

بررسی تاثیر شکل پایه پل و نسبت تنگ شدگی بر پروفیل سطح آب در بالادست سازه پل

محمد هوشمندزاده

کارشناس مهندسی عمران، دانشکده مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز و عضو باشگاه پژوهشگران جوان
hooshmandzadeh_civil@yahoo.com

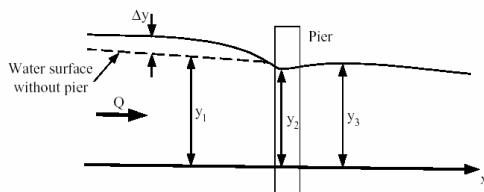
چکیده

با احداث پل در مسیر رودخانه، معمولاً عرض طبیعی جریان کاهش یافته. مانعی در برابر جریان بوجود می آید. برای اینکه عبور جریان از میان پایه های پل با حداقل انرژی مخصوص ممکن گردد، عمق آب در بالادست پل افزایش می یابد. این افزایش عمق را فرآب می نامند و تغییرات آن با فاصله از بالادست پل را پروفیل برگشت آب می نامند. در این مقاله تلاش می شود تا فرمولی آزمایشگاهی برای محاسبه عمق فرآب ارائه شود.

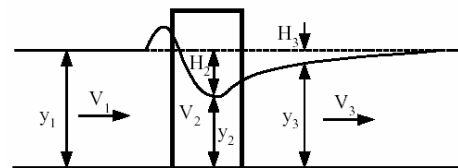
کلید واژه ها: فرآب، پایه پل، ضریب تنگ شدگی، عدد فروید

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 فرآب 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.



تصویر (۱) - نیمرخ جریان قبل از عبور از پایه پل



تصویر (۲) - نیمرخ جریان پس از عبور از پایه پل

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 [۳].

۲- مطالعات اولیه در طرح سازه پل

بطور خلاصه می توان مطالعات اولیه مربوط به طرح پل ها به شرح زیر بیان کرد:

۲-۱- محل پل

در بیشتر اوقات انتخاب محل ساختمان پل به مسیر جاده بستگی پیدا می کند و برای این منظور از نقشه های هوایی استفاده می شود. در محل تقاطع مسیر جاده با رودخانه، نقشه خطوط تراز با فاصله ۰/۵ متر مورد نیاز است و باید سعی نمود تا اطلاعات کافی از پلهای موجود در بالادست و پایین دست محل ساختمان پل جدید بدست آورد.

۲-۲- نوع پل

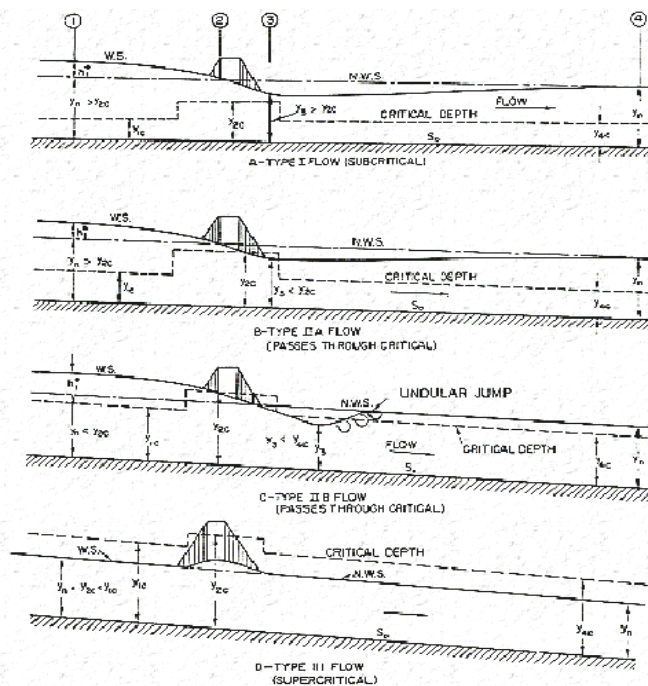
وجود پایه های پل مختلف و سطوح مقطعی که برای عبور جریان آب در نظر گرفته می شود از عوامل موثر در مطالعه هیدرولیک پل می باشد.

