

## تخمین عمق آبستگي در محل پایه های پل به کمک تلفیق مدل های تجربی با مدل عددی FASTER

الهام قنبری عدیوی<sup>۱\*</sup>، سید محمود کاشفی پور<sup>۲</sup>

### چکیده

پل‌ها از جمله مهمترین سازه های رودخانه‌ای هستند. یکی از مؤثرترین عوامل تخریب پل‌ها، آبستگي موضعی اطراف پایه پل می‌باشد. همه ساله پل‌های زیادی در سراسر جهان به دلیل در نظر نگرفتن نقش عوامل هیدرولیکی تخریب می‌شوند. بر این اساس برای یک طراحی مطمئن، تخمین دقیق از عمق آبستگي در اطراف پایه‌های پل ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق، آبستگي در محل پایه‌های پل اعلاء مورد بررسی قرار گرفت. پل فلزی اعلاء در نزدیکی شهرستان رامهرمز بر روی رودخانه اعلاء احداث گردیده است. برای شبیه سازی دینامیک رودخانه از حل عددی معادلات یک بعدی سنت و نانت در مدل ریاضی FASTER استفاده شد. همچنین برای محاسبه عمق آبستگي ۱۳ رابطه تجربی پیش‌بینی عمق آبستگي به صورت یک زیر برنامه به مدل اضافه شد. مقایسه نتایج نشان داد که بیشترین دقت را معادله فروهلیچ داشته است، و بعضی روابط تجربی آبستگي قابل استفاده برای منطقه نمی‌باشند.

**واژه‌های کلیدی:** عمق آبستگي، پایه پل، مدل FASTER، معادلات آبستگي.

<sup>۱</sup> دانش آموخته دکتری سازه های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز

تلفن: ۰۹۱۶۶۰۷۷۰۳۷- ایمیل: Elhamgh44@gmail.com

<sup>۲</sup> استاد، عضو هیئت علمی گروه سازه های آبی، دانشگاه شهید چمران اهواز

ایمیل: Kashefipour@excit.com

## مقدمه

بقا، جرم و ممنتوم در حالت جریان یک بعدی در رودخانه و کانال های آب است، عبارتند از:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_l \quad (1)$$

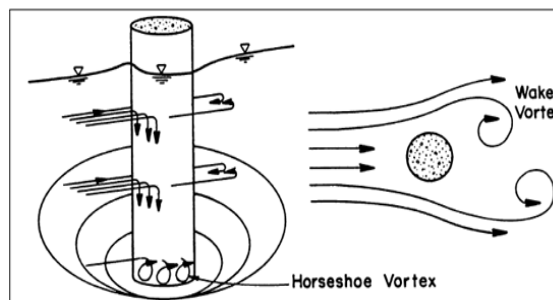
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\beta Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2AR} = 0 \quad (2)$$

که در آن  $h$ : ارتفاع آب،  $Q$ : دبی آب،  $\beta$ : ضریب تصحیح ممنتوم،  $q_l$ : ورودی یا خروجی جانبی،  $C$ : ضریب شزی،  $R$ : شعاع هیدرولیکی می باشد.

لارسن - تاچ (۱۹۵۶) به بررسی تاثیر شکل هندسی پایه و کوله، مشخصات هیدرولیکی جریان، مشخصات رسوب رودخانه و شکل سطح مقطع و امتداد رودخانه بر آبشستگی در پایه و کوله پرداختند. شوبرت و انگلدينر (۱۹۵۶) الگوی رفتاری آبشستگی را با در نظر گرفتن تغییرات عمق آبشستگی با زمان توصیف کردند. شن و همکاران (۱۹۶۹-۱۹۶۶) دریافتند که گرداب نعل اسبی یکی از عوامل اصلی آبشستگی است که با عدد رینولدز پایه متناسب می باشد. ایشان به بررسی هر دو حالت آبشستگی آب زلال و بستر متحرک پرداختند. رادکیوی و اتمان (۱۹۷۷) سری آزمایشاتی را برای بررسی تاثیر غیر یکنواختی رسوبات در حالت آبشستگی آب زلال انجام دادند. همچنین رادکیوی و اتمان در سال (۱۹۸۳) به بررسی اثر غیر یکنواختی مصالح پرداختند. ایشان شرایط جریان را به آبشستگی آب زلال محدود کردند و به بررسی اثر رسوبات متفاوت پرداختند. ملویل و ساترلند (۱۹۸۸) روش طراحی برای بدست آوردن حداکثر عمق آبشستگی پایه پل ارائه نمودند که اثر غیر یکنواختی مصالح، شکل پایه، راستای قرارگیری پایه، اندازه پایه، عمق و سرعت جریان را در محاسبه عمق آبشستگی در نظر می گیرد. اداره راه فدرال آمریکا و آبشستگی پل مشتمل بر ۴۷۰ مشاهده صحرایی ایجاد شد. (ملویل و کالمن، ۲۰۰۲). اداره راه فدرال موسسه جغرافی ایالات متحده در سال (۱۹۸۷) مطالعاتی برای جمع آوری اطلاعات آبشستگی پل در سراسر آمریکا، انجام دادند. در نهایت یک پایگاه از داده های آمریکا (۲۰۰۳) در بین سالهای ۱۹۹۱ تا ۱۹۹۶ یکسری از تحقیقات مفصل و جامع در دانشگاه ایالتی کلرادو تحت عنوان «تاثیرات غیر یکنواختی و چسبندگی مصالح بر آبشستگی پایه پل» انجام شد. در

آبشستگی پدیده ای است که در اثر جریان آب در رودخانه ها و نهرها در اطراف سازه های آبی اتفاق می افتد. اهمیت تعیین عمق آبشستگی از آن جهت است که بیان-گر میزان پتانسیل تخریب جریان در اطراف سازه بوده و علاوه بر این، نقش بسیار مهمی را در طراحی ابعاد پی سازه هایی که در معرض برخورد آب قرار دارند، ایفا می نماید.

