

# بررسی اثر طول پایه پل مستطیل شکل بر طول پروفیل فراآب

محمد هوشمندزاده ، احمد فتحی ، حسن کیامنش

کارشناس عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز و عضو باشگاه پژوهشگران جوان

مدرس گروه عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز

دکتری عمران - هیدرولیک ، سازمان آب و برق خوزستان

hooshmandzadeh\_civil@yahoo.com

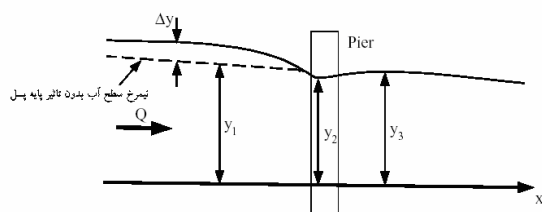
## چکیده

پایه پل یکی از موانعی است که پس از احداث معمولاً باعث کاهش عرض طبیعی جریان گشته و مانعی در برابر جریان بوجود می آورد. برای اینکه عبور جریان از میان پایه های پل با حداقل انرژی مخصوص ممکن گردد، عمق آب در بالادست پایه پل افزایش می یابد. این افزایش عمق را فراآب می نامند. در این مقاله تلاش می شود تا پس از ارائه مبانی مطالعات هیدرولیک پایه پل ، تاثیر طول پایه پل مستطیلی شکل بر پروفیل طولی فراآب بصورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گیرد.

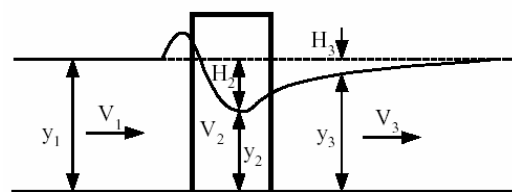
**کلید واژه ها :** کانال ، رودخانه ، هیدرولیک پل ، فلوم ، پایه پل ، دبی ، عدد فرود ، طول پایه ، ضریب تنگ شدگی ، فراآب

## ۱- مقدمه

یکی از موانعی که در مسیر جریان آب در کانال ها و رودخانه ها قرار می گیرد و باعث انقباض و انبساط بعدی جریان و بطور کلی تغییراتی در حرکت آب می گردد عبارت است از پایه های پل [۱]. احداث سازه پل و نوسازی و بازسازی پل های موجود نیازمند مکان یابی و تعیین موقعیت پایه های پل در کانال یا آبراهه های قدیمی دارد [۲]. وجود پایه های پل در مسیر حرکت آب در کانال و یا رودخانه باعث تنگ شدگی در مقطع جریان می شود. این تنگ شدگی سبب افزایش ارتفاع در تراز سطح آب در بالادست محل سازه پل خواهد شد. در ساختن پل ها برای صرفه جویی و امکان طرح ساختمان پل سعی می شود که همواره طول پل از عرض طبیعی رودخانه کمتر باشد یا به عبارت دیگر سطح مقطع جریان را در محل ساختمان پل کم می نمایند. این امر موجب می شود که یک سطح انقباض جریان در محل ساختمان پل پدید آید و جریان یکنواخت رودخانه را در محل پایه های پل به جریان متغیر سریع تبدیل نماید. در بالادست پل جریان متغیر تدریجی است. فشردگی جریان در محل ساختمان پل باعث افت انرژی در سیستم جریان آب می گردد که نتیجه آن افزایش عمق آب در بالادست پل می باشد. پروفیل سطح آب پیش از رسیدن به پل یک فراآب است. گاهی اوقات افزایش سطح ایستابی در بالادست پل موجب غرقاب شدن زمینهای اطراف رودخانه در خارج از شهرها ، و سرازیر شدن آب به مناطق مسکونی ، مراکز تجاری و خیابانهای داخل شهرها می شود. تصاویر ۱ و ۲ مقطع طولی جریان هنگام عبور از بین پایه های پل را نشان می دهد. در شکل مشخص است که پروفیل برگشت آب ، تا فاصله ای در بالادست پل ادامه پیدا می کند در این نقطه ، پل اثری بر روی جریان نداشته و لذا جریان یکنواخت در این نقطه و بالادست آن وجود دارد. فاصله بین این مقطع تا سازه پل به پارامترهایی چون هندسه کانال ، زبری شیب کانال بستگی دارد. در فاصله بین این مقطع و پل ، سطح آب بالا می آید و از عمق نرمال بیشتر می شود جریان در بالادست و پایین دست پایه ، متغیر تدریجی و در محل پل ، متغیر سریع است.