۲-۳- مطالعه هیدرولوژیکی منطقه بالادست

بطور معمول در بزرگ راهها از سیلهایی که دوره بازگشت آنها ۵۰ سال است استفاده می نمایند. ولی گاهی اوقات سیل ۵۰ ساله را با بیشترین سیلی که اتفاق افتاده مقایسه کرده و هر کدام را که بزرگتر هستند انتخاب می کنند.

۲-۴- 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.



تصویر ۳- انواع مختلف جریان عبوری از بین پایه های پل

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 A (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 $y > y_n$ برقرار باشد، یک نقطه عطف دیگر نیز در پروفیل جریان وجود دارد [۴]

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

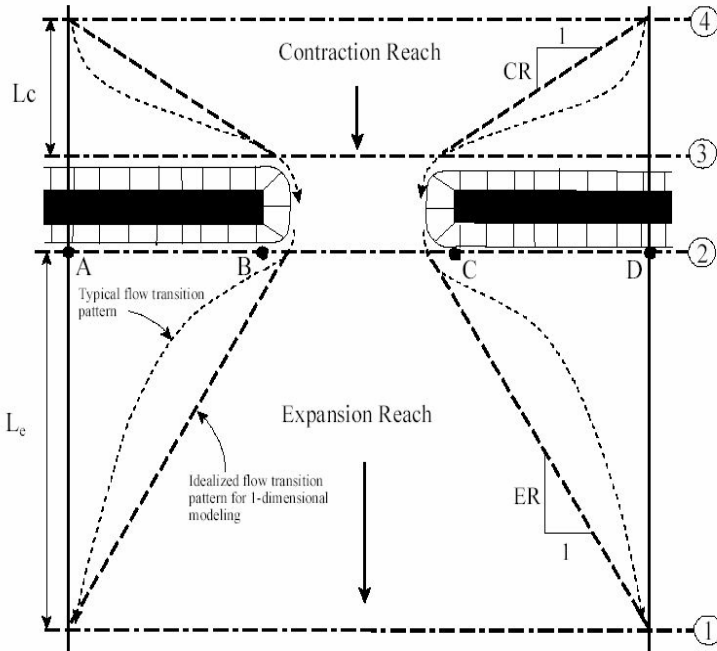
بلافاصله در پایین دست سازه پل (در فاصله چند فوتی) واقع است . این مقطع عرضی باید نمایش دهنده زمین طبیعی درست در خارج پل باشد . این مقطع عرضی در پنجه خاکریز پایین دست پل واقع می باشد .

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



تصویر (۴) - مقاطع عرضی هیدرولیکی در اطراف پایه پل

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 [۵] .

۵- پیشینه مطالعات

تاکنون تحقیقات و مطالعات زیادی درباره محاسبه فرآب پایه پل توسط افراد مختلفی صورت گرفته است و منتهی به ارائه روابطی برای محاسبه آن شده است که از آن جمله می توان به موارد زیر اشاره نمود

۱- رابطه زیر توسط ویکتور ارائه گردیده است:

$$\Delta h = \frac{V_3^2}{2g} \left(\frac{B^2}{C^2(B-b)^2} - 1 \right) \quad (1)$$

که در آن Δh مقدار فراآب بر حسب متر ، V_3 سرعت جریان قبل از احداث پل بر حسب متر بر ثانیه ، B عرض آبراهه بر حسب متر ، b عرض پایه پل بر حسب متر ، g شتاب جاذبه و C ضریب ورودی (برای ورودی تند برابر ۰/۷ و برای ورودی زنگوله ای شکل برابر ۰/۹ است) است.

۲- تحقیقات آزمایشگاهی یارنل ، منجر به ارائه رابطه زیر برای شکلهای مختلف پایه پل گردید:

$$\frac{\Delta h}{h_3} = KFr^2 (k + 5Fr^2 - 0.6) (\sigma + 15\sigma^4) \quad (2)$$

که در آن h_3 عمق نرمال جریان قبل از احداث پل بر حسب متر ، σ ضریب تنگ شدگی ، Fr عدد فروید مربوط به عمق نرمال جریان ، K ضریب شکل پایه پل و مقدار آن بر حسب شکل پایه در محدوده ۰/۹-۱/۲۵ می باشد . لازم به ذکر است که ضریب K در جدول مذکور

برای حالتی است که طول پایه چهار برابر عرض آن باشد. ولی آزمایشهای دیگری که برای نسبتهای طول به عرض ۷ و ۱۳ انجام گرفته است نشان می دهد که نتایج بدست آمده حدود ۸۳ تا ۹۶ درصد از معادله یارنل پیروی می کنند. معادله و جدول ارائه شده برای هر مقدار از نسبت پایه ها توصیه می گردد.

