

## حل معادله های میدان جریان و انتقال رسوب در اطراف پایه ی پل ها و محاسبه ی عمق آبشستگی موضعی با استفاده از روش عناصر محدود

ابوالقاسم صیادی<sup>۱\*</sup>

تاریخ دریافت: ۸۷/۵/۲۳ تاریخ پذیرش: ۸۷/۹/۲۰

### چکیده

یک شبیه ریاضی دو بعدی برای محاسبه ی آبشستگی موضعی در اطراف پایه ی پل ها تهیه گردیده است. از معادله ی ناویر- استوکس، به عنوان معادله ای که میدان سرعت را شبیه سازی می کند، استفاده شده است. در ابتدا معادله ی ناویر- استوکس حل شده و میدان سرعت بدست آمد. سپس از سرعت های بدست آمده در صفحه ی افقی، به عنوان داده های ورودی در حل معادله ی انتقال رسوب و از روش معیار باقیمانده های وزنی گالرکین، برای مرتب کردن تغییرات معادله های ناویر- استوکس استفاده شد. دامنه ی مورد بررسی به هشت واحد گرهی تقسیم گردید و از توابع مرتبه ی دوم برای سرعت ها و خطی برای فشار، استفاده شد. پس از حل معادله ی انتقال رسوب با داشتن غلظت های اولیه و نهایی، عمق آبشستگی محاسبه و جواب های شبیه با مقادیر اندازه گرفته شده ی آزمایشگاهی و براساس شبیهی که از حل معادله ی لاپلاس با روش تفاضل محدود بدست آمده بود، مقایسه گردید. در عمل، جواب های حاصل انطباق خوبی را با مقادیر اندازه گرفته شده نشان می دهند. در آخر، تاثیر عامل های گوناگون مثل عمق جریان، شیب کف رودخانه، میانگین اندازه ی ذرات و ... بر عمق آبشستگی بررسی شد. نمودارهای مربوط به بررسی اثر عامل های گوناگون با عمق آبشستگی بر عمق جریان و مقایسه ی آن ها با نتایج بدست آمده از حل معادله های بالا با روش اختلافات محدود، و مقادیر تعیین گردیده در انتهای مقاله آورده شده است که انطباق خوبی را نشان می دهند.

**واژه های کلیدی:** معادله های انتقال رسوب، پایه ی پل ها، عمق آبشستگی، روش عناصر محدود

<sup>۱</sup> - مربی دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت.

\* نویسنده ی مسوول مقاله. email:ghasemsayadi@yahoo.com

## پیشگفتار

در موارد بسیاری پل های واقع بر روی رودخانه ها و نهرها بر اثر پدیده ی آبشستگی خراب شده اند ، اما به خاطر طبیعت پیچیده این فرایند ، هنوز یک روش قطعی و کامل برای اندازه گیری عمق آبشستگی تهیه نشده است. تعداد زیادی روابط تجربی به وسیله ی پژوهشگران ارایه شده است که به خاطر تعدد عوامل موثر بر عمق آبشستگی نتایج آنها با هم اختلاف داشته است ، ضمن اینکه محدوده ی کاربرد این روابط نیز متفاوت و محدود است . در این مقاله یک شبیه ریاضی که بر اساس حل معادله های جریان و انتقال رسوب به روش اجزای محدود استوار است ، ارائه شده است . آبشستگی به دو دسته ی آبشستگی کلی و موضعی تقسیم می شود . آبشستگی کلی در فواصل طولانی و برای حجم شایان توجهی از رسوبات ایجاد می شود . در این نوع آبشستگی در یک طول چندین کیلومتری ممکن است عمق آبشستگی به چندین متر هم برسد و معمولا در مواقع طغیان رود ها سیلاب ها ایجاد می شود . آبشستگی موضعی موضوع این پژوهش است در اطراف پل ها ، یک گروه جریان های ثانویه که عمدتا گرداب ها هستند ایجاد می شوند . این جریان های ثانویه باعث ایجاد یک گودی قیفی شکل در اطراف پایه می شوند که به آن آبشستگی موضعی می گویند ، هدف اصلی این پژوهش ارائه ی یک شبیه ریاضی جهت برآورد این نوع آبشستگی است . همچنین ، بسته به این که آب جریان یافته دارای رسوبات باشد یا نباشد ، آبشستگی موضعی به دو دسته ی آبشستگی بستر زنده و آبشستگی آب زلال تقسیم می شود . در ضمن ، بسته به این که چه نوع آبشستگی وجود داشته باشد، عمق تعادل آبشستگی تغییر می کند . در آبشستگی آب زلال وارد شده به منطقه ی مورد بررسی بدون رسوب می باشد و بنابراین خطر این نوع آبشستگی بیشتر است.

