

اثر تجمع اجسام شناور چوبی بر آب‌شستگی در اطراف پایه پل مربعی با دماغه تیز

سید میثم مشعشی^۱، مهدی اسدی آق‌بلاغی^{۲*} و بهزاد قربانی^۳

چکیده

در این پژوهش، اثر تجمع اجسام شناور چوبی روی عمق آب‌شستگی در اطراف پایه پل‌ها به‌صورت آزمایشگاهی بررسی می‌شود. آزمایش‌ها در شرایط آب زلال، با شرایط هیدرولیکی متفاوت در فلوم آزمایشگاهی با طول ۲۰ متر و عرض ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهرکرد انجام شد. پایه پل به‌صورت مربعی با ضلع ۹ سانتی‌متر با دماغه تیز مثلثی به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر است. اجسام شناور به‌صورت مستطیلی با طول و عرض متفاوت و در عمق‌های مختلف نسبت به سطح آب قرار گرفتند. آزمایش‌ها با دبی‌های ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ لیتر بر ثانیه انجام شد. نتایج نشان داد که وقتی اجسام شناور بالای سطح آب، هم سطح آب و زیر سطح آب باشند عمق آب‌شستگی، به‌ترتیب، حداکثر تا ۱/۷، ۱/۸۵ و ۲/۲ برابر نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌یابد. علاوه بر این، زمانی که درصد انسداد (نسبت مساحت اشغال شده جریان با اجسام شناور به سطح مقطع جریان) برابر با ۳۰٪ و اجسام شناور در زیر سطح آب قرار گرفته باشند، بیشینه عمق آب‌شستگی (۲/۲ برابر نمونه شاهد) رخ می‌دهد. همچنین معادله‌ای برای محاسبه حداکثر عمق آب‌شستگی در حضور تجمع اجسام شناور چوبی در جلو پایه مربعی با دماغه تیز ارائه شد.

واژه‌های کلیدی: آب‌شستگی، پایه پل، تجمع اجسام شناور، مدل آزمایشگاهی.

ارجاع: مشعشی س. م.، اسدی آق‌بلاغی م. و قربانی ب. ۱۳۹۵. اثر تجمع اجسام شناور چوبی بر آب‌شستگی در اطراف پایه پل مربعی با دماغه تیز. مجله پژوهش آب ایران. ۲۳: ۲۳-۳۲.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

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

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

* نویسنده مسئول: mahdi.asadi.a@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۴/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۹/۱۷

مقدمه

درختان در اثر فرآیندهای طبیعی‌ای چون ریزش کوه، باد، جریان سیل و ... شکسته می‌شوند و در داخل رودخانه‌ها به‌صورت معلق یا اجسام شناور درمی‌آیند، در جهت جریان آب حرکت می‌کنند و در جلوی سازه هیدرولیکی یا پایه پل‌ها انباشته می‌شوند. انباشتگی اجسام شناور چوبی در اطراف پایه‌های پل سبب انسداد جریان آب رودخانه و کاهش سطح مقطع، افزایش سطح آب در بالادست، برگشت آب، افزایش سرعت در تنگ‌شدگی‌ها، تشدید آب‌شستگی در پایه پل‌ها و افزایش نیروی هیدرولیکی روی پایه پل می‌شود (لارسن و توچ، ۱۹۵۶؛ دیهل، ۱۹۹۷؛ ملویل و چپو، ۱۹۹۹؛ لاگاس و همکاران، ۲۰۱۰ و الیوت و همکاران، ۲۰۱۲). بنابراین می‌توانند پایداری پایه پل را به خطر بیندازند و سبب تخریب آن شوند.

با شناخت الگوی جریان در اطراف اشکال هندسی پایه‌ها می‌توان صدمات ناشی از تخریب پایه پل‌ها را به طرز چشم‌گیری کاهش داد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در جلو پایه، گرداب‌های نعل اسبی تشکیل می‌شود و تا پشت پایه ادامه پیدا می‌کنند، که محور آن‌ها افقی است. همچنین در پشت پایه گرداب‌های خیزان ایجاد می‌شوند که محور آن‌ها قائم است این گرداب‌ها مانند یک جاروبرقی عمل می‌کنند و سبب فرسایش در پشت پایه پل می‌شوند. علاوه بر این یک جریان روبه پایین در جلوی پایه پل ایجاد می‌شود. گرداب‌های نعل اسبی، گرداب‌های خیزان و جریان رو به پایین نقش عمده‌ای در ایجاد حفره آب‌شستگی اطراف پایه پل دارند (بروزرز و رادکیوی، ۱۹۹۱). درگاهی (۱۹۹۰) شروع آب‌شستگی در کناره‌های پایه را ناشی از افزایش سرعت جریان دانست. از نظر آنان حداکثر عمق آب‌شستگی، در اثر جریان پایین‌دست و گردابه‌های نعل اسبی شکل گرفته در بالادست رخ می‌دهد. ملویل و چپو، (۱۹۹۹) به بررسی طبقه‌بندی آب‌شستگی در شرایط آب زلال و بستر زنده براساس سرعت جریان و عمق حفره آب‌شستگی پرداختند. از نظر آنان هرگاه سرعت متوسط جریان در آستانه حرکت ذرات رسوبی U_c ، بیشتر از سرعت متوسط جریان U ، باشد آب‌شستگی در شرایط آب زلال رخ می‌دهد ($U > 0.3U_c$)، در غیر این صورت شرایط با بستر زنده یا متحرک را ایجاد می‌کند.