۳- رابطه زیر توسط برولی و پلیت ، جهت برآورد مقدار فرآب پیشنهاد شده است:

$$\left(\frac{h_1}{h_3}\right)^3 = 4.48 Fr^2 \left[\frac{1}{\sigma^2} - \frac{2}{3} (2.5 - \sigma) \right] + 1 \quad (3)$$

۴- یازارد با استفاده از داده های آزمایشگاهی برولی و پلیت ، رابطه زیر را ارائه نمود:

$$\frac{\Delta h}{h_3} = 0.45 \left(\frac{Fr}{\sigma} \right)^2 \quad (4)$$

Aubuisson در سال ۱۸۵۲ رابطه زیر را برای محاسبه مقدار فرآب پیشنهاد نمود:

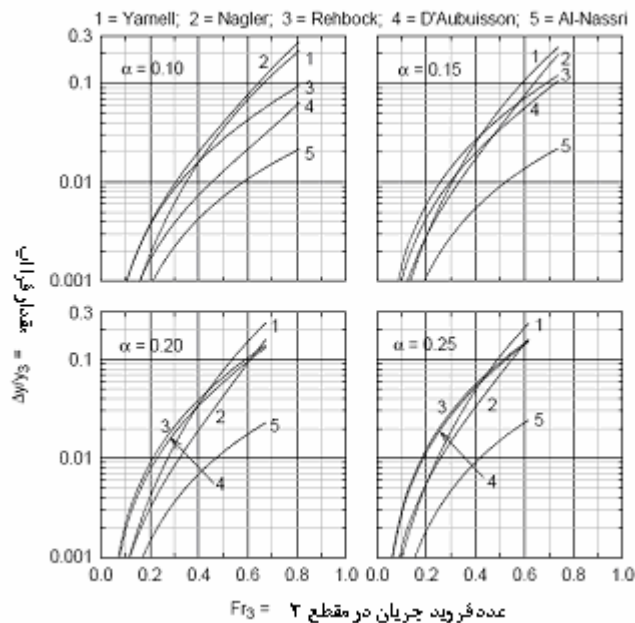
$$\frac{\Delta y}{y} = \left[\frac{8}{27 K_{DA}^2} \frac{(1 + 0.5 Fr_{3c}^2)^3}{Fr_{3c}^2} - \left[\frac{1}{1 + \frac{\Delta y}{y}} \right]^2 \right] \frac{Fr_3^2}{2} \quad (5)$$

در رابطه فوق K_{DA} ضریب شکل پایه پل بوده که مقدار آن بین ۰.۹۶۶ تا ۱.۰۷۹ متغیر است.

۶- ناگلر در سال ۱۹۱۸ معادله زیر را برای محاسبه مقدار فرآب پیشنهاد نمود:

$$\frac{\Delta y}{y} = \left[\frac{8}{27 K_{DA}^2} \frac{(1 + 0.5 Fr_{3c}^2)^3}{Fr_{3c}^2 \left(\frac{1 - 0.3 Fr_3^2}{2} \right)} - \beta \left[\frac{1}{1 + \frac{\Delta y}{y}} \right]^2 \right] \frac{Fr_3^2}{2} \quad (6)$$

در رابطه بالا K_{DA} ضریب شکل پایه پل بوده که مقدار آن بین ۰.۸۷۱ تا ۰.۹۵۲ متغیر است.



۶- شرایط لازم برای مدلسازی فیزیکی - هیدرولیکی پایه های پل

موارد اصلی که برای بدست آوردن یک راه حل مناسب ، انجام مطالعات فیزیکی لازم است به شرح زیر است:

الف- اگر عدد فرود رودخانه بیشتر از 0.8 باشد برای تخمین میزان آب شستگی در اثر شکل و جهت پایه از مدل استفاده می شود .

ب- اگر برای شکل خاصی از پایه اطلاعات در مورد آب شستگی و نیروهای هیدرودینامیک وجود نداشته باشد مدل کمک خواهد کرد تا آنها ارزیابی شده و احیاناً شکل پایه ها اصلاح گردد.

