- استاد، دانشکده‌ی مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ پذیرش: ۸۹/۹/۲۷

تاریخ دریافت: ۸۸/۱۲/۱۰

چکیده

نهشته شدن رسوب در سازه‌های انتقال آب، از جمله سیفون معکوس، باعث کاهش سطح مقطع جریان و همچنین افزایش زبری می‌شود که در نتیجه کاهش آبدهی سازه را به دنبال خواهد داشت. به منظور عملکرد صحیح سازه، ضروری است تا این سازه طوری طراحی گردد تا از تجمع رسوب در مسیر انتقال آب جلوگیری کند و یا در صورت نهشته شدن بتوان با ایجاد شرایط لازم رسوبات را تخلیه کرد. از جمله روش‌های جلوگیری از نهشته شدن رسوب و یا خروج آن‌ها، منظور نمودن سرعت جریان بیش از سرعت آستانه‌ی حرکت ذرات می‌باشد. تاکنون مطالعات زیادی برای تعیین آستانه‌ی حرکت ذرات رسوبی در بستر یا بدنه‌ی کانال‌ها انجام شده است ولی در خصوص جریان در مقاطع بسته از جمله سیفون معکوس مطالعه‌ی اندکی صورت گرفته است. در تحقیق حاضر ابتدا با استفاده از آنالیز ابعادی رابطه‌ی کلی برای شرایط آستانه‌ی حرکت ذرات در مقاطع مربع ایجاد شد. سپس با احداث مدل آزمایشگاهی و به کار بردن پنج نمونه رسوب غیر چسبنده با اندازه ۰/۵، ۰/۷، ۱، ۲ و ۳/۲ میلی‌متر تحت چهار شیب متغیر ۰، ۸، ۱۶ و ۲۴ درجه آزمایش-های لازم انجام گرفت. نتایج به صورت منحنی‌هایی ارائه شده است. با به کار بردن این منحنی‌ها می‌توان سرعت آستانه‌ی حرکت را در مقاطع تحت فشار مربعی به دست آورد. همچنین کاربرد نتایج این تحقیق در تعدادی از سیفون‌های معکوس استان خوزستان ارائه شده است.

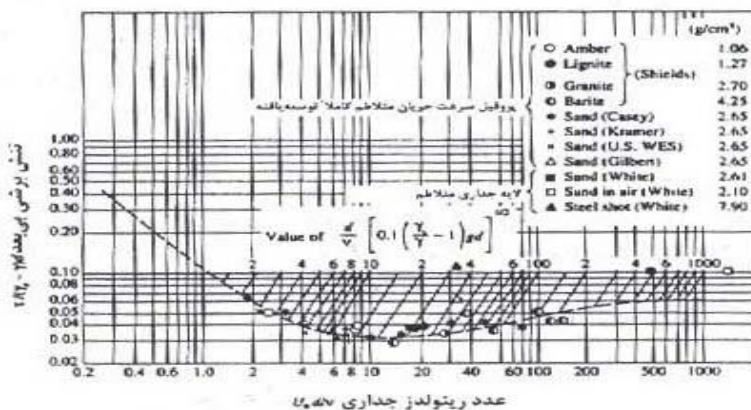
کلید واژه‌ها: آستانه‌ی حرکت ذرات رسوب، مجاری انتقال مربع شکل، سیفون معکوس، کنترل رسوبگذاری

مقدمه

خسارت زیادی به کانال بالادست وارد خواهد کرد. به منظور عملکرد صحیح سازه ضروری است تا طراحی به گونه‌ای انجام گیرد که از تجمع رسوب در مسیر انتقال آب جلوگیری کند و یا در صورت نهشته شدن بتوان با ایجاد شرایط لازم رسوبات را تخلیه کرد. از جمله روش‌های جلوگیری از نهشته شدن رسوب و یا خروج آن‌ها، منظور نمودن سرعت جریان بیش از سرعت آستانه‌ی حرکت می‌باشد. تاکنون مطالعات زیادی برای تعیین آستانه‌ی حرکت ذرات رسوبی در بستر یا بدنه‌ی کانال‌ها انجام شده است ولی در خصوص جریان در مقاطع بسته، از جمله سیفون معکوس، مطالعه‌ی اندکی صورت گرفته است.

نهشته شدن رسوب در سازه‌های انتقال آب باعث ایجاد مشکلاتی نظیر کاهش ظرفیت، کاهش سرعت و به طور کلی کاهش راندمان سازه می‌شود. بخشی از سازه‌های انتقال در شبکه‌های آبرسانی به صورت بسته و با فشار کم می‌باشند که از نمونه بارز آن می‌توان به سیفون معکوس و زیرگذر جاده اشاره کرد. نهشته شدن رسوب در مجاری این سازه‌ها باعث کاهش سطح مقطع جریان و همچنین افزایش زبری می‌شود که در نتیجه کاهش ظرفیت انتقال سازه را به دنبال خواهد داشت و باعث خواهد شد تا در دبی طراحی پس‌زدگی جریان آب به وجود آید که در نتیجه

آستانه‌ی حرکت ذرات در مطالعات انتقال رسوب کانال‌ها و همچنین طراحی آبراهه‌های پایدار



شکل (۱) نمودار شیلدز برای آستانه‌ی حرکت [۲].