همه ساله در اثر سیلاب ها، پل های زیادی در اثر آبشستگی از بین می روند که این امر بیانگر اهمیت بررسی پدیده آبشستگی اطراف پایه می باشد. پس از احداث پل در مسیر رودخانه، به دلیل قرار گرفتن پایه های پل در مسیر جریان تغییراتی در جریان پیش می آید. به طور کلی اگر پایه ای بطور عمودی در بستر رودخانه قرار گیرد، موجب فشردگی افقی جریان در رودخانه و تلاطم جریان آب در اطراف پایه می شود، در نتیجه یک سلسله جریان های گردابی را ایجاد می کند (شفاعی، ۱۳۸۷). سیستم اصلی گردابی از برخورد جریان به جلو پایه و انحراف آن به طرف پایین ایجاد می شود (شکل ۱). جریان چرخشی در جلو پایه به دو طرف پایه نیز امتداد می یابد و شکلی به خود می گیرد که در پلان شبیه نعل اسب است، از این رو به آن گرداب نعل اسبی گفته می شود (زراتی، ۱۳۸۱).



شکل ۱ - خطوط جریان و گردابه های ناشی از اثر جریان در اطراف یک پایه قائم استوانه ای

به منظور تخمین عمق آبشستگی در محل پایه پل، لازم است ابتدا معادلات هیدرودینامیک حاکم بر جریان رودخانه به منظور برآورد شرایط هیدرولیکی جریان در محل پایه های پل حل شوند. برای شبیه سازی دینامیک رودخانه از معادلات یک بعدی سنت و نانت استفاده شد. که در قالب مدل عددی FASTER به حل این معادلات پرداخته شده است. این معادلات که توصیف ریاضی قانون

عمق گودال آبستگي پرداخته و ضرایب این فرمول برای شرایط مختلف روابط تعريف شده ی متفاوتی دارد. طهماسی (۲۰۰۵) به بررسی "مقایسه روشهای محاسبه آبستگي در پایه پلها با بکارگیری داده های اندازه گیری" پرداخت. هدف از انجام این تحقیق ارزیابی ۱۴ رابطه محاسبه عمق آبستگي موضعی در محل پایه‌های پل با استفاده از داده های صحرائی و مدل نرم افزاری FASTER می‌باشد. روابط مورد استفاده در این تحقیق در جدول شماره ۱ آورده شده است.

طی این سری از آزمایشات تعداد ۲۵۰ داده جدید در بحث آبستگي جمع آوری شده و درانتها رابطه جدیدی برای در نظر گرفتن بخش درشت دانه مصالح ، موجود در رسوبات ارائه گردید. چانگ و همکاران درسال(۲۰۰۴) تاثیر غیر یکنواختی مصالح ، بر عمق آبستگي در دماغه پایه دایره ای شکل پل را تحت شرایط آبستگي آب زلال توسط تحقیقات آزمایشگاهی و شبیه سازی مدل ، مورد بررسی قرار دادند .راجکمار درسال(۲۰۰۶) رابطه‌ای به صورت زیر ارائه نمودند که یکی از جدیدترین معادلات آبستگي می باشد که به محاسبه عمق آبستگي براساس یکسری طبقه بندی شرایط بستر بالادست و

جدول ۱- روابط تجربی عمق آبستگي استفاده شده در این تحقیق

منبع	نام محقق	معادله
مولر - وگنر (۲۰۰۵)	فروهلج (۱۹۹۶)	$y_s = 0.32b\phi Fr_1^{0.2} \left(\frac{b_e}{b}\right)^{0.62} \left(\frac{y_0}{b}\right)^{0.46} \left(\frac{b}{D_{50}}\right)^{0.08}$
چیس - هولن بک (۲۰۰۴)	فروهلج - طراحی (۱۹۹۶)	$y_s = 0.32b\phi Fr_1^{0.2} \left(\frac{b_e}{b}\right)^{0.62} \left(\frac{y_0}{b}\right)^{0.46} \left(\frac{b}{D_{50}}\right)^{0.08} + b$ $y_{se} = 2.0b(Fr_1 - Fr_c)^{0.25} \left(\frac{y}{b}\right)^{0.5}$ $Fr_1 - Fr_c > 2.0$
احمد (۲۰۰۵)	جین - فیشر (۱۹۷۹)	$Fr_1 - Fr_c < 0 \quad y_{se} = 1.85b(Fr_c)^{0.25} \left(\frac{y}{b}\right)^{0.3}$ از دو عمق هر کدام بزرگتر بود $0 < Fr_1 - Fr_c < 2.0$
چیس - هولن بک (۲۰۰۴)	HEC/18 جونز - (۱۹۹۵)	$y_s = 2.0y_0 K_1 K_2 K_3 K_4 \left(\frac{b}{y_0}\right)^{0.65} Fr_1^{0.43}$ $k_4 = [1 - 0.89(1 - V_R)^2]^{0.5}$
چیس - هولن بک (۲۰۰۴)	HEC/18-مولر (۱۹۹۵)	$y_s = 2.0y_0 K_1 K_2 K_3 K_4 \left(\frac{b}{y_0}\right)^{0.65} Fr_1^{0.43}$ $K_4 = 0.4 \left(\frac{V_0 - V_{i50}}{V_{c50} - V_{i95}}\right)^{0.15}$
جانسون (۱۹۹۵)	نیل (۱۹۶۴)	$\frac{y_{se}}{D} = 1.35 \left(\frac{b}{D}\right)^{0.70}$
جانسون (۱۹۹۵)	بروزرز (۱۹۷۷)	$y_s = bf \left( K_1 K_2 2 \tanh\left(\frac{y_0}{b}\right) \right)$
طهماسی (۱۳۸۴)	طهماسی (۱۳۸۴)	$d_s = 0.636b K_s K_\sigma (Fr^{-0.05}) \left(\frac{b_e}{b}\right)^{-0.53} \left(\frac{y_0}{b}\right)^{0.69}$

