

بررسی تأثیر المان زبری نصب شده در وجه بالادست پایه‌ی پل در جریان‌های پایین‌رونده با استفاده از آنالیز طیف قدرت

امین محمودی مقدم* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی شمس، گنبد

سعید صالحی (دکتری)

دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

طیب صادقی‌فر (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۴۰۱
دوری ۲ - ۳۸، شماره ۲/۱، ص. ۱۷-۲۶، (پژوهشی)

استفاده از زبری در بدنه‌ی بالادست و پایین‌دست پایه‌ی پل‌ها، تأثیر مستقیمی در کاهش آبشستگی خواهد داشت. از این رو، در جهت تعیین شرایط بهینه، ۱۰۸ آزمایش به اداء شرایط مختلف زبری نصب شده برای بررسی تأثیر در آبشستگی اطراف پایه‌ی پل، طرح ریزی شده است. مقایسه‌ها بین مدل‌های زبری پیوسته و ناپیوسته نشان داد که با اجرای ناپیوسته‌ی زبرهای مستطیلی و مثلثی، میزان بیشینه‌ی عمق آبشستگی به صورت محسوسی کاهش پیدا کرده است. درنهایت، با استفاده از آنالیز طیف قدرت و به‌کارگیری داده‌های سرعت‌سنجی، به بررسی میزان قدرت مؤلفه‌های سرعت در نقطه‌ی بیشینه‌ی آبشستگی پرداخته شده است. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار شدت آشفتگی، در زمان بیشترین مقدار طیف قدرت رخ داده است. بررسی داده‌های سرعت نشان داد که سرعت در جهت قائم در حالت پایه‌ی پل بدون زبری، بیشترین مشارکت را در افزایش شدت آشفتگی در جالوی پایه‌ی پل ایفا کرده است. همچنین ناپیوسته کردن زبری، باعث تغییر در ساختار گردابه‌های پایین‌رونده به سمت جلو شده است که درنهایت تغییر مشارکت سرعت‌ها در بیشینه‌ی مقدار آشفتگی را به دنبال داشته است.

واژگان کلیدی: آبشستگی، شدت آشفتگی، عدد رینولدز، انتقال رسوب‌ها، طیف قدرت.

amin.mahmudi@modares.ac.ir
saedsalehi100@gmail.com
tsadeghifar90@gmail.com

۱. مقدمه

پل‌ها از جمله مهم‌ترین سازه‌های هیدرولیکی هستند که بشر از دیرباز استفاده کرده است و نقش راهبردی آن در مسائل گوناگون برکسی پوشیده نیست. سامانه‌ی گردابی پیچیده‌ی در اطراف پایه‌ی پل‌ها به وجود می‌آید که عملکرد آن‌ها باعث حفرگودالی در اطراف پایه‌ی پل‌ها می‌شود که حفره‌ی آبشستگی نامیده می‌شود. توسعه‌ی حفره‌ی آبشستگی در اطراف پایه‌ی پل‌ها باعث خالی شدن زیر پی‌ها و در نتیجه، خرابی آن‌ها و خرابی پل می‌شود. دو عامل مهم باعث ایجاد چنین خرابی‌هایی می‌شود: (۱) برخورد جریان آب به پایه، و (۲) جدا شدن جریان آب از پایه‌ی پل. در اثر عبور جریان آب، در پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی به علت شدت جریان زیاد و در اثر به وجود آمدن جریان‌های متلاطم موضعی، فرسایش بستر به وجود می‌آید.

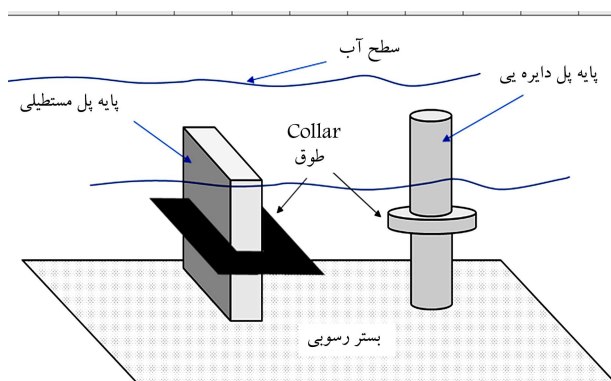
* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۱۲/۲۸، اصلاحیه ۱۴۰۰/۱۱/۲، پذیرش ۱۴۰۰/۱۲/۲۱.

DOI:10.24200/J30.2022.57666.2925

۲. مطالعات انجام شده

احداث پل در رودخانه‌ها همواره با فرایند فرسایش و آبشستگی در پایه‌ی آن همراه است. برخورد خطوط جریان و جدایی آن‌ها از پایه، سیستم‌های گردابی در اطراف پایه ایجاد می‌کند. راودکیوی و ساترلند^۱ (۱۹۸۱) بیان داشته‌اند که الگوی جریان سه‌بعدی اطراف پایه‌ی پل، متشکل از جریان رو به پایین و دو نوع سیستم گردابی (گرداب نعل اسبی و برخاستگی) است. اقدامات برای جلوگیری و کاهش آبشستگی در پایه‌ها و تکیه‌گاه‌های پل به دو روش کلی تقسیم می‌شود: (۱) روش اول (روش مستقیم): با تثبیت و تحکیم بستر و ساحل، سعی در جلوگیری و کاهش آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه می‌شود،^[۱] همچنین می‌توان با استفاده از سنگچین^۲ کیسه‌ی خاک^۳ بلوک‌های به هم بسته شده با کابل^۴، متراکم کردن خاک اطراف تکیه‌گاه و دیگر اقدامات به تثبیت و تحکیم بستر و ساحل پرداخت،^[۲] روش دوم (روش



شکل ۱. استفاده از طوق برای کاهش آبشستگی پایه و تکیه‌گاه پل.

ابتدایی بوده و با افزایش فاصله بین پایه‌ها، عمق آبشستگی نیز افزایش پیدا کرده است.^[۸] آشتیانی و قمیشی (۲۰۰۶)، به بررسی اثر ارتفاع قرارگیری طوق در کاهش آبشستگی تکیه‌گاه مستطیلی پل پرداختند. ایشان طوقی را در کانالی مرکب در معرض دو دبی ۲۰ و ۲۵ لیتر بر ثانیه قرار دادند و عملکرد طوق را در سه ارتفاع مختلف: ۹ سانتی‌متر روی بستر و ۲ سانتی‌متر بالای بستر در شرایط آبشستگی آب زلال بررسی و با تکیه‌گاه بدون طوق مقایسه کردند. طبق نتایج به دست آمده، طوق روی بستر عملکرد بهتری داشته و بیشینه‌ی درصد کاهش آبشستگی با دبی‌های ۲۰ و ۲۵ لیتر بر ثانیه به ترتیب ۹۴/۷ و ۹۳/۵ درصد به دست آمده است. چپو (۱۹۸۷)،^[۹] تأثیر طوق‌های محافظ را در کاهش آبشستگی پایه‌ی پل آزمایش کرده و با استفاده از طوق به اندازه‌ی ۲ برابر قطر پایه مشاهده کرده است که عمق آبشستگی به میزان ۲۰٪ کاهش یافته است. همچنین در ادامه‌ی پژوهش، برای کاهش عمق آبشستگی از ۵ اندازه‌ی مختلف طوق با قطرهای ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳ و ۴ سانتی‌متر برابر قطر پایه در اطراف پایه‌ی استوانه‌ای استفاده و مشاهده کرد که طوق‌های کوچک، باعث به وجود آمدن چاله‌های بزرگ در وجه بالادست پایه می‌شوند.^[۱۰]

در ساختار آبشستگی اطراف پایه‌ی پل، همواره مباحثی در رابطه با عوامل تأثیرگذار هیدرودینامیکی،^[۱۱] در پدیده‌ی آبشستگی وجود داشته است. پاسخ به این سؤال که کدامیک از اجزاء جریان، تأثیر بیشتری در پدیده‌ی آبشستگی دارند، همواره مورد بحث و پژوهش بوده است. در پژوهش حاضر، با استفاده از داده‌های سرعت‌سنجی و نیز آنالیز آماری طیف قدرت، به بررسی این سؤال که کدامیک از عوامل و اجزاء جریان در پدیده‌ی آبشستگی بیشترین تأثیر را دارند، پرداخته شده است. رحیمی‌نیا و همکاران (۱۳۹۵)، برای بررسی تأثیر بیرون‌زدگی زبری‌ها در کاهش عمق آبشستگی در اطراف پایه‌ی پل، از طوق نواری پیچیده شده بر روی پایه‌ی پل جانبی برای بررسی تغییرات پروفیل قائم سرعت استفاده کردند و دریافتند که استفاده از زبری، تأثیر قابل توجهی در کاهش میزان آبشستگی در اطراف پایه‌ی پل دارد.^[۱۲]