است عمدتاً بر مبنای آنالیز ابعادی و استفاده از داده‌های تجربی بوده است. شفاعی بجستان [Shafai-Bejestan, 1990] نشان داده است که شکل عمده‌ی این روابط را می‌توان به صورت زیر نوشت [۱۶]:

$$\frac{V_T}{[g(G_s - 1)d_s]^{0.5}} = a \left(\frac{D}{d_s}\right)^m \quad (۱)$$

که در آن V_T سرعت آستانه‌ی حرکت، G_s چگالی رسوب، d_s اندازه ذرات رسوب، g شتاب ثقل، D عمق جریان و a و m ضرایبی هستند که با استفاده از نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی با شرایط جریان آزاد به دست می‌آید. جدول (۱) این ضرایب را نشان می‌دهد.

گسلر [Gessler, 1965] نیز در این زمینه مطالعاتی را انجام داد. وی نشان داد که منحنی نشان دهنده‌ی آستانه‌ی حرکت در دیاگرام شیلدز، به خصوص برای حالتی که جریان کاملاً در هم و بستر زیر می‌باشد، باید مقداری اصلاح گردد [۲]. بعدها مانند [Mantz, 1977]، یالین و کاراهان [Yalin & Karahan, 1979] در این زمینه مطالعاتی را انجام دادند و دیاگرام‌هایی مشابه دیاگرام شیلدز ارائه دادند [۱۴].

اما تعدادی از محققین علم هیدرولیک رسوب بجای استفاده از تنش برشی، سرعت جریان را به عنوان مهم‌ترین عامل در فرموله کردن آستانه‌ی حرکت به کار برده‌اند. روابطی که پیشنهاد گردیده

جدول (۱) ضرایب a و m در رابطه (۱)

توضیحات	m	a	محقق
بستر کانال	۰/۱۶۷	۱/۴۹	Straub (1953)
بستر کانال	۰/۱	۱/۵۸	Neill (1968)
بستر کانال	۰/۰۹۵	۱/۷۰	Bogardi (1968)
کانال $d_s/D < 0.1$ بستر کانال	۰	۲/۲	Shafai bejestan (1990)
کانال $d_s/D > 0.1$ بستر کانال	۰/۲۵	۱/۲۳۷	
بستر مجاری بسته مستطیلی	۰/۴	۰/۲۸۷	Nalluri & Ghani (1996)
بستر مجاری بسته دایره‌ای	۰/۴۷	۰/۱۲۵	May (2003)

چان [Channe,1994] با استفاده از آنالیز داده‌های تجربی میرل [Mayerl,1988] که حاصل آزمایش روی مجاری مستطیلی با بستر نرم و زبر بود، مقدار متوسط $1/53$ را برای ثابت c پیشنهاد داد. [به نقل از ۱۲].

قانی [Ghani,1993] با استفاده از آزمایش روی رسوبات چسبنده در مجاری دایره‌ای با شرایط جریان آزاد روابط زیر را ارائه نمود [به نقل از ۱۱]:
برای لوله‌های با بستر تمیز:

$$\frac{V_s}{\sqrt{g(s_s-1)d_{50}}} = 3.08C_V^{0.21}D_{gr}^{-0.09} \left(\frac{R}{D}\right)^{0.53} \lambda_s^{-0.21} \quad (4)$$

$$\lambda_s = 1.13\lambda_0^{0.98} C_V^{0.02} D_{gr}^{0.01} \quad (5)$$

برای لوله‌های با بستر شامل مواد نهشته شده ثابت:

$$\frac{V_s}{\sqrt{g(s_s-1)d_{50}}} = 1.18C_V^{0.16} \left(\frac{wb}{y_0}\right)^{-0.18} \left(\frac{d}{D}\right)^{-0.94} \lambda_s^{-0.31} \quad (6)$$

$$\lambda_s = 0.0014C_V^{-0.04} \left(\frac{wb}{y_0}\right)^{0.34} \left(\frac{R}{D}\right)^{0.24} D_{gr}^{0.54} \quad (7)$$

که V_s سرعت خود تنظیفی و یا حداقل سرعتی که در مجرا باید باشد تا ذرات با غلظت C_V نهشته نشوند، C_V غلظت حجمی رسوب بر حسب ppm ، R شعاع هیدرولیکی، λ_s فاکتور اصطکاک برای جریان شامل رسوب، λ_0 فاکتور اصطکاک برای جریان فاقد رسوب، d قطر متوسط رسوب، wb عرض بستر رسوبی، y_0 عمق متوسط جریان، D قطر لوله، s_s چگالی نسبی رسوب، g شتاب ثقل و D_{gr} پارامتر بی