جانسون (۱۹۹۶)	طهماسبی (۱۳۸۴)	$k_s = \left( \frac{D_{84}}{D_{50}} \right)^{-0.58}$ $y_s = 2.08 y_0 K_1 K_2 K_3 K_4 \left( \frac{b}{y_0} \right)^{0.504} Fr_1^{0.639}$ $d_s = 1.141 K_s b^{0.6} y_0^{0.15} D_m^{-0.07} \left( \frac{V_0 - V_{ic}}{V_C - V_{ic}} \right)$
روش چینی (۱۹۹۳)	مولر - وگنر (۲۰۰۵)	
ملویل-ساترلند (۱۹۸۸)	ملویل-ساترلند (۱۹۸۸)	$ds = k_1 \cdot k_d \cdot k_y \cdot k_a \cdot k_s \cdot b$ $ds = k_1 \cdot k_d \cdot k_{yD} \cdot b$
ملویل (۱۹۹۷)	ملویل (۱۹۹۷)	$\frac{ds}{b} = 1.5 \left( \frac{y}{b} \right)^{0.3}$ $ds = 2.23 \times 10^{-4} \left( \frac{Vb}{v} \right)^{0.619}$
لارسن-تاچ (۱۹۵۶)	لارسن-تاچ (۱۹۵۶)	
شن و همکاران (۱۹۶۹)	شن و همکاران (۱۹۶۹)	

### مواد و روش ها

به ورودیکسری اطلاعات می باشد. داده های مورد نیاز برای مدلسازی دینامیک جریان شامل مقاطع عرضی، تعداد مقاطع، فاصله مقاطع از یکدیگر به صورت تجمعی، هیدروگراف سیل ورودی در بالادست، منحنی دبی-اشل در پایین دست و ضریب زبری منطقه می باشد. دوره بازگشت متوسط سیل سالیانه ۲/۳۳ ساله است (گرید و همکاران، ۱۹۹۸). آبشستگی محلی پیرامون پایه های پل نیز فرآیند نسبتاً سریعی است، بنابراین در طراحی برای برآورد عمق آبشستگی در محل پایه های پل معمولاً دبی سیل با دوره بازگشت ۲ ساله مد نظر قرار می گیرد.

بنابراین دبی بادوره برگشت دوساله (۴۵۹ m<sup>3</sup>/s) به عنوان دبی طراحی و معیاری برای بررسی آبشستگی انتخاب گردید، با توجه به اطلاعات موجود شرایط مناسب مرزی در این محل شرایط دبی ثابت است بنابراین دبی دوسالانه به عنوان شرایط مرزی بالادست به مدل وارد شد. اطلاعات جمع آوری شده در این پروژه را می توان در پنج گروه تقسیم بندی نمود. ۱- آمار جریان روزانه ایستگاه هیدرومتری رودخانه اعلا در نزدیکی پل، ۲ - اطلاعات دانه بندی مواد بستر رودخانه، ۳ - وضعیت پوشش گیاهی منطقه، ۴ - اطلاعات مربوط به مقاطع برداشت شده از رودخانه در مسیر جریان، ۵- آمار و اطلاعات مربوط به آبشستگی پایه های پل.

عمده اطلاعات لازم برای محاسبه عمق آبشستگی شامل عمق جریان، سرعت متوسط جریان، وضعیت دبی

در مطالعه حاضر برای حل معادلات هیدرودینامیکی جریان (معادلات سنت ونانت) و نیز محاسبه عمق آبشستگی با استفاده از روابط مختلف از مدل ریاضی FASTER استفاده شد. این مدل در ابتدا توسط کاشفی-پور (۲۰۰۲) به منظور شبیه سازی جریان و انتقال املاح در رودخانه و خلیج بسط داده شد. برای اطلاعات بیشتر در این مورد می توان به کاشفی پور و توکلی زاده (۱۳۸۶) و کاشفی پور و همکاران (۲۰۰۲) مراجعه نمود. معادلات آبشستگی جدول ۱ در قالب زیر برنامه ای به نام PIER SCOUR به مدل FASTER اضافه شده است. در این زیر برنامه برای هر یک از ۱۴ معادله آبشستگی جدول (۱) یک کد مشخص شده و شرایط و ویژگی های هر معادله در کد مربوطه تعریف می شود. با اجرا شدن هر کد، عمق آبشستگی با استفاده معادله مورد نظر و به ازای دبی های مختلف محاسبه می گردد. در بخش بعدی نتایج حاصل از حل این معادلات بصورت گراف و جدول نمایش داده می شود.