کاظمی‌زاده و همکاران (۲۰۲۱)، با استفاده از ساخت مدل‌های پایه پل با زبری‌های مختلف در دو حالت پیوسته و ناپیوسته در ابعاد مختلف سعی در بررسی تأثیر ساختار هندسی زبری‌های مورد آزمایش بر بیشینه‌ی میزان عمق آبشستگی در اطراف پایه پل را داشتند. نتایج تحقیق نشان داد، با افزایش طول زبری در بالادست و پایین دست پایه پل، چاله آبشستگی به صورت محسوسی با نرخ کاهشی عمق آبشستگی بیشینه‌ی در حدود ۳۴ درصد نسبت به مدل شاهد (بدون زبری) تغییر وضعیت می‌دهد. همچنین مقایسه‌های بین مدل‌های زبری پیوسته و ناپیوسته نشان

غیرمستقیم؛ با تغییر الگوی جریان در اطراف سازی احداث شده در مقطع پل، از آبشستگی در اطراف تکیه‌گاه جلوگیری می‌شود. از جمله اقدامات تغییر الگوی جریان می‌توان به دیواره‌های هدایت، آبشکن‌ها، طوقه‌ی محافظ و دیواره‌های موازی اشاره کرد. در ادامه، به بررسی نتایج بعضی از پژوهشگران در این زمینه پرداخته شده است. ایجاد پوشش حفاظتی سنگچین در اطراف پایه‌ها و تکیه‌گاه‌ها، به عنوان روشی متداول و آسان توسط پژوهشگران بسیاری بررسی و الگوهای پوششی مختلفی ارائه شده است. در روش اخیر، اطراف فونداسیون پل با سنگ‌هایی با قطر بیش از دانه‌های کف انباشته می‌شود. چپو و ملویل^۵ (۱۹۸۹)، رابطه‌ی ۱ را برای طراحی سنگچین توصیه کرده‌اند که اگر سرعت بحرانی برای ذرات معلوم باشد، اندازه‌ی سنگچین محاسبه خواهد شد.

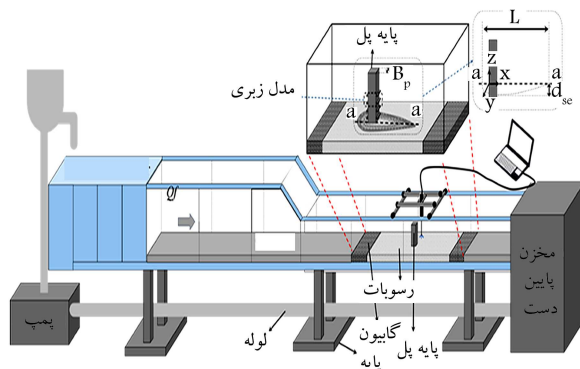
$$U_c = \sqrt{2g(G_s - 1)D_r} \quad (۱)$$

که در آن، U_c سرعت بحرانی، G_s چگالی ذرات، D_r اندازه‌ی سنگچین و g شتاب ثقل هستند.

نوردیلا و همکاران (۲۰۱۷)، در بررسی پایداری سنگچین در کنترل آبشستگی پایه‌ی پل استوانه‌ای در قوس رودخانه، از ۴ اندازه‌ی مختلف سنگچین که در اطراف یک مدل پایه‌ی استوانه‌ای شکل به قطر ۶۱ میلی‌متر و در موقعیت‌های مختلف قوس نصب شده بود، استفاده کردند و دریافتند که بیشینه و کمینه‌ی پایداری لایه‌ی سنگچین به ترتیب در موقعیت‌های ۳۰ و ۶۰ درجه رخ داده است. همچنین پایداری لایه‌ی سنگچین در قوس، کمتر از پایداری لایه‌ی سنگچین در مسیر مستقیم بوده است.^[۱۳] طوق‌ها وسایلی هستند که موازی با کف رودخانه و عمود بر پایه یا تکیه‌گاه نصب می‌شوند و می‌توانند در دماغه‌ی بالادست آن‌ها، جلو جریان رو به پایین را بگیرند و مانع از حفرگودال آبشستگی توسط آن شوند. طوق به صورت یک سپر محافظ در مقابل جریان رو به پایین گرداب نعل اسبی اطراف تکیه‌گاه عمل می‌کند و اثر فرسایشی عوامل مذکور را تا حد زیادی خنثی می‌کند. یک طوق در هر سطحی که نسبت به بستر نصب شود، جریان را به دو ناحیه‌ی بالا و پایین آن تقسیم می‌کند. ناحیه‌ی بالای طوق به عنوان یک مانع در مقابل جریان رو به پایین عمل می‌کند و قدرت جریان رو به پایین را در اثر برخورد با طوق کاهش می‌دهد. در ناحیه‌ی پایین طوق، قدرت جریان رو به پایین و در نتیجه گرداب نعل اسبی کاهش می‌یابد.^[۱۴] سعادت و همکاران (۲۰۱۴)، عملکرد طوق‌های مربعی و دایره‌ای در پایه‌ی پل استوانه‌ای را مقایسه کردند و دریافتند که یک طوقه‌ی مربعی‌شکل در کاهش عمق آبشستگی، بیشترین تأثیر را دارد.^[۱۵]

کارکبراید (۱۹۹۳)، اثر طوق در کاهش آبشستگی تکیه‌گاه را بررسی کرد و دریافت طوقی که در سطح بستر قرار دارد، کارایی بیشتری از خود نشان می‌دهد و طوق در هر ارتفاعی که بالای بستر نصب شود، جریان را به دو منطقه‌ی بالا و پایین طوق تقسیم می‌کند. برای منطقه‌ی بالا، طوق به صورت مانعی در مقابل جریان پایین‌رونده عمل می‌کند و قدرت جریان پایین‌رونده را که منجر به تخریب بستر می‌شود، را به صورت محسوسی کاهش می‌دهد. همچنین نتایج نشان دادند که برای منطقه‌ی پایین طوق، قدرت و شدت جریان پایین‌رونده و گردابه‌های اصلی تشکیل شده کاهش می‌یابد. در شکل ۱، کاهش آبشستگی پایه و تکیه‌گاه پل مشاهده می‌شود.^[۱۶]

معمار و همکاران (۲۰۲۰)، اثر طوق را در کاهش عمق آبشستگی در اطراف پایه‌های مستطیلی در خم ۱۸۰ درجه مطالعه کردند و دریافتند که طوق با اندازه‌ی ۳ برابر عرض پایه‌ی نصب شده، عمق آبشستگی را حدود ۳۸٪ کاهش می‌دهد.^[۱۷] همچنین حیدرپور و همکاران (۲۰۰۷)، در مطالعات خود در مورد اثر طوق در گروه پایه‌ها نشان داده‌اند که بیشترین اثر طوق در کاهش عمق آبشستگی در پایه‌های



شکل ۳. فلوم آزمایشگاهی و تجهیزات.

۵.۱.۳. آزمایش‌های مدل‌ها

در جدول ۱، آزمایش‌های انجام شده بر روی مدل آزمایشگاهی با زبری وجه بالادست و پایین‌دست ارائه شده است. به ازاء یک مدل زبری، ۲۷ آزمایش با طول‌های مختلف زبری انجام و به ازاء ۴ مدل زبری و مدل شاهد، جمعاً ۱۰۸ آزمایش صورت گرفته است که در کلیه آزمایش‌ها، پروفیل آب‌شستگی پایه‌ی پل اندازه‌گیری شده است.