تصویر (۲) - پروفیل جریان قبل از رسیدن به پایه پل



تصویر (۱) - پروفیل جریان پس از عبور از پایه پل

## ۲- مطالعه هیدرولیکی پل

منظور از مطالعه هیدرولیکی پل تعیین تغییراتی است که در نتیجه ایجاد ساختمان پل بر روی رودخانه بوجود می آید. از جمله ارتفاع و طول پروفیل فراآب است.

### ۳- انواع جریان در محاسبات مربوطه به هیدرولیک پل

در مسائل مربوط به هیدرولیک پل، جریانها را به سه دسته طبقه بندی می کنند:

۱-۳- جریان نوع اول (Type I)

در این جریانها، در تمام مسیر جریان، از سطح مقطع ۱ تا ۴،  $y_n > y_c$  است. لذا در اینچنین رودخانه هایی جریان زیر بحرانی (subcritical) است. این حالت در بسیاری از موارد اتفاق می افتد.

۲-۳- جریان نوع دوم (Type II)

این جریانها به نوبه خود به دو حالت A و B تقسیم میشوند. در جریان نوع دوم (Type IIA)  $y_n > y_c$  است و پروفیل سطح آب در زیر و پاشنه پل از عمق بحرانی پایین تر می افتد. در جریان نوع دوم B (Type IIB)، قبل و بعد از پل  $y_n > y_c$  و در زیر پل  $y_n < y_c$  می باشد. پروفیل سطح جریان در زیر پل از عمق بحرانی پایین تر می افتد.

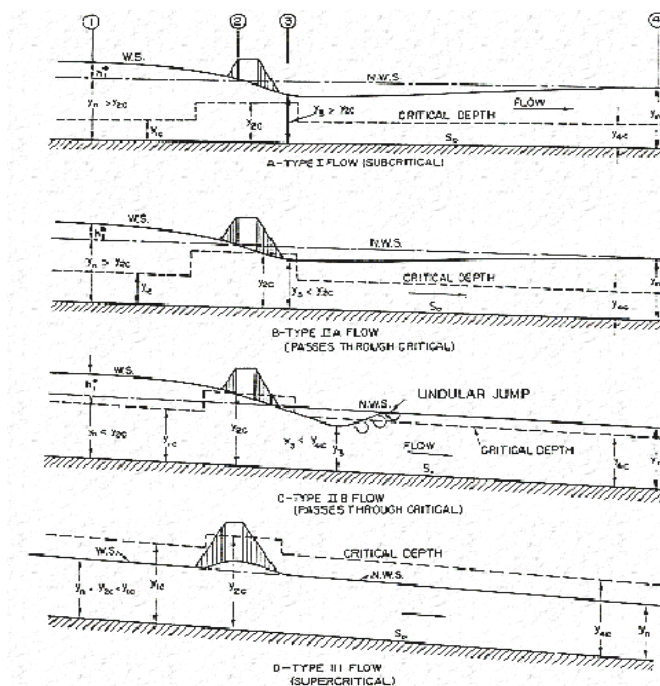
۳-۳- جریان نوع سوم (Type III)

در این جریانها، در تمام مسیر رودخانه  $y_n < y_c$  و لذا از جنبه نظری پروفیل تشکیل نمی شود.

۴-۳- نقاط عطف پروفیل های سطح آب

اگر فرمول شزی مورد استفاده قرار گیرد برای  $y = 0$  مقدار  $\frac{dy}{dx} = S_0 \left( \frac{y_n}{y_c} \right)^3$  بدست می آید و این فرمول نشان می دهد که منحنی سطح آب

یک زاویه مخصوص با کف کانال می سازد. به وضوح می توان دریافت که وقتی  $y < y_c$  باشد باید به دنبال نقطه عطفی در روی پروفیل سطح آب گشت. نقطه عطف در یک فاصله خیلی نزدیک به کف کانال اتفاق می افتد. به علاوه وقتی شرط  $y > y_c$  برقرار باشد، یک نقطه عطف دیگر نیز در پروفیل جریان وجود دارد [۴].



تصویر ۳- انواع جریان در محاسبات هیدرولیک پل

### ۴- مقاطع عرضی هیدرولیکی در محل سازه پل

۱-۴- مقطع عرضی ۱

در فاصله ای در پایین دست سازه طوری قرار گرفته است که جریان تحت تاثیر سازه نباشد (بطوریکه جریان منبسط شده باشد). بطور کلی این فاصله باید بر اساس مطالعات میدانی در طی جریانهای سیلابی تعیین شود. فاصله واگرایی جریان تابعی از درجه همگرایی، شکل همگرایی، مقدار دبی جریان و سرعت جریان خواهد بود.