در پژوهش‌های تجربی و میدانی، اندکی به بررسی تأثیرات تجمع اجسام شناور چوبی بر آب‌شستگی پایه پل‌ها

پرداخته شده است (ملویل و دانگول، ۱۹۹۲؛ دیهل، ۱۹۹۷؛ کاتل و اریکسون، ۱۹۹۸؛ بردلی و همکاران، ۲۰۰۵؛ زونبرگ و همکاران، ۲۰۰۶؛ پاگلیارا و کارناسینا a و b، ۲۰۱۰؛ لاگاس و همکاران، ۲۰۱۰؛ پاگلیارا و کارناسینا، ۲۰۱۱ و الیوت و همکاران، ۲۰۱۲). فقط برخی از این پژوهش‌ها روش‌هایی برای ارزیابی تأثیرات تجمع اجسام شناور چوبی بر آب‌شستگی پایه پل پیشنهاد کرده‌اند. ملویل و دانگول، (۱۹۹۲) با استفاده از تجمع اجسام شناور چوبی در جلو پایه استوانه‌ای شکل آزمایش‌هایی انجام دادند. بر اساس نتایج آن‌ها بیشترین عمق آب‌شستگی در حالت تعادل در حضور تجمع اجسام شناور چوبی را می‌توان با استفاده از قطر یک پایه معادل این چنین تعریف کرد:

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

که در این رابطه؛ D_e قطر پایه معادل یا هم ارز است که در معرض تجمع اجسام شناور قرار دارد، h و D به ترتیب عمق آب و قطر پایه پل، T و d_d هم به ترتیب ضخامت (ارتفاع) و عرض اجسام شناور هستند. بعدها لاگاس و همکاران، (۲۰۱۰) بر اساس روش ملویل و دانگول، (۱۹۹۲) معادله جدیدی را مطرح کردند بر این اساس قطر معادل D_e ، برای تجمع اجسام شناور مستطیلی در اطراف پایه مربعی شکل به‌صورت زیر است:

$$D_e = \frac{k_{d1}(T \times d_d) \left(\frac{L_d}{h}\right)^{k_{d2}} + (h - k_{d1} \times T)D}{h} \quad (2)$$

در این رابطه؛ L_d طول اجسام شناور در بالادست که بر حسب فوت و یا متر است. k_{d1} و k_{d2} ضریب بهینه هستند که شکل، وسعت و یا اندازه اجسام شناور در بالادست و در نتیجه آب‌شستگی روی پایه را مشخص می‌کنند. برای اجسام شناور مستطیل شکل به ترتیب ضریب بهینه ۰/۳۹ و ۰/۷۹ و برای اجسام شناور مثلثی شکل به ترتیب ۰/۲۱ و ۰/۱۷ است.

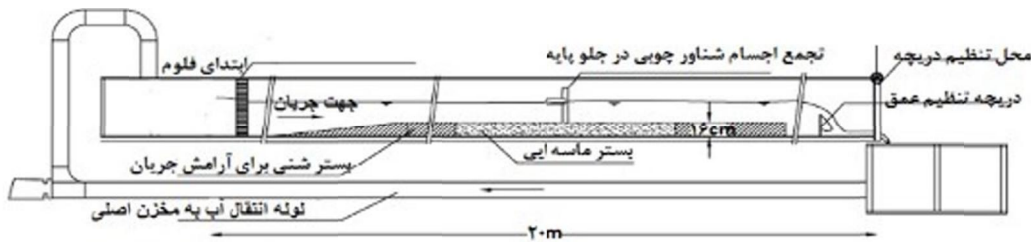
بر اساس بررسی‌ها تاکنون پژوهشی بر روی تأثیر اجسام شناور چوبی بر عمق آب‌شستگی موضعی بر پایه مستطیلی با دماغه تیز انجام نشده است. بنابراین در این مقاله عمق آب‌شستگی موضعی در حضور اجسام شناور در اطراف یک پایه مربعی دماغه تیز بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

مشخصات مجرای آب

تمام آزمایش‌های تجربی در کانالی در مرکز آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب در دانشگاه شهرکرد انجام شد. این کانال شامل یک مجرای افقی با دیواره‌های فایبرگلاس به طول ۲۰ متر، عرض ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر است. یک پمپ در بالادست کانال قرار گرفته است که بیشترین توان تخلیه آن ۷۰ لیتر بر ثانیه است. در این پژوهش، ۴۸ آزمایش برای اجسام شناور چوبی نفوذپذیر و ۱۲ آزمایش برای اجسام شناور چوبی زبر انجام شد. همه آزمایش‌ها در شرایط آب زلال با بستر ماسه‌ای به ضخامت ۱۶۰ میلی‌متر انجام شد. اندازه متوسط دانه‌های ماسه $d_{50} = 0.78$ میلی‌متر بوده در همه آزمایش‌ها شیب فلوم ۰/۱ درصد به طور ثابت در نظر

گرفته شده است. عمق جریان در بالای سطح بستر ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. همچنین آزمایش‌ها با دبی‌های ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ لیتر بر ثانیه انجام شد، در این آزمایش‌ها از یک پایه مربعی به ضلع ۹ سانتی‌متر با دماغه تیز مثلثی (متساوی‌الساقین) به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر و با زاویه رأس ۴۸ درجه نسبت به پایه مربعی استفاده شد. آزمایش‌ها برای اجسام شناور مستطیلی با چهار اندازه متفاوت (از نظر طول و عرض، و ارتفاع ثابت) در مقابل پایه مربعی با دماغه تیز مثلثی قرار می‌گیرد که در اینجا عمق آب‌شستگی را در دو حالت با اجسام شناور و بدون اجسام شناور با استفاده از نقطه‌سنج (کولیس) اندازه‌گیری و با هم مقایسه می‌شود. شکل ۱ نمایی از فلوم آزمایشگاهی و نحوه قرارگیری پایه و اجسام شناور را به شکل نمادین نمایش می‌دهد.



شکل ۱- نمایی از فلوم آزمایشگاهی و نحوه قرارگیری پایه و اجسام شناور چوبی

آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شده است برابر با ۰/۳۸۸ متر بر ثانیه محاسبه شد. جدول ۱ محاسبه سرعت متوسط جریان و سرعت بحرانی (سرعت آستانه حرکت رسوبات) در عمق ۲۰ سانتی‌متری را نشان می‌دهد.