از دیگر روش‌های جلوگیری از نهشته شدن رسوب در مجاری باز یا بسته، تعیین شرایط خود تنظیفی است. یا به عبارتی شرایطی است که در آن رسوبات همراه جریان فرصت نهشته شدن را ندارند. از جمله این مطالعات می‌توان به مطالعات نالوری و همکاران [Nalluri et al.,1994] اشاره کرد. آن‌ها رابطه‌ای برای حد نهشته شدن بار بستر بر پایه‌ی داده‌های وسیعی که برای مجاری مستطیلی تحت شرایط جریان آزاد وجود داشت پیشنهاد کردند. این رابطه هم برای مجاری تمیز که فاقد رسوبات نهشته شده می‌باشند و هم در مجاری با بستر شامل رسوبات نهشته شده ثابت، کاربرد دارد. این رابطه به شرح زیر است [۱۲]:

$$\frac{V_s}{\sqrt{g(s-1)d_{50}}} = 1.94C_V^{0.165} \left(\frac{b}{y_0}\right)^{0.4} \left(\frac{d_{80}}{D}\right)^{-0.57} (6.6\lambda_s^{1.49})^{0.19} \quad (2)$$

$$\lambda_s = 0.88C_V^{0.01} \left(\frac{b}{y_0}\right)^{0.03} \lambda^{0.94} \quad (3)$$

که V_s سرعت حد نهشته شدن، g شتاب ثقل، $s = \frac{\rho_s}{\rho}$ چگالی ویژه رسوب، ρ جرم مخصوص آب، ρ_s جرم مخصوص رسوب، C_V غلظت حجمی رسوب در مقیاس ppm ، b عرض بستر، y_0 عمق آب، d_{50} اندازه متوسط رسوب، D قطر لوله، λ_s و λ ضریب اصطکاک دارسی ویسباخ به ترتیب برای جریان‌های رسوب دار و جریان‌های فاقد رسوب می‌باشند.

در مجاری دایره‌ای به جای b عرض بستر باید $0.5 \times D$ جایگزین شود و برای مجاری مستطیلی به جای D قطر مجرای دایره‌ای پارامتر $c \times b$ جایگزین می‌شود که c یک ضریب ثابت معادل $1/35$ می‌باشد.

[1996] آن‌ها مقدار 0.45 را برای این ضریب جهت طراحی لوله‌ها به کار برده بودند [۸].

با توجه به مطالبی که بیان شد ملاحظه می‌گردد که روابطی برای آستانه‌ی حرکت ذرات رسوبی در مجاری بسته مربعی شکل با شیب معکوس تاکنون ارائه نشده است. از این رو هدف اصلی این تحقیق فرموله کردن شرایط آستانه‌ی حرکت ذرات رسوبی غیر چسبنده در مجاری انتقال آب با مقطع مربعی و تحت فشار کم با شیب‌های متفاوت می‌باشد.

تحلیل ابعادی

برای رسیدن به اهداف این تحقیق ابتدا لازم است تا رابطه‌ی کلی برای تعیین شرایط آستانه‌ی حرکت ذرات استخراج گردد. از این رو از آنالیز ابعادی استفاده می‌شود. از آنجا که محاسبه‌ی سرعت جریان در مجاری بسته آسان‌تر از محاسبه تنش برشی است، لذا از پارامتر سرعت در آنالیز استفاده می‌شود. بنابراین چنانچه V_T سرعت جریان در آستانه‌ی حرکت در مجاری بسته باشد، می‌توان نوشت:

$$f(V_T, \rho, \rho_s - \rho, D, d_s, \theta, g, \mu) = 0 \quad (12)$$

که ρ جرم واحد حجم آب، $\rho_s - \rho$ جرم واحد حجم مستغرق ذره، D اندازه هر ضلع مربع، d_s قطر متوسط ذرات رسوب، θ زاویه مقطع با شیب معکوس نسبت به افق، g شتاب ثقل زمین، μ ضریب لزجت دینامیکی آب می‌باشد. با به کار بردن تئوری باکینگهام و انتخاب سه پارامتر V_T ، d_s و g به عنوان سه متغیر تکراری، رابطه‌ی (۱۲) را می‌توان به رابطه بدون بعد به صورت زیر تبدیل نمود:

$$\frac{V_T}{\sqrt{g(G_s - 1)d_s}} = f_3\left(\frac{d_s}{D}, \theta, R_e\right) \quad (13)$$

در این رابطه G_s چگالی نسبی ذرات رسوبی، $\frac{d_s}{D}$ نسبت اندازه ذره به بعد مقطع تحت فشار که بیشتر به

بعد است که نماینده اندازه‌ی ذره بوده و به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$D_{gr} = d \left(\frac{G_s - 1}{\nu^2} g \right)^{1/3} \quad (8)$$