پژوهش های زیادی که بیشتر تجربی هستند ، از زمان های خیلی قبل بر روی عمق آبشستگی موضعی انجام شده است . بیشتر این پژوهش ها براساس داده های آزمایشگاهی می باشند ، موارد کمی نیز براساس داده های صحرایی انجام شده است ، از آنجایی که جمع آوری داده های صحرایی به خاطر طبیعت پیچیده ی این پدیده

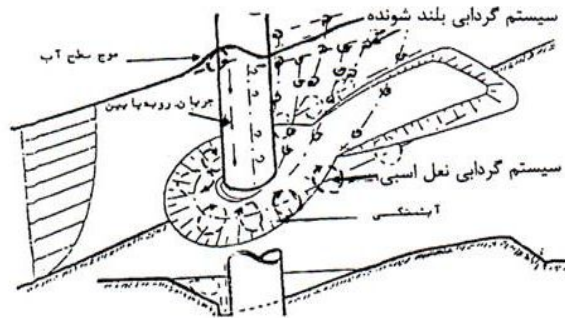
کاری بسیار دشوار است ، به همین دلیل نیز کاربرد این روابط عمدتا آزمایشگاهی و در کارهای عملی و صحرایی همراه با شک و تردید بوده است . به بیان دیگر ، محدوده ی قابل کاربرد این روابط و همچنین دقت آنها کاملا واضح نمی باشد . در همین زمینه نیز کارهایی انجام شده است و نتایج روابط پیشنهادی پژوهشگران گوناگون به وسیله ی عده ای مقایسه و تجزیه و تحلیل شده است.

از جمله کارهای گذشته در زمینه ی آبشستگی می توان به روابط ارایه شده به وسیله ی شن و همکاران (۱۹۹۶) اشاره کرد. ایشان با در نظر گرفتن تاثیر عدد رینولدز روابطی را برای محاسبه ی عمق آبشستگی ارائه داده اند . پژوهشگران دیگری همچون بریسیرز و همکاران (۱۹۷۷)، رادیکو (۱۹۸۶)، درگاهی (۱۹۷۷)، رادیکو و اتما (۱۹۹۰)، کیت و همکاران (۱۹۷۵)، لارسن و تاچ (۱۹۷۵)، میکایل و همکاران (۱۹۹۱)، پگی (۱۹۹۵)، ملویل و دونگال (۱۹۹۲) و جین (۱۹۸۱) ، همگی با در نظر گرفتن اثر سرعت ، اندازه ی رسوبات و چگالی آب و بعضا تاثیر عرض و شکل پایه ها و همچنین عمق جریان روابطی را برای عمق آبشستگی ارایه داده اند . همچنین بر اساس پژوهش های انجام شده به وسیله ی این پژوهشگران برخورد گردها ی ناشی از دو شاخه در پشت پایه باعث تشدید عمق آبشستگی ، بویژه در بستر ماسه ای ریزدانه می شود . پژوهش هایی گسترده نیز به وسیله ی HEC-18(American Hydraulic Engineering) در سال ۱۹۹۳ انجام شده است که در آنها اثر گوشه ی پایه ها، عمق جریان، زاویه ی برخورد جریان با پایه، شرایط بستر و عدد رینولدز در تهیه ی رابطه ی نهایی در نظر گرفته شده است، همچنین کارهای نیز به وسیله ی میرباقری و همکاران (۱۹۸۱، ۱۹۸۸ و ۱۹۸۸) در خصوص محاسبه ی عمق آبشستگی با استفاده از حل معادلات جریان و انتقال رسوب به روش اختلافات محدود و تعیین نرخ فرسایش بستر (M) با استفاده از رسم نمودار فرسایش بستر بر اساس تنش برشی کف انجام شده است.