۶.۱.۳. آنالیز ابعادی

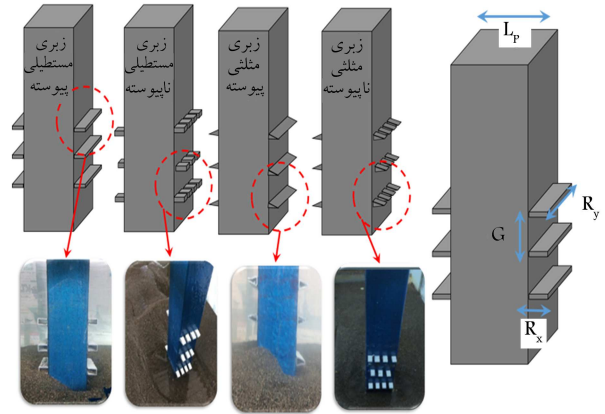
اعداد بی‌بعد در زمان آب‌شستگی پایه‌ی پل به صورت رابطه‌ی ۲ است. با توجه به آشفته بودن جریان می‌توان از آثار عدد رینولدز صرف‌نظر کرد:

$$\frac{d_s}{B_p} = f\left(F_r, \frac{R_x}{G}, \frac{d_{50}}{y}\right) \quad (2)$$

که در آن، d_s بیشینه‌ی عمق رسوب‌های شسته شده، B_p عرض مقطع آب شسته شده، R_x طول المان زبری، G فاصله‌ی بین المان زبری نصب شده بر روی وجه بالادست و پایین‌دست، d_{50} متوسط ذرات رسوب‌ها و y عمق آب در زمان آستانه‌ی حرکت هستند. لازم به ذکر است با توجه به اینکه نتایج به صورت درصد ارائه شده است، از این رو می‌توان از نتایج پژوهش حاضر با برقرار بودن آستانه‌ی حرکت ذرات در شرایط واقعی استفاده کرد. همچنین باید توجه داشت که رسوب‌ها به صورت ماسه‌ی غیرچسبنده در نظر گرفته شده‌اند، تا بدترین شرایط آب‌شستگی در شرایط آستانه‌ی حرکت رخ دهد. این امر باعث حذف آثار چسبندگی رسوب‌ها می‌شود که خود عامل مهمی در کاهش عمق آب‌شستگی است.

۲.۳. نحوه‌ی انجام کار

در پژوهش حاضر، با در نظر گرفتن شرایط مختلف هندسی مسئله (تغییر شکل زبری‌ها، بیرون‌زدگی‌های وجه بالادست و پایین‌دست پل)، آزمایش‌های هیدرولیکی برای محاسبه‌ی پروفیل گودال آب‌شستگی استفاده شده است. لذا ابتدا، با جریان دادن دبی‌های انتخاب شده و جایگذاری پایه‌ی پل مربعی‌شکل در قسمت تعبیه شده، پروفیل آب‌شستگی رسوب‌ها با استفاده از پوینت‌گیج برداشت شده است. برای بررسی تأثیر زبری نصب شده در پایه‌ی پل، از زبری‌های مستطیلی و مثلثی استفاده و به ازاء دبی‌های انتخاب شده، میزان آب‌شستگی در مقطع طولی از پایین‌دست پایه‌ی پل به سمت بالادست برداشت شده است. در نهایت با داشتن مقادیر اخیر، مقایسه‌هایی برای نشان دادن تأثیر زبری‌های نصب شده انجام پذیرفته است. همچنین عمق آب در اطراف پایه‌ی پل با در نظر گرفتن سرعت آستانه‌ی



شکل ۲. مدل‌های آزمایشگاهی زبری پایه‌ی پل.

داد، با اجرای ناپیوسته زبری مستطیلی و مثلثی میزان بیشینه‌ی عمق آب‌شستگی به صورت محسوسی کاهش پیدا می‌کند. در نهایت با در نظر گرفتن آنالیز ابعادی، رابطه‌ی بر پایه رگرسیون غیرخطی بر داده‌های آزمایشگاهی برازش داده شد. [۱۲]

۳. مواد و روش‌ها

۱.۳. تجهیزات آزمایشگاهی

۱.۱.۳. مدل‌های زبری پایه‌ی پل

در پژوهش حاضر، به‌طور کلی از ۴ مدل آزمایشگاهی همراه با یک مدل شاهد (بدون زبری) استفاده شده است (شکل ۲).

۲.۱.۳. فلوم آزمایشگاهی

مدل‌های پایه‌ی پل مربعی شکل با زبری‌های مختلف در فلوم آزمایشگاهی با عرض ۵۰ سانتی‌متر در محلی از کانال، که جریان توسعه یافته و دبی آن توسط یک پمپ تعبیه شده بود، تأمین شده است. در پژوهش حاضر، از سه دبی مختلف با مقادیر ۲۴، ۲۸ و ۳۲ لیتر بر ثانیه استفاده شده است. آزمایش‌ها در سه عمق نرمال آب به ازاء دبی‌های مذکور انجام شده‌اند. در نهایت، با استفاده از پوینت‌گیج^۶ و مترلیتری تعبیه شده در کانال، پروفیل طولی گودال آب شسته شده برداشت شده است. وضعیت قرارگیری مدل‌های آزمایشگاهی در فلوم آزمایشگاهی و تجهیزات فلوم در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

۳.۱.۳. جعبه‌ی رسوب‌ها

در جهت کاهش میزان حجم رسوب‌ها برای آماده‌سازی بستر اولیه در بالادست و پایین‌دست کانال از ورقه‌های چوبی جهت بالا آوردن کف کانال استفاده شده است که این امر موجب کاهش حجم رسوب‌ها شده است. همچنین با توجه به نظر ملوین (۱۹۹۷)، [۷] در رسوب‌ها، جریان داری برقرار است. از این رو، برای تأمین جریان داری، از گابیون‌هایی در بالادست و پایین‌دست رسوب‌ها استفاده شده است (شکل ۳).

۴.۱.۳. موقعیت قرارگیری پایه‌ی پل در فلوم آزمایشگاهی

مطابق شکل ۳، پایه‌ی پل مربعی‌شکل در جعبه‌ی تعبیه شده در کانال (محل جریان توسعه یافته) و کلیه‌ی پارامترهای طراحی زبری نشان داده شده ساخته شده است. نقطه‌ی بالادست مدل پایه‌ی پل مربعی‌شکل در سطح رسوب‌ها به عنوان نقطه‌ی مبدأ مختصات که کلیه‌ی نقاط با توجه به نقطه‌ی مبدأ مختصات نمایش داده شده است، در نظر گرفته شده است.

جدول ۱. آزمایش‌های مدل زبری پایه‌ی پل مربعی شکل.

ردیف	دبی (L/s)	عمق نرمال (mm)	عرض کانال (mm)	طول پایه (mm)	عرض پایه (mm)	نوع زبری	ابعاد زبری (mm)			فاصله زبری (mm)
							طول (R_x)	عرض (R_y)	ارتفاع (R_z)	
۱	۲۴	۱۸۰	۵۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱،۲،۳،۴، شاهد	۱۷	۱۵۰	۱۰	۵۰
۲	۲۸	۲۰۰	۵۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱،۲،۳،۴، شاهد	۳۵	۱۵۰	۱۰	۵۰
۳	۳۲	۲۱۰	۵۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱،۲،۳،۴، شاهد	۵۲	۱۵۰	۱۰	۵۰
۴	۲۴	۱۸۰	۵۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱،۲،۳،۴، شاهد	۱۷	۱۵۰	۱۰	۷۰
۵	۲۸	۲۰۰	۵۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱،۲،۳،۴، شاهد	۳۵	۱۵۰	۱۰	۷۰
۶	۳۲	۲۱۰	۵۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱،۲،۳،۴، شاهد	۵۲	۱۵۰	۱۰	۷۰
۷	۲۴	۱۸۰	۵۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱،۲،۳،۴، شاهد	۱۷	۱۵۰	۱۰	۷۰
۸	۲۸	۲۰۰	۵۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱،۲،۳،۴، شاهد	۳۵	۱۵۰	۱۰	۹۰
۹	۳۲	۲۱۰	۵۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱،۲،۳،۴، شاهد	۵۲	۱۵۰	۱۰	۹۰
۱۰	۲۴	۱۸۰	۵۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱،۲،۳،۴، شاهد	۱۷	۱۵۰	۱۰	۵۰
۱۱	۲۸	۲۰۰	۵۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱،۲،۳،۴، شاهد	۳۵	۱۵۰	۱۰	۵۰
۱۲	۳۲	۲۱۰	۵۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱،۲،۳،۴، شاهد	۵۲	۱۵۰	۱۰	۵۰
۱۳	۲۴	۱۸۰	۵۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱،۲،۳،۴، شاهد	۱۷	۱۵۰	۱۰	۷۰
۱۴	۲۸	۲۰۰	۵۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱،۲،۳،۴، شاهد	۳۵	۱۵۰	۱۰	۷۰
۱۵	۳۲	۲۱۰	۵۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱،۲،۳،۴، شاهد	۵۲	۱۵۰	۱۰	۷۰
۱۶	۲۴	۱۸۰	۵۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱،۲،۳،۴، شاهد	۱۷	۱۵۰	۱۰	۷۰
۱۷	۲۸	۲۰۰	۵۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱،۲،۳،۴، شاهد	۳۵	۱۵۰	۱۰	۹۰
۱۸	۳۲	۲۱۰	۵۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱،۲،۳،۴، شاهد	۵۲	۱۵۰	۱۰	۹۰
۱۹	۲۴	۱۸۰	۵۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱،۲،۳،۴، شاهد	۱۷	۱۵۰	۱۰	۵۰
۲۰	۲۸	۲۰۰	۵۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱،۲،۳،۴، شاهد	۳۵	۱۵۰	۱۰	۵۰
۲۱	۳۲	۲۱۰	۵۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱،۲،۳،۴، شاهد	۵۲	۱۵۰	۱۰	۵۰
۲۲	۲۴	۱۸۰	۵۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱،۲،۳،۴، شاهد	۱۷	۱۵۰	۱۰	۷۰
۲۳	۲۸	۲۰۰	۵۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱،۲،۳،۴، شاهد	۳۵	۱۵۰	۱۰	۷۰
۲۴	۳۲	۲۱۰	۵۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱،۲،۳،۴، شاهد	۵۲	۱۵۰	۱۰	۷۰
۲۵	۲۴	۱۸۰	۵۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱،۲،۳،۴، شاهد	۱۷	۱۵۰	۱۰	۷۰
۲۶	۲۸	۲۰۰	۵۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱،۲،۳،۴، شاهد	۳۵	۱۵۰	۱۰	۹۰
۲۷	۳۲	۲۱۰	۵۰۰	۱۵۰	۱۵۰	۱،۲،۳،۴، شاهد	۵۲	۱۵۰	۱۰	۹۰