۲-۴- مقطع عرضی ۲

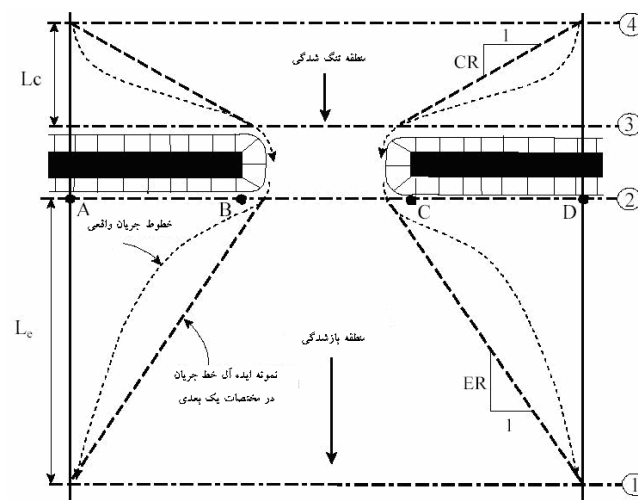
بلافاصله در پایین دست سازه پل ( در فاصله چند فوتی ) واقع است . این مقطع عرضی باید نمایش دهنده زمین طبیعی درست در خارج پل باشد . این مقطع عرضی در پنجه خاکریز پایین دست پل واقع می باشد.

#### ۳-۴- مقطع عرضی ۳

باید درست در بالادست سازه پل قرار بگیرد . فاصله بین مقطع عرضی ۳ و پل باید نسبتاً کوتاه باشد . این فاصله فقط باید طول مورد نیاز برای شتاب و همگرایی ناگهانی جریان را که در ناحیه مجاور بازشدگی پل رخ می دهد ، تامین کند . مقطع عرضی ۳ نمایش دهنده زمین طبیعی درست در بالادست پل باشد . این مقطع در پنجه خاکریز بالادست پل واقع می باشد . هر دو مقطع عرضی ۲ و ۳ دارای سطوح جریان غیر موثر در طرفین بازشدگی پل در طی جریان با دبی کم و تحت فشار می باشند .

#### ۴-۴- مقطع عرضی ۴

این مقطع در بالادست سازه پل واقع بوده و در آن خطوط جریان تقریباً موازی بوده و مقطع عرضی کاملاً موثر است . بطور کلی واگرایی های جریان در فاصله کوتاه تری از همگرایی های جریان رخ می دهند . معمولاً فاصله بین مقطع عرضی ۳ و ۴ (طول بازه تنگ شونده ،  $L_c$  ) باید بر اساس مطالعات میدانی در هنگام جریانهای سیلابی تعیین شود . فاصله همگرایی بسته به درجه واگرایی ، شکل واگرایی ، مقدار دبی جریان و سرعت جریان متغیر خواهد بود . انجمن مهندسين ارتش آمریکا توصیه کرده است که مقطع عرضی بالادست در فاصله ای معادل یک برابر طول متوسط تنگ شدگی کناری که توسط تکیه گاههای سازه ایجاد می شوند ، قرار داده شود .



تصویر ۴- مقاطع عرضی هیدرولیکی در محل سازه پل

#### ۵- بررسی وضعیت جریان عبوری مابین پایه های پل

مطابق تصاویر (۱ و ۲) :

۱- آب از حدود مقطع شروع به افزایش ارتفاع کرده و این مقطع طبق ادعای Matthai (۱۹۷۶) در فاصله دو برابر عرض باز در بالادست پایه ها ( $b_1$ ) می باشد.

۲- در محل تنگ شدگی ، سطح آب به سرعت شروع به افت می نماید.

۳- در داخل قسمت تنگ شده ، خطوط جریان از عرضی کمتر از عرض باز عبور نموده و در حد فاصل بین آخرین خطوط جریان و بدنه جامد پایه ها ، گرداب وجود خواهد داشت.

۴- در وسط پایه ها عرض جریان کمترین مقدار خود را دارد.

۵- در مقطع ۳ مجدداً جریان نرمال بوجود آمده و در حد فاصل میان مقاطع ۲ و ۳ (یا انتهای پرش) جریان متغیر تدریجی وجود دارد.

#### ۶- محاسبات هیدرولیک پل

۶-۱- محاسبات جریان با دبی کم

برای محاسبات جریان با دبی کم از معادله مومنوم برای مشخص کردن کلاس جریان استفاده می شود . این امر به محاسبه مومنوم در عمق بحرانی داخل پل در دو انتهای بالا دست و پایین دست آن صورت می پذیرد . انتهای دارای مومنوم بیشتر (و در نتیجه مقطع دارای همگرایی بیشتر) به عنوان مقطع کنترل کننده در پل در نظر گرفته خواهد شد . سپس مومنوم در عمق بحرانی در مقطع کنترل کننده با مومنوم جریان در پایین دست پل در هنگام محاسبه یک پروفیل زیر بحرانی ( مومنوم جریان در بالا دست پل برای یک پروفیل فوق بحرانی ) مقایسه میشود . اگر مومنوم پایین دست بیشتر از مومنوم در عمق بحرانی در داخل پل باشد در آن صورت کلاس جریان کاملاً زیر بحرانی در نظر گرفته خواهد شد (کلاس A جریان با دبی کم). اگر

