

Scour around a square pier with parabolic nose in presence of woody debris in front of pier

SM. Moshashaie¹, M. Asadi Aghbolaghi^{2*}

1- M.Sc. of Water Engineering, Faculty of Agriculture., Shahrekord University

2- Assistant Prof., Water Eng. Dept., Faculty of Agriculture., Shahrekord University

mahdi.asadi.a@gmail.com

Abstract:

Woody debris accumulates in front of bridge piers, reduces the flow area, deviates the flow and increases the velocity around the bridge piers. Debris accumulation in front of bridge piers increases the downward flow, and shear stress around the bridge pier, therefore, the scour hole depth increases and bed degradation accelerates. Most of previous researchers focused on the scour depth around the bridge piers, and less researchers have investigated the effect of debris accumulation on the scour depth. To the best of our knowledge, the effect of debris accumulation on the scour depth has not been reported in previously published literature, as explored in this work. The purpose of this study is to experimentally investigate the effect of accumulation of woody debris in front of a square pier with a parabolic nose on the scour depth. The experiments were performed in clear water condition, with and without debris accumulation and with 20, 30 and 40 l/s discharges and for different debris dimensions. The experiments were performed in a sixty centimeter width channel at the hydraulic laboratory of Shahrekord University. Previous field studies showed that most debris accumulates in front of bridge piers in rectangular shapes, therefore three different rectangular shapes debris are designed and are placed in front of bridge piers during the experiments. Since, performed experiments at twelve hours showed the maximum equilibrium scour depth occurs at the first seven hours, therefore, all experiments are done in 420 minutes. The results showed that when woody debris is placed over, at, and below the water surface respectively, the ratio of scour depth to the scour depth of control sample is 2.2, 2.36 and 1.44, respectively. Moreover, when the percentage of blockage (ratio of the occupied flow area by debris to the flow cross section) is 30% and when debris is located below the water surface, the maximum scour depth will occur (2.36 with respect to the control sample). Also, the comparison between a square pier with parabolic nose and a sharp nose piers at the same hydraulic condition, show when there are no debris, the scour depth around the square pier with a parabolic nose is less than the scour around a sharp nose square pier (1.5 times). For the case in which debris are placed in front of bridge pier, the scour depth, width, and length around a square pier with a parabolic nose are significantly decreased with respect to a sharp nose square pier (2.3 times). Also, using dimensional analysis an equation is presented for predicting the maximum scour depth around a square pier with a parabolic nose in presence of woody debris accumulation. The results show that there is good agreement between predicted and observed scour depth.

Keywords: Local Scour, Dimensional analysis, Bridge pier, Flow blockage, Experimental study.

آبشستگی در اطراف پایه مربعی با دماغه سهمی شکل در حضور اجسام شناور چوبی در جلوی پایه

سید میثم مشعشی^۱، مهدی اسدی آقباغی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

mahdi.asadi.a@gmail.com

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۵/۲۴]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۶/۱۸]

چکیده- هدف از این پژوهش، تحلیل و بررسی آزمایشگاهی تاثیر تجمع اجسام شناور در جلوی پایه مربعی با دماغه سهمی شکل بر عمق گودال آبشستگی است. آزمایش‌ها در شرایط آب زلال و در دو حالت با و بدون تجمع اجسام شناور در جلوی پایه با دبی‌های ۳۰، ۲۰ و ۴۰ لیتر بر ثانیه و برای ابعاد مختلف اجسام شناور انجام گرفت. نتایج نشان داد که وقتی اجسام شناور بالای سطح آب، هم سطح آب و زیر سطح آب باشند عمق آبشستگی، به ترتیب، بیشینه تا ۲/۲، ۲/۳۶ و ۱/۴۴ برابر نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌یابد. علاوه بر این، زمانی که درصد انسداد (نسبت مساحت اشغال شده جریان به وسیله اجسام شناور به سطح مقطع جریان) برابر با ۳۵/۲۹٪ و اجسام شناور در هم سطح آب قرار گرفته باشند، بیشینه عمق آبشستگی (۲/۳۶ برابر نمونه شاهد) رخ می‌دهد. همچنین در حالتی که اجسام شناور وجود ندارند، میزان آبشستگی پایه مربعی با دماغه سهمی شکل نسبت به حالت پایه مربعی با دماغه تیز، ۱/۵ برابر کمتر است. به علاوه وجود اجسام شناور در جلوی پایه مربعی با دماغه سهمی تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش عمق، عرض و طول گودال آبشستگی نسبت به پایه مربعی با دماغه تیز دارد (۲/۳ برابر). همچنین با استفاده از آنالیز ابعادی معادله‌ی جدیدی برای پیش‌بینی بیشینه عمق آبشستگی با وجود تجمع اجسام شناور چوبی در جلو پایه مربعی با دماغه سهمی شکل ارائه شد.

واژگان کلیدی: آبشستگی موضعی، آنالیز ابعادی، انسداد جریان، پایه پل، مطالعه آزمایشگاهی.

۱- مقدمه

پل با شرایط مختلف هندسی، هیدرولیکی و رسوبی، حتی در حضور سازه‌های حفاظتی متمرکز بوده است. سایر پژوهشگران [۵، ۶، ۷ و ۸] به بررسی تاثیر شدت جریان آب، حجم رسوب، عمق جریان، و شکل هندسی پایه‌های پل بر بیشترین عمق آبشستگی در اطراف پایه‌های پل پرداختند برخی از آن‌ها راهکارهایی برای کم کردن بیشینه عمق گودال آبشستگی (با توجه به دهانه‌ی ورودی، سنگ ریزی، و قالب چهارضلعی پایه) ارائه کردند. این مطالعات طیف گسترده‌ای از متغیرها و وضعیت‌های موثر بر آبشستگی پل را پوشش می‌دهد. از این مطالعات چنین استنباط می‌شود که گودال آبشستگی زمانی به بیشینه مقدار خود می‌رسد که بین وضعیت‌های آب زلال و

انباشتگی تکه‌های چوب و کنده‌ی درختان در اطراف پایه‌های پل باعث انسداد جریان آب رودخانه می‌شود. افزایش آبگرفتگی باعث آبشستگی‌های بیشتر و رسوب‌زدایی و کف‌کنی بیشتری در مقایسه با عدم انباشتگی اجسام شناور می‌شود که خود باعث زیرشویی می‌شوند و بنابراین بر استحکام پل تاثیر می‌گذارد و منجر به خرابی غیرمنتظره‌ی پل‌ها می‌شود [۱ و ۲]. آبشستگی پایه‌ی پل در چند دهه‌ی گذشته بسیار مورد پژوهش و بررسی قرار گرفته است [۳، ۴، ۵ و ۶]. این پژوهش‌ها بیشتر بر بزرگترین گودال آبشستگی، شکل هندسی آبشستگی و روند زمانی تکامل آبشستگی ایجاد شده در اطراف یک یا چند پایه‌ی

بستر زنده در گذار باشد [۵ و ۶]. به علاوه، کم عمق بودن جریان و حجم بالای رسوبات بیشترین عمق تعادل آبشستگی را کاهش می‌دهد [۷].

روند زمانی تکامل بزرگترین آبشستگی در اطراف پایه پل به وسیله‌ی پژوهشگران متعددی مورد بررسی قرار گرفته است [۴، ۵، ۸ و ۹]، این پژوهشگران معادلات متعددی را با توجه به مشاهدات تجربی و میدانی خود مطرح ساختند.