به منظور حل مدل های تجربی آبشستگی به یکسری پارامترها، از جمله سرعت، دبی و تنش برشی بعنوان ورودی نیاز می باشد. از اینرو ابتدا به اجرای بخش هیدرودینامیک جریان در مدل FASTER پرداخته شده است. برای اجرای بخش هیدرودینامیک این مدل، نیاز

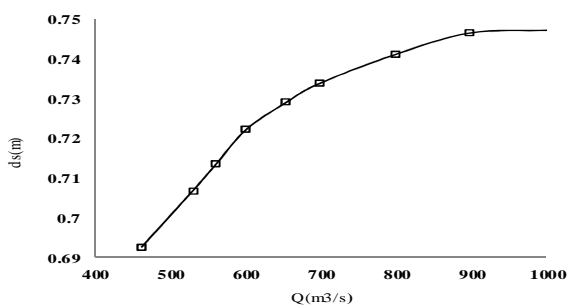
در جدول ۱ برآورد شده است. مقادیر عمق آبستگي به- ازای دبی‌های مختلف در شکل‌های ۲ تا ۱۰ آورده شده است. انتظار داریم که با افزایش دبی عمق آبستگي افزایش یابد. این روند در نتایج حاصله از معادلات فروهلیچ (۱۹۹۶)، HEC/18 معادله طراحی فروهلیچ (۱۹۹۶)، شن (۱۹۶۹)، و لارسن تاج (۱۹۵۶) مشاهده می‌شود، این در حالی است که نتایج عمق آبستگي محاسبه شده از فرمول‌های بروزرز (۱۹۷۷)، طهماسبی (۲۰۰۶)، نیل (۱۹۶۴)، ملویل - ساترلند (۱۹۸۸) و جین-فیشر (۱۹۷۹) یا بصورت عدد ثابت درآمده، و یا با افزایش دبی کاهش عمق آبستگي را نتیجه داده است. علت این روند کاهش و یا ثابت، به تفاوت تعریف شرایط آستانه حرکت ذرات رسوبی در فرمول، نوع پارامترهای مؤثر در فرمول و شرایط منطقه ای فرمول تجربی مربوطه در مقایسه با شرایط منطقه طرح می باشد، که این روند کاهش براساس تحقیقات رادکیوی - اتما در سال (۱۹۸۳)، چپو- ملویل (۱۹۸۷) و سایرین منطقی می باشد. و همچنین روند ثابت برخی از این مدل ها را می توان به وجود ضرایب ثابت در محدوده خاص تعریف شده در این معادلات نسبت داد. که در نتیجه این معادلات برای شرایط کنونی قابل استناد نمی باشند، چرا که شرایط مطالعه حاضر در محدوده تعریف شده برای این معادلات نمی باشند. همانطور که در قبل توضیح داده شد برخی از معادلات مورد استفاده در بالا نتایج متفاوت و یا مغایر با واقعیتی را نشان می دهند. که در ادامه توضیح داده شده است. مدل رابطه نیل (۱۹۷۹)، همانطور که از شکل رابطه‌ی ذکر شده در جدول ۱ پیداست پارامتر هیدرولیکی در این رابطه آورده نشده، که این باعث می شود تا تغییرات دبی تأثیری روی میزان آبستگي نداشته باشد و این تغییرات روی D تأثیر گذاشته و در نهایت تغییرات کمی را در روند افزایش دبی بر روی عمق آبستگي شاهد باشیم (شکل ۹). مدل رابطه ملویل - ساترلند (۱۹۸۸)، همانطور که از شکل رابطه‌ی ذکر شده در جدول ۱ پیداست پارامترهایی از جمله عمق جریان، شکل پایه، زاویه استقرار پایه نسبت به جهت جریان، پارامتر شدت جریان، اندازه رسوب و دانه بندی رسوب، عرض پایه و عمق جریان در نظر گرفته شده که در نتیجه میزان

سرعت بحرانی و عدد فرود در بالادست پایه پل می‌باشد. ضریب زبری یکی از مهم ترین پارامترهای ورودی به مدل می باشد. و تعیین آن با بررسی وضعیت منطقه، فرمول ها و جداول موجود انجام پذیرفت. رسوبات منطقه در اصل نهشته‌های بستر قدیمی رودخانه رامهرمز می‌باشند و در حاشیه‌ی آن بصورت پهنه‌های نسبتا وسیعی با مساحت‌های مختلف دیده می شوند. لازم به ذکر است که تراکم پوشش گیاهی در مسیر کلیه مقاطع بیشتر درختچه ای از نوع گز به ارتفاع ۰/۵ متر تا ۱/۵ متر می باشد. اما در فاصله ۰ تا ۱۰ متری مرکز پل تراکم پوشش گیاهی تا ۹۰ درصد می رسد. در مدل FASTER هر مقطع عرضی به سه قسمت، مقطع اصلی عبور جریان، سیلابدشت چپ و سیلابدشت راست تقسیم می شود و برای هر قسمت ضریب زبری براساس مشخصات آن بخش، نتایج آزمایش رسوب در تعیین دانه بندی، روابط استریکلر و میر-پیترو و دید تجربی تعیین گردید. ضریب زبری سیلابدشت ها به دلیل تراکم پوشش گیاهی ۰/۰۴۵ و برای بخش مقطع اصلی که تقریبا همیشه جریان آب در آن وجود دارد، ۰/۰۴ در نظر گرفته شد. تعداد مقاطع عرضی برداشت شده در اطراف پایه‌های پل ۱۳ مقطع می‌باشد، به منظور افزایش دقت، به کمک مدل ریاضی بین مقاطع برداشت شده، درونیابی صورت گرفته و تعداد مقاطع به ۵۵ مقطع افزایش یافت.