۴.۳. رسوب‌های استفاده شده

منحنی دانه‌بندی رسوب‌ها در شکل ۵ مشاهده می‌شود. قطر متوسط رسوب‌ها در حدود ۲/۹ میلی‌متر و ماسه‌ی متوسط دسته‌بندی شده است. این مقدار با توجه به ماسه‌ی درشت‌دانه‌ی ارائه شده توسط ملوین (۱۹۸۷) انتخاب شده است.^[۷]

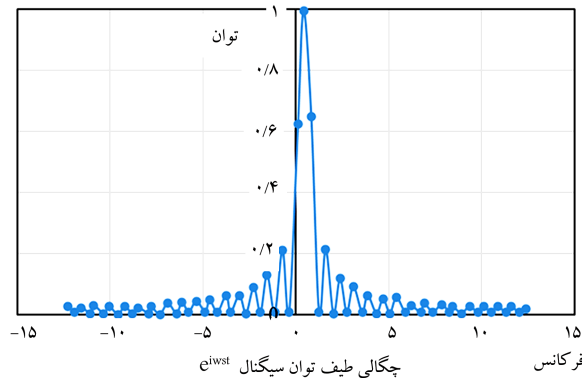
۵.۳. تابع طیف قدرت

در بخش کنونی، تابع پایه‌ی طیف قدرت برای داده‌های سرعت‌سنج^۷ نمایش داده شده است. چگالی طیفی قدرت برای سیگنال $X(t)$ ، بیانگر نحوه‌ی توزیع قدرت سیگنال در بسامدهای سازنده‌ی آن سیگنال است. به عبارتی دیگر، چگالی طیف قدرت مشخص می‌کند که هر مؤلفه‌ی بسامدی سیگنال، چه میزان قدرتی دارد.

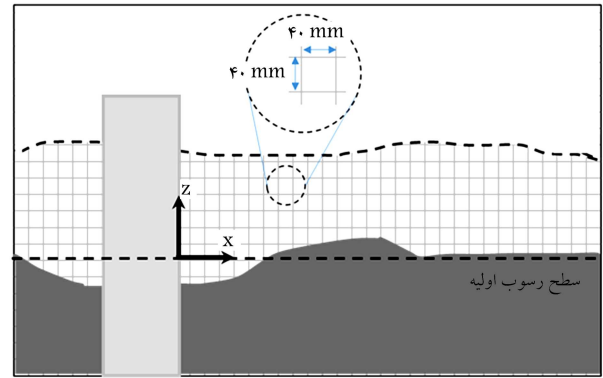
ذرات رسوبی در نظر گرفته شده است. این مقدار با پایین آوردن عمق آب و شروع حرکت ذرات رسوبی به ازاء دبی‌های مختلف در نظر گرفته شده است. باید در نظر داشت که در این حالت، جریان به صورت زیربحرانی و آشفته است.

۳.۳. مقاطع بررسی شده‌ی هیدرودینامیک

در حالت کلی، در پژوهش حاضر از مقطع‌های مختلفی در پشت و جلوی پایه‌ی پل برای بررسی داده‌های سرعت‌سنجی استفاده شده است. برای بررسی تأثیر زبری‌های نصب شده بر روی وجه بالادست و پایین‌دست پایه‌ی پل، برای جریان یک مقطع طولی با شبکه‌ی ۴×۴ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است (شکل ۴).



شکل ۶. تابع طیف قدرت ترسیم شده برای تابع پایه.



شکل ۴. موقعیت صفحه‌ای برداشت سرعت توسط سرعت‌سنج صوتی.

که قسمت دوم معادله‌ی اخیر، تبدیل فوری‌ی سیگنال است که از رابطه‌ی ۴ به دست می‌آید:

$$\bar{y}(w) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t)e^{-iwt} dt \quad (4)$$

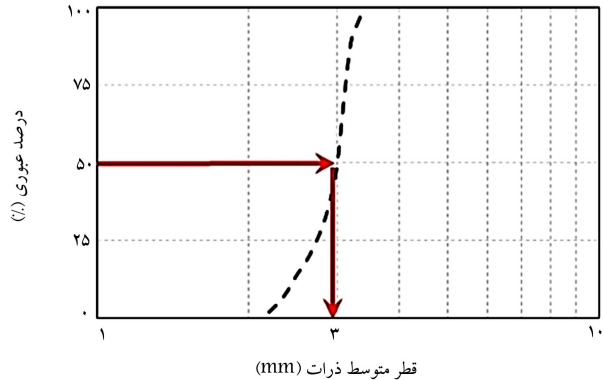
از طرف دیگر، همواره سیگنال $y(t)$ در طول بازه‌ی محدود $0 \leq t \leq T$ با نرخ نمونه‌برداری محدود اندازه‌گیری شده است. بنابراین، نمونه از سیگنال Y در بازه‌ی $t = \text{integer} \times \Delta$ اندازه‌گیری شده است. همچنین رابطه‌ی $T = N \Delta T$ صادق است. بنابراین، برای تخمین طیف قدرت یک سیگنال می‌توان سری فوری‌ی سیگنال را مطابق رابطه‌ی ۵ محاسبه کرد:

$$\bar{y}(w) = \int_{j=0}^{N-1} y(t) j e^{\frac{2\pi i j k}{N}} \quad (5)$$

که در آن، بسامدهای گسسته و زمان‌های گسسته برابر با $w_k = 2\pi k/T$ و $t_j = j\Delta$ هستند. البته برای یک سیستم گسسته با زمان، دینامیک‌ها به صورت عبارت‌هایی با اندیس j نوشته می‌شوند. در ادامه، N به صورت یک عدد زوج در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، تخمین طیف قدرت به صورت رابطه‌ی ۶ محاسبه خواهد شد.

$$p(w) \cong \begin{cases} N^2 \left| \frac{\bar{y}_0}{N} \right|^2 & \text{for } w = 0 \\ N^2 \left| \frac{\bar{y}_N}{N} \right|^2 + \left| \bar{y}_{N-k} \right|^2 & \text{or } w = 2\pi k/T, k = 1, 2, \dots \\ N^2 \left| \frac{\bar{y}_{N/2}}{N} \right|^2 & \text{for } w = \pi N/T = \pi/\Delta \end{cases} \quad (6)$$

که در آن، از عبارت $|y_k| = |y - k|$ به دلیل حقیقی بودن سیگنال و بنابر روابط قبل استفاده شده است. از P فقط برای بسامدهای مثبت استفاده می‌شود. در شکل ۶، طیف قدرت برای سیگنال $T = 8T = e^{(iwt)}$ و $\Delta = 0.25$ مشاهده می‌شود. با محاسبه‌ی طیف قدرت یک تناوب پیوسته مثل سرعت‌های اندازه‌گیری شده توسط ADV، می‌توان بیشینه‌ی قدرت بیشینه‌ی که در کمترین بسامد رخ می‌دهد، را به دست آورد و طیف مذکور را به صورت نمودار زمان-قدرت نمایش داد. با مقایسه‌ی قدرت داده‌های سرعت می‌توان نتیجه گرفت که کدامین سرعت (در جهت طول، عرض و ارتفاع)، بیشترین مشارکت را در اعمال قدرت بیشتر به رسوب‌ها در نقطه‌ی بیشینه‌ی آبشستگی دارد. در شکل ۶، تابع طیف قدرت در یک تابع بسامد نشان داده شده است.