ویژگی‌های اجسام شناور چوبی و کنده‌ی درختان و تأثیر آنها بر شکل ظاهری رودخانه‌ها و انحراف جریان آب به وسیله‌ی برخی از پژوهشگران بررسی شده است [۱۰، ۱۱ و ۱۲]. نتایج این پژوهش‌ها بیشتر بر انباشتگی در رودخانه‌ها و نهرها متمرکز بوده است و مطالعات کمی بر روی تأثیر اجسام شناور بر آبشستگی پایه پل‌ها انجام شده است. اجسام شناور چوبی و کنده‌ی درختان در اثر فرسایش بستر رودخانه و حرکت مجدد کنده‌های چوبی ذخیره شده در بستر سیلابی یا در اثر ریزش کوه یا بهمن به وجود می‌آید. ویژگی‌های هندسی، حجم و احتمال جابه‌جایی تجمع اجسام شناور چوبی به نوع کنده‌های چوبی و جریان آب، یعنی عمق آب، حرکت موجی و پهنای کانال آب، قطر کنده‌ها و طول مسیر بستگی دارد. برادریک و گرنت [۱۰] مشخصات اجسام شناور را بر اساس احتمال رسوب ذرات چوبی در کانال آب و ویژگی این چوب‌ها تعریف کرده‌اند. بعدها لین و همکارانش [۱۱] به بررسی مکانیک تجمع ذرات چوبی بزرگ LWD در اطراف پایه‌های پل پرداختند. شکل ظاهری کانال‌ها و همچنین شکل پایه‌های پل تأثیر چشمگیری بر تجمع اجسام شناور و کنده‌های چوبی در جلو پایه‌های پل دارد. همچنین لین و همکاران [۱۱] بدین نتیجه رسیدند که ابعاد نسبی کنده‌ها با توجه به عمق آب یک پارامتر مهم برای توصیف گرفتگی اجسام شناور است. مشاهده میدانی نشان می‌دهد که تجمع اجسام شناور به صورت تدریجی و نه یکباره، اتفاق می‌افتد و توده‌ی اجسام شناور ابتدا تجمع می‌یابد و در زمان‌های مختلف، حتی زمان‌هایی غیر از زمان اوج هیدروگراف، رشد می‌یابد.

پژوهش‌های تجربی و میدانی متعددی به بررسی تأثیر تجمع

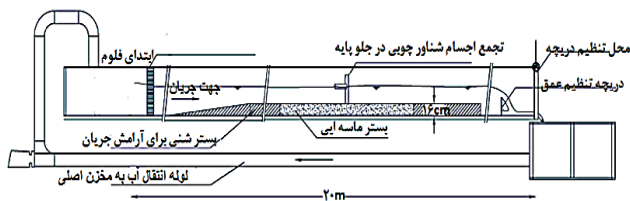
اجسام شناور بر آبشستگی پایه پل‌ها پرداخته شده است [۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶ و ۱۷]. تنها برخی از این پژوهش‌ها، به بررسی آزمایشگاهی تأثیر تجمع اجسام شناور بر آبشستگی پایه‌پل پرداخته‌اند. ملویل و دانگول [۱۳] در مطالعه آزمایشگاهی، اجسام شناور چوبی را در جلوی پایه استوانه‌ای شکل قرار دادند و اثر آن‌ها را بر آبشستگی پایه پل بررسی کردند. آن‌ها عنوان کردند برای در نظر گرفتن اثر تجمع اجسام شناور می‌توان قطر پایه را افزایش داد و رابطه‌ی زیر را برای قطر پایه‌ی معادل پیشنهاد کردند:

$$D_e = \frac{[0.52 T d + (h - 0.52 T) D]}{h} \quad (1)$$

که در این رابطه، D_e قطر پایه‌ی معادل یا هم ارز است، h و D به ترتیب عمق آب و قطر پایه پل، T و d هم به ترتیب ضخامت (ارتفاع) و عرض اجسام شناور هستند. پس از آن پاگلیرا و کارناسینا [۱۵] به بررسی روند تکامل شکل‌گیری آبشستگی در انباشت‌های سخت و متخلخل پرداختند. ضمن اینکه پاگلیرا و کارناسینا [۱۶] تأثیر شکل تجمع اجسام شناور چوبی را بر آبشستگی پایه پل بررسی کردند. یافته‌های اصلی پژوهش‌های آنها نشان دهنده‌ی تأثیر چشمگیر منطقه‌ی مسدود شده به وسیله‌ی اجسام شناور بر بیشترین عمق حفره‌ی آبشستگی بود. تمام این آزمایش‌ها فقط در یک عمق برای تجمع اجسام شناور انجام شد و هیچگاه به پایین دست پایه‌ی پل کشیده نشد. اما تحلیل و مقایسه‌ی داده‌های ملویل و دانگول [۱۳] نشان دهنده کاهش بیشترین عمق حفره‌ی آبشستگی است، که شاید به علت طول عرضی اجسام شناور چوبی و گسترش آن باشد.

اگرچه در مورد بررسی تأثیر اجسام شناور چوبی بر عمق آبشستگی موضعی بر پایه مربعی شکل کارهای پژوهشی انجام شده ولی برای پایه مربعی با دماغه سهمی شکل، مطالعاتی انجام نگرفته است. پس در این پژوهش، عمق آبشستگی موضعی در حضور اجسام شناور در اطراف یک پایه مربعی با دماغه سهمی شکل مطالعه می‌شود. در صورت عملکرد مطلوب پایه با دماغه سهمی در مقابل آبشستگی می‌توان آن را جایگزین پایه‌های متداول کرد. به گونه‌ای که در شرایط مختلف

قرارگیری پایه و اجسام شناور را نمایش می‌دهد.



شکل (۱) نمایی از فلوم آزمایشگاهی و چگونگی قرارگیری پایه و اجسام شناور چوبی

۲-۲ طراحی اجسام شناور چوبی مستطیلی و ویژگی مواد بستر

بر اساس پژوهش‌های انجام شده به وسیله‌ی پژوهشگران چون ملویل و دانگول [۱۳] و دیهل [۲] تجمع اجسام شناور چوبی در طبیعت بیشتر به شکل مستطیلی است که کاملاً می‌تواند در جریان بالادست اطراف پایه پل انباشته شوند و در نهایت به سمت پایین پایه پل (زیر سطح آب) نفوذ کنند. بنابراین در این پژوهش، اجسام شناور چوبی مستطیلی شکل، در داخل قفسه‌های توری با فاصله‌ی عرضی ۱/۲ سانتی‌متر (تا جریان آب به راحتی از این توری‌ها عبور کند) به صورت آزمایشگاهی شبیه‌سازی شد (شکل ۲).

این قفسه‌ها به شکل مستطیلی و در اندازه‌های متفاوت مطابق با جدول ۱ است. که در این جدول؛ T بیانگر ارتفاع اجسام شناور، d_d عرض اجسام شناور در عرض کانال، L_d طول اجسام شناور در طول کانال، D عرض پایه، b بیانگر عرض کانال، n_d نفوذپذیری اجسام شناور چوبی به کار برده شده در آزمایش‌ها است که برابر با نسبت حجم منافذ خالی بین چوب‌های داخل قفسه به حجم کل قفسه اجسام شناور چوبی می‌باشد. این اجسام در سه حالت نسبت به سطح آب جلوی پایه (چسبیده به دماغه سهمی شکل) قرار گرفتند؛ هم سطح آب، زیر سطح آب (متوسط عمق) و بالای سطح آب (روی سطح آب).

جدول (۱) مشخصات اجسام شناور چوبی به کار رفته در آزمایش‌ها

شکل اجسام	L_d (cm)	d_d (cm)	T (cm)	L_d / D	d_d / b	d_d / D	L_d / d_d	n_d
مستطیلی (M_1)	۱۵	۲۰	۱۰	۱/۶۶۷	۰/۳۳۴	۲/۲۲۳	۰/۷۵	۰/۶-۰/۷
مستطیلی (M_2)	۱۲	۲۵	۱۰	۱/۳۳۴	۰/۴۱۶	۲/۷۷۸	۰/۴۸	۰/۷
مستطیلی (M_3)	۲۰	۳۰	۱۰	۲/۲۲۳	۰/۵	۳/۳۳۴	۰/۶۶۷	۰/۷
مستطیلی (M_4)	۲۵	۴۵	۱۰	۲/۷۷۸	۰/۷۵	۵	۰/۵۵۶	۰/۷

هیدرولیکی رودخانه (با و بدون اجسام شناور چوبی) کمینه آبشستگی در پایه‌های پل ایجاد شود. نتایج به صورت نمودار و جدول ارائه و مورد بحث و بررسی قرار گرفت. همچنین معادله‌ای برای بیشینه عمق آبشستگی، در اثر تجمع اجسام شناور چوبی مستطیلی در جلو پایه مربعی با دماغه سهمی شکل با استفاده از آنالیز ابعادی ارائه شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ مشخصات مجرای آب