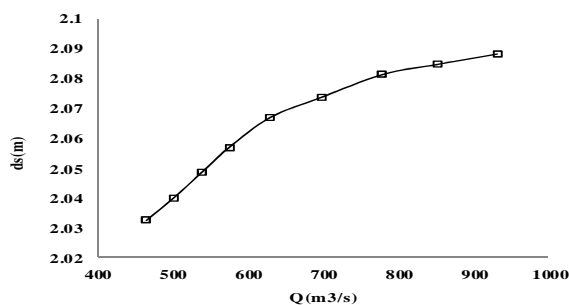
اطلاعات مربوط به آبستگي کنار پایه های پل عمق آبستگي و میزان گود رفتگی بر اساس خط داغاب روی پایه های پل، در کنار تعدادی از پایه ها ی در معرض جریان بیشتر، درگودالی به عرض ۰/۴۵ اطراف پایه مورد نظر طی دوره زمانی ۲ساله اندازه گیری شده است. میزان عمق آبستگي بطور متوسط ۰/۶۲ متر تخمین زده شده است.

### نتایج و بحث

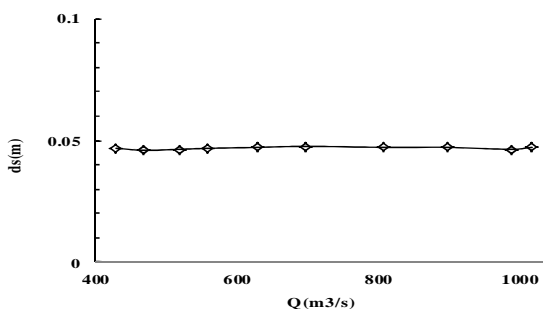
در این مطالعه دینامیک جریان با استفاده از اطلاعات مقاطع عرضی، شرایط اولیه و شرایط مرزی مدلسازی شد. داده‌های خروجی بخش هیدرودینامیک، شرایط هیدرولیکی رودخانه را مشخص می‌کند. با استفاده از داده‌های شرایط هیدرولیکی، مشخصات هندسی پایه پل و مشخصات مربوط به مواد بستر، عمق آبستگي در محل پایه‌ها، بوسیله فرمول‌های ارائه شده



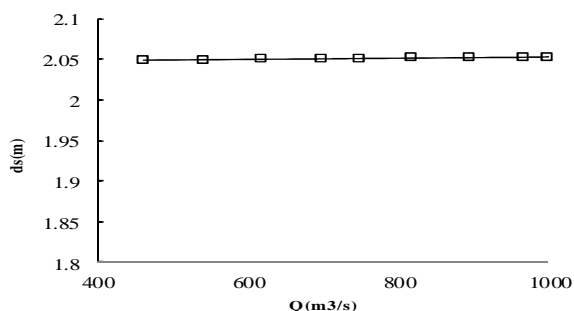
شکل ۳- مقادیر برآورد شده عمق آبشستگی با استفاده از معادله فروهلیچ



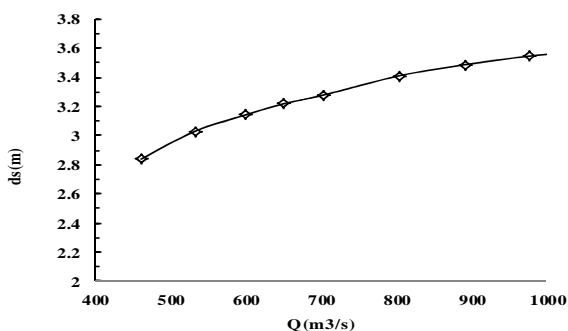
شکل ۲- مقادیر برآورد شده عمق آبشستگی با استفاده از معادله فروهلیچ برای طراحی



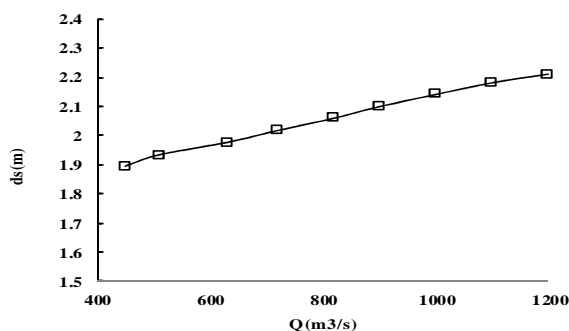
شکل ۵- مقادیر برآورد شده عمق آبشستگی با استفاده از معادله ملویل-ساترلند



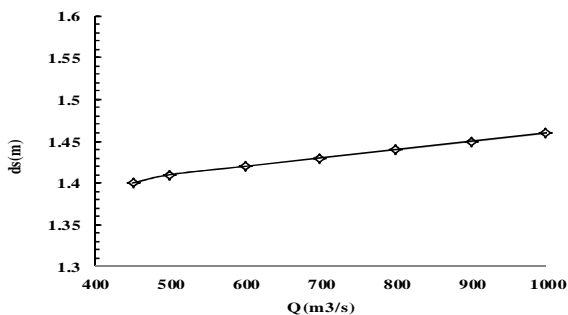
شکل ۴- مقادیر برآورد شده عمق آبشستگی با استفاده از معادله بروزز.