تحقیق دیگری نیز توسط می، [May 2004] در زمینه‌ی نهشته شدن رسوب در سیفون معکوس انجام گرفته است. آزمایش‌های وی جهت تعیین کم‌ترین سرعت برای جلوگیری از نهشته شدن رسوب در شیب‌های معکوس و لوله‌های عمودی انجام شد. وی 107 آزمایش مجزا با غلظت‌های مختلف رسوب، اندازه ذرات و زاویه‌ی شیب لوله انجام داد. وی دو نمونه رسوب ماسه و شن با اندازه‌های متوسط 0.78 و $4/3$ میلی‌متر را در شیب‌های 0 ، 15 ، $22/5$ ، 30 ، $37/5$ ، 45 ، 60 و 90 درجه مورد آزمایش قرار داد و روابط زیر را ارائه داد. شیب لوله هم در شن و هم در ماسه اثر مشابهی روی مقدار کوچک‌ترین سرعت خود تنظیفی داشت [۸].

$$C_v = (0.0303 - 0.169 \sin \theta) \left(\frac{4}{\pi} \right) \left(\frac{d_{50}}{D} \right)^{0.6} \quad (9)$$

$$\left(1 - \frac{\sigma V_T}{V_s} \right)^4 \left[\frac{V_s^2}{g(G_s - 1)D \cos \theta} \right]^{3/2}$$

$$V_T = 0.125 \sqrt{g(G_s - 1)d_{50}} \left(\frac{D}{d_{50}} \right)^{0.47} \quad (10)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\{\sin \theta + \mu \cos \theta\}}{\mu}} \quad (11)$$

که C_v غلظت حجمی رسوب بر حسب ppm ، θ شیب لوله، d_{50} قطر متوسط ذرات رسوب، D قطر لوله، فاکتور σ مربوط به اثر شیب لوله، V_T سرعت متوسط آستانه‌ی حرکت ذرات رسوب در لوله‌ی افقی، V_s سرعت خود تنظیفی، g شتاب ثقل زمین، S چگالی ذرات رسوب و μ ضریب اصطکاک مؤثر بین رسوب و جدار لوله می‌باشد [Ackers et al.,

قسمت دوم می‌تواند با زاویه‌ی مورد نظر به صورت شیب‌دار قرار گیرد. در انتهای قسمت دوم کانال مستطیلی فلزی به طول ۱/۵ متر، عرض ۰/۵ و ارتفاع ۰/۵ متر قرار دارد. این کانال خود به دو بخش تقسیم شده است. بخش اول وظیفه‌ی آرام کردن جریان را بر عهده دارد. در انتهای بخش دوم سرریز مثلثی ۹۰ درجه برای اندازه‌گیری دبی نصب شده است. حد فاصل بخش اول و بخش دوم برای کنترل سطح آب دریاچه تاشویی نصب شده تا سطح آب همیشه در حدی که برای استغراق دهانه‌ی خروجی لازم است، تنظیم گردد. آب پس از عبور از این سرریز وارد مخزن زیرزمینی آزمایشگاه می‌گردد. ارتفاع قرارگیری کانال انتهایی از کف آزمایشگاه بستگی به شیب قسمت اصلی مدل دارد. از این رو سکوها‌ی متفاوتی با ارتفاعات متغیر برای اینکه کانال روی آن قرار گیرد ساخته شده بود. شکل (۲) نمایی از مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. مواد رسوبی در بستر قسمت دوم مدل قرار می‌گیرد. به منظور قرارگیری آسان رسوب در این مجرا از یک صفحه‌ی فلزی بسیار نازک استفاده گردید، به طوری که ابتدا مصالح رسوبی مورد نظر روی این صفحه قرار داده شده و سپس این صفحه به صورت کشویی به آهستگی درون مجرا قرار می‌گرفت. البته برای این کار لازم بود تا هر بار قسمت سوم از مدل جدا و پس از قرارگیری صفحه پر از رسوب در قسمت دوم، دو قسمت مدل مجدداً به همدیگر متصل شوند. آب از برج اصلی آزمایشگاه به مدل وارد می‌گردید. میزان جریان ورودی قبل از وارد شدن به مدل از طریق شیر قطع و وصل جریان کنترل می‌شد. برای جلوگیری از نشت آب، همچنین آب‌بندی مطمئن مدل، بین فلنج‌های ابتدا، انتها و اجزای مختلف مدل از یک سری لاستیک‌های آب‌بند استفاده گردید.

زبری نسبی معروف می‌باشد، θ زاویه مجرای انتقال نسبت به افق و R_e عدد رینولدز ذره می‌باشد. پارامتر بی بعد $\frac{V_T}{\sqrt{g(G_s - 1)d_s}}$ به عدد پایداری ذره در آستانه‌ی حرکت معروف است و در اینجا با SN_T نشان داده می‌شود [۱۶]. با توجه به اینکه در آزمایش‌های این تحقیق عدد رینولدز ذره بسیار بزرگ‌تر از ۱۰۰ می‌باشد لذا می‌توان به استناد مطالعات شیلدز از اثر آن صرف‌نظر کرد [۲]. در این صورت رابطه‌ی (۱۳) به رابطه‌ی (۱۴) تبدیل می‌شود:

$$\frac{V_T}{\sqrt{g(G_s - 1)d_s}} = f_3\left(\frac{d_s}{D}, \theta\right) \quad (14)$$