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه شهرکرد انجام شد. کانال شامل مورد استفاده یک مجرای افقی با دیواره‌های شیشه‌ای به طول ۲۰ متر، عرض ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر است. یک پمپ در بالادست کانال ایجاد شده است که بیشترین توان تخلیه‌ی آن ۷۰ لیتر بر ثانیه است. همه آزمایش‌ها در شرایط آب زلال با بستر ماسه‌ای به ضخامت ۱۶۰ میلی‌متر انجام گرفت. انحراف معیار هندسی $\sigma = 1/1$ و اندازه‌ی متوسط دانه‌های ماسه $d_{50} = 0.78$ میلی‌متر است. در همه آزمایش‌ها شیب فلوم ۰/۱ درصد به طور ثابت، و عمق جریان در بالای سطح بستر ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. آزمایش‌ها با دبی‌های ۲۰، ۳۰ و ۴۰ لیتر بر ثانیه انجام شد، در این آزمایش‌ها از یک پایه مربعی با دماغه سهمی شکل به ضلع مربع ۹ سانتی‌متر و ارتفاع دماغه‌ی سهمی ۱۵ سانتی‌متر استفاده شد. آزمایش‌ها برای اجسام شناور مستطیلی با چهار اندازه‌ی متفاوت (از نظر طول و عرض، و ارتفاع ثابت) که در جلوی پایه (چسبیده به دماغه سهمی شکل) قرار گرفت، انجام شد. عمق آبشستگی در دو حالت با اجسام شناور و بدون اجسام شناور با استفاده از نقطه‌سنج (کولیس) اندازه‌گیری و با هم مقایسه شد. شکل ۱ نمایی از فلوم آزمایشگاهی و چگونگی

آبشستگی نشان داده شده است. در این شکل T_d ، ضخامت مستغرق اجسام شناور است که در کلیه آزمایش‌ها چون ارتفاع اجسام شناور چوبی ثابت است (۱۰ سانتی‌متر) مقدار آن برای وقتی که اجسام شناور؛ بالای سطح آب باشد ۵ سانتی‌متر، هم سطح آب و زیر سطح آب باشد ۱۰ سانتی‌متر است.

ضخامت بستر ریخته شده (ماسه) در فلوم با توجه به بیشینه عمق آبشستگی، ۱۶۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. محدوده‌ای معادل ۴ متر از فلوم آزمایشگاهی با رسوبات غیر چسبنده با مشخصات جدول ۲، پر شد. و در بالادست و پایین‌دست برای کنترل و حفاظت رسوبات در مقابل قدرت جریان از دو سطح شیب‌دار چوبی که با مقادیر قابل توجهی شن برای افزایش آرامش جریان بالارونده بر روی سطح پوشیده شده بودند استفاده شد.

جدول (۲) ویژگی‌های رسوبات بستر مورد استفاده در آزمایش

$d_{50}(\text{mm})$	$d_{16}(\text{mm})$	$d_{84}(\text{mm})$	G_s
۰/۷۸	۰/۷۲	۰/۸۶	۲/۶۵

۲-۳ تعیین سرعت متوسط و سرعت آستانه‌ی حرکت رسوبات

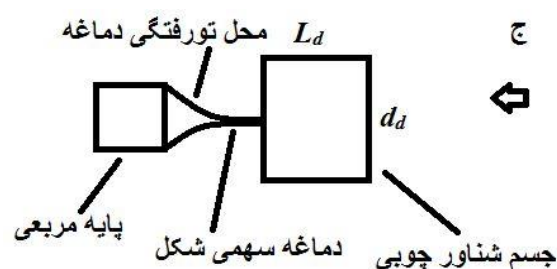
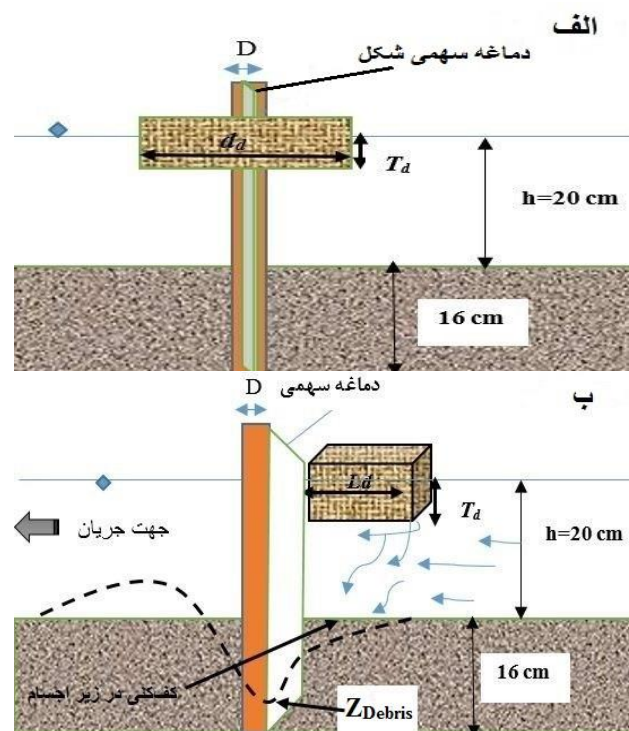
به منظور اجرای آزمایش‌ها در شرایط آب زلال و با بستر ثابت که در آن به جز آبشستگی موضعی در اطراف پایه پل هیچ‌گونه حرکت رسوبی نداشته باشیم نیاز است تا آستانه حرکت رسوبات تعیین شود. بدین منظور سرعت آستانه حرکت ذرات بستر، U_c بر اساس فرمول ریچاردسون و دیویس [۵] تخمین زده شد و به صورت زیر است:

$$U_c = \frac{K_s^{0.5} (S_s - 1)^{0.5} d_{50}^{0.5} h^{0.167}}{n} \quad (2)$$

در رابطه بالا U_c سرعت آستانه حرکت رسوبات (m/s)، K_s پارامتر بی‌بعد شیلدز، S_s وزن مخصوص نسبی ذرات (که مقدار آن ۲/۶۵ و به صورت بی‌بعد است)، d_{50} عرض متوسط ذرات (m)، h عمق جریان (m) و n ضریب زبری مانینگ است که از رابطه‌ی استریکلر به دست می‌آید. با



شکل (۲) طراحی اجسام شناور چوبی مستطیلی



شکل (۳) مشخصات اجسام شناور چوبی در جلو پایه الف- مقطع عرضی ب- مقطع طولی و ج- پلان

شکل ۳ به صورت نمادین، چگونگی قرارگیری اجسام شناور و ایجاد گودال آبشستگی در این مطالعه را نشان می‌دهد که در آن اجسام شناور چوبی مستطیلی شکل در جلو پایه در حالت بالای سطح آب قرار دارد. که در آن Z_{Debris} بیشترین عمق آبشستگی در اطراف پایه می‌باشد. در مقطع طولی، فرو رفتگی و بالا آمدگی در سطح بستر در اثر

کانال در یک دبی کم ($Q \approx 0.001 \text{ (m}^3/\text{s)}$) کاملاً انباشته از آب شد تا زمانی که عمق آب در کانال به ۲۰ سانتی متر بالاتر از سطح بستر برسد (برای جلوگیری از آبستگي اولیه در جلو پایه). سپس با افزایش دبی، Q مورد نظر برای آزمایش تنظیم شد، ضمن این که سطح آب طوری تنظیم شده بود که عمق جریان در ۲۰ سانتی متری ثابت بماند (با استفاده از دریچه تنظیم عمق در انتهای فلوم). از یک نقطه سنج با دقت 0.1 mm برای اندازه گیری عمق آبستگي استفاده شد. میزان آبستگي در دقایق ۱، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ... و ۴۲۰ اندازه گیری شد و هر آزمایش به طور کلی به مدت ۴۲۰ دقیقه انجام شد. این زمان بر اساس پژوهش های قربانی و کلز [۱۸] و همچنین با انجام آزمایش های ۱۲ ساعته مشخص شد، به گونه ای که بیشینه آبستگي موضعی در کنار پایه پل ها در ۷ ساعت اول آزمایش انجام گرفت.