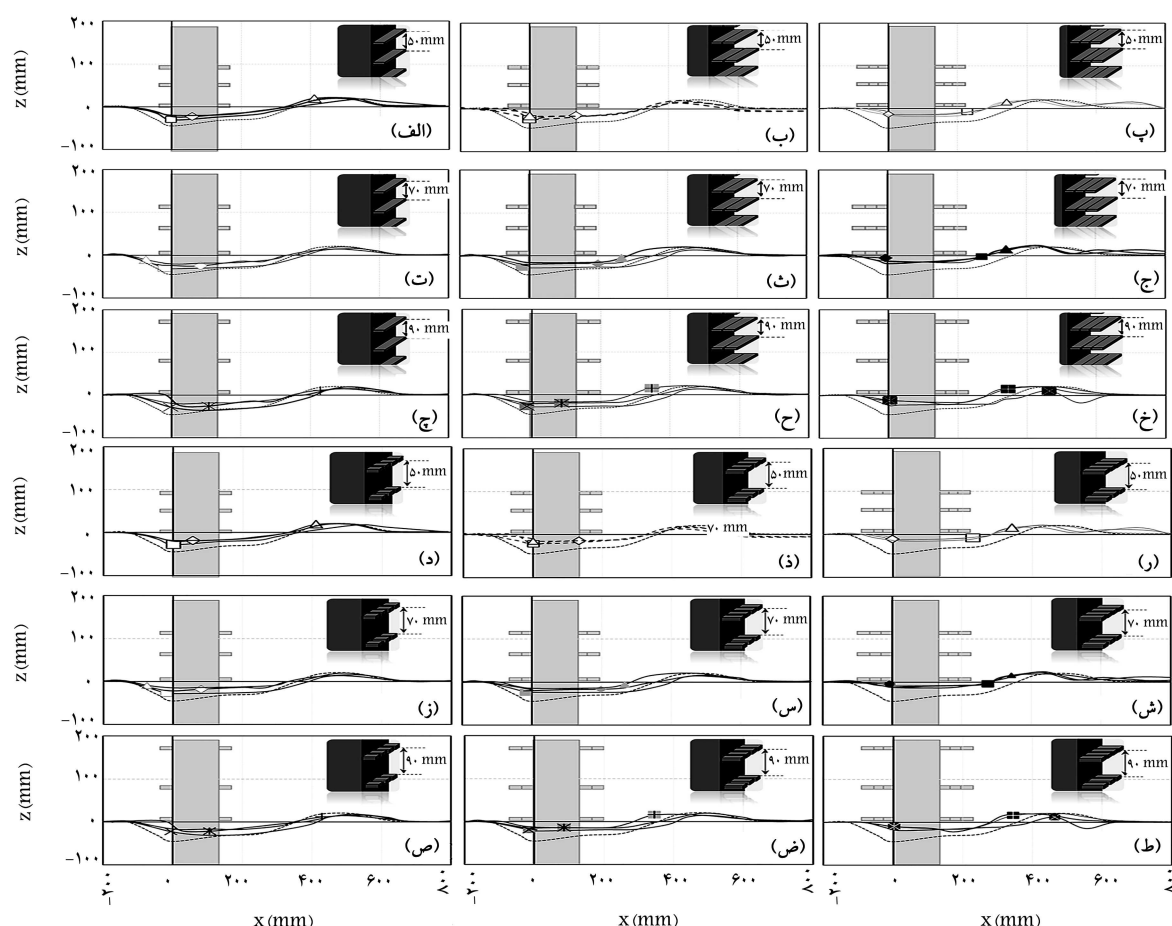
شکل ۵. دانه‌بندی خاک استفاده شده.

طیف قدرت یک سیگنال را می‌توان به صورت یکباره و برای تمام سیگنال محاسبه کرد که در این صورت به آن «دوره‌نگار»^۸ می‌گویند. همچنین می‌توان از دوره‌نگار بخش‌های مختلف سیگنال زمانی با یکدیگر میانگین گرفت و به این ترتیب چگالی طیف قدرت را به دست آورد. داده‌های سرعت در طول زمان به عنوان یک سیگنال متناوب در نظر گرفته می‌شوند و به ازاء زمان‌هایی، به بیشینه‌ی خود می‌رسند؛ به این دلیل که داده‌های سرعت جریان در طول زمان یک متغیر آنتروپی^۹ هستند و در بازه‌های مختلف به مقدار بیشینه‌ی تصادفی خود نزدیک می‌شوند. همچنین نقطه‌ی اوج سیگنال‌های «شبه‌ریودیک»^{۱۰} در ترکیب‌های خطی از دو یا چند بسامد وابسته قرار دارد. «دینامیک‌های آشوبناک»^{۱۱} مؤلفه‌های باند گسترده‌ی به طیف می‌دهند. در حقیقت، این ویژگی بعداً به عنوان یک معیار برای شناسایی یک دینامیک به عنوان آشوب استفاده می‌شود. تمام موارد اشاره شده، براساس طیف قدرت سیگنال بیان می‌شوند. یک طیف قدرت، زمانی ایده‌آل در نظر گرفته می‌شود که دنباله‌ی بی‌نهایت از داده‌های پیوسته درباره‌ی سیگنال در دست باشند. در حالی که عملاً همواره برای بسامد نمونه‌برداری و نیز طول داده‌ها، محدودیت وجود دارد؛ و به عبارت دیگر، داده‌های با طول محدود در اختیار ما قرار دارد. در نتیجه بسیار مهم است که مشخص شود موارد اخیر چگونه در طیف قدرت یک سیگنال اثر خواهند گذاشت.

۱.۵.۳. طیف قدرت سیگنال گسسته در زمان

اگر یک دنباله‌ی زمانی پیوسته $Y(t)$ با طول نامحدود، مانند داده‌های سرعت برداشت شده توسط ADV، در اختیار باشد، آن‌گاه طیف قدرت این سیگنال یا $P(w)$ با استفاده از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$P(w) \propto \left| \bar{y}(w) \right|^2 \quad (3)$$



□- G=۵۰ mm, yn=۱۸۰ mm, Rx=۱۷ mm	◇- G=۵۰ mm, yn=۲۰۰ mm, Rx=۱۷ mm	△- G=۵۰ mm, yn=۲۱۰ mm, Rx=۱۷ mm
□- G=۵۰ mm, yn=۱۸۰ mm, Rx=۳۵ mm	◇- G=۵۰ mm, yn=۲۰۰ mm, Rx=۳۵ mm	□- G=۵۰ mm, yn=۱۸۰ mm, Rx=۵۲ mm
◇- G=۵۰ mm, yn=۲۰۰ mm, Rx=۵۲ mm	△- G=۵۰ mm, yn=۲۱۰ mm, Rx=۵۲ mm	□- G=۷۰ mm, yn=۱۸۰ mm, Rx=۱۷ mm
◇- G=۷۰ mm, yn=۲۰۰ mm, Rx=۱۷ mm	△- G=۷۰ mm, yn=۲۱۰ mm, Rx=۱۷ mm	■- G=۷۰ mm, yn=۱۸۰ mm, Rx=۳۵ mm
◆- G=۷۰ mm, yn=۲۰۰ mm, Rx=۳۵ mm	▲- G=۷۰ mm, yn=۲۱۰ mm, Rx=۳۵ mm	■- G=۷۰ mm, yn=۱۸۰ mm, Rx=۵۲ mm
◆- G=۷۰ mm, yn=۲۰۰ mm, Rx=۵۲ mm	▲- G=۷۰ mm, yn=۲۱۰ mm, Rx=۵۲ mm	×- G=۹۰ mm, yn=۱۸۰ mm, Rx=۱۷ mm
✱- G=۹۰ mm, yn=۲۰۰ mm, Rx=۱۷ mm	✱- G=۹۰ mm, yn=۲۱۰ mm, Rx=۱۷ mm	✱- G=۹۰ mm, yn=۱۸۰ mm, Rx=۳۵ mm
✱- G=۹۰ mm, yn=۲۰۰ mm, Rx=۳۵ mm	✱- G=۹۰ mm, yn=۲۱۰ mm, Rx=۳۵ mm	✱- G=۹۰ mm, yn=۱۸۰ mm, Rx=۵۲ mm
✱- G=۹۰ mm, yn=۲۰۰ mm, Rx=۵۲ mm	✱- G=۹۰ mm, yn=۲۱۰ mm, Rx=۵۲ mm G=NA, Rx=N/A

شکل ۷. نیمرخ گودال آبشستگی برای زبری مستطیلی پیوسته و ناپیوسته.