جدول ۱- سرعت آستانه حرکت در عمق ۲۰ سانتی‌متری

U/Uc	Uc (m/s)	U (m/s)	h (cm)	Q (lit/s)
۰/۳۲۲۱	۰/۳۸۸	۰/۱۲۵	۲۰	۱۵
۰/۴۳۰۴	۰/۳۸۸	۰/۱۶۷	۲۰	۲۰
۰/۶۴۴۳	۰/۳۸۸	۰/۲۵	۲۰	۳۰
۰/۸۶۰۸	۰/۳۸۸	۰/۳۳۴	۲۰	۴۰

طراحی اجسام شناور چوبی مستطیلی شکل

اجسام شناور چوبی مستطیلی شکل به صورت قفسه‌های توری با فاصله عرضی ۱/۲ سانتی‌متر بین حفره تورها طراحی شد که جریان آب به راحتی از آن عبور کند (شکل ۲). این قفسه‌ها به شکل مستطیلی و در اندازه‌های متفاوت بر اساس جدول ۲ ساخته شدند و از چوب‌های

تعیین سرعت متوسط و سرعت آستانه حرکت

رسوبات

برای اجرای آزمایش‌ها در شرایط آب زلال و با بستر ثابت که در آن بجز آب‌شستگی موضعی در اطراف پایه پل هیچ‌گونه حرکت رسوبی وجود نداشته باشد نیاز است تا آستانه حرکت رسوبات تعیین شود. بدین منظور سرعت آستانه حرکت ذرات بستر، U_c براساس فرمول ریچاردسون و دیویس، (۲۰۰۱) تخمین زده شد که به صورت زیر است:

$$U_c = \frac{k_s^{0.5} (S_s - 1)^{0.5} d_{50}^{0.5} \cdot y^{0.167}}{n} \quad (3)$$

در رابطه بالا U_c سرعت آستانه حرکت رسوبات (m/s)، K_s پارامتر بی‌بعد شیلدز، S_s چگالی ذرات (که مقدار آن ۲/۶۵ و به صورت بی‌بعد است)، d_{50} قطر متوسط ذرات (m)، y عمق جریان بر حسب (m) و n ضریب زبری مانینگ است که از رابطه استریکلر به دست می‌آید. با محاسبه مقدار عددی ۰/۰۳۱ برای پارامتر شیلدز $(\frac{d_s}{u} \sqrt{0.1(S_s - 1)gd_s})$ سرعت بحرانی در عمق ۲۰ سانتی‌متری که برای تمام



شکل ۲- طراحی اجسام شناور چوبی مستطیلی

خشک پر شدند. و آن‌ها در سه حالت؛ هم سطح آب (روی سطح آب)، زیر سطح آب (متوسط عمق) و بالای سطح آب، در جلوی پایه مربعی با دماغه تیز مثلثی قرار داده شدند. به عبارت دیگر، تأثیر محل تجمع اجسام شناور بر عمق آب‌شستگی نیز بررسی شد. در جدول ۲، داده‌ها (طول، عرض و ارتفاع اجسام شناور چوبی) بر حسب سانتی‌متر و D نیز نشان دهنده طول ضلع مربع (۹ cm) است.

جدول ۲- مشخصات اجسام شناور چوبی به کار رفته در آزمایش

شکل اجسام شناور چوبی	طول اجسام شناور چوبی L_d (cm)	عرض اجسام شناور چوبی d_d (cm)	ارتفاع اجسام شناور چوبی T (cm)	L_d/D	d_d/D	T/D
مستطیلی	۱۵	۲۰	۱۰	۱/۶۶۷	۲/۲۲۳	۱/۱
مستطیلی	۱۲	۲۵	۱۰	۱/۳۳۴	۲/۷۷۸	۱/۱
مستطیلی	۲۰	۳۰	۱۰	۲/۲۲۳	۳/۳۳۴	۱/۱
مستطیلی	۲۵	۴۵	۱۰	۲/۷۷۸	۵	۱/۱

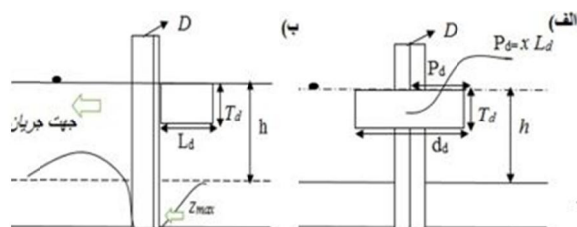
اجرای آزمایش

برای هر یک از آزمایش‌ها، بستر در فلوم آزمایشگاهی در اطراف پایه پل با دقت تراز شد و اجسام شناور چوبی در فاصله‌های مختلف از بستر (هم سطح آب، زیر سطح آب و بالای سطح آب) در داخل فلوم در جلو پایه مربعی با دماغه تیز مثلثی قرار داده شد تا T_d های مختلف به دست آیند. پس از آنکه اجسام شناور چوبی در جلو پایه مربعی با دماغه تیز مثلثی ثابت شد، کانال در یک دبی کم به طور کامل انباشته از آب شد ($Q \approx 0,001 m^3/s$) تا زمانی که سطح آب در فلوم به ۲۰ سانتی‌متر بالاتر از سطح بستر برسد (برای جلوگیری از آب‌شستگی 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 سانتی‌متری ثابت بماند (با استفاده از سرریز تعبیه شده در انتهای فلوم). از یک نقطه‌سنج (کولیس) با دقت 0.1 mm برای اندازه‌گیری حداکثر عمق آب‌شستگی استفاده شد. میزان آب‌شستگی در زمان ۱، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ... و ۴۲۰ دقیقه اندازه‌گیری شد.

آنالیز ابعادی

بیشترین عمق آب‌شستگی در محاسبات اطراف پایه‌های 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:

شکل ۳ به صورت نمادین، یکی از حالت‌ها سه گانه نحوه قرارگیری اجسام شناور و ایجاد گودال آب‌شستگی در این بررسی را نشان می‌دهد که در آن اجسام شناور چوبی مستطیلی شکل در جلو پایه در حالت هم سطح آب قرار دارد. در شکل ۳، Z_{max} بیشترین عمق آب‌شستگی در اطراف پایه است. از نمای بالایی، فرورفتگی و بالآمدگی در سطح بستر در جلو و پشت پایه نشان دهنده تأثیر تجمع اجسام شناور چوبی با P_d/L_d متفاوت بر عمق آب‌شستگی در جلو پایه است که P_d ، فاصله عرضی ابتدای اجسام شناور قرار داده شده در جلو پایه تا مرکز پایه، و x یک متغیر است که بستگی به P_d/L_d دارد. T_d ، نیز ضخامت مستغرق اجسام شناور است. 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 در نظر گرفته شد.