۲-۵ آنالیز ابعادی

بیشترین عمق آبستگي در محاسبات اطراف پایه های پل (Z)، تابعی از شکل هندسی پل (f_{bg})، جریان آب یا سیل (f_f)، رسوبات (f_{st})، و زمان (f_t)، در نظر گرفته شده است:

$$Z = f \left[f_{bg} (D, S_{hp}, A_{lp}, b), f_f (U, h, v, \rho, g), f_{st} (d_{50}, \sigma, \rho_s'), f_t (t) \right] \quad (3)$$

در این رابطه؛ S_{hp} شکل پایه ی پل، A_{lp} عامل هم تراز ی یا یکنواختی رسوبات که طبق پژوهش های پاگلیارا و کارناسینا [۱۶] اثر ناچیزی دارد (در اینجا نادیده در نظر گرفته شد)، t زمان، U سرعت متوسط جریان، b عرض کانال، v ویسکوزیته سینماتیکی، ρ چگالی آب، g شتاب ثقل، d_{50} متوسط اندازه رسوبات، σ انحراف معیار هندسی ذرات رسوبی و $\rho_s' = (\rho_s - \rho) / \rho$ چگالی نسبی رسوبات، که ρ_s چگالی رسوبات است. وجود تجمع اجسام شناور چوبی در جلو پایه، تاثیر جدیدی در محاسبات عمق آبستگي می گذارد و از این رو پارامترهای هندسی (f_d) مشخصات اجسام شناور، را هم

محاسبه ی مقدار عددی ۰/۰۳۱ برای پارامتر شیلدز ($\frac{d_s}{v} \sqrt{0.1(S_s - 1)gd_s}$) و نونی [۲۱]، سرعت بحرانی در عمق ۲۰ سانتی متری که برای تمام آزمایش ها ثابت در نظر گرفته شده است مطابق جدول ۳ محاسبه شد.

جدول (۳) محاسبه سرعت آستانه حرکت در عمق ۲۰ سانتی متری

سرعت آستانه حرکت رسوبات بستر (متر بر ثانیه) عمق جریان (سانتی متر)		
	محاسبه ای	مشاهده ای
۲۰	۰/۳۸۸	۰/۳۶۷

از آنجایی که مقدار مشاهده ای سرعت آستانه ی حرکت رسوبات کمتر از مقدار محاسبه ای است. پس در این پژوهش از روش مشاهده ای برای تعیین سرعت آستانه ی حرکت استفاده شد.

همچنین جدول ۴، محاسبه نسبت سرعت متوسط جریان به سرعت بحرانی (سرعت آستانه حرکت رسوبات) و عدد فرود (Fr) با دبی های ذکر شده در عمق ۲۰ سانتی متری را نشان می دهد.

جدول (۴) محاسبه نسبت سرعت متوسط به سرعت آستانه حرکت

U (m/s)	U/U _c	Fr	Q (lit/s)
۰/۱۶۷	۰/۴۵۵	۰/۱۱۹۲	۲۰
۰/۲۵	۰/۶۸۱	۰/۱۷۸۴	۳۰
۰/۳۳۴	۰/۹۱	۰/۲۳۸۴	۴۰

در جدول بالا Fr عدد فرود و برابر با ($Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}}$) و g نیز شتاب ثقل و مقدار آن برابر با $9.81 \text{ (m/s}^2\text{)}$ است.

۲-۴ اجرای آزمایش

برای هریک از آزمایش ها، بستر در فلوم آزمایشگاهی در اطراف پایه پل با دقت تراز شد و اجسام شناور چوبی در فواصل مختلف از بستر (هم سطح آب، زیر سطح آب و بالای سطح آب) در داخل کانال در جلو پایه قرا داده شد. پس از آنکه اجسام شناور چوبی در جلو پایه نصب شد،

$$\frac{Z_{Debris}}{D} = \Pi \left[\frac{D}{d_{50}}, \frac{h}{D}, Fr, \Delta A \%, \frac{d_d}{b}, \frac{L_d}{D}, \frac{T_d}{h} \right] \quad (5)$$

در این رابطه Fr عدد فرود و برابر با $(Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}})$ است و $\Delta A \%$ یک پارامتر بدون بعد است که برای بررسی انسداد ایجاد شده به وسیله اجسام شناور چوبی در رابطه فوق لحاظ شد و مقدار آن برابر با $\Delta A \% = [(d_d - D).T_d / (b - D)h].100$ است. همچنین Π در رابطه فوق یک نماد عملکردی است. اجسام مستطیلی شکل چوبی، نفوذپذیر در جلو پایه مورد آزمایش قرار گرفته است. لازم به ذکر است که آزمون نمونه شاهد، (آزمون بدون تجمع اجسام شناور) در همان شرایط آزمایشی، یعنی شدت جریان، زبری سطح، عمق آب، و آبگرفتگی اطراف پایه‌ی پل انجام می‌شود، برای نمونه شاهد $\Delta A \% = 0$ و $T_d = 0$ است.

۳- بحث و نتیجه‌گیری

۳-۱ مقایسه آبشستگی پایه مربعی با دماغه سهمی در حالت‌های با و بدون اجسام شناور

برای پایه مربعی با دماغه سهمی شکل و برای نمونه شاهد، و با دبی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ لیتر بر ثانیه، عمق آبشستگی بیشینه به ترتیب برابر با ۲/۱۵، ۳/۲۸ و ۴/۳۵ سانتی‌متر مشاهده شد. وجود دماغه سهمی شکل یا تورفتگی دماغه باعث شد که بیشینه عمق آبشستگی در محل اتصال پایه مربعی به دماغه سهمی اتفاق افتاد و در کناره‌های دماغه مقدار آبشستگی ناچیز باشد. همچنین بیشینه عمق آبشستگی بدون تجمع اجسام شناور چوبی (نمونه شاهد) برای پایه مربعی با دماغه سهمی نسبت به پایه مربعی با دماغه تیز حاصل از مطالعات مشعشی و همکاران [۱۹] به میزان ۱/۵ برابر کاهش یافت. با قرار دادن اجسام شناور چوبی متفاوت در جلو پایه در موقعیت‌های قرارگیری گفته شده (بالای سطح، هم سطح و زیر سطح آب) عمق گودال آبشستگی تغییر می‌کند. به گونه‌ای که با برخورد جریان به اجسام شناور یک جریان روبه پایین ایجاد می‌شود که باعث به حرکت در آوردن مواد بستر

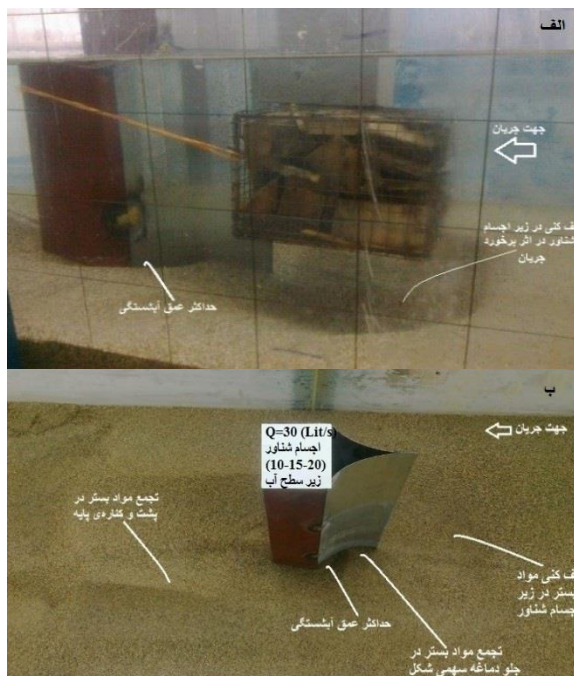
باید بدان اضافه کرد، بنابراین رابطه‌ی (۳) به شکل زیر در می‌آید:

$$Z_{Debris} = f \left[f_{bg} (D, S_{hp}, A, b), f_f (U, h, v, \rho, g), f_{st} (d_{50}, \sigma, \rho'), f_t (t), f_d (d_d, T_d, L_d, S_{hd}, n_d) \right] \quad (4)$$