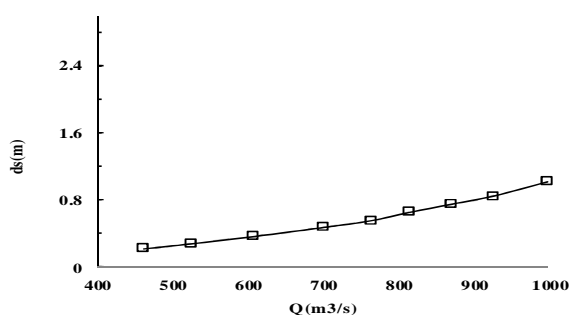
شکل ۷- مقادیر برآورد شده عمق آبشستگی با استفاده از معادله جین-فیشر



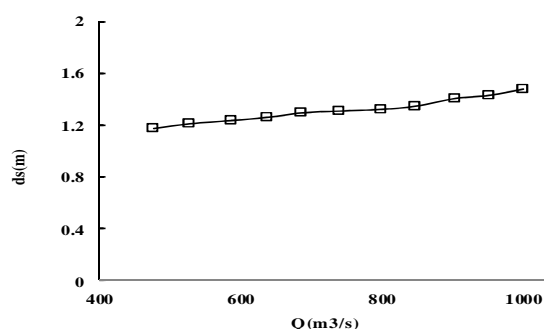
شکل ۶- مقادیر برآورد شده عمق آبشستگی با استفاده از معادله طهماسبی



شکل ۹- مقادیر برآورد شده عمق آبشستگی با استفاده از معادله نیل



شکل ۸- مقادیر برآورد شده عمق آبشستگی با استفاده از معادله شن

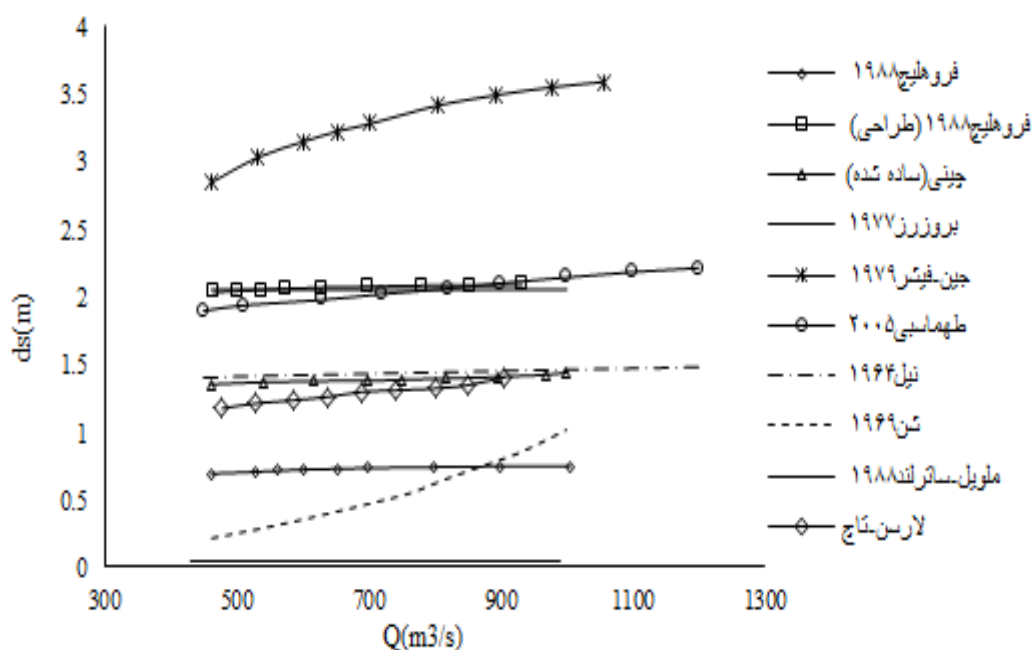


شکل ۱۰- مقادیر برآورد شده عمق آبشستگی با استفاده از معادله لارسن-تاچ

رابطه به سرعت و عمق جریان باشد.  $f$  پارامتری است که با توجه به شرایط جریان در این منطقه مقدار آن ۱ در نظر گرفته می‌شود. مقدار  $\tanh(y_0/b)$  نیز با توجه به شرایط جریان نزدیک به ۱ می‌باشد. بنابراین  $y_s$  تنها به  $b, k_2, k_1$  بستگی دارد و مقدار آن ثابت می‌باشد. سایر مدل‌های مورد استفاده در تحقیق که روند مشخص و منطقی در برآورد عمق آبشستگی را نتیجه نداده اند در زیر آورده شده اند (شکل ۴). مدل رابطه ملویل (۱۹۹۷)، همانطور که از شکل رابطه‌ی ذکر شده در جدول ۱ پیداست پارامترهایی از جمله عمق جریان، شکل پایه، زاویه استقرار پایه نسبت به جهت جریان، پارامتر شدت جریان، اندازه رسوب و دانه بندی رسوب، عرض پایه و تاثیر پارامتر مؤثر هیدرولیکی سرعت در نظر گرفته نشده که در نتیجه میزان عمق آبشستگی محاسبه شده با این فرمول ناچیز برآورد شده است. و با افزایش دبی در شرایط هیدرولیکی موجود تغییری در عمق آبشستگی دیده نمی‌شود. مدل رابطه طهماسبی (۲۰۰۵)، همانطور که از شکل رابطه‌ی ذکر شده در جدول ۱ پیداست ضرایبی در معادله وجود دارند که در شرایط موجود نسبتاً زیاد برآورد می‌گردند و مناسب شرایط و ویژگی‌های پایه‌های پل مورد مطالعه نمی‌باشد در نتیجه میزان عمق آبشستگی محاسبه شده با این فرمول نسبتاً زیاد برآورد شده است. (شکل ۶).