شکل ۳- مشخصات اجسام شناور چوبی در جلو پایه الف)

پروفیل عرضی و ب) پروفیل طولی

$$Z = f \left[f_{bg} \left(D, S_{hp}, A_{lp}, b \right), f_f \left(q, h, v, \rho, g \right), f_{st} \left(d_{50}, \sigma, \rho'_s \right), f_t \left(t \right) \right] \quad (4)$$

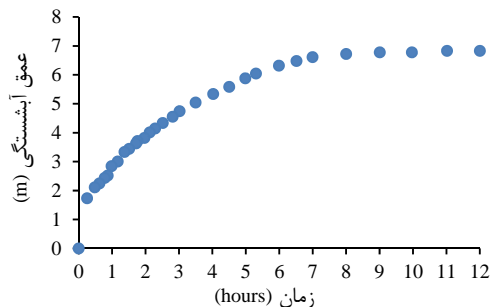
در این معادله؛ S_{hp} شکل پایه پل، A_{lp} عامل هم‌ترازی یا یکنواختی رسوبات (در اینجا نادیده در نظر گرفته شد)، t زمان، q دبی در واحد عرض، b عرض کانال، v ویسکوزیته سینماتیکی، ρ چگالی آب، g شتاب ثقل، d_{50} متوسط اندازه رسوبات، s زاویه قرارگیری رسوبات، و $\rho'_s = (\rho_s - \rho) / \rho$ چگالی نسبی رسوبات، که r_s چگالی

در این رابطه n_d تخلخل یا زبری اجسام شناور چوبی است که براساس بررسی پاکلیارا و کارناسینا (۲۰۱۰ a) تعریف شده است. S_{hd} نشان دهنده 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 ($Re = 4Uh/v > 2 \times 10^5$) است و مواد بستر در این آزمایش به طور تقریبی یک دست بودند ($\sigma < 1.3$) انحراف معیار، و هیچ تأثیر تقویت کننده‌ای ظاهر نشد. تعداد کل متغیرها نوزده پارامتر است که در این پژوهش اثر دوازده پارامتر در نظر گرفته شد و در نهایت نه پارامتر بی‌بعد از آن استخراج شد. با استفاده از قضیه Π و با توجه به آب‌شستگی در اثر تجمع اجسام شناور چوبی و عمق جریان، معادله (۵) به صورت زیر در خواهد آمد:

$$Z_{Debris} = f \left[f_{bg} \left(D, S_{hp}, A_{lp}, b \right), f_f \left(q, h, v, r, g \right), f_{st} \left(d_{50}, s, r'_s \right), f_t \left(t \right), f_d \left(d_d, t_d, l_d, p_d, s_{hd}, n_d \right) \right] \quad (5)$$

نتایج و بحث

هر آزمایش به طور کلی به مدت ۴۲۰ دقیقه انجام شد. این زمان براساس پژوهش‌های قربانی و کلز (۲۰۰۸) و همچنین با انجام یک آزمایش ۱۲ ساعته مشخص شد، که حداکثر آب‌شستگی موضعی در کنار پایه پل‌ها در ۷ ساعت اول آزمایش انجام می‌شود. شکل ۴، نمودار توسعه زمانی آب‌شستگی پایه شاهد (مربعی با دماغه تیز) را با دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. همان طوری که شکل نشان می‌دهد عمق آب‌شستگی در ۴ ساعت اول آزمایش افزایش پیدا می‌کند و بعد از آن به صورت تدریجی در زمان ۴۲۰ دقیقه ثابت می‌شود.



شکل ۴- توسعه زمانی آب‌شستگی برای پایه مربعی با دماغه تیز مثلثی

شکل ۵، گودال آب‌شستگی ایجاد شده را در حضور اجسام شناور چوبی با عرض، طول و ارتفاع به ترتیب (۳۰-۲۰-۱۰) سانتی‌متر در جلو پایه مربعی با دماغه تیز مثلثی با دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه در حالتی که اجسام شناور چوبی بالای سطح آب قرار گرفته بودند را نشان می‌دهد. شکل ۶ گودال آب‌شستگی را برای حالتی که اجسام شناور چوبی

در این رابطه n_d تخلخل یا زبری اجسام شناور چوبی است که براساس بررسی پاکلیارا و کارناسینا (۲۰۱۰ a) تعریف شده است. S_{hd} نشان دهنده 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 ($Re = 4Uh/v > 2 \times 10^5$) است و مواد بستر در این آزمایش به طور تقریبی یک دست بودند ($\sigma < 1.3$) انحراف معیار، و هیچ تأثیر تقویت کننده‌ای ظاهر نشد. تعداد کل متغیرها نوزده پارامتر است که در این پژوهش اثر دوازده پارامتر در نظر گرفته شد و در نهایت نه پارامتر بی‌بعد از آن استخراج شد. با استفاده از قضیه Π و با توجه به آب‌شستگی در اثر تجمع اجسام شناور چوبی و عمق جریان، معادله (۵) به صورت زیر در خواهد آمد:

$$K_d = \frac{Z_{Debris}}{h} = \Pi \left(\frac{D}{d_{50}}, \frac{h}{D}, \frac{b}{D}, \frac{u}{u_c}, \Delta A\%, \frac{d_d}{b}, \frac{l_d}{D}, \frac{p_d}{l_d} \right) \quad (6)$$

در این معادله $\Delta A\% = [(d_d - D) \cdot t_d / (b \cdot h)] \cdot 100$ ضریب انسداد ناشی از تجمع اجسام شناور مستطیلی، u/u_c نسبت سرعت جریان به سرعت بحرانی، و Π ، یک نماد عملکردی است. شکل مستطیلی، نفوذپذیر و زیر (متخلخل) اجسام شناور چوبی در جلو پایه آزمایش شده است. شایان ذکر است که آزمون نمونه شاهد، آزمونی است که بدون تجمع اجسام شناور در همان شرایط آزمایشی، یعنی شدت جریان، زبری سطح، عمق آب، و آب‌گرفتگی اطراف پایه پل انجام می‌شود. شایان ذکر است که هنگام آزمون نمونه شاهد $\Delta A\% = 0$ و $t_d = 0$ است (چون اجسام شناور چوبی در جلو پایه قرار ندارد).