مومنتموم پایین دست کمتر از مومنتموم در عمق بحرانی در پل باشد در آن صورت فرض می شود که همگرایی باعث خواهد شد که جریان از عمق بحرانی گذر کرده و یک پرش هیدرولیکی در فاصله ای در پایین دست رخ خواهد داد (کلاس B جریان با دبی کم). اگر پروفیل در طول پل کاملاً فوق بحرانی باشد در آن صورت این حالت برابر کلاس C جریان کم خواهد بود.

۲-۶- کلاس A جریان با دبی کم

کلاس A جریان با دبی کم هنگامی رخ می دهد که سطح آب در طول پل کاملاً زیر بحرانی (بالای عمق بحرانی) باشد. افت های انرژی ناشی از بازشدگی (مقطع ۱ تا ۲) بصورت افت های اصطکاکی و افت های بازشدگی محاسبه می شوند. افت های اصطکاکی بر مبنای حاصل ضرب وزنی شیب اصطکاکی در طول بازه بین مقاطع ۱ و ۲ تعیین می گردند. متوسط شیب اصطکاکی بر اساس یکی از چهار گزینه موجود در HEC-RAS با پیش فرض روش انتقال متوسط ، محاسبه می شود. طول متوسط مورد استفاده در محاسبات بر مبنای طول وزنی بازه - دبی جریان استوار می باشد. چهار روش برای محاسبه افتها در پل (از مقطع ۳ تا ۴) وجود دارد:

۱- معادله انرژی (روش گام استاندارد)

۲- تعادل مومنتموم

۳- معادله یارنل

۴- روش FHWA WSPRO

افت های انرژی در طول مقطع همگرایی (مقاطع ۳ تا ۴) بصورت افتهای اصطکاکی و افت های همگرایی محاسبه می شوند. افت های اصطکاکی و همگرایی بین مقاطع ۳ و ۴ همانند افتهای اصطکاکی و واگرایی بین مقاطع ۱ و ۲ محاسبه می گردند.

۳-۶- کلاس B جریان با دبی کم

کلاس B جریان با دبی کم برای پروفیل های زیر بحرانی و فوق بحرانی می تواند بوجود آید برای هر پروفیل ، کلاس B جریان در هنگامی که پروفیل از عمق بحرانی در همگرایی پل عبور می کند ، رخ می دهد . برای یک پروفیل زیر بحرانی از معادله مومنتموم برای محاسبه سطح آب بالادست در بالای عمق بحرانی و سطح آب پایین دست در زیر عمق بحرانی ، با استفاده از تعادل مومنتموم در طول پل ، استفاده می شود. برای یک پروفیل فوق بحرانی ، پل به عنوان یک کنترل عمل نموده و سبب می شود که تراز سطح آب بالادست بیشتر از عمق بحرانی گردد. مجدداً از معادله مومنتموم برای محاسبه سطح آب بالادست در بالای عمق بحرانی و سطح آب به پایین دست در زیر عمق بحرانی استفاده می گردد.

۴-۶- کلاس C جریان با دبی کم

کلاس C جریان با دبی کم در هنگامی که سطح آب در طول پل کاملاً فوق بحرانی می شود ، بوجود می آید. از معادله انرژی و یا معادله مومنتموم برای محاسبات سطح آب در طول پل استفاده می شود.

۵-۶- افت های همگرایی و واگرایی جریان

افت های ناشی از واگرایی و همگرایی جریان میان مقاطع عرضی در محاسبات پروفیل سطح آب با استفاده از روش گام استاندارد تعیین می شوند. این افتها برحسب حاصل ضرب یک ضریب در مقدار مطلق تغییرات بار سرعت میان مقاطع عرضی مجاور بیان می شوند. زمانی که بار سرعت در جهت پایین دست افزایش می یابد ، از ضریب همگرایی استفاده می شود و هنگامی که بار سرعت در جهت پایین دست کاهش می یابد ، ضریب بازشدگی مورد استفاده قرار می گیرد. همانگونه که در تصویر (۴) مشاهده می شود جریان در فاصله میان مقاطع ۳ و ۴ همگرا و در فاصله میان مقاطع ۱ و ۲ واگرا می شود. ضرایب همگرایی و واگرایی برای محاسبه افت انرژی جریان که به دلیل تغییر شکل مقطع رودخانه ، بواسطه وجود پایه پل ، محاسبه می شود. افت در جریان به دلیل واگرایی بیشتر از افت های ناشی از همگرایی می باشد. مقادیر ضرایب بازشدگی و تنگ شدگی در جریانهای زیر بحرانی در جدول (۱) بیان شده اند.