در شکل ۱۱ و جدول ۲ عمق آبشستگی برآورد شده با استفاده از روابط تجربی معرفی شده، بازای دبی‌های مختلف نشان داده شده است. مقادیر بدست آمده از معادلات جانسون، جونز و مولر بدلیل تفاوت بسیار زیاد در شکل قابل نمایش نمی‌باشند. معادله جین-فیشر (۱۹۷۹) بیشترین مقدار آبشستگی و معادله ملویل-ساترلند (۱۹۹۸) کمترین مقدار آبشستگی را به خود اختصاص می‌دهد.

عمق آبشستگی محاسبه شده با این فرمول برای شرایط منطقه مورد بررسی ناچیز برآورد شده است. چرا که در معادله ضرایب آن بر اساس معادلاتی به دست می‌آید که در مرجع ۱۲ (ملویل و ساترلند، ۱۹۸۸) به آن اشاره شده است. با توجه به شرایط هیدرولیکی جریان، مقدار این ضرایب ثابت بوده و برای شرایط موجود کم برآورد می‌شود که این باعث نسبتاً ثابت شدن عمق آبشستگی می‌شود (شکل ۵). مدل رابطه جانسون (۱۹۹۶)، همانطور که از شکل رابطه‌ی ذکر شده در جدول ۱ پیداست پارامترهایی از جمله طول و عرض جریان، زاویه برخورد جریان، وضعیت بستر، عمق جریان و اندازه متوسط ذرات در نظر گرفته شده که در معادله پارامتر هیدرولیکی عمق جریان که از مهمترین عوامل مؤثر در آبشستگی می‌باشد با تاثیر کمی در رابطه گنجانده شده و توان آن در فرمول مربوطه کم می‌باشد در نتیجه میزان عمق آبشستگی محاسبه شده با این فرمول ناچیز برآورد شده است. در این رابطه بجای سرعت و عمق از پارامتر بی بعد فرود استفاده شده است در حالیکه این پارامتر برای تعیین محدوده مناسب بوده و برای آوردن در فرمول پارامتر جایگزین مناسبی برای عمق و سرعت نمی‌باشد. مدل رابطه مولر (CSU ۱۹۹۶)، همانطور که از شکل رابطه‌ی ذکر شده در جدول ۱ پیداست پارامترهایی از جمله عرض پایه، عمق جریان و ضرایب تصحیح شکل دماغه و زاویه برخورد جریان به پایه شرایط بستر در نظر گرفته شده، ضرایب  $k_1, k_2, k_3, k_4$  موجود در فرمول با توجه به شرایط هیدرولیکی موجود زیاد برآورد شده در نتیجه میزان عمق آبشستگی محاسبه شده با این فرمول دور از واقعیت برآورد شده است. مدل رابطه بروزرز (۱۹۷۷)، رابطه بروزرز به شکل یک خط ثابت نشان داده شده است. علت این امر می‌تواند عدم وابستگی این



شکل ۱۱- عمق آبشستگی بازای دبی های مختلف با استفاده از معادلات تجربی

جدول ۲ - عمق آبشستگی بازای دبی های مختلف با استفاده از معادلات تجربی

معادلات	آبشستگی (متر)			
	Q=۴۵۹	Q=۷۰۰	Q=۸۵۰	Q=۱۰۰۰
لارسن-تاچ (۱۹۵۶)	۱/۳	۱/۴	۲۵۴۱	۱/۵۴
نیل (۱۹۶۴)	۱/۳۵	۱/۳۶	۱/۴۱	۱/۴۵
جونز (۱۹۹۵)	۸	-----	-----	-----
شن (۱۹۶۹)	۰/۲	۰/۲۲	۰/۲۴	۰/۲۵
جین- فیشر (۱۹۷۹)	۲/۸	۳/۱	۳/۵	۳/۷
ملویل - ساترلند (۱۹۸۸)	۰/۰۴۳	۰/۰۴۹	۰/۰۵	۰/۰۵۲
فروهلچ (۱۹۸۸)	۰/۶۹	۰/۷۳	۰/۷۴۹	۰/۷۵۲
فروهلچ- طراحی (۱۹۸۸)	۲/۰۳	۲/۰۷	۲/۰۸۳	۲/۰۸۴
جانسون (۱۹۹۶)	-----	-----	-----	-----
مولر (۱۹۹۵)	-----	-----	-----	-----
بروزرز (۱۹۷۷)	۲/۰۵	۲/۰۵	۲/۰۵	۲/۰۵
ملویل (۱۹۹۷)	-----	-----	-----	-----
طهماسبی (۲۰۰۵)	۱/۹	۲/۴	۲/۹	۳/۱

(دبی بر حسب متر مکعب بر ثانیه می باشد).

### تعیین میزان خطای محاسبات

میزان خطای محاسبه عمق آبشستگی با استفاده از رابطه ۳ برآورد می شود. مقادیر خطای برآورد عمق آبشستگی در جدول ۳ آورده شده است. ( $ds_c$  عمق آبشستگی محاسبه شده و  $ds_m$  عمق آبشستگی اندازه گیری شده).

$$E(\%) = \frac{|ds_c - ds_m|}{ds_m} \times 100 \quad (3)$$

مقایسه نتایج جدول ۳ نشان می دهد رابطه فروهلچ (۱۹۸۸)، از دقت بیشتری نسبت به سایر روابط برخوردار است (۱۱٪ خطا). برای یک طراحی مطمئن، پیش بینی دقیق عمق آبشستگی در محل پایه های پل ضروری است.



به نظر می‌رسد. و با کمک یک مدل ریاضی مشابه FASTER می‌توان بهترین و نزدیک به واقع ترین عمق آبشستگی را قبل از انجام پروژه و در مرحله طراحی تعیین نمود.