اجسام شناور چوبی نشان دهنده مقادیر متفاوت عمق آبشستگی و انباشت ماسه‌ها در کناره‌ها و پایین‌دست پایه است.

با عرض، طول و ارتفاع به ترتیب (۲۰-۱۵-۱۰) سانتی‌متر را در حالت هم سطح آب قرار گرفته در هنگام آزمایش و حداکثر عمق آبشستگی در حالت خشک را نشان می‌دهد. با توجه به شرایط هیدرولیکی و هندسه، وجود



شکل ۵- نمایی از آبشستگی پس از زمان ۴۲۰ دقیقه با

$$\frac{d_a}{b} = 0.5, l_a = 2.23, \frac{p_a}{l_a} = 0.75, \frac{h}{D} = 2.23, \frac{U}{U_c} = 0.86, \Delta A\% = 8.75$$



شکل ۶- نمایی از حداکثر عمق آبشستگی در زمان ۴۲۰ دقیقه با

$$\frac{d_a}{b} = 0.334, l_a = 1.667, \frac{p_a}{l_a} = 0.667, \frac{h}{D} = 2.23, \frac{U}{U_c} = 0.86, \Delta A\% = 9.167$$

طول گودال آبشستگی (۱/۱۵، ۱/۲ و ۱/۴ برابر نمونه شاهد) دارد. به طوری که هرچه اجسام شناور به کف بستر نزدیک‌تر باشند، عمق، عرض و طول گودال بیشتر افزایش پیدا می‌کند. اگر اجسام شناور چوبی در زیر سطح آب قرار گیرند حداکثر عمق آبشستگی رخ می‌دهد و سبب افزایش طول و عرض گودال می‌شود (۲/۲ برابر نمونه شاهد، عمق آبشستگی بیشتر می‌شود). علاوه بر این هرچه حجم قسمتی از اجسام شناور که در داخل آب قرار گرفته است بیشتر باشد (حجم قسمت مستغرق) حجم گودال آبشستگی نیز بزرگ‌تر خواهد بود.

جدول ۳ مشخصات گودال آبشستگی برای نمونه شاهد و اجسام شناور چوبی در حالت هم سطح آب برای شکل ۸ الف، ب، ج و د را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین عمق آبشستگی مربوط به حالتی است که $\Delta A = 30\%$ باشد، که در این حالت $d_a/b = 0.75$ است.

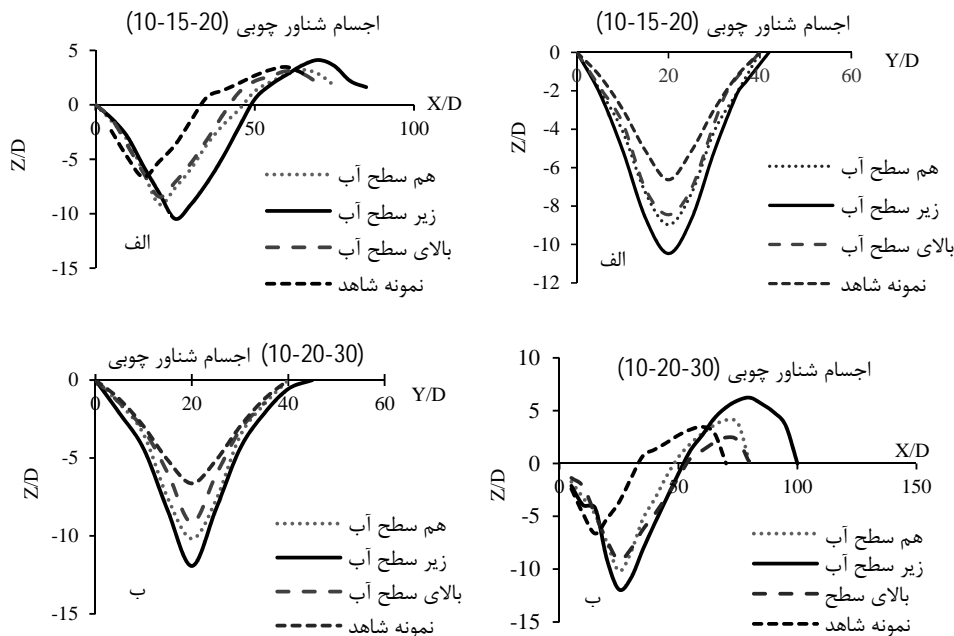
شکل ۸ الف، ب، ج و د پروفیل طولی گودال آبشستگی را به ترتیب با دبی‌های ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ لیتر بر ثانیه،

شکل ۷ الف و ب، مقایسه پروفیل طولی و عرضی برای اجسام شناور چوبی با عرض، طول و ارتفاع (۳۰-۲۰-۱۰) و (۲۰-۱۵-۱۰) سانتی‌متر در سه حالت؛ هم سطح آب، زیر سطح آب و بالای سطح آب که در جلو پایه دماغه تیز مثلی قرار گرفته‌اند را با نمونه شاهد (بدون اجسام شناور)، در دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه مقایسه می‌کند.