جدول ۱ - مقادیر ضرایب بازشدگی و تنگ شدگی

بازشدگی	تنگ شدگی	نوع تغییر جریان
۰	۰	فاقد افت ناشی از تغییر وضعیت جریان
۰/۳	۰/۱	تغییر وضعیت تدریجی
۰/۸	۰/۶	تغییر وضعیت ناگهانی

ماکزیمم مقدار ضرایب بازشدگی و تنگ شدگی برابر ۱/۰ می باشد. بطور کلی مقادیر ضرایب بازشدگی و تنگ شدگی برای جریانهای فوق بحرانی بایستی کمتر از مقادیر آنها برای در جریان زیر بحرانی باشد. از معادله رگرسیون زیر برای محاسبه ضریب بازشدگی استفاده می شود.

$$C_e = -0.09 + 0.570 \left( \frac{D_{ob}}{D_c} \right) + 0.075 \left( \frac{F_{c2}}{F_{c1}} \right) \quad (1)$$

در رابطه فوق  $D_{ob}$  عمق هیدرولیکی برای سیلابدشت ها در مقطع ۱ (بر حسب فوت) در حالت جریان کاملاً پر است.  $D_c$  عمق هیدرولیکی جریان در کانال اصلی برای حالت جریان کاملاً پر بر حسب فوت در مقطع یک است.

$$L_e = -298 + 257 \left( \frac{F_{c2}}{F_{c1}} \right) + 0.918 \left( L_{obs}^- \right) + 0.00479(Q) \quad (2)$$

در رابطه فوق  $L_e$  طول ناحیه بازشدگی بر حسب فوت،  $F_{c2}$  عدد فرود کانال اصلی در مقطع ۲،  $F_{c1}$  عدد فرود کانال اصلی در مقطع ۱،  $L_{obs}^-$  میانگین طول مانع بر حسب فوت، و  $Q$  دبی کل بر حسب  $cf/s$  است. معادله زیر برای محاسبه طول ناحیه تنگ شدگی بکار می رود.

$$L_e = 263 + 38.8 \left( \frac{F_{c2}}{F_{c1}} \right) + 257 \left( \frac{Q_{ob}}{Q} \right)^2 - 58.7 \left( \frac{n_{ob}}{n_c} \right)^{0.5} + 0.161(L_{obs}^-) \quad (3)$$

در رابطه فوق  $L_{obs}^-$  میانگین طول مانع،  $Q_{ob}$  دبی انتقال یافته بوسیله دو کانال فرعی (سیلابدشت) در مقطع ۴،  $n_{ob}$  ضریب مانینگ سیلابدشت ها در مقطع ۴ و  $n_c$  ضریب مانینگ کانال اصلی در مقطع ۴ است

## ۷- تشریح آزمایشات

### ۷-۱- مشخصات فلوم آزمایشگاهی

آزمایشات در فلومی به عرض ۶۰ سانتی متر و طول ۱۰ متر و ارتفاع ۶۰ سانتیمتر انجام گردید. فلوم مذکور دارای اسکلت و چارچوب فلزی بوده و بدنه های جانبی آن به خاطر سادگی در مشاهده از جنس شیشه می باشد. در فواصل یک متری از هم، نگهدارنده های قائمی برای حفظ پایداری بیشتر بدنه ها استفاده شده است. آب مورد نیاز جهت انجام آزمایش توسط یک پمپ که در مجاورت فلوم قرار داشت تامین می گردید. پمپ، آب را از مخازن واقع در زیر کف آزمایشگاه برداشت نموده و سپس به ورودی فلوم تخلیه می نمود. ورودی فلوم به شکل مکعب مستطیل ساخته شده بود. برای آرام نمودن جریان از ورقه های فلزی که در کف ورودی تعبیه شده بود، استفاده گردید. بیشترین دبی تامین شده توسط پمپ برابر ۵۱ لیتر بر ثانیه بود. فلوم مذکور از نوع مستقیم و شیب پذیر بوده و حداکثر شیب مثبت و منفی فلوم برابر ۳٪ است. نحوه تغییر شیب فلوم با کمک یک چرخ دنده که در فاصله ۱/۵ متری ابتدای فلوم قرار داشت، انجام می گرفت. کنترل شیب فلوم با استفاده از یک درجه قائم نصب شده در مجاورت چرخ دنده صورت می گرفت. با توجه به اینکه شیب کانال در مطالعه بررسی نخواهد شد، لذا آنرا تقریباً روی صفر درجه قرار می دهیم. جهت تغییر عمق آب در فلوم در یک دبی ثابت، از دریچه ای که در انتهای فلوم پیش بینی شده بود استفاده شد. جهت تغییر عمق آب در فلوم در یک دبی ثابت، از دریچه ای که در انتهای فلوم پیش بینی شده بود استفاده می شد.