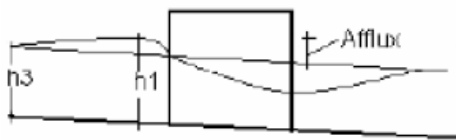
ج- اگر داده های صحرایی از روی دبی و تراز آب کافی نباشند ، مدل کمک خواهد کرد تا وضعیت جریان در شرایط سیلابی مشخص گردد. به خصوص اینکه در مدل الگوی جریان نیز بررسی می شود.

د- اگر جریان با زاویه زیاد (بیش از 10° درجه) نسبت به محور طولی پایه ها با آنها برخورد کند مطالعه مدل فیزیکی قابل توصیه است.

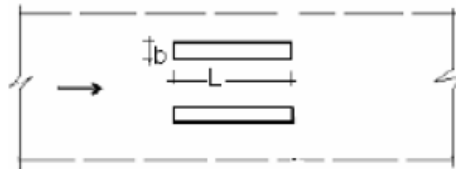
۷- شرایط هیدرولیک جریان بر اساس زاویه محور پایه پل با جهت جریان

۷-۱- پایه های موازی با جریان

حالت ساده ای را که در آن پایه های پل موازی با راستای جریان باشد مطابق شکل (۶) در نظر می گیریم. ارتفاع آب از حدود مقطع ۳، شروع به افزایش می کند. در میان پایه ها که مقطع باریکتر بوده و خطوط جریان از عرض کمتری عبور می کنند، سطح آزاد مایع کاهش می یابد و پس از عبور از پایه های پل جریان یکنواخت حاصل و در حد فاصل بین مقاطع ۱ و ۳ جریان متغیر تدریجی ایجاد می شود.



تصویر(۶) - نمای پایه های پل موازی با جریان آب



تصویر(۵) - پلان پایه های پل موازی با جریان آب

۷-۲- پایه های غیرموازی با جریان

این نوع پایه ها کاربرد بسیار کمتری دارند و حتی الامکان سعی می شود که پای های پل موازی راستای جریان باشند . معذالک گاهی اوقات رعایت این امر امکان پذیر نبوده و محور طولی پایه ها نسبت به جهت جریان دارای مقدار معینی انحراف می باشد. یارنل با انجام آزمایشاتی بر روی پایه هایی با نسبت طول به عرض 4 به 1 و زوایای انحراف 10° و 20° درجه ، دریافت که هرگاه میزان انحراف 10° درجه باشد ، مقدار فراآب نسبت به پایه های موازی خیلی کم افزایش می یابد. ولی اگر میزان انحراف به 20° درجه برسد ، مقدار فراآب نسبت به حالت موازی به اندازه $2/3$ برابر می گردد ؛ زیرا سطح مقطع پیشانی یک پایه منحرف شده با زاویه 20° درجه و نسبت طول به عرض 4 به 1 حدوداً $2/3$ برابر سطح مقطع پیشانی مربوط به حالت پایه های موازی می باشد. بنابر نظریه "هندرسون" برای تاثیر میزان انحراف تا 20° درجه ، عرض موثر را باید عرض عمود بر جهت جریان در نظر گرفت.

۸- آنالیز ابعادی

بررسی کارهای انجام گرفته در زمینه فراآب ، نشان می دهد که پارامترهای موثر بر پدیده فراآب ، عبارتند از : عدد فروید Fr ، نسبت تنگ شدگی و ضریب شکل پایه پل . با استفاده از آنالیز ابعادی خواهیم داشت:

$$\frac{\Delta y}{y_2} = f(Fr_2, \sigma, \alpha) \quad (7)$$

روند تغییرات بین داده های موجود در رابطه (۱) با استفاده از داده های آزمایشگاهی بدست می آید .

۹- شرح آزمایش

آزمایشات در فلومی به عرض 300 میلیمتر و طول 12 متر انجام گردید . برای انجام آزمایشات در هر مورد ، با ثابت نگه داشتن دبی ، دیگر متغیرها به ترتیب تغییر داده شده ، فراآب اندازه گیری می گردید . سپس با تغییر دبی ، آزمایشات تکرار می شد . دبی طوری تغییر داده می شد که دامنه مناسبی از Fr بدست آید [۶] . جدول زیر محدوده متغیرها را نشان می دهد .