مواد و روش‌ها

رابطه‌ی (۱۴) رابطه‌ی کلی بدون بعد برای شرایط آستانه‌ی حرکت می‌باشد. برای برقراری رابطه‌ی خاص نیاز به داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد. از این رو مدل آزمایشگاهی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید چمران اهواز ساخته شد. مدل از سه قسمت تشکیل شده است. قسمت اول، ورودی مدل، مجرای با مقطع مربعی به ابعاد ۱۵ در ۱۵ سانتی‌متر، به طول ۲/۵ متر و از ورقه‌ی فلزی ساخته شده است. وظیفه‌ی این قسمت انتقال آب از لوله‌ی اصلی آزمایشگاه، برقراری جریان نسبتاً یکنواخت و رساندن آن به بخش دوم، قسمت اصلی مدل، می‌باشد. قسمت اصلی یا بخشی که آزمایش‌های رسوب در آن انجام می‌شود، دارای مقطع مربعی به ابعاد ۱۵ در ۱۵ سانتی‌متر، به طول ۱/۸ متر و از پلکسی گلاس ساخته شده است. این دو قسمت توسط فلنج‌های مخصوص به همدیگر و با زاویه‌ی مورد نظر متصل می‌شوند. قسمت اول همیشه در حالت افقی و روی سکوی فلزی قرار دارد. ولی



(ب) قسمت آزمایشی در زاویه ۸ درجه قرار دارد



(الف) قسمت آزمایشی در حالت افقی قرار دارد



(ج) قسمت آزمایشی در زاویه ۱۶ درجه قرار دارد



(د) قسمت آزمایشی در زاویه ۲۴ درجه قرار دارد

شکل (۲) نمایی از مدل آزمایشگاهی و قرار گیری بازوی خروجی سیفون معکوس در چهار زاویه مختلف

جدول (۲) مشخصات مصالح رسوبی مورد استفاده در این مطالعه

ϕ (درجه)	G_S	σ	d_{50} (mm)	رسوب	ردیف
۳۰/۲	۲/۶۵	۱/۲	۳/۲	a	۱
۲۹/۸	۲/۶۵	۱/۱۲	۲	b	۲
۲۹/۴	۲/۶۵	۱/۱۲	۱	c	۳
۲۹/۱۵	۲/۶۵	۱/۱۲	۰/۷	d	۴
۲۹	۲/۶۵	۱/۱۲	۰/۵	e	۵

در جدول (۲)، d_{50} اندازه‌ی متوسط ذرات، σ پارامتر هندسی ذره و مقدار آن برابر است با $\sqrt{D_{84}/D_{16}}$ ، G_S چگالی ذره رسوب و ϕ زاویه ایستایی ذره رسوب می‌باشد.

نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها

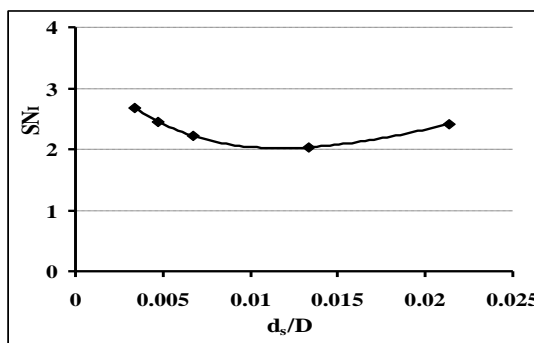
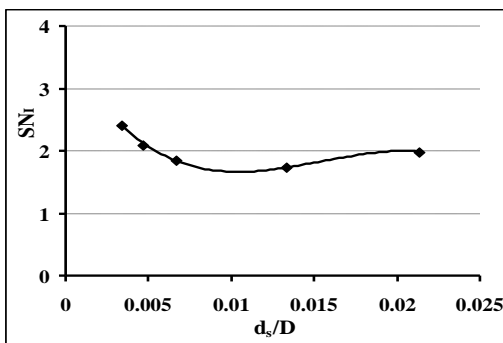
روند انجام آزمایش‌ها بدین صورت بود که قبل از انجام هر آزمایش ابتدا مقطع اصلی مدل، (قسمت دوم مدل) در زاویه یا شیب مورد نظر قرار گرفته سپس روی صفحه کشویی به ضخامت یک سانتی‌متر مواد رسوبی مورد نظر قرار می‌گرفت. آنگاه این صفحه به آرامی درون مقطع اصلی قرار داده شده و نهایتاً مخزن انتهایی به مقطع اصلی متصل می‌گردید.