### ۷-۲- مشخصات پایه های پل

در این مطالعه عرض پایه ها را کلاً ثابت در نظر گرفته و براساس این عرض ثابت، مقدار طولهای متفاوتی از پایه ها مورد آزمایش قرار گرفت. مقدار عرض پایه ها برابر ۹/۵ سانتیمتر انتخاب گشت و از آنجا که نسبت طول به عرض های ۱۰، ۴، ۶، ۸، ۱۰ در نظر گرفته شده بود، لذا چهار طول گیری ابعاد شیشه ها و برش، توسط چسب آکواریوم متصل گردیدند. یکی از پارامترهای موثر بر فرآب، تنگ شدگی مجرا است، پارامتر  $\sigma$  جهت

لحاظ کردن این پارامتر در نظر گرفته شد. پارامتر  $\sigma$  بصورت  $\sigma = 1 - \frac{b}{B}$  تعریف شده و ضریب تنگ شدگی نام دارد. چهار ضریب تنگ شدگی

۰/۸۴، ۰/۶۸، ۰/۵۳ و ۰/۳۷ در نظر گرفته شد.  $\sigma = 0.84$  مربوط به حالتی است که یک پایه پل در مسیر جریان قرار دارد. با افزایش پایه پل ها، ضریب تنگ شدگی کاهش می یابد و هنگامی که چهار پایه در مسیر جریان قرار داشت، ضریب تنگ شدگی برابر ۰/۳۷ گردید. با توجه به تعداد ضریب تنگ شدگی، از هر پایه چهار عدد ساخته شد و در نهایت ۱۶ عدد پایه پل شیشه ای برای انجام آزمایشات آماده گردید.

### ۷-۳- وسائل اندازه گیری

در این آزمایشات دو پارامتر دبی و عمق آب باید توسط دستگاه های مناسب اندازه گیری و قرائت شود. برای اندازه گیری دبی جریان از یک سرریز مستطیلی لبه تیز استفاده شد. برای اندازه گیری عمق آب از یک دستگاه عمق سنج دیجیتالی استفاده شد. دقت دستگاه مورد استفاده صدم میلی بود. عمق سنج بر روی یک شاسی فلزی نصب شده بود و شاسی بر روی ریلهای تعبیه شده در دو طرف فلوم قابل حرکت می باشد. با توجه به این موارد امکان حرکت عمق سنج در دو جهت فراهم شد و لذا در هر نقطه ای که مایل به اندازه گیری عمق آب بودیم، عمق سنج قرار می گرفت. حرکت عمودی میله عمق سنج توسط یک پیچ کنترل می شد. ابتدا میله قائم را آنقدر پایین می بردیم تا انتهای سوزن آن روی کف فلوم قرار می گرفت. در این حالت دستگاه را صفر می کردیم و لذا مبنای قرائت، عمق کف کانال می شد. سپس میله قائم را بالا آورده و نوک سوزن را در سطح آب قرار می دادیم. عدد قرائت شده توسط عمق سنج، عمق آب در نقطه مورد نظر را بدست می داد. لازم به ذکر است که اندازه گیری عمق آب در پشت پایه پل و در وسط فلوم آزمایشگاه صورت می گرفت. علاوه بر اندازه گیری فرآب، در چند مورد پروفیل طولی جریان بالادست نیز برداشت شد.