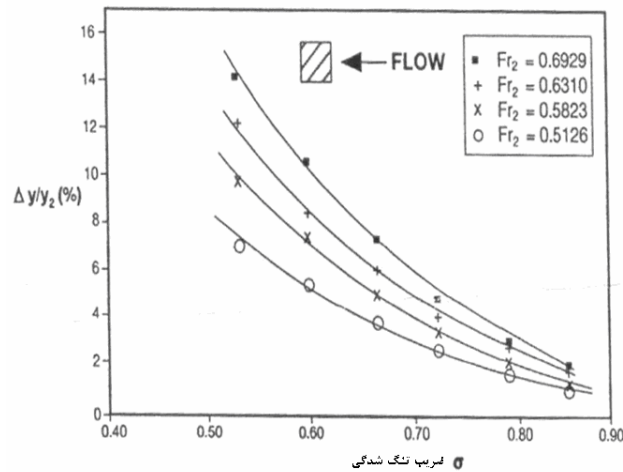
جدول(۱) - محدوده مقادیر ضریب تنگ شدگی و عدد فروید جریان

پارامتر	محدوده مقادیر
عدد فروید	$0.5126 - 0.7139$
ضریب تنگ شدگی	$0.53 - 0.93$

۱۰- تجزیه و تحلیل

بررسی داده های آزمایشگاهی و تحلیل نتایج حاصله ، صحت رابطه (۷) را نشان داد . در ادامه ، ارتباط پارامترهای بدون بعد با نسبت فرآب بررسی می شود . ابتدا منحنی تغییرات تراز سطح فرآب $\frac{\Delta y}{y_2}$ در مقابل نسبت تنگ شدگی برای هر شکل پایه ، به ازای اعداد فروید متفاوت

ترسیم گردید .



نمودار (۲) - تغییرات تراز سطح فرآب در مقابل نسبت تنگ شدگی برای شکل های مختلف پایه به ازای اعداد فروید مختلف

صورت کلی منحنی تغییرات سطح فرآب در مقابل نسبت تنگ شدگی لگاریتمی (غیر خطی) است . رابطه میان این دو پارامتر بصورت زیر است:

$$\frac{\Delta y}{y_2} \propto \frac{1}{\sigma^n} \quad (8)$$

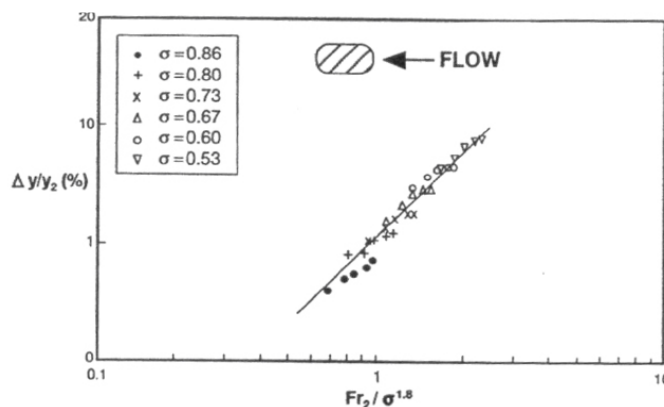
همچنین رابطه کلی میان تغییرات تراز سطح آب و عدد فروید جریان فروآب (پایین دست سازه پل) بصورت زیر است :

$$\frac{\Delta y}{y_2} \propto Fr_2^m \quad (9)$$

در روابط (۹ و ۱۰) n و m توابعی از شکل پایه پل هستند . از ترکیب این روابط و قرار دادن $\alpha = \frac{n}{m}$ خواهیم داشت:

$$\frac{\Delta y}{y_2} = k \left[\frac{Fr_2}{\sigma^\alpha} \right]^m \quad (10)$$

برای تعیین مقادیر k و m, α مجموعه ای از نمودار لگاریتمی برای هریک از انواع پایه پل ترسیم می کنیم.



نمودار (۳) - تغییرات $\frac{\Delta y}{y_2}$ در برابر $\frac{Fr_2}{\sigma^{1.8}}$

از نمودار فوق مقدار α برابر $1/8$ بدست می آید . بهترین خط از میان نقاط نمودار برازش داده شده و مقادیر m و k بدست می آیند.