پس از آماده شدن مدل، شیر قطع و وصل جریان به آرامی باز شده و آب آرام وارد مدل می‌گردید تا اینکه مقطع آزمایش پر از آب گردد. در حین پر کردن جریان چنانچه رسوبات حرکتی می‌کردند جریان قطع و با باز کردن فلنج اتصالی بین قسمت اصلی و کانال انتهایی صفحه رسوبی از درون مقطع اصلی خارج و رسوبات به حالت اولیه برگردانده می‌شدند و مجدداً مدل برقرار و آزمایش شروع می‌گردید. پس از اینکه آب وارد کانال انتهایی می‌شد به کمک دریچه تاشو سطح آب در مخزن خروجی در رقوم مورد نظر تنظیم می‌گردید. این رقوم با توجه به حداقل ارتفاع مورد نیاز حد استغراق که در طراحی خروجی سیفون معکوس و یا زیر گذر جاده باید رعایت شود محاسبه می‌گردید. برای جلوگیری از تغییرات شرایط جریان در مجرای مدل به خصوص افزایش یا کاهش سرعت، این رقوم تا پایان آزمایش ثابت باقی نگه داشته می‌شد. پس از اطمینان از پر شدن مقطع به وسیله‌ی شیر قطع و وصل ورودی، جریان آب آرام افزایش می‌یافت. با هر بار افزایش جریان، شرایط تا مدتی ثابت باقی مانده و در این فاصله‌ی زمانی سطح آب خروجی کنترل شده و اشل سرریز قرائت می‌شد. در این بین هر نوع اتفاق خاصی که در مقطع اصلی رخ می‌داد یادداشت می‌-

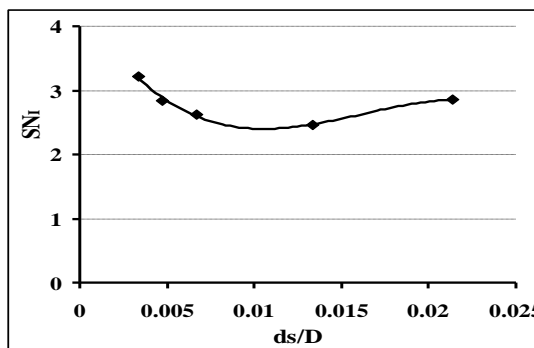
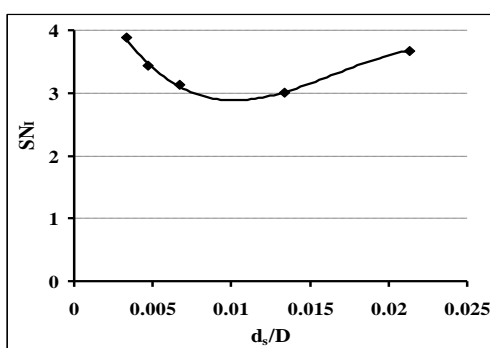
گردید. پس از اینکه شرایط تا مدتی ثابت باقی ماند مقدار جریان ورودی کمی زیاد شده و مراحل قبل تکرار می‌گردید. افزایش تدریجی جریان آنقدر ادامه پیدا می‌کرد تا اینکه شرایط آستانه‌ی حرکت ذرات رسوبی و همچنین حرکت عمومی و یا فرسایش بستر، کاملاً مشاهده شود. آستانه‌ی حرکت در اینجا به شرایطی اطلاق می‌گردد که در آن شرایط، ذرات رسوبی به حرکت در آمده باشند و شامل حرکات منقطع و نوسانی جزئی نمی‌گردد. البته موقعیت شروع حرکت ذرات رسوبی در آزمایش‌های مختلف متفاوت بود ولی عمده‌تاً در نقاط ابتدایی مشاهده می‌شد. در طول هر آزمایش وضعیت حرکت رسوب در مقطع اصلی اعم از شروع آبشستگی، آستانه‌ی حرکت، فرم-های بستر یادداشت می‌گردید. همچنین در حین آزمایش چندین مرتبه مقدار دبی مدل و سطح آب بالادست کنترل می‌گردید تا احياناً تغییری نکرده باشد. پس از اتمام آزمایش فلنج انتهایی باز شده و رسوب باقی مانده روی صفحه‌ی فلزی خارج می‌گردید. مقداری از رسوبات نیز وارد مخزن شده که پس از جمع‌آوری خشک شده و برای انجام آزمایش‌های مرحله‌ی بعد آماده می‌شدند. مراحل فوق برای هر پنج ذره‌ی رسوب انجام می‌گرفت. پس از اتمام آزمایش-های فوق، مقطع اصلی در شیب دیگری قرار گرفته و کلیه‌ی مراحل فوق مجدداً برای پنج نوع ذره‌ی رسوبی انجام می‌شد.

نتایج و بحث

با توجه به نتایج آزمایش‌ها و رابطه (۱۴)، شکل (۳) ترسیم گردید. (برای کسب اطلاع بیشتر می‌توان به منبع [۱] مراجعه کرد).

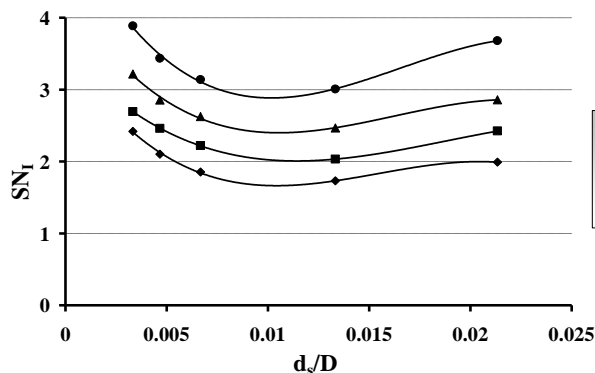


الف) مجرای افقی تحت فشار با مقطع مربع ب) مجرای شیب‌دار (۸ درجه) تحت فشار با مقطع مربع



ج) مجرای شیب‌دار (۱۶ درجه) تحت فشار با مقطع مربع د) مجرای شیب‌دار (۲۴ درجه) تحت فشار با مقطع مربع

شکل (۳) تغییرات پارامتر عدد پایداری در برابر زبری نسبی



شکل (۴) تغییرات پارامتر SN_I در برابر پارامتر $\frac{d_s}{D}$ برای زوایای مختلف

نسبی ابتدا کاهش و سپس کمی افزایش می‌یابد شکل (۴) کلیه‌ی داده‌ها را نشان می‌دهد.