## مکانیزم آبشستگی موضعی

همان گونه که پیشتر نیز اشاره شد در اثر عبور از کنار پایه ی پل یک سری جریان های ثانویه رخ می دهند

نیست و به گونه ی معمول فقط در پایه های کاملا مستغرق ایجاد می شود . نظام گردابی نعل اسبی بر اثر گسیختگی جریان در بالادست پایه به وجود می آید، به بیان دیگر این نظام هنگامی ایجاد می شود که شیب فشار زیادی بر اثر برخورد جریان با پایه تشکیل شده و شکل پایه در ایجاد و قدرت این نظام نقش زیادی داشته باشد. نظام موج کمائی در سطح آب تشکیل شده و جهت چرخش آن عکس نظام گردابی نعل اسبی می باشد . نظام موج کمائی در جریان های کم عمق ، جایی که جریان با پایه برخورد می کند و سبب تعدیل قدرت جریان رو به پایین می شود ، اهمیت می یابد. در شکل ۱ انواع نظام های موجود در اطراف پایه نشان داده شده است.



که عامل اصلی ایجاد آبشستگی موضعی هستند. این جریان های ثانویه عبارتند از:

- ۱- نظام گردابی بلند شونده Wake vortex
- ۲- نظام گردابی دنباله دار Trailing vortex
- ۳- نظام گردابی نعل اسبی Horseshoe vortex
- ۴- نظام موج کمائی Bow wave

نظام گردابی بلند شونده همچون یک گردباد عمل کرده و رسوبات را از کف بستر به سمت بالا حرکت می دهد. قدرت این نظام بستگی به شکل پایه و سرعت آب دارد. در صورت نبودن نظام گردابی نعل اسبی ، این نظام باعث ایجاد حفره ای بزرگ در پایین دست جریان می شود . نظام گردابی دنباله دار در عمل از اهمیت چندانی برخوردار

#### ۱- انواع نظام های موجود در اطراف یک پایه مرتب کردن معادله ی انتقال رسوب

#### معادله ی انتقال

روی هم رفته ، روند فرسایش و انتقال رسوب بر اساس معادله های تعادل جرمی بیان می شود. برای تعیین غلظت یک ماده در سیال ، از راه موازنه ی جرمی، بایستی ابتدا سرعت را مشخص کرد که این کار را می توان با روش های گوناگون مثل اندازه گیری مستقیم یا استفاده از Rating curve انجام داد. معادله ی همرفت نفوذ که از اعمال اصل موازنه جرمی بدست می آید می تواند بر فرآیند انتقال رسوب حاکم باشد. با توجه به این که در اطراف پایه ی پل ها سرعت زیادی وجود دارد، در عمل بخش عمده ای از رسوبات به حالت معلق جا به جا می شوند و بنابراین معادله ی همرفت نفوذ در محاسبه ی عمق آبشستگی کاربرد دارد. اصل بقاء جرم را می توان در مورد فرآیند انتقال به فرم زیر نوشت:

تجمع رسوبات = رسوبات ورودی - رسوبات خروجی  $\pm$   
منابع افزاینده یا کاهنده

یا به بیان ریاضی:

در این شبیه از دو معادله ی انتقال رسوب و ناویر - استوکس استفاده شده است. ابتدا معادله ی جریان حل شده و سرعت ها در اطراف پایه محاسبه می شود ، سپس با استفاده از سرعت محاسبه شده به عنوان اطلاعات ، معادله ی انتقال رسوب حل و میزان غلظت رسوبات در اطراف پایه مشخص می شود ، در انتها ، با داشتن میزان رسوبات اولیه و فعلی، مقدار رسوبات جا به جا شده محاسبه و در نهایت عمق آبشستگی موضعی مشخص می شود. بنابراین ابتدا مرتب کردن معادله های بالا ارائه می شود.