#### ۷-۴- مراحل انجام آزمایشات

پارامترهای موثر بر فرآب ، عدد فرود ، ضریب تنگ شدگی ، نسبت طول به عرض پایه و زاویه محور پایه پل با جهت جریان در نظر گرفته شدند. این پارامترها با توجه به مطالعات انجام شده در گذشته ، معادلات ارائه شده و نیز آنالیز ابعادی صورت گرفته ، انتخاب شدند. به دلیل اینکه علاوه بر بررسی اثر نسبت طول به عرض پایه بر فرآب ، در صدد بررسی نحوه ارتباط دیگر متغیرها با فرآب نیز بودیم ، سعی شد تا دامنه مناسبی از هر متغیر انتخاب شود تا بتوان در نهایت بر روی نتایج با دقت بیشتری تجزیه و تحلیل انجام داد. پس از بررسی های مورد نیاز در نهایت تعداد چهار نسبت طول به عرض ، چهار ضریب تنگ شدگی ، هشت عدد فرود و چهار زاویه محور پایه با جهت جریان در نظر گرفته شد. پس از مطالعات اولیه ، نوبت به انجام آزمایشات بود. از آنجا که تغییر همزمان متغیرهای فوق باعث سردرگمی و بروز خطا و اشتباه می شود ، لذا ابتدا دبی را ثابت نگه داشته و دیگر متغیرها را به ترتیب تغییر می دادیم و سپس با تغییر دبی مراحل برای متغیرهای گوناگون دوباره تکرار می شد. برای هر دبی ، قبل از اینکه پایه ها را در فلوم قرار دهیم ، عمق نرمال جریان را با استفاده از عمق سنج دیجیتالی قرائت می نمودیم . علاوه بر این میزان ارتفاع آب روی سرریز با استفاده از پیژومتر بدست آمده و سپس مقدار عددی دبی و سپس عدد فرود جریان بدست می آمد. پس از انجام این اعمال اولین پایه در وسط فلوم قرار می گرفت. پس از اینکه جریان به حالت ثابت می رسید و عمق آب در بالادست تغییری نمی کرد ، عمق را توسط عمق سنج در بالادست پل و در وسط عرض فلوم قرائت می نمودیم . سپس زاویه پایه را تغییر داده و دوباره پس از ثابت شدن عمق ، مقدار ارتفاع آب در بالادست پل را بدست می آوریم. این عملیات برای تمامی زوایای مورد نظر تکرار می شد . سپس یک پایه دیگر را در فلوم قرار می دادیم و آزمایشات مشابه حالت قبل تکرار می شد. پایه های دوم ، سوم و چهارم طوری قرار داده شدند که کلیه فواصل تشکیل شده در عرض فلوم با هم برابر بودند. در تمام حالات ، اندازه گیری در بالادست پایه و در وسط عرض فلوم انجام گرفت. پس از آنکه در دبی اول تمام انواع پایه ها در زوایای مختلف و ضریب تنگ شدگی های متفاوت مورد آزمایش قرار گرفت. آنگاه دبی را تغییر داده و دوباره آزمایشات مشابه حالات مشروحه تکرار می شد. نحوه تغییر دبی با استفاده از یک شیر حلزونی تعبیه شده در ابتدای فلوم بود ، لذا دقت کافی در دبی ورودی وجود نداشت و لذا برای اطمینان از عدم تغییرات دبی به علل مختلف از جمله نوسانات برق ، میزان ارتفاع روی سرریز توسط پیژومتر مرتب کنترل شده تا نتایج با دقت مناسبی بدست آید. از آنجا که در تحقیقات ، عدد فرود مد نظر بود ، لذا در هر مورد دبی ، عمق آب را طوری تغییر می دادیم تا در دامنه مناسبی برای عدد فرود بدست آید. نکته قابل توجه آن است که پس از قرار دادن هر پایه ، برای ثابت شدن تراز آب باید مدت زمانی صبر می شد و سپس عمق جدید قرائت می شد.

#### ۷-۵- محدوده متغیرهای مورد نظر

سعی شد تا دامنه مناسبی از متغیرهای مورد مطالعه در این تحقیق استفاده شود. با توجه به مطالعات انجام شده قبلی ، در نهایت متغیرها مطابق جدول ( ۱ ) در نظر گرفته شد. جدول ( ۲ ) محدوده مقادیر اندازه گیری شده در این مطالعه را نشان می دهد.

جدول ۱- مقادیر انتخاب شده برای متغیرها

۱۰،۸،۶،۴	$\frac{l}{b}$
۰،۳۷،۰،۵۳،۰،۶۸،۰،۸۴	$\sigma$
۰،۴۶۸،۰،۳۸۲،۰،۳۶۸،۰،۳۵۰،۰،۳۳۶،۰،۲۹۶،۰،۶۴۳،۰،۵۲۴	$Fr_0$
۲۰،۱۵،۱۰،۰	$\alpha$