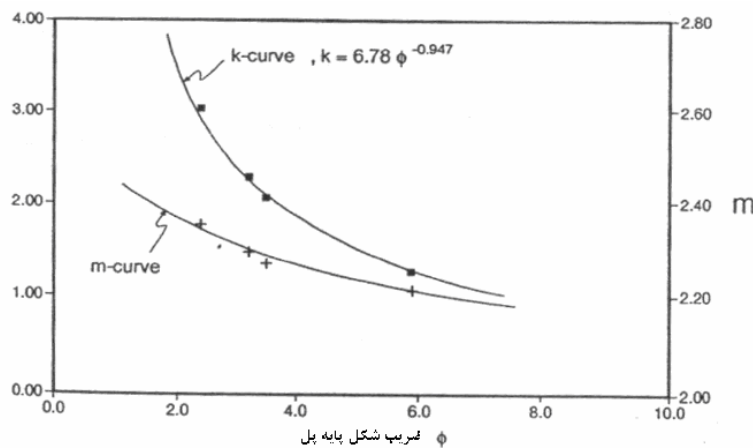
جدول (۲) - مقادیر پارامترهای k , m و α

α	m	k	ضریب شکل پایه	شکل پایه
1/8	2/355	3/011	2/36	مربع
1/8	2/297	2/277	3/19	دایره
1/8	2/216	1/276	5/85	نیم دایره
1/8	2/272	2/073	3/46	پایه ابتدا و انتها مثلثی

با تعیین مقادیر α رابطه کلی بصورت زیر نوشته می شود :

$$\frac{\Delta y}{y_2} = k \left[\frac{Fr_2}{\sigma^{1.8}} \right]^m \quad (11)$$

برای تعیین مقادیر m و k نمودار موجود در جدول (۲) را در مقابل نسبت تنگ شدگی ترسیم می کنیم . بدین ترتیب رابطه فوق برای هر نوع پایه پل قابل استفاده خواهد بود .



نمودار (۴) - تغییرات ضریب شکل پایه پل

مقدار بهینه m که از منحنی m بدست می آید وابستگی کمتری به ضریب شکل پایه پل دارد . در این نمودار ، دامنه تغییرات m در منحنی M بین 2/216 تا 2/355 و مقدار تغییرات ϕ متناظر با تغییرات m بین 2/36 تا 2/85 است . با استفاده از روش حداقل مجموع مربعات ، مقدار k تابعی بر حسب ϕ با توان منفی بصورت زیر بدست می آید .

$$k = 6.78 \phi^{-0.947} \quad (12)$$

با توجه به اینکه دامنه تغییرات m بین 2/216 تا 2/355 است میانگین این دامنه برابر 2/288 بدست می آید . حال با معلوم شدن مقادیر مجهولات ، معادله کلی بصورت زیر نوشته می شود :

$$\frac{\Delta y}{y_2} = 6.78 \left[\frac{Fr_2}{\sigma^{1.8}} \right] \phi^{-0.947} \quad (13)$$

۸- نتیجه گیری

فرمول فوق آزمایشگاهی بوده و در شرایط واقعی ممکن است پاسخ درستی به دست ندهد . علاوه بر این کل پارامترهای موثر را در نظر نگرفته است . در تحقیقات مشابه پارامترهایی همچون زاویه محور پایه و... مورد توجه قرار گیرند.

مراجع

- ۱- ابریشمی , جلیل ; حسینی , محمود ; (۱۳۸۱) هیدرولیک کانلهای باز , انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد
- 2-Randall&Holley(2001) Backwater Effects of Bridge Piers in Subcritical Flow
- ۳- قدسیان , مسعود ; دانشمند , پدram , (۱۳۸۲) بررسی آزمایشگاهی فرآب در بالادست پایه پل مستطیلی شکل , ششمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران , دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی اصفهان
- ۴- نجمایی , محمد , هیدرولیک کاربردی , (۱۳۶۹) , انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران , تهران
- ۵- جبلی فرد , سعید ; آرش , نجفی جیلانی , عطا الله , (۱۳۸۱) سیستم تحلیل رودخانه HEC RAS , انتشارات جهاد دانشگاهی دانشگاه صنعتی امیرکبیر , چاپ اول , تهران
- ۶- دانشمند , پدram , اثر طول پایه پل مستطیلی شکل بر روی فرآب , (۱۳۸۰) پایان نامه کارشناسی ارشد , دانشکده فنی و مهندسی , دانشگاه تربیت مدرس , تهران
- 7- Henderson,F.M(1966)"Open Channel Flow" , Mac Millan Publishing Co.