برآورد عمق آبشستگی کمتر از مقدار واقعی، موجب شکست پل شده و بیشتر از مقدار واقعی منجر به هزینه اضافی خواهد شد، از این رو برای شرایط مشابه این تحقیق، معادله فروهلیچ نسبت به سایر معادلات منطقی‌تر

جدول ۳- مقادیر درصد خطای اندازه‌گیری عمق آبشستگی

معادلات	عمق آبشستگی (متر)	E(%)
لارسن-تاچ(۱۹۵۶)	۱/۳	۹۳/۵
نیل(۱۹۶۴)	۱/۳۵	۱۲۴/۲
جونز(۱۹۹۵)	۸	۱۱۹۰/۳
شن(۱۹۶۹)	۰/۲	۶۷/۷
جین- فیشر(۱۹۷۹)	۲/۸	۳۵۱/۶
ملویل - ساترلند(۱۹۸۸)	۰/۰۴۳	۹۱/۹
فروهلیچ(۱۹۸۸)	۰/۶۹	۱۱/۰
فروهلیچ- طراحی(۱۹۸۸)	۳/۰۳	۲۲۹/۰
بروزرز(۱۹۷۷)	۲/۰۵	۲۳۰/۶
طهماسبی(۲۰۰۵)	۱/۹	۲۰۶/۵

- (۱) بیات، ح. ۱۳۷۹. اندرکنش سازه‌های آبی و فرسایش. انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر. ۲۷۲ صفحه.
- (۲) جعفرزاده، م.ر. (مترجم). ۱۳۸۷. مکانیک رودخانه. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد. ۵۴۰ صفحه.
- (۳) زراتی، ار. (مترجم). ۱۳۸۱. نقش عوامل هیدرولیکی در طراحی پل ها. انتشارات دانشگاه امیر کبیر. شفاعی بجستان، م. ۱۳۸۷. مبانی نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب. صفحه ۲۵۰.
- (۴) محمودیان شوشتری، م، طهماسبی بیرگانی، ی. ۱۳۸۵. مقایسه چهار رابطه تخمین عمق آبشستگی اطراف پایه-های پل با استفاده از آمار صحرایی. هفتمین سمینار مهندسی رودخانه. اهواز.

- 5) Ahmed Mohamed, T., Noor, M. J., Ghazali, A.H. and B.K. Huat. 2005. Validation of some bridge pier scour formulae using field. American Journal of Environmental Science. 119-125.
- 6) Chase, k.J., and R.S. Holnbeck. 2004. Evaluation of Pier-Scour Equations for Coarse-Bed Stream. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 04-5111, 24 p.
- 7) Deng, L., and C.S. Cai. 2010. Bridge Scour: Prediction, Modeling, Monitoring, and Countermeasures. Review. Practice Periodical on Structural Design and Construction. 15: 125.

## نتیجه گیری

در این تحقیق همانگونه که از نتایج پیداست فرمول-های فروهلیچ(۱۹۹۶)، نیل(۱۹۶۴)، لارسن - تاچ(۱۹۵۶)، شن و همکاران(۱۹۶۹) و ملویل-ساترلند(۱۹۸۸) جواب نزدیک به واقع‌تری را می‌دهند. بیشترین دقت را فرمول فروهلیچ دارا می‌باشد، که عمق حفرة آبشستگی اطراف پایه را ۶۹ سانتی‌متر برآورد نموده است. این عمق با عمق واقعی آبشستگی موضعی اطراف پایه پل فلزی رامهرمز (۶۲ سانتی متر) ۰/۰۷ متر اختلاف را نشان می‌دهد. فرمول فروهلیچ بیشترین همبستگی را با واقعیت و تئوری را دارا می‌باشد (میزان خطا در حدود ۱۱ درصد). فرمول‌های جین - فیشر(۱۹۷۹)، فروهلیچ (طراحی)، نیل(۱۹۶۴)، طهماسبی(۲۰۰۶) و بروزرز(۱۹۹۷) دقت بسیار کمی در برآورد عمق آبشستگی در شرایط مورد بررسی را دارا می‌باشند. فرمول‌های HEC/18-(۱۹۹۵) جونز، (مولر ۱۹۹۶) CSU، جانسون (۱۹۹۶) جواب گوی این شرایط نبوده و مناسب منطقه نمی‌باشند.

## منابع

- 8) Grade, R.J. and U.C. Kothyari .1988. Scour around bridge piers. PINS.A. 64(4): 596-580.
- 9) Johnson. P.A. 1995. Comparison of pier scour equations using field data. Journal of Hydraulic Engineering . 121(8): 626-629.
- 10) Lee, S. O., and T. W. Sturm. 2009. "Effect of Sediment Size Scaling on Physical Modeling of Bridge Pier Scour". Journal of. Hydraulicl Engineering. 135(10): 793–802.
- 11) Melville, B. W., and A. J. Sutherland. .1988. Design method for local scour at bridge piers. Journal of. Hydraulicl Engineering. 114 (10): 1210–1226.
- 12) Melville, B.V. 1997. Pier and Abutment Scour: Integrated Approach. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. 123(2): 125-136.
- 13) Mueller, D.S., and R.C. wagner. 2005. Field observations & evaluations of streambed scour at bridges. McLean,VA, Federal Highway Administration Research Report FHWA–RD–03–052,137 p.
- 14) Sheppard, D. M. and W. Miller. 2006. Live-Bed Local Pier Scour Experiments. Journal of Hydraulic Engineering. 132(7): 635-642.