در این رابطه n_d ، نفوذپذیری اجسام شناور چوبی است که براساس مطالعه پاگلایارا و کارناسینا [۱۵] تعریف شده است و طبق مطالعات ایشان تاثیر اندکی بر سیر تکاملی آبشستگی دارد. S_{hd} بیانگر شکل اجسام شناور چوبی، d_d عرض اجسام شناور چوبی، و f یک نماد عملکردی است. همچنین تأثیر ویسکوزیته جریان و تأثیر رسوبات نیز نادیده گرفته شده است زیرا عدد رینولدز بزرگ $(Re = 4uh / \nu > 2 \times 10^5)$ است و مواد بستر در این آزمایش‌ها تقریباً یکنواخت بودند. غیر یکنواختی رسوبات باعث کاهش آبشستگی موضعی می‌شود، پس در صورتی که انحراف معیار هندسی ذرات کمتر از ۱/۳ باشد $(\sigma = \sqrt{D_{84} \div D_{16}} < 1.3)$ شرط یکنواختی ذرات برقرار، و اثر غیر یکنواختی رسوبات بر آبشستگی موضعی از بین می‌رود. همچنین لایه جوشنی (رسوبات درشت دانه به عنوان محافظ بر روی رسوبات ریز قرار می‌گیرند) در آزمایش‌ها ظاهر نشد. همچنین چون در این پژوهش هدف این است که رابطه‌ای فقط برای پایه مربعی با دماغه سهمی شکل ارائه شود پس اثر شکل پایه S_{hp} نادیده در نظر گرفته شد. به علاوه در این مطالعه عمق آبشستگی در حالت به تعادل رسیده (حالت ماندگار) بررسی شد، پس اثر زمان نیز در معادلات نادیده گرفته شد. با توجه به توضیحات بالا در این پژوهش ۱۰ پارامتر موثر $(D, d_{50}, h, b, g, U, T_d, d_d)$ وجود دارد. و چون پارامترها دارای دو بعد مستقل زمان (T) و طول (L) است، بنابراین طبق تئوری باکینگهام ۸ پارامتر بدون بعد به دست می‌آید؛ که با توجه به آبشستگی در اثر تجمع اجسام شناور چوبی و قطر پایه، رابطه‌ی (۴) به صورت زیر در خواهد آمد:

چه طول و عرض اجسام شناور افزایش یابد میزان کف‌کنی در زیر اجسام شناور نسبت به بیشینه عمق آبشستگی بیشتر می‌شود (ایجاد یک گودال در بالادست پایه). به عبارتی بیشینه عمق آبشستگی (در حالت زیر سطح آب) نسبت به حالت‌های قرارگیری بالای سطح و هم‌سطح آب کمتر می‌شود. با مقایسه سه حالت قرارگیری اجسام شناور مشخص می‌شود، که برای اجسام شناور چوبی در حالت هم‌سطح آب بیشترین عمق آبشستگی رخ می‌دهد. برای تمام بازه‌های آزمایش شده رفتار مشابهی مشاهده شد.

شکل ۵ قرارگیری اجسام شناور چوبی در حین آزمایش با عرض، طول و ارتفاع به ترتیب (۲۰-۱۵-۱۰) سانتی‌متر، و گودال آبشستگی ایجاد شده را با دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه در حالت زیر سطح آب در زمان ۴۲۰ دقیقه (بعد از اتمام آزمایش) نشان می‌دهد. با توجه به شرایط هیدرولیکی و هندسه، وجود اجسام شناور چوبی نشان دهنده‌ی مقادیر متفاوت عمق آبشستگی و انباشت ماسه‌ها در کناره‌ها و پایین دست پایه است.

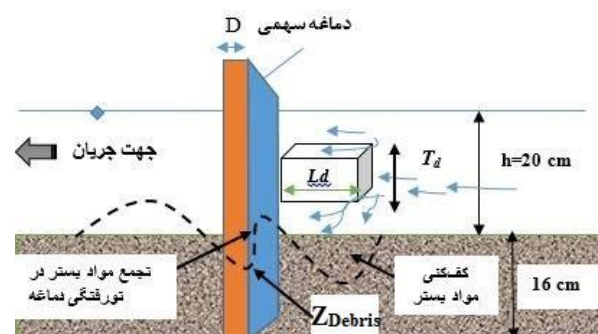


شکل (۵) نمایش گودال آبشستگی در حالت زیر سطح آب الف- در حین آزمایش ب- در پایان آزمایش در زمان ۴۲۰ دقیقه با مشخصات؛

$$\frac{d_s}{b} = 0.333, \frac{L_d}{D} = 1.667, \frac{h}{D} = 2.222, Fr = 0.1784, \Delta\% = 10.78$$

در زیر اجسام شناور و کف‌کنی مواد بستر در جلو پایه می‌شود. در نتیجه وجود اجسام شناور باعث افزایش طول و عرض گودال در جلو پایه می‌شود.

در شرایطی که اجسام شناور چوبی در موقعیت زیر سطح آب در جلو پایه قرار می‌گیرند، به علت وجود دماغه سهمی شکل (تورفتگی دماغه) مواد بستر در اثر کف‌کنی در زیر اجسام شناور (در حالت جسم شناور زیر سطح آب، کف‌کنی مواد بستر شدیدتر است)، در محل دماغه سهمی یا به اصطلاح تورفتگی دماغه، تجمع می‌یابند و به شکل یک تپه ماسه‌ای تورفتگی دماغه را می‌پوشانند. همچنین بعد از گذشت یک دوره زمانی این تپه ماسه‌ای به بیشینه میزان خود می‌رسد و جریان باعث لغزش در آن و در نتیجه فرو ریختن آن در چاله آبشستگی و کاهش بیشینه عمق آبشستگی می‌شود. شکل ۴ به صورت نمادین کف‌کنی مواد بستر زیر اجسام شناور و تجمع آن در محل تورفتگی دماغه و بیشینه عمق آبشستگی را نشان می‌دهد.



شکل (۴) نمایش پروفیل طولی آزمایش برای اجسام شناور در موقعیت زیر سطح آب و تپه ماسه‌ای در محل تورفتگی

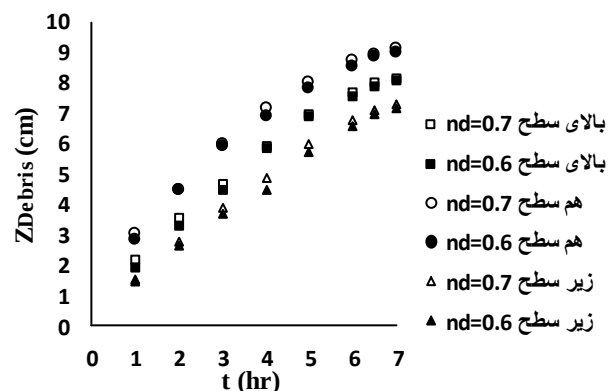
برای موقعیت قرارگیری اجسام شناور در بالای سطح و هم‌سطح آب، طول و عرض اجسام شناور تاثیر زیادی بر افزایش عمق گودال آبشستگی دارد به طوری که هرچه عرض و طول اجسام شناور قرار گرفته در جلو پایه پل بیشتر باشد عمق کف‌کنی در زیر اجسام شناور کمتر می‌باشد (نسبت به موقعیت زیر سطح آب) و ماسه کمتری در محل تورفتگی دماغه تجمع می‌یابد. در نتیجه بیشینه عمق آبشستگی افزایش می‌یابد. اما شرایط برای اجسام شناور در موقعیت زیر سطح آب کاملاً متفاوت است به شکلی که هر

آب پرداخته شد. شکل ۶ تکامل آبشستگی در اثر تجمع اجسام شناور چوبی مستطیلی با طول، عرض و ارتفاع (۲۰-۱۵) سانتی متری را در موقعیت‌های قرارگیری گفته شده در مقابل زمان نشان می‌دهد. همان طوریکه ملاحظه می‌شود نفوذپذیری (n_d) تاثیر اندکی بر بیشینه عمق آبشستگی دارد به گونه‌ای که برای حالت‌های قرارگیری بالای سطح، هم سطح و زیر سطح آب رفتار مشابهی مشاهده شد.