در این شکل؛ Z نشان دهنده تراز گودال آبشستگی نسبت به کف آبراهه است، X فاصله طولی گودال آبشستگی ایجاد شده در جلو و پشت پایه و Y فاصله عرضی از مرکز پایه پل در گوشه‌های دماغه که حداکثر عمق آبشستگی در آنجا رخ می‌دهد است. همان‌طور که شکل‌ها نشان می‌دهند، اجسام شناور چوبی سبب افزایش طول، عرض و عمق گودال آبشستگی شده‌اند. از طرفی دیگر، محل قرارگیری اجسام شناور چوبی (بالای سطح، هم سطح و زیر سطح آب) در جلو پایه پل تأثیر بسزایی بر روی عمق گودال آبشستگی (۱/۳۵، ۱/۶ و ۱/۹ برابر نمونه شاهد)، عرض (۱، ۱/۰۷ و ۱/۲ برابر نمونه شاهد) و

دبی‌های ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد انسداد اجسام شناور نحوه قرارگیری آن در جلو پایه (بالای سطح، هم سطح و زیر سطح آب) تأثیر چشم‌گیری بر حداکثر عمق آب‌شستگی دارد. به طور کلی، انباشت کوچکی از اجسام شناور چوبی در جلو پایه پل نیز باعث افزایش عمق آب‌شستگی در جلو پایه و افزایش طول و عرض گودال نسبت به نمونه شاهد می‌شود. در مقابل، با افزایش طول و عرض اجسام شناور، ریخت حفره آب‌شستگی بیشتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در این آزمایش‌ها براساس شکل ۹، بیشترین عمق آب‌شستگی مربوط به حالتی است که اجسام شناور چوبی در زیر سطح آب در جلو پایه با دبی ۴۰ لیتر بر ثانیه و ضریب انسداد، $\Delta A = 30\%$ است، که در این حالت $d_d/b = 0.75$ است.

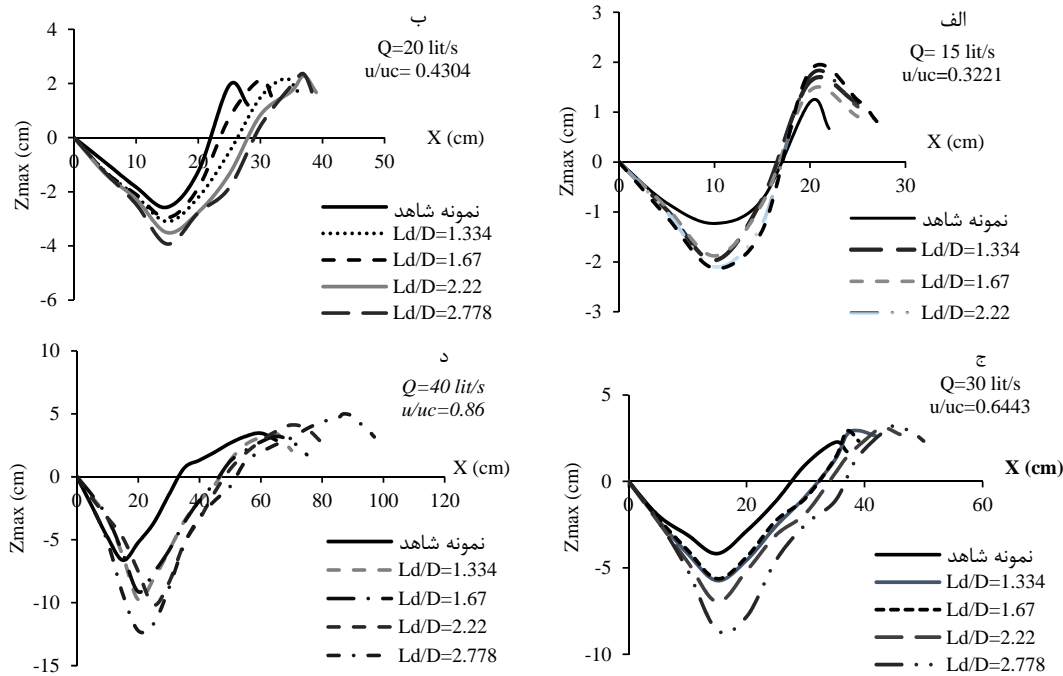
برای نمونه شاهد و با اجسام شناور چوبی در حالت هم سطح آب (با مشخصات زیر) با عرض، طول و ارتفاع (۲۰-۱۵-۱۰)، (۲۵-۱۲-۱۰)، (۳۰-۲۰-۱۰) و (۴۵-۲۵-۱۰) سانتی‌متر نشان می‌دهد. مشخصات نمونه‌های ذکر شده در این شکل‌ها در جدول ۳ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که طول و عرض نسبی اجسام شناور چوبی تأثیر چشم‌گیری بر شکل ظاهری طولی و عرضی آب‌شستگی دارد. به طور کلی، انباشت کوچکی از اجسام شناور چوبی در جلو پایه پل نیز باعث افزایش عمق آب‌شستگی در جلو پایه و افزایش طول و عرض گودال نسبت به نمونه شاهد می‌گردد. در مقابل، با افزایش طول و عرض اجسام شناور، ریخت حفره آب‌شستگی بیشتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد. شکل ۹ بیشینه عمق آب‌شستگی را در برابر درصد انسداد اجسام شناور قرار گرفته شده در جلو پایه مربعی با دماغه تیز مثلثی در سه حالت ذکر شده (بالای سطح، هم سطح و زیر سطح آب) را در مقابل حداکثر عمق آب‌شستگی در