در این شکل‌ها عدد پایداری ذره در مقابل نسبت اندازه‌ی ذره به ضلع مقطع تحت فشار مربعی شکل، برای شیب‌های مختلف ترسیم شده است، همان‌طور که ملاحظه می‌شود عدد پایداری ذره با افزایش زبری

جدول (۳) مشخصات سیفون‌های معکوس در حال ساخت در استان خوزستان

زاویه بازوی خروجی	ابعاد باکس (m)	تعداد باکس	سرعت (m/s)	دبی (m ³ /s)	طول (m)	نام سیفون
۸	۳/۷۵×۳/۷۵	۳	۱/۵۴	۶۵	۴۲۰/۶	کرخه
۱۷/۵	۳/۳×۳/۳	۳	۲/۰۸	۶۸	۴۷/۳۹	پای پل کیلومتر ۲۰۰+۵
۱۰/۵	۳×۳	۳	۲/۵۲	۶۸	۱۱۹/۲۳	پای پل کیلومتر ۲۰۰+۱۷
۱۸	۳×۳	۳	۱/۹۷	۵۳/۲۵	۵۰	پای پل کیلومتر ۲۴۰+۵۵
۱۱	۲/۲×۲/۲	۲	۱/۸۹	۱۸/۳۰	۱۰۰	پای پل کیلومتر ۸۲۵+۸۹
۱۴	۲/۱×۲/۱	۲	۱/۹۶	۱۷/۳۰	۱۵۰	پای پل کیلومتر ۷۵۵+۹۲
۱۲	۲/۱×۲/۱	۲	۱/۹۶	۱۷/۳۰	۱۰۰	پای پل کیلومتر ۰۵۰+۹۵
۹	۲×۲	۲	۱/۹۵	۱۵/۶	۱۰۰	پای پل کیلومتر ۷۱۰+۹۶
۱۱/۵	۲×۲	۲	۱/۹۵	۱۵/۶	۲۰۰	پای پل کیلومتر ۱۰۰+۱۰۰

بازوی افقی و چه در بازوی شیب‌دار خروجی، شرایط نهشته شدن در دبی طراحی پیش نخواهد آمد. نتایج این جدول نشان می‌دهد که سرعت‌های بحرانی محاسبه شده با استفاده از نتایج این مطالعه و نتایج نالوری بسیار به هم نزدیک می‌باشد. البته مقادیر بدست آمده با روش می بسیار کوچک می‌باشند و دلیل آن این است که رابطه‌ی می برای مقاطع دایره-ای می‌باشد. علاوه بر این نتایج می‌توان اندازه ذره‌ای که سرعت طراحی سیفون آن را در شرایط آستانه‌ی حرکت قرار می‌دهد را نیز محاسبه نمود. مشخص نمودن این ذره کمک زیادی در جهت طراحی شبکه آشغال‌گیر، ابعاد و کیفیت حوضچه‌ی آرامش کانال بالادست خواهد نمود.

کاربرد نتایج این مطالعه در تعدادی از طرح‌های انتقال آب استان خوزستان

در راستای کاربرد نتایج این تحقیق، تعدادی از سیفون‌های معکوس در حال ساخت در استان خوزستان نیز مورد بررسی قرار گرفتند که مشخصات آن‌ها در جدول (۳) ارائه شده است.

در جدول (۴) سرعت بحرانی استخراج شده از نتایج مطالعه حاضر (مقطع آزمایش با شیب صفر درجه) و روابط تجربی نالوری و می (ارائه شده برای شیب افقی) برای ذره با قطر ۳/۵ میلی‌متر آمده است. انتخاب این اندازه با توجه به بررسی‌های به عمل آمده روی کانال‌ها و مجاری انتقال آب استان خوزستان حاصل شده است. با مقایسه‌ی سرعت بحرانی محاسبه شده و سرعت جریان ملاحظه می‌شود که در هیچ‌کدام از سیفون‌های معکوس مورد نظر، چه در

جدول (۴) سرعت بحرانی برای ذره‌ی با قطر ۳/۵ میلی‌متر در مقاطع میانی (افقی) و انتهایی (معکوس) سیفون‌های معکوس در حال ساخت در استان خوزستان