۴. نتایج و بحث

۱.۴. نتایج گودال آبشستگی مدل زبری مستطیلی با المان‌های

زبری پیوسته و ناپیوسته

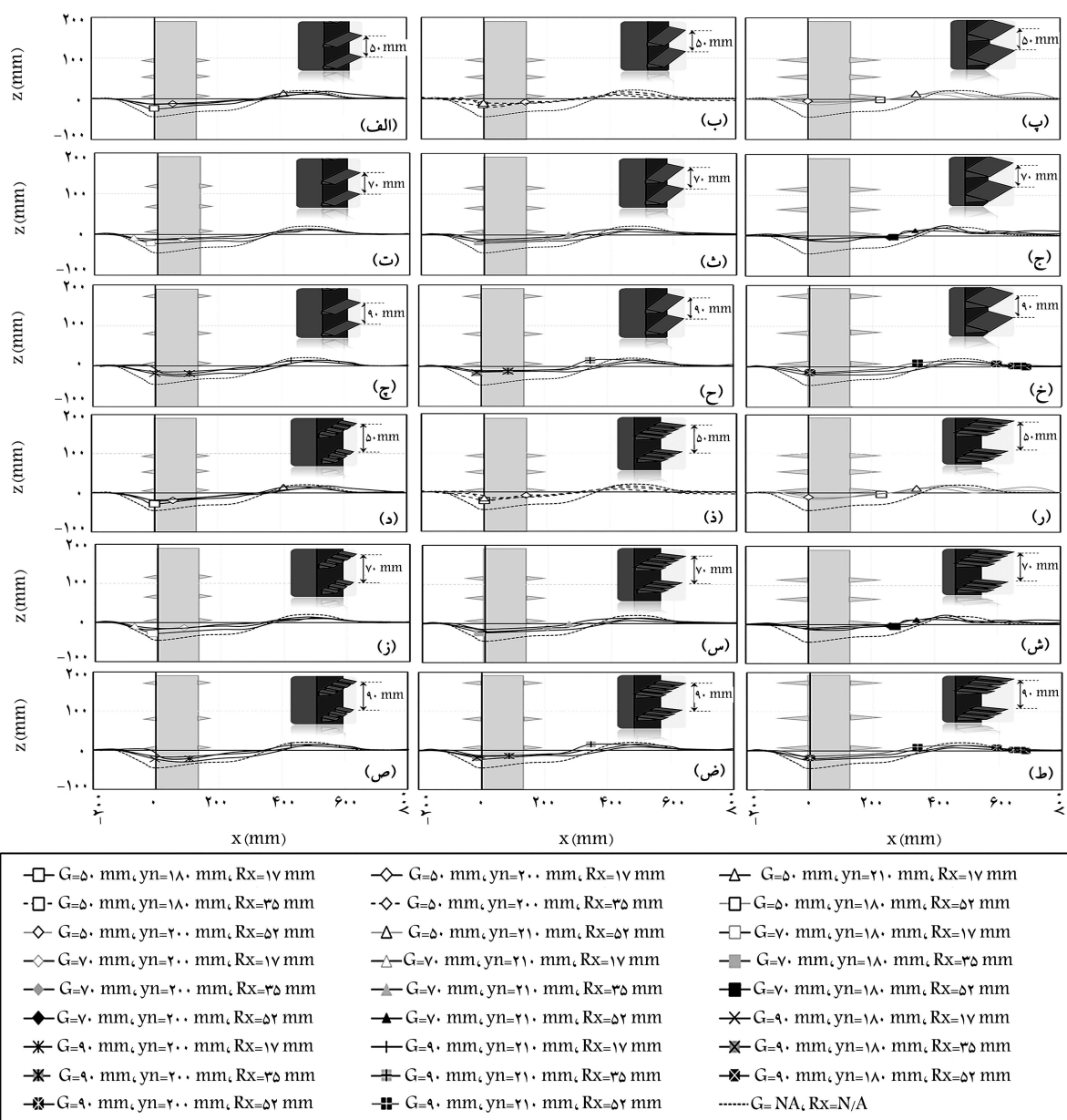
در شکل ۷ (a-i)، نیمرخ آبشستگی در مدل زبری مستطیلی با زبری پیوسته مشاهده می‌شود که مطابق آن، آزمایش‌ها در دو حالت، به ازاء افزایش طول زبری و همچنین فاصله‌ی بین زبری‌ها بررسی شده‌اند. به ازاء دبی عمق آب ۱۸۰، ۲۰۰ و ۲۱۰ میلی‌متر، پروفیل آبشستگی رسوب‌ها ترسیم شده است. نتایج نشان می‌دهند که با اعمال زبری مستطیلی، میزان آبشستگی به میزان قابل محسوسی (به‌طور متوسط ۴۸٪) نسبت به مدل شاهد کاهش پیدا کرده است. کاهش مقدار آبشستگی در دامنه‌ی بالادست پایه‌ی پل، با افزایش طول زبری در بالادست و

۶.۳. شدت آشفتگی

با استفاده از رابطه‌ی ۷، (رابطه‌ی ویلکاکس) [۱۳، ۱۴] مقادیر آشفتگی برای پایه‌ی پل مربعی شکل به ازاء صفحه‌ی طولی از بالادست پایه‌ی پل به سمت پایین‌دست محاسبه و نتایج آن، تجزیه و تحلیل شده است.

$$TKE = \frac{(v_x'^2 + v_y'^2 + v_z'^2)^{1/2}}{3v_{ave}} \quad (7)$$

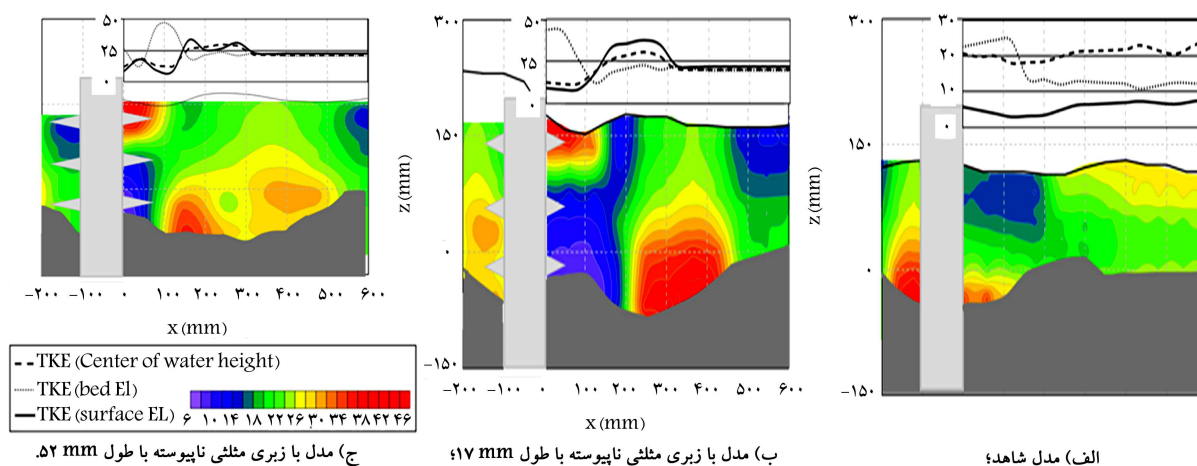
که در آن، مقادیر v_x' ، v_y' ، v_z' و به ترتیب نوسان‌های سرعت در جهت‌های منحنی مختصات v_{ave} سرعت متوسط طولی جریان در بالادست پایه‌ی پل در مقطعی است که محاسبه شده است. [۱۵]



شکل ۸. نیمرخ گودال آبهستگی برای زبری مستطیلی پیوسته و ناپیوسته.