۳-۳ تاثیر ابعاد و موقعیت قرارگیری اجسام شناور بر بیشینه عمق آبشستگی

شکل ۷ به مقایسه پروفیل طولی تاثیر تجمع اجسام شناور چوبی (۲۰-۱۵-۱۰) و (۳۰-۲۰-۱۰) سانتی متر روی عمق آبشستگی نسبت به نمونه شاهد در دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه می‌پردازد. در این شکل، Z_{Debris} نشان دهنده تراز گودال آبشستگی نسبت به کف کانال می‌باشد و X فاصله‌ی طولی گودال آبشستگی ایجاد شده در جلو و پشت پایه می‌باشد. همان‌گونه که شکل نشان می‌دهند، اجسام شناور چوبی باعث افزایش طول (۲/۵ برابر)، عرض (۲/۳ برابر) و عمق گودال آبشستگی (۲/۱ برابر) نسبت به نمونه شاهد شده‌اند. از طرفی دیگر، محل قرارگیری اجسام شناور چوبی (بالای سطح، هم سطح و زیر سطح آب) در جلو پایه پل تاثیر زیادی روی عمق، عرض و طول گودال آبشستگی دارد. به گونه‌ای که نمای بالادست گودال آبشستگی دو شیب متفاوت را نشان می‌دهد. در حالت اجسام شناور زیر سطح آب، در بالادست گودال شیب رفته رفته تند می‌شود و در نزدیک پایه این شیب نسبت به گودال بالادست کاهش می‌یابد. همچنین برای حالت‌های بالای سطح و هم سطح آب در بالادست گودال شیب ملایم‌تر (نسبت به حالت زیر سطح آب) و در نزدیک پایه رفته رفته شیب تندتر می‌شود (شکل ۷ الف). در مقابل با افزایش طول و عرض اجسام شناور شیب گودال در بالادست برای حالت زیر سطح آب بیشتر از حالت قبل و در نزدیک پایه شیب کاهش بیشتری دارد. برای حالت بالای سطح و هم سطح آب نیز این روند عکس حالت زیر سطح آب مشاهده می‌شود (شکل ۷ ب). همچنین

با مقایسه نتایج برای پایه مربعی با دماغه سهمی شکل با پایه مربعی با دماغه تیز [۱۹] در شرایط آزمایشگاهی یکسان مشخص می‌شود که اجسام شناور چوبی تاثیر بیشتری بر عرض، طول و عمق گودال آبشستگی در جلوی پایه مربعی با دماغه تیز، نسبت به پایه مربعی با دماغه سهمی شکل دارد (۱/۴ برابر). همچنین میزان کف کنی مواد بستر در زیر اجسام شناور در جلو پایه مربعی با دماغه سهمی بیشتر از پایه مربعی با دماغه تیز است (۰/۷ برابر). برای پایه مربعی با دماغه تیز، بیشینه عمق آبشستگی در حالت زیر سطح آب مشاهده شد [۱۹].



شکل (۶) تاثیر نفوذپذیری اجسام شناور چوبی بر تکامل زمانی آبشستگی

۳-۲ تاثیر نفوذپذیری اجسام شناور چوبی بر گودال آبشستگی

طبق مطالعات پارولا و همکاران [۲۰] و پاگلپارا و کارناسینا [۱۵] نفوذپذیری اجسام شناور چوبی تاثیری بر طول، عرض و بیشینه عمق آبشستگی ندارد، اما به عنوان بار اضافی بر پایه پل محسوب می‌شود و می‌تواند پایداری پایه پل را به خطر بیندازد. در این پژوهش برای مشاهده تاثیر نفوذپذیری اجسام شناور چوبی بر حداکثر عمق گودال آبشستگی، به مقایسه جسم شناور چوبی با طول، عرض و ارتفاع به ترتیب (۲۰-۱۵-۱۰) سانتی متر و با نفوذپذیری متفاوت (۰/۷ و ۰/۶) و شرایط هیدرولیکی یکسان

$$\frac{d}{b} = 0.333, \quad \frac{L}{D} = 1.667, \quad \frac{h}{D} = 2.22, \quad Fr = 0.2384$$

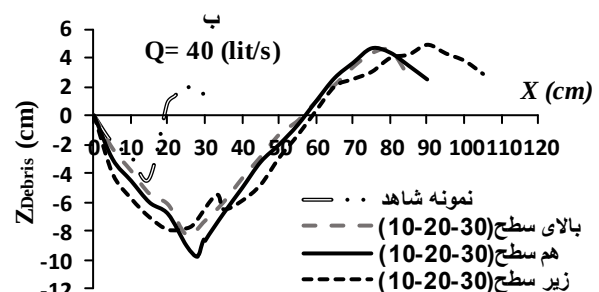
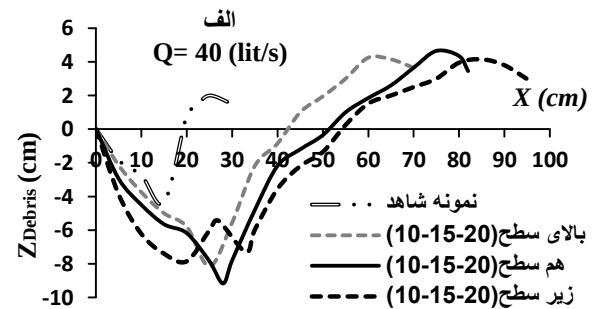
در سه حالت قرارگیری بالای سطح، هم سطح و زیر سطح

به علاوه میزان کف کنی در زیر اجسام شناور و مقدار بیشینه عمق آبشستگی در حالت اجسام شناور چوبی هم سطح آب بیشتر از حالت قرارگیری بالای سطح آب مشاهده شد (به ترتیب ۱/۲ و ۱/۱ برابر). به طور کلی اگر اجسام شناور در حالت هم سطح آب قرار گیرند بیشینه عمق آبشستگی رخ می دهد و باعث افزایش طول و عرض گودال می شود (۲/۵ برابر نمونه شاهد).

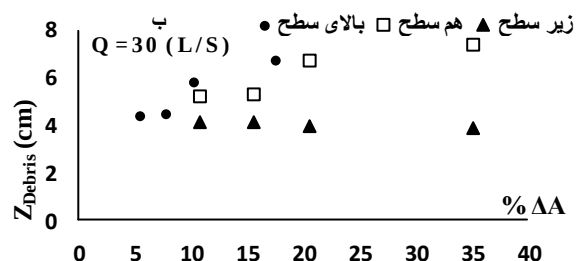
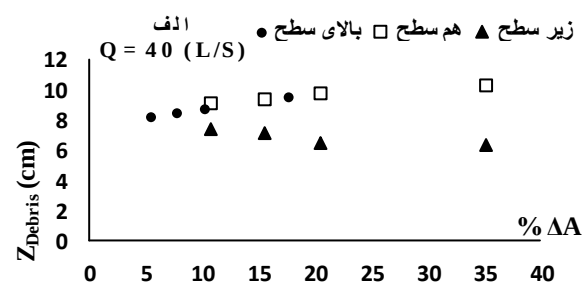
علاوه بر این، برای حالاتی که اجسام شناور داخل آب در موقعیت بالای سطح و هم سطح آب قرار گرفته باشند هر چه حجم قسمت مستغرق بیشتر باشد حجم و عمق گودال آبشستگی نیز بزرگتر خواهد بود. در شرایط قرارگیری زیر سطح آب هرچه حجم اجسام کمتر باشد عمق آبشستگی بیشتر و گودالی که در زیر اجسام شناور رخ می دهد کمتر می شود. شکل ۸ (الف و ب) بیشینه عمق آبشستگی را در مقابل درصد انسداد در سه حالت ذکر شده در دبی های ۳۰ و ۴۰ لیتر بر ثانیه نشان می دهد. همان طوری که ملاحظه می شود بیشترین عمق آبشستگی مشاهده شده مربوط به حالتی است که اجسام شناور چوبی در موقعیت هم سطح آب در جلو پایه با دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه و درصد انسداد، $\Delta A = 35.29\%$ است، که در این حالت $d_d/b = 0.75$ است.