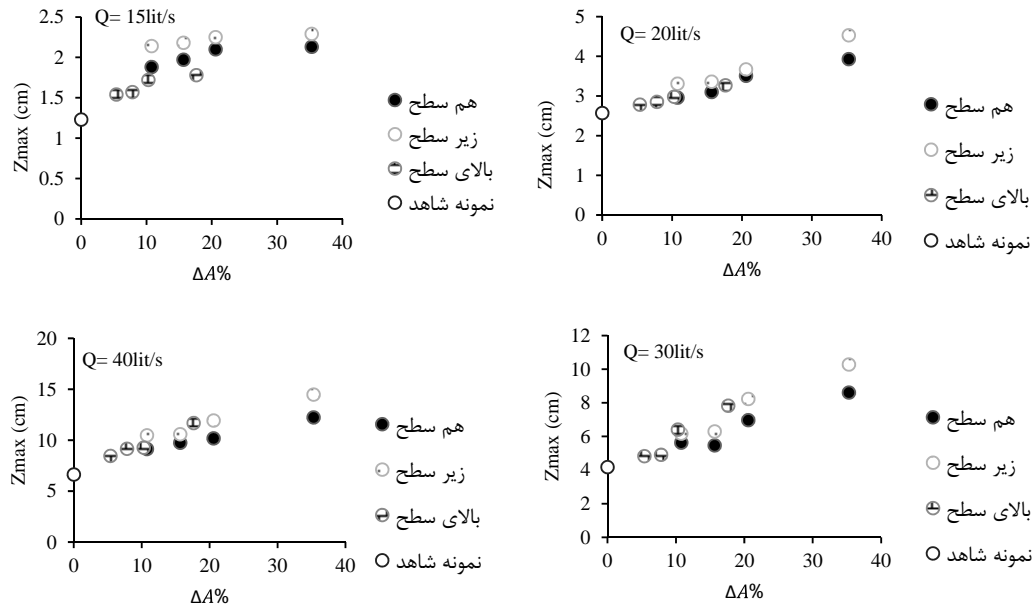
شکل ۷- مقایسه حداکثر آب‌شستگی طولی و عرضی در زمان ۴۲۰ دقیقه

جدول ۳- مشخصات نمونه شاهد و اجسام شناور چوبی در حالت هم سطح آب

L_d/D	P_d/L_d	h/D	$\Delta A\%$	d_d/b	T_d (cm)	S_t
-	-	۲/۲۲	-	-	-	نمونه شاهد
۱/۶۶۷	۰/۶۶۷	۲/۲۲	۹/۱۶۷	۰/۳۳۴	۱۰	(۱۰-۱۵-۲۰)
۱/۳۳۴	۱/۰۴۱۶	۲/۲۲	۱۳/۳۳	۰/۴۱۶	۱۰	(۱۰-۱۲-۲۵)
۲/۲۲۳	۰/۷۵	۲/۲۲	۱۷/۵	۰/۵	۱۰	(۱۰-۲۰-۳۰)
۲/۷۷۸	۰/۹	۲/۲۲	۳۰	۰/۷۵	۱۰	(۱۰-۲۵-۴۵)



شکل ۸- پروفیل طولی گودال عمق آب‌شستگی در حضور تجمع اجسام شناور در حالت هم سطح آب: الف) Q=15 lit/s، ب) Q=20 lit/s، ج) Q=30 lit/s و د) Q=40 lit/s



شکل ۹- درصد انسداد اجسام شناور قرار داده شده در جلو پایه در مقابل حداکثر عمق آب‌شستگی در زمان ۴۲۰ دقیقه

$$\frac{Z_{debris}}{h} = a \left(\frac{U}{U_c}\right)^{a_1} (\Delta A)^{a_2} \left(\frac{d_d}{b}\right)^{a_3} \left(\frac{L_d}{D}\right)^{a_4} \quad (\gamma)$$

با گرفتن از طرفین رابطه (۷) داریم:

$$\ln\left(\frac{Z_{debris}}{h}\right) = \ln a + a_1 \ln\left(\frac{U}{U_c}\right) + a_2 \ln(\Delta A) + a_3 \ln\left(\frac{d_d}{b}\right) + a_4 \ln\left(\frac{L_d}{D}\right) \quad (\lambda)$$

برای یافتن معادله مناسب برای پیش‌بینی عمق آب‌شستگی در جلو پایه مربعی با دماغه تیز مثلثی از نتایج آنالیز ابعادی استفاده شد. بدین ترتیب معادله عمق آب‌شستگی، به صورت نمایی و به صورت زیر بیان می‌شود:

اجسام شناور در جلو پایه مربعی با دماغه تیز مثلثی به استخراج و با شکل زیر (معادله (۱۰)) ارائه می‌شود:

$$R = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2 \sum(y-\bar{y})^2}} \quad (9)$$

$$\frac{Z_{debris}}{h} = 1.224 \left(\frac{U}{U_c}\right) 1.7057 (\Delta A) 0.2598 \left(\frac{d}{b}\right) - 0.1096 \left(\frac{L_d}{D}\right) 0.1592 \quad (10)$$

بالای سطح، هم سطح و زیر سطح آب برای اجسام شناور متخلخل (زبر) انجام شد. مقایسه نتایج نشان داد که زبری اجسام شناور چوبی تأثیری بر شکل ظاهری و عمق گودال آب‌شستگی ندارند. اما براساس بررسی‌های پاگیلارا و کارناسینا (۲۰۱۰ a) این زبری می‌تواند بار دینامیکی را بر پایه پل افزایش دهد. شکل ۱۱ موقعیت اجسام شناور چوبی زبر را در حالت هم سطح آب (روی سطح آب) با دبی ۳۰ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- تجمع اجسام شناور چوبی زبر در جلو پایه در حالت هم سطح آب

نتیجه‌گیری

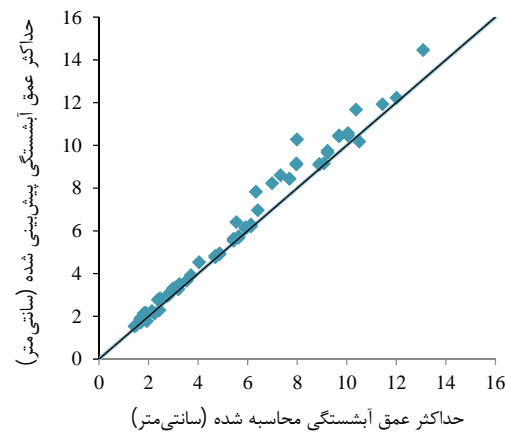
در این مقاله اثر اجسام شناور روی عمق آب‌شستگی اطراف یک پایه مربع شکل با دماغه تیز بررسی شد. نتایج نشان داد که حداکثر عمق آب‌شستگی در پایه با دماغه تیز در اطراف اضلاع دماغه مثلثی رخ می‌دهد. نتایج نشان داد که وقتی اجسام شناور بالای سطح آب، هم سطح آب و زیر سطح آب هستند عمق آب‌شستگی، به ترتیب، حداکثر تا ۱/۷، ۱/۸۵ و ۲/۲ برابر نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌یابد. علاوه بر این، زمانی که درصد انسداد (نسبت مساحت اشغال شده جریان با اجسام شناور به سطح مقطع جریان) برابر با ۳۰٪ و اجسام شناور در زیر سطح آب قرار گرفته باشند، بیشینه عمق آب‌شستگی