در شکل ۸، تغییر المان‌های زبری از مقطع مستطیلی به مقطع مثلثی مشاهده می‌شود. این امر با هدف بررسی تأثیر شکل زبری صورت پذیرفته است. زبری‌های مثلثی نصب شده در وجه بالادست و پایین دست پایه‌ی پل مربعی در حالت پیوستگی (شکل ۸) آزمایش شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که زبری مثلثی همانند زبری مستطیلی پیوسته و ناپیوسته، تأثیری مستقیم در کاهش عمق بیشینه‌ی آب‌شستگی می‌گذارد. در شکل ۸، مقایسه‌ی بین شرایط نصب زبری مثلثی به ازاء فاصله‌ی قائم بر روی وجه پایه‌ی پل نشان می‌دهد که زبری مثلثی به مراتب تأثیر بیشتری در کاهش عمق بیشینه‌ی آب‌شستگی دارد. پیش‌بینی می‌شود وجه مثلثی بالادست و پایین دست زبری، همسویی بیشتری با جریان در اطراف پایه‌ی پل داشته باشد. از این رو هدایت جریان‌های نعل اسبی به پایین دست، بهتر صورت پذیرفته و در نهایت جریان پایین دست با روند کمتری در جلوی پایه‌ی پل تشکیل شده است. همچنین برای بررسی تأثیر فاصله بین زبری‌های نصب شده بر روی وجه بالادست و پایین دست

پایین دست ادامه پیدا کرده و به ازاء افزایش بیشینه‌ی زبری، میزان آب‌شستگی به صورت متوسط ۶۸٪ نسبت به حالت شاهد کاهش یافته و همچنین با فاصله گرفتن زبری‌های ایجاد شده، تأثیر مستقیمی در حدود ۱۷ و ۲۳ درصد به ازاء کمینه و بیشینه در کاهش طول آب‌شستگی داشته است. همچنین مقایسه‌ها نشان می‌دهند که با افزایش طول زبری‌ها، به مراتب تأثیر بیشتری در کاهش میزان آب‌شستگی نسبت به افزایش فاصله بین زبری‌ها (افزایش G) مشاهده می‌شود. عامل اخیر نشان می‌دهد که افزایش طول زبری به مراتب تأثیر بیشتری در جریان پایین رونده (عامل اصلی آب‌شستگی پیشانی) بالادست می‌گذارد که به خودی خود باعث کاهش آب‌شستگی می‌شود. همچنین افزایش طول زبری در مدل زبری مستطیلی پیوسته تا ۵۸٪ باعث کاهش آب‌شستگی شده است. در حالی که کاهش اخیر به ازاء افزایش فاصله بین زبری‌ها به مراتب کمتر بوده و در حدود ۱۸٪ تخمین زده شده است.



شکل ۹. خطوط تراز شدت آشفتگی در مقطع طولی در مدل پایه‌ی پل با زبری مثلثی ناپیوسته.

است، مقایسه شدت آشفتگی در سه عمق آب ۱۸ سانتی‌متر در شکل ۹ مشاهده می‌شود.

پایه پل، افزایش طول زبری نسبت به افزایش فاصله‌ی ردیف‌های زبری نصب شده، به مراتب تأثیری بیشتری در کاهش عمق آبستگي داشته است.

۳.۴. تابع طیف قدرت

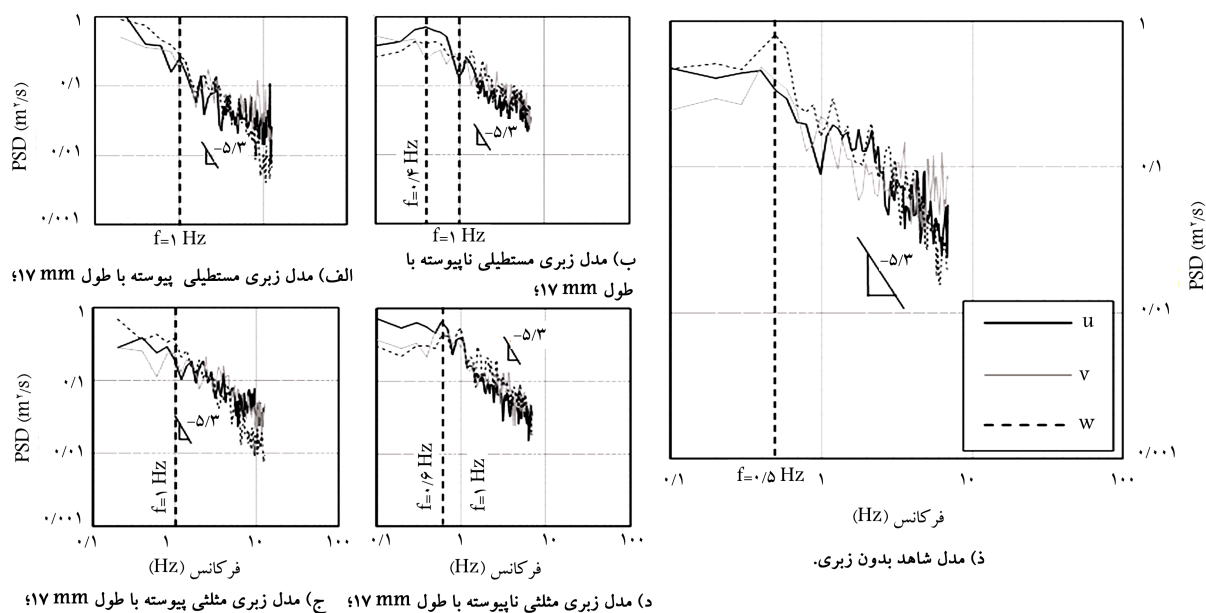
همان‌طور که مشخص است، دستگاه سرعت‌سنج صوتی، تابع زمانی سرعت در جهات مختلف را در مکان مشخصی اندازه‌گیری می‌کند که با استفاده از آن می‌توان تعداد تکرار یک مقدار سرعت را محاسبه کرد. با توجه به نظر هنز^{۱۲} (۱۹۷۵)، به ازاء تبدیل دوره‌ی زمانی سرعت در جهات مختلف، در بازه‌ی مشخص شیب نمودار طیف قدرت به مقدار $5/3$ - رسیده است. لازم به ذکر است بیشترین مقدار شدت آشفتگی در زمان بیشترین مقدار طیف قدرت (سرعت در واحد طول) رخ خواهد داد.^[۱۵] به این ترتیب بررسی داده‌های سرعت در نقطه‌ی جلوی پیشانی پایه پل (محل بیشینه‌ی عمق آبستگي در مدل شاهد) با استفاده از تابع طیف قدرت می‌تواند نشان‌دهنده‌ی این مطلب باشد که کدامیک از سرعت‌ها (در جهات‌های منحنی مختصات) بیشترین مشارکت را در به‌وجود آوردن بیشترین تلاطم دارند. با توجه به شکل ۱۰ می‌توان بیان کرد که در حالت پایه‌ی پل بدون زبری، بیشترین مشارکت در افزایش میزان شدت آشفتگی را سرعت در جهت قائم در جلوی پایه پل ایفا می‌کند که در قالب گردابه‌های پایین‌رونده نمایان می‌شوند. این مطلب با پدیدار شدن سرعت در جهت قائم در بیشترین مقدار در شکل ۱۰ (e) نمایان است. همچنین در شکل‌های با زبری پیوسته، بیشترین مقادیر مشارکت با تکرار زیاد، سهم سرعت در جهت قائم است (شکل ۱۰ (a و c)). در حالی که با ناپیوسته کردن زبری در وجه بالادست و پایین‌دست، مشارکت بیشینه‌ی مذکور به سرعت در جهت طولی داده می‌شود. با توجه بدین موارد قدرت می‌توان بیان کرد که ناپیوسته کردن زبری، باعث تغییر در ساختار گردابه‌های پایین‌رونده به سمت جلو می‌شود؛ که در نهایت، باعث تغییر مشارکت سرعت‌ها در بیشینه‌ی مقدار آشفتگی می‌شود. لذا با تغییر مشارکت سرعت قائم به افقی، عملاً آشفتگی به‌وجود آمده در پایه پل بدون زبری به سمت پایین‌دست گودال آبستگي حرکت خواهد کرد (شکل ۱۰).

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با استفاده از مدل آبستگي پایه پل با مقطع مربعی‌شکل،