همچنین در شکل بالا بیشینه عمق آبشستگی برای اجسام شناور چوبی در موقعیت بالای سطح آب نزدیک و یا حتی بیشتر از بیشینه عمق آبشستگی اجسام شناور در موقعیت هم سطح آب مشاهده می شود (به ویژه در حالت درصد انسداد $10.29\% \leq \Delta A \leq 10.78\%$). علت این امر اندازه (ابعاد) اجسام شناور چوبی قرار گرفته شده در جلو پایه پل است. یعنی اینکه اجسام شناور چوبی که در حالت $10.29\% \leq \Delta A \leq 10.78\%$ قرار گرفته شده است برای حالت بالای سطح آب از نوع مستطیلی (M_3) و برای حالت هم سطح آب جسم شناور چوبی از نوع مستطیلی (M_1) است؛ و از آنجایی که ابعاد جسم شناور قرار گرفته شده در جلو پایه در حالت بالای سطح آب بزرگتر از جسم شناور چوبی در حالت هم سطح آب است، بنابراین تقریباً یک درصد انسداد

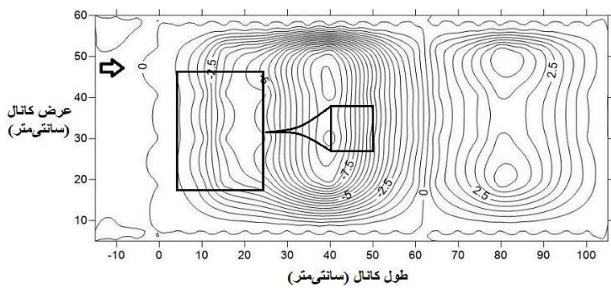
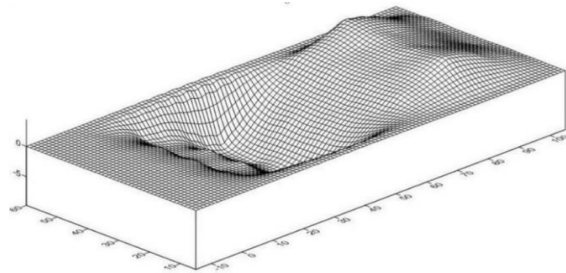
با قرارگیری جسم شناور در حالت زیر سطح آب بیشترین مواد بستر در پشت پایه تجمع می یابد. به طوری که با افزایش حجم اجسام شناور در جلو پایه، طول تپه ماسه ای (مواد بستر جمع شده) در پشت پایه بیشتر مشاهده شد.



شکل (۷) پروفیل طولی عمق گودال آبشستگی با دبی $Q=40$ (Lit/s) در حضور اجسام شناور الف- (۲۰-۱۵-۱۰) سانتی متر و ب- (۳۰-۲۰-۱۰) سانتی متر



شکل (۸) بیشینه عمق آبشستگی در برابر درصد انسداد اجسام شناور قرار داده شده در جلو پایه برای الف) $Q=40$ lit/s و ب) $Q=30$ lit/s



شکل (۱۰) پروفیل بستر نهایی برای اجسام شناور در موقعیت هم-

سطح آب در زمان ۴۲۰ دقیقه با مشخصات؛

$$\frac{d_z}{b} = 0.5, \frac{L_z}{D} = 2.222, \frac{h}{D} = 2.222, Fr = 0.238, \Delta A\% = 20.58$$

۳-۵ رابطه عمق آبشستگی در حضور اجسام شناور

برای یافتن رابطه مناسب برای پیش بینی عمق آبشستگی در جلوی پایه مربعی با دماغه سهمی شکل از نتایج آنالیز ابعادی استفاده می‌شود. با توجه به اینکه نسبت D/d_{50} و نسبت h/D ثابت می‌باشد پس در رگرسیون اثر آن‌ها نادیده گرفته شد. همچنین اثر پارامتر بدون بعد d_d/b و T_d/h نیز نادیده در نظر گرفته شد زیرا اثر آن‌ها در رابطه بی بعد درصد انسداد اعمال شده است. بدین ترتیب رابطه عمق آبشستگی به صورت نمایی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{Z_{debris}}{D} = \alpha (Fr)^{a_1} (\Delta A\%)^{a_2} \left(\frac{L_d}{D}\right)^{a_3} \quad (6)$$

با $\ln$ گرفتن از طرفین رابطه ۶ داریم:

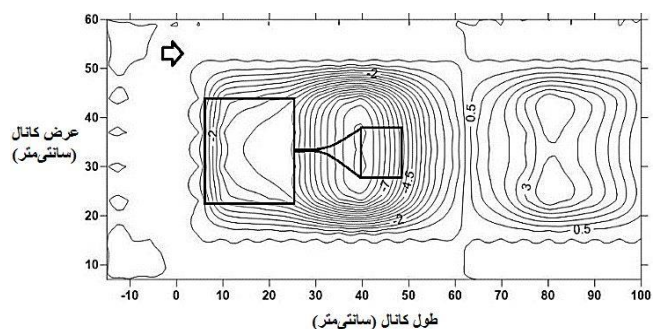
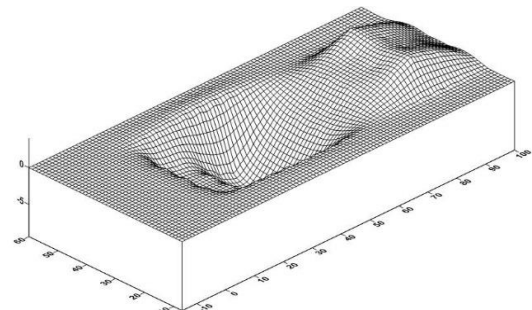
$$\ln \left(\frac{Z_{debris}}{D} \right) = \left[\ln \alpha + a_1 \ln (Fr) + a_2 \ln (\Delta A\%) + a_3 \ln \left(\frac{L_d}{D} \right) \right] \quad (7)$$

سپس با استفاده از نرم افزار *spss* و رگرسیون خطی مقادیر a_1 تا a_4 و $\ln \alpha$ به دست آورده شد. مقدار R^2 برابر با ۰/۷۸ است، که در سطح معنی‌داری ۹۹٪، معنی‌دار بوده و نشان می‌دهد ۷۸ درصد از تغییرات آبشستگی به وسیله‌ی پارامترهای مورد بررسی، توجیه می‌شود. همچنین مقدار F (آزمون کارایی مدل)

بوجود آمده است و فقط حالت قرارگیری جسم شناور متفاوت است. به همین دلیل بیشینه عمق آبشستگی برای حالت قرارگیری بالای سطح آب نزدیک و یا حتی بیشتر از حالت قرارگیری هم سطح آب مشاهده می‌شود.

۳-۴ تغییرات نهایی پروفیل بستر

شکل ۹ و ۱۰ شکل بستر ایجاد شده برای اجسام شناور چوبی با عرض و طول و ارتفاع به ترتیب (۱۰-۱۵-۲۰) و (۱۰-۲۰-۳۰) سانتی‌متر در حالت هم سطح آب با دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه را نشان می‌دهد. با مقایسه شکل ۹ و ۱۰ مشخص می‌شود که عرض و طول اجسام شناور چوبی تاثیر مستقیم بر میزان عرض و طول گودال آبشستگی در زیر اجسام شناور دارد به طوری که با افزایش عرض اجسام، میزان تنگ‌شدگی جریان نسبت به کانال بیشتر و رسوب-زدایی بیشتری در عرض کانال رخ می‌دهد. همچنین فاصله‌ی خط‌های تراز در پروفیل طولی بستر نسبت به هم به اندازه ۰/۵ سانتی‌متر است.