سپس با نرم‌افزار spss و رگرسیون خطی مقادیر a_1 تا a_4 و $\ln a$ به دست آورده شد. که مقدار R^2 (به دست آمده از رابطه (۹)) برابر با ۰/۹۸۴۸ است که این مقدار نشان دهنده این است که همبستگی خوبی بین داده‌ها برقرار بوده است. معادله حداکثر عمق آب‌شستگی در اثر تجمع

که در رابطه (۹) x متغیر وابسته و y متغیر مستقل است. شکل ۱۰ حداکثر عمق آب‌شستگی محاسبه شده در برابر حداکثر عمق آب‌شستگی مشاهده شده را نمایش می‌دهد. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد پراکندگی داده‌ها در حد خوب است. میانگین مجموع مربعات خطا از معادله زیر حساب می‌شود:

$$MS_E = \frac{(Z_{dP} - Z_{dm})^2}{n} \quad (11)$$

در معادله بالا؛ MS_E میانگین مجموع مربعات خطا، Z_{dP} حداکثر عمق آب‌شستگی پیش‌بینی شده، و Z_{dm} حداکثر عمق آب‌شستگی محاسبه شده حاصل از آزمایش است. برای داده‌های آب‌شستگی مشاهده شده و محاسبه شده مقدار $MS_E = 0.183$ است، که نشان دهنده دقت خوب برای معادله ارائه شده است.



شکل ۱۰- مقایسه حداکثر عمق آب‌شستگی محاسبه شده و پیش‌بینی شده حاصل از آزمایش
تأثیر زبری (تخلخل) اجسام شناور چوبی بر روی عمق آب‌شستگی

برای یافتن اثر زبری اجسام شناور روی عمق آب‌شستگی اجسام شناور مانند شکل ۱۱ به صورت زبر ساخته شدند، و آزمایش‌ها با دبی‌ها و اجسام شناور مختلف و در سه حالت

10. Mellvil B. W. and Chiew Y. M. 1999. Time scale for local scour at bridge piers. *J Hyd Engrg ASCE*. 125(1): 59-65.
11. Melville B. W. and Dongol D. M. 1992. Bridge pier scour with debris accumulation. *Journal of Hydraulic Engineering*. 118(9): 1306-1310.
12. Pagliara S. and Carnacina I. 2010 a. Temporal scour evolution at bridge piers: Effect of wood debris roughness and porosity. *Journal of Hydraulic Research*. 48(1): 3-13 .
13. Pagliara S. and Carnacina I. 2010 b. Scour and dune morphology in presence of large wood debris accumulation at bridge pier. *Dittrich, Koll, Aberle & Geisenhainer (eds) Bundesanstalt für Wasserbau ISBN 978-3-939230-00-7*.
14. Pagliara S. and Carnacina I. 2011. Influence of large woody debris on sediment scour at bridge piers. *International Journal of Sediment Research*. 26(2): 121-136.
15. Richardson EV. and Davis SR. 2001. *Evaluating Scour at bridges*. Fourth Edition, Federal Highway Administration, Washington, DC. 378 p.
16. Zevenbergen L. W. Lagasse P. F. Clopper P. E. and Spitz W. J. 2006. Effect of debris on bridge pier scour. *International conference on scour erosion, Amsterdam, The Nederland*.

۲/۲ برابر نمونه شاهد) رخ می‌دهد. علاوه بر این حضور اجسام شناور سبب افزایش طول (حداکثر ۱/۶ برابر نمونه شاهد) و عرض گودال آب‌شستگی (حداکثر ۱/۵ برابر نمونه شاهد) نیز می‌شود. همچنین یک معادله برای پیش‌بینی عمق آب‌شستگی پایه پل در حضور اجسام شناور ارائه شد که می‌تواند برای مهندسی رودخانه برای تخمین عمق آب‌شستگی مفید باشد. به علاوه نتایج نشان داد که زبری یا متخلخل بودن اجسام شناور تأثیری بر عمق و شکل ظاهری گودال آب‌شستگی ندارد.

منابع

1. Bradley J. B. Richards D. L. and Bahner C. D. 2005. *Debris Control Structures – Evaluation and Countermeasures*. Report No. FHWA-IF-04-016, Hydraulic engineering No. 9 (3th edition), Federal Highway administration, Washington, D.C.
2. Breusers H. N. and Raudkivi A. J. 1991. *Scouring Hydraulic Structures Design Manual*. Balkerna, Rotterdam. 2.152.
3. Dargahi B. 1990. Controlling Mechanism of Local Scouring. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*. 116 (10): 1197-12140.
4. Diehl T. H. 1997. Potential drift accumulation at bridges. Report No. FHWA-RD-97-028, Hydraulic Engineering No. 9, Federal Highway administration, Washington, D.C.
5. Elliot R. C. Froehlich D. C. and MacArthur R. C. 2012. 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.
6. Ghorbani B. and Kells JA. 2008. Effect of Submerged Vanes on The Scour occurring at a Cylindrical Pier. *Journal of Hydraulic Research*. 46: 610-619.
7. Kattell J. and Eriksson M. 1998. *Bridge scour evaluation: screening, analysis and countermeasures*. General Technical Report 9877 1207-SDTDC, U.S. Department of Agriculture, Forest San Dimas, CA.
8. Lagasse P. F. Clopper P. E. Zevenbergen P. E. Spitz W. J. and Girard L. G. 2010. *Effects of Debris on Bridge Pier Scour*. Transportation Research Board. 117 p.
9. Laursen E. M. and Toch A. 1956. Scour around bridge piers and abutments. *Bulletin No. 4, Iowa Highways Research Board, Ames, Iowa*.