۲.۴. برآورد میزان شدت آشفتگی

مقایسه‌های نتایج نیمرخ طولی رسوب‌ها در مدل‌های مختلف زبری پایه پل در پژوهش حاضر نشان داده است که به ازاء افزایش طول و همچنین ناپیوسته کردن زبری انتخاب شده (مثلثی و مستطیلی)، کاهش محسوسی در مقدار گودال آبستگي رخ داده است. همچنین، تغییر سطح مقطع زبری از مستطیلی به مثلثی نشان داد که مقدار عمق آبستگي در حدود متوسط ۳۱٪ در مقابل مدل متناظر از نظر طول و پیوستگی کاهش پیدا کرده است. با در نظر گرفتن حجم کمتر برای زبری مثلثی و همچنین تأثیر بهتر در کاهش عمق آبستگي، پیش‌بینی می‌شود که زبری مثلثی در زمان ساخت نسبت به زبری مستطیلی اولویت داشته باشد. از این رو با هدف بررسی دینامیک جریان، مقدار متوسط شدت آشفتگی مطابق روابط ۶ محاسبه شده است (شکل ۹). همچنین استفاده از داده‌های فیلتر شده‌ی ADV، در مقطع طولی در مکان عمق بیشینه رسم شده است. شکل‌های ۹ (a، b و c) به ترتیب مربوط به مدل شاهد، مدل زبری مثلثی ناپیوسته (بهترین زبری برای کاهش عمق آبستگي) با طول‌های ۱۷ و ۵۲ میلی‌متر هستند. مطابق شکل ۹، در پایه پل بدون زبری در بالادست پایه پل به دلیل وجود جریان‌های پایین‌رونده، میزان قابل توجهی در حدود متوسط ۴۸٪ نسبت به مدل شاهد، مقدار شدت آشفتگی افزایش پیدا کرده است. در حالی که این مقدار در سطح بالاتر عمق نسبت به کف کانال کمتر بوده و در مدل با زبری به صورت متوسط، ۳۸٪ میزان شدت آشفتگی افزایش پیدا کرده است. همچنین، شدت آشفتگی در شکل‌های ۹ (b و c)، بیشتر در دامنه‌ی پایین‌دست پایه پل رخ داده است. این مقدار بیشینه با افزایش طول زبری از ۱۷ میلی‌متر به ۵۲ میلی‌متر، به صورت متوسط ۵٪ افزایش پیدا کرده است. این امر نشان می‌دهد، با افزایش طول زبری، میزان بیشینه‌ی آبستگي به سمت پایین‌دست تغییر وضعیت می‌دهد. این تغییر موقعیت بیشینه‌ی شدت آشفتگی به صورت متوسط مساوی با ۴ برابر طول مقطع پایه پل مربعی‌شکل است. باید توجه داشت، اگر چه مقدار بیشینه‌ی شدت آشفتگی به مراتب بیشتر از مقدار شدت آشفتگی مدل شاهد است، اما به دلیل تشکیل شدن در پایین‌دست به مراتب در پایداری فونداسیون پایه پل تأثیر کمی خواهد گذاشت. شایان ذکر



شکل ۱۰. تابع طیف قدرت برای سری زمانی سرعت در آزمایش‌های پایه‌ی پل با عمق آب برابر با ۱۸ سانتی‌متر.

آبشستگی دارد. بیشینه‌ی مقدار آبشستگی با افزایش فاصله بین زبری‌ها در مدل‌های پیوسته و ناپیوسته باعث کاهش میزان آبشستگی می‌شود. پیش‌بینی می‌شود این امر به دلیل تأثیر فاصله‌ی مذکور در جت پایین‌رونده در پیشانی پایه‌ی پل است که به عنوان پیشنهاد می‌تواند در مطالعات آتی بررسی شود. برای بررسی پدیده‌ی اخیر می‌توان از آنالیز طیف قدرت جریان‌های گردابه‌یی استفاده کرد که لازمه‌ی استفاده از آن، دسترسی به داده‌های سرعت‌سنجی در سه جهت است.

۴. مقایسه بین مدل‌های پیوسته و ناپیوسته بیانگر این مطلب است که با ایجاد قطاع فضای خالی در زبری‌های پیوسته، تأثیر زبری در کاهش میزان آبشستگی بیشینه کاهش پیدا می‌کند. این امر به موجب برخورد جت‌های پایین‌رونده در بین زبری‌های ناپیوسته به وجود خواهد آمد.

۵. زبری‌های دوزنقه‌یی و دیگر شکل‌های هندسی می‌توانند به عنوان پیشنهاد برای مطالعات آتی با این طرح آزمایشگاهی به پژوهشگران مطرح شود. از این رو نویسندگان نوشتار حاضر، کلیه‌ی داده‌های پروفیل آبشستگی در متن را جانمایی کرده‌اند، تا شرایط برای پیگیری مطالعات آینده با این رویکرد فراهم شود.

تأثیر زبری بیرون‌زدگی در دو حالت پیوسته و ناپیوسته (دو نوع زبری با سطح مقطع مستطیلی و مثلثی)، ارزیابی شده و این نتایج به‌دست آمده است:

۱. نصب زبری با مقطع مثلثی بر زبری با مقطع مستطیلی ارجحیت دارد. این امر نشان می‌دهد زاویه‌دار کردن زبری، تأثیر مستقیمی در میزان آبشستگی دارد و باعث کاهش آبشستگی می‌شود. همچنین ناپیوسته کردن زبری، تأثیر مستقیمی در کاهش چاله‌ی آبشستگی در جلوی پایه‌ی پل دارد. پیش‌بینی می‌شود فاصله‌دار کردن زبری‌های نصب شده، باعث برخورد جریان‌های پایین‌رونده در جلوی پایه‌ی پل می‌شود که این امر سبب افزایش افت انرژی و درنهایت، کاهش آبشستگی می‌شود.

۲. نتایج حاصل از مقایسه‌ی مدل آبشستگی مدل زبری مستطیلی پیوسته نشان داد که با افزایش طول زبری، میزان آبشستگی تا مقدار بیشینه‌ی ۵۸٪ کاهش پیدا می‌کند. همچنین روند اخیر برای دیگر مدل‌های زبری ارائه شده در پژوهش حاضر صادق است.

۳. افزایش فاصله بین زبری‌های مدل آبشستگی، تأثیر مستقیمی در میزان بیشینه‌ی

پانویس‌ها

1. Raudkivi & Sutherland
2. Riprap
3. Geo-bag
4. cable tied blocks
5. Chiew & Melville
6. Point gage

7. (ADV, Vectrino, NortekAS, Norway)
8. period
9. entropy
10. quasiperiodic
11. chaotic dynamics
12. Hinze

منابع (References)

1. Raudkivi, A.J. and Sutherland, A.J. "Scour at bridge crossings", Report No. 51, Road Research Unit, National Roads Board, Wellington, New Zealand (1981).
2. Melville, B.W. "Pier and abutment scour: integrated approach", *J. Hyd. Eng., ASCE*, **123**(2), pp. 125-136 (1997).
3. Nordila, A.; Thamer, M.; Melville, B.W. and et al. "Modelling the effect of sediment coarseness on local scour at wide bridge piers", *Pertanika journal of social and humanities*, **25**(1), pp. 191-200 (2017).
4. Chiew, Y.M. and Melville, B.W. "Local scour around bridge piers", *J. Hydraul. Res. Jahr*, **25**(1), pp. 15-26 (1987).
5. Saadati Pachekenari, S.S., Esmacili Varaki M. and Fazl Ola, R. "Experimental investigation of effect of sill location on local scour around inclined bridge piers group", *Journal of Water and Soil*, **28**(2), pp. 406-419 (in Persian) (2014).
6. Kirkbride, A. "Observations of the influence of bed roughness on turbulence structure in depth limited flows over gravel beds", in: *Turbulence: Perspectives on flow and sediment transport*, Eds. N.J., Clifford; J.R., French and J., Hardisty, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, U.K., pp. 185-196 (1993).
7. Memar, S., Zounemat-Kermani, M., Beheshti, A. and et al. "Influence of collars on reduction in scour depth at two piers in a tandem configuration", *Acta Geophysica*, **68**(1), pp. 229-242 (2020).
8. Heidarpour, M., Afzalimehr H. and Khodarahmi Z. "Local scour protection of circular bridge pier groups using slot", *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, **14**(3), pp. 174-185 (in Persian) (2007).
9. Ataie-Ashtiani, B. and Beheshti, A.A. "Experimental investigation of clear-water local scour at pile groups", *Journal of Hydraulic Engineering*, **132**(10), pp. 1100-1104 (2006).
10. Rahiminia, A., Heidarpour, M. and Shahsavari, H. "Investigating the effect of roughness protrusions in reducing the surrounding scour depth", *Journal of Water and Soil Conservation*, **23**(5), pp. 325-332 (in Persian) (2016).
11. Kazemizadeh, H., Sanie, S. and Haji Kandi, H. "Impact of roughness created on the upstream and downstream side of the bridge pier", *JWSS (J. of Water and Soil Science)*, **25**(2), pp. 135-150 (in Persian) (2020).
12. Salehi, S., Mostaani, A. and Azimi, A.H. "Experimental and numerical investigations of flow over and under weir-culverts with a downstream ramp", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **147**(7), pp.1-17, 04021029
13. Salehi, S., Esmaili, K. and Azimi, A.H. "Mean velocity and turbulent characteristics of flow over half-cycle cosine sharp-crested weirs", *Flow Measurement and Instrumentation*, **66**, pp. 99-110 (2019).
14. Salehi, S. and Azimi, A.H. "Discharge characteristics of weir-orifice and weir-gate structures", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **145**(11), pp.99-110 04019025 (2019).
15. Hinze, J.O., *Turbulence*, Mc Graw-Hill, New York, p. 790 (1975).