سرعت آستانه حرکت m/s				نام سیفون	ردیف
می شیب افقی (لوله)	نالوری شیب افقی	مطالعه حاضر			
		شیب معکوس	شیب افقی		
۰/۷۹	۱/۱۱	۰/۸۹	۰/۸۴	کرخه	۱
۰/۷۴	۱/۰۶	۰/۹۵	۰/۸۲	پای پل کیلومتر ۲۰۰+۵	۲
۰/۷۱	۱/۰۲	۰/۸۳	۰/۸	پای پل کیلومتر ۲۰۰+۱۷	۳
۰/۷۱	۱/۰۲	۱	۰/۸	پای پل کیلومتر ۲۴۰+۵۵	۴
۰/۶۱	۰/۹	۰/۸۱	۰/۷۶	پای پل کیلومتر ۸۲۵+۸۹	۵
۰/۶	۰/۸۸	۰/۸۶	۰/۷۴	پای پل کیلومتر ۷۵۵+۹۲	۶
۰/۶	۰/۸۸	۰/۸۱	۰/۷۴	پای پل کیلومتر ۵۰+۹۵	۷
۰/۵۹	۰/۸۷	۰/۷۲	۰/۷۴	پای پل کیلومتر ۷۱۰+۹۶	۸
۰/۵۹	۰/۸۷	۰/۸۶	۰/۷۴	پای پل کیلومتر ۱۰۰+۱۰۰	۹

تشکر و قدردانی

این مطالعه با حمایت مالی سازمان آب و برق خوزستان معاونت طرح و توسعه‌ی نیروگاه انجام گردید و نویسندگان از این بابت تشکر و قدردانی خود را اعلام می‌دارند.

منابع

۱. خزیمه نژاد، حسین، (۱۳۸۳)؛ "بررسی شرایط آستانه‌ی حرکت رسوب در بازوی خروجی سیفون معکوس" پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد تأسیسات آبیاری، دانشکده‌ی مهندسی علوم آب دانشگاه شهید چمران اهواز.
۲. شفاعی بجزستان، محمود، (۱۳۷۸)؛ "هیدرولیک رسوب" انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، ویرایش دوم.

3. Desutter.R.and.Roshforth.P.J.and.Tait.S.J.and.Huygens.M.and.Verhoeven and Saul A.J ,(2000) ,“The erosion of cohesive mixed deposits : implications for sewer flow quality modeling. ” Urban water 2,pp 285-294.
4. Dey . S, (2002),“ Incipient motion of gravel and coal beds. ” sadhana vol .27 ,part.5 , pp.559-568.
5. Dey . S ,(1999) , “Sediment threshold. ”, Applied. Mathematical. Modeling 23 , pp 399-417

6. Hrissanthou. V .and. Hartmann .S ,(1998), “measurement of critical shear stress in sewer. ” Journal of water . Res , Vol 32 , No 7 , PP 2035-2040.
7. Lenzi. M.A..and.Agostino.V.Billo.P,(1999) “ Bed load transport in instrument catchment of the Riocondon. ”catena 36, pp 171-190
8. May . R.W.P, (2003) ,“preventing sediment deposition in inverted sewer siphons .,” Journal of Hydraulic Engineering ,ASCE, April.pp.283-290.
9. May . R.W.P.and. Ackers.C.J.and.Butler.D.and.John.s , (1996), “Development of design methodology for self-cleansing. ” wat . sci . tech . vol .33 No .9 ,pp .195 – 205 .
10. Nalluri . C, El_Zaeme .A.K. and .H.L.Chan ,(2002),“sediment transport over fixed deposited beds in sewers _An.Appraisal of existing models. ”,wat.sci.tech,vol.36,no.8_9,pp123_128 .1997 ress “ Journal of hydraulic Research , vol . 40, No5 ,pp.123 – 128.
11. Nalluri . C .and.Ghani. A.b , (1996), “Design options for Self_ cleansing storm sewers. ” wat . sci . tech . vol .33 No .9 ,pp .215 – 220 .
12. Nalluri . C .and.Spalliviero. P , (1998)“Suspended sediment transport in rigid boundary channels at limit deposition .” wat . sci . tech . vol .37 No .1 ,pp .147 – 154 .
13. Paquier . A ,(2002), “ River bed deformation calculated from boundary shear stress . ”Journal of Hydraulic Resaerch ,vol.40,No.5.pp.603 – 609.
14. Paphitis . D, (2001) , “sediment movement under unidirectional flows; an assessment of empirical threshold curves.” coastal Engineering 43.pp 227-245 .
15. parker . G, (2002), “Bed load at low shields stress on arbitrarily sloping beds : Failure of Bagnold hypthesis. ” Journal of water Resourse Research , Vol .38 , No .11 , 1249.
16. Shafai Bejestan, M. (1990). " Critical stability number in rock lined channels." Iran Agricultural Research, vol.9, Shiraz university, pp:121-138.
17. Vongvisessomjai . N, (2002), “ Determination of sediment Deposit in waste water collecting sewers of samut prakarn processes and networks .”paris ,france.
18. Yuan . C Fan , (1998), “sewer sediment control : overview of an epa wet – weather flow research program. ” Epa .600 .j.03 . 188