جدول ۲- محدوده تغییرات مقادیر متغیرها

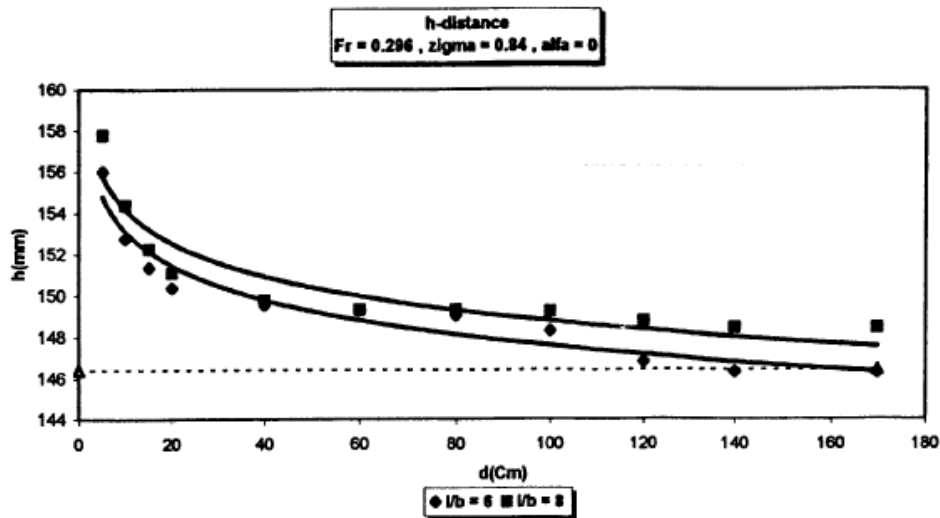
دبی	عدد فرود	عمق جریان	ضریب تنگ شدگی	فرآب	طول پایه
$\left( \frac{lit}{s} \right)$	$Fr_0$	$h_3 (mm)$	$\sigma$	$\Delta h (mm)$	$l (m)$
۳۱،۲-۵۱،۲	۰،۲۹۶-۰،۶۴۳	۱۴۶-۱۷۵	۰،۳۷-۰،۸۴	۱۲-۱۶۶	۰،۳۸-۰،۹۵

#### ۸- پروفیل طولی جریان

اعماق آب در فواصل ۰،۲۰،۰،۴۰، ۰،۸۰، ۰،۱۰۰، ۰،۱۲۰، ۰،۱۴۰، ۰،۱۷۰ سانتی متری از بالادست پایه و در وسط عرض فلوم اندازه گیری شدند. نمودار (۱) نمونه ای از پروفیل اندازه گیری شده را نشان می دهد. بیشترین عمق در بالادست پایه اتفاق می افتد و با دور شدن از پایه اعماق کاهش می یابند. همانطور که در شکل ( ۲ و ۱ ) مشاهده می شود ، پس از فاصله ای از بالادست پل ، عمق جریان به عمق نرمال می رسد . این فاصله به پارامترهای متعددی چون هندسه کانال ، زبری کانال ، خصوصیات جریان و شکل پایه بستگی دارد . تصویر ( ۳ ) برای  $Fr = 0.296$  ،  $\sigma = 0.84$  ،  $\alpha = 0$  و دو

نسبت طول به عرض ۸ برابر ترسیم شده است. مشخص است که مقدار فرآب برای  $\frac{l}{b} = 8$  بیشتر از  $\frac{l}{b} = 6$  می باشد، ولی روند کاهش در هر دو

تقریباً مشابه است. برای  $\frac{l}{b} = 8$  فاصله ای که طول می کشد تا عمق جریان به عمق نرمال برسد، بیشتر است. علاوه بر این جریان در بالادست پل حالت یکنواخت تری پیدا کرده و سطح آب نوسانات کمتری دارد. نکته قابل توجه دیگر آن است که در نزدیکی پایه، اختلاف اعماق برای  $\frac{l}{b} = 8$  و  $\frac{l}{b} = 6$  کمتر از میزان اختلاف در فواصل بالادست پل می باشد. لازم به ذکر است به دلیل اغتشاش زیاد جریان در پایین دست پایه ها، امکان اندازه گیری پروفیل طولی پایین دست وجود نداشت.



نمودار (۱) - پروفیل طولی جریان برای  $Fr = 0.296$ ،  $\sigma = 0.84$ ،  $\alpha = 0$

## ۷- نتیجه گیری

پس از فاصله ای از بالادست پل، عمق جریان به عمق نرمال می رسد. این فاصله به پارامترهای متعددی چون هندسه کانال، زبری کانال، خصوصیات جریان و شکل پایه بستگی دارد. برای بررسی تاثیر این پارامترها بر طول پروفیل فرآب می توان آزمایشهای جداگانه ای در نظر گرفت.

## مراجع

- ۱- ابریشمی، جلیل؛ حسینی، محمود؛ هیدرولیک کانلهای باز، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد
- 2-Randall&Holley, Backwater Effects of Bridge Piers in Subcritical Flow, 2001
- ۳- قدسیان، مسعود؛ دانشمند، پدرام، بررسی آزمایشگاهی فرآب در بالادست پایه پل مستطیلی شکل، ششمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۲
- ۴- نجمایی، محمد، هیدرولیک کاربردی، ص ۱۴۱، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
- ۵- جبلی فرد، سعید؛ آرش، نجفی جیلانی، عطا الله، سیستم تحلیل رودخانه HEC-RAS، انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، چاپ اول ۱۳۸۱، تهران

6-French, OPEN CHANNEL HYDRAULIC, MCGROW HILL

7-Les Hamill, Bridge Hydraulics, Eand FN Spon, 1999