شکل (۹) پروفیل بستر نهایی برای اجسام شناور در موقعیت هم‌سطح آب در زمان ۴۲۰ دقیقه با مشخصات؛

$$\frac{d_z}{b} = 0.333, \frac{L_z}{D} = 1.667, \frac{h}{D} = 2.222, Fr = 0.238, \Delta A\% = 10.78$$

به نمونه شاهد شد (۲/۳۶ برابر). برخورد جریان با اجسام شناور چوبی انباشته شده در جلو پایه، علاوه بر افزایش عمق آبشستگی باعث کف‌کنی در زیر اجسام و به وجود آوردن چاله در جلو پایه می‌شود. علاوه بر این، اگر اجسام شناور در موقعیت زیر سطح آب در جلو پایه قرار گیرند مقدار بیشینه عمق آبشستگی نسبت به موقعیت بالای سطح و هم‌سطح آب کاهش می‌یابد اما میزان کف‌کنی مواد بستر در زیر اجسام افزایش می‌یابد (ایجاد گودال در بالادست پایه). نتایج نشان داد در حالت استفاده از پایه با دماغه سهمی شکل، میزان آبشستگی نسبت به حالت پایه با دماغه تیز، ۲/۳ درصد کمتر می‌شود (با و بدون تجمع اجسام شناور). همچنین رابطه‌ای برای پیش‌بینی عمق آبشستگی در حضور اجسام شناور در جلوی پایه مربعی با دماغه سهمی شکل ارائه شد.

۵- مراجع

- [1] Laursen, E.M., and Toch, A., "Scour around bridge piers and abutments," Bulletin No. 4, Iowa Highways Research Board, Ames, Iowa, 1956.
- [2] Diehl, T.H., "Potential drift accumulation at bridges," Report No. FHWA-RD-97-028, Hydraulic Engineering No. 9, Federal Highway, administration, Washington, D.C, 1997.
- [3] Breusers, H.N., and Raudkivi, A.J., "Scouring Hydraulic Structures Design Manual," Balkema, Rotterdam. 2.152, 1991.
- [4] Mellvil, B.W., and Chiew, Y.M., "Time scale for local scour at bridge piers," Hydraulic Engineering ASCE 125(1), pp. 59-65, 1999.
- [5] Richardson, E.V., and Davis, S.R., "Evaluating Scour at bridges," Fourth Edition, Federal Highway Administration, Washington, DC. 378P. 2001.
- [6] Laursen, E.M., "Scour at bridge crossings," Bulletin No. 8, Iowa Highways Research Board, Ames, Iowa, 1958.
- [7] Raudkivi, A.J., and Ettema, R., "Clear-water scour at cylindrical pier," Journal of Hydraulic Engineering, No. 3, pp. 338-350, 1983.
- [8] Zevenbergen, L.W., "Time scale for contraction scour at bridges," Water Resources Engineering, Minneapolis, 30 July - 2 August, 2000.
- [9] Link, O., Pfleger, F., and Zanke, U., "Characteristics of developing scour-holes at a sand-embedded cylinder," International Journal of Sediment Research, No. 3, pp. 258-266, 2008.
- [10] Braudrick, C.A., and Grant, G.E., "Transport and deposition of large woody debris in streams: a flume experiment," Geomorphology, pp. 263-283, 2001.

برای مدل فوق ۳۳/۹۶ محاسبه شده که در سطح معنی‌داری ۹۹٪، معنی‌دار بوده و نشان دهنده کارایی قابل قبول مدل است. معادله‌ی بیشینه عمق آبشستگی در اثر تجمع اجسام شناور در جلو پایه مربعی با دماغه سهمی شکل به صورت زیر ارائه می‌شود.

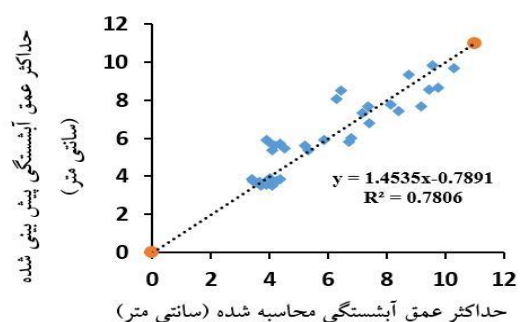
$$\frac{Z_{debris}}{D} = 1.35 (Fr)^{0.42} (\Delta A \%)^{0.139} \left(\frac{L}{D}\right)^{0.315} \quad (۸)$$

میانگین مجموع خطا پیش‌بینی شده مدل از فرمول زیر حساب می‌شود.

$$MFE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \quad (۹)$$

در رابطه‌ی بالا؛ MFE ، میانگین مجموع خطا پیش‌بینی شده، y_i بیشینه عمق آبشستگی محاسبه شده، و $\hat{y}_i$ بیشینه عمق آبشستگی پیش‌بینی شده حاصل از آزمایش و n نیز تعداد مشاهده است. مقدار ایده‌آل برای MFE صفر است که نشان دهنده‌ی مدلی بدون خطا است و هرچه قدر به صفر نزدیکتر شود نشان‌دهنده‌ی دقت فرمول است. برای مدل فوق مقدار $MFE=0.131$ به دست آمد، که این مقدار به صفر نزدیک است و نشان دهنده‌ی دقت نسبتاً بالای مدل است.

شکل ۱۱ بیشینه عمق آبشستگی محاسبه شده در برابر بیشینه عمق آبشستگی مشاهده شده را نمایش می‌دهد. همانطور که شکل نشان می‌دهد پراکندگی داده‌ها در حد قابل قبول است.



شکل (۱۱) مقایسه حداکثر عمق آبشستگی محاسبه شده و پیش‌بینی شده حاصل از آزمایش

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر اجسام شناور روی آبشستگی یک پایه مربعی با دماغه سهمی شکل بررسی شد. تجمع اجسام شناور چوبی در جلو پایه باعث افزایش بیشینه عمق آبشستگی نسبت

136, 2011.

[17] Elliot, R.C., Froehlich, D.C., and MacArthur, R.C., "Calculating the Potential Effects of Large Woody Debris Accumulations on Backwater, Scour, and Hydrodynamic Loads," World Environmental and Water Resources. Crossing Boundaries © ASCE. pp. 1213-1222, 2012.

[18] Ghorbani, B., and Kells, J.A., "Effect of Submerged Vanes on The Scour occurring at a Cylindrical Pier," Journal of Hydraulic Research, pp. 610-619, 2008.

[19] Moshashaie, S.M., Asadi, M., and Ghorbani, B., "The Effects Of Woody Debris Accumulations On, Local Scour And Hydrodynamic Loads At Bridge Piers," International Conference on Civil Engineering, 27&28 November 2013, Tabriz, Iran, 2013.

[20] Parola, A.C., Apelt, C.J., Jempson, M.A., "Debris forces on highway bridges, " NCHRP Report No. 445. Transportation Research Board ,Washington,DC, 2000.

[21] Vanoni, V.A., "Sedimentation Engineering ASCE Task Committee for the preparation of the manual on sedimentation of the sedimentation committee of the Hydraulics division," 1975. (reprinted 1977).

[11] Lyn, D.A., Cooper, T., Yi, Y.K., Sinha, R., and Rao, A.R., "Debris accumulation at bridge crossings: laboratory and field studies," TRB 2003 Annual Meeting, 2003.

[12] Andreoli, A., Comiti, F., and Lenzi, M.A., "Characteristics, distribution and geomorphic role of large woody debris in a mountain stream of the Chilean Andes," Earth Surface Processes and Landforms, pp. 1675-1692, 2007.

[13] Melville, B.W., and Dongol, D.M., "Bridge pier scour with debris accumulation," Journal of Hydraulic Engineering, No. 9, pp. 1306-1310, 1992.

[14] Lagasse, P.F., Cloper, P.E., Zevenbergen, P.E., Spitz, W.J., and Girard, L.G., "Effects of Debris on Bridge Pier Scour," Transportation Research Board, 117P, 2010.

[15] Pagliara, S., and Carnacina, I., "Temporal scour evolution at bridge piers: Effect of woody debris roughness and porosity," Journal of Hydraulic Research 48(1), pp. 3-13, 2010.

[16] Pagliara, S., and Carnacina, I., "Influence of large woody debris on sediment scour at bridge piers," International Journal of Sediment Research, pp. 121-