$b =$  عرض جریان بر حسب  $m$

$R =$  شعاع آبی بر حسب  $m$

$d_{50} =$  میانگین قطر رسوبات بر حسب  $m$

$\gamma_s =$  چگالی رسوبات بر حسب  $kg/m^3$

$\gamma =$  چگالی آب بر حسب  $kg/m^3$

$q =$  بده ی عبوری در واحد عرض بر حسب  $m^2/s$

$v =$  سرعت متوسط جریان  $m/s$  می باشند.

$$\Phi = \frac{Mv}{q} \left[ \frac{\gamma b \lambda s}{(vb + 2q)(0.06d_{50})(\gamma_s - \gamma)} \right] \quad (6)$$

معادله ی بالا به عنوان منبع افزایشنده و یا کاهشنده ی غلظت به شمار می آید. در معادله ی انتقال رسوب،  $\Phi$  با توجه به علامتی که می گیرد، می تواند وضعیت تولید و یا تعادل آن را بیان نموده و با توجه به مقادیر سرعت و بده در واحد عرض جریان خود به خود وضعیت فرسایش یا تعادل را مشخص می کند. به بیان دیگر، چنانچه میزان سرعت به اندازه ای باشد که تنش کف از تنش بحرانی بیشتر شود، فرسایش رخ می دهد و در حالتی که تنش کف با تنش بحرانی برابر باشد، تعادل وجود خواهد داشت. شایان ذکر است که با مشخص بودن چگونگی تغییرات سه کمیت  $V$ ،  $q$  و  $H$  در یک رودخانه و با توجه به این که این سه کمیت برای یک حالت مشخص با هم رابطه ای معین خواهند داشت، در بیان مقدار  $\Phi$  می توان به گونه ی مستقیم از  $H$  استفاده نمود و آن را از رابطه ی زیر محاسبه کرد:

$$\Phi = \frac{M}{H} \left[ \frac{\gamma b \lambda s}{(vb + 2q)(0.06d_{50})(\gamma_s - \gamma)} \right] \quad (8)$$

بدین ترتیب، با معلوم بودن  $D_x$ ،  $D_y$  و  $\Phi$  بدین ترتیب، با معلوم بودن  $D_x$ ،  $D_y$  و  $\Phi$  عامل های اصلی در معادله ی ۱ مشخص خواهند شد. در معادله ی قبل به غیر از  $M$  (ثابت فرسایش) سایر عامل ها را می توان از اندازه گیری مستقیم بدست آورد. ثابت فرسایش از راه نمودارهایی که نشانگر ارتباط بین تنش برشی و میزان فرسایش هستند و  $M$  در واقع شیب نمودار است، بدست می آید. در این زمینه کارهایی به وسیله ی میرباقری و همکاران ارایه شده است که نمونه ای از آن در شکل ۱ آورده شده است.

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} = -\bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} - \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} - \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} - \frac{\partial(\bar{u}\bar{c})}{\partial x} - \frac{\partial(\bar{v}\bar{c})}{\partial y} - \frac{\partial(\bar{w}\bar{c})}{\partial z} \pm \Phi \quad (1)$$

$c$  غلظت رسوبات معلق بر حسب  $mg/l$ ،  $w, v, u$  سرعت جریان در امتدادهای گوناگون بر حسب  $m/s$  و  $D_x$ ،  $D_y$  و  $D_z$  ضرایب نفوذ موثر بر حسب  $m^2/S$  و  $\Phi$  منابع افزایشنده و کاهشنده می باشد.

در طبیعت ساز و کار انتقال رسوب در رودخانه ها و مصب ها در صفحه ی افقی صورت می گیرد و انتقال عمودی جزئی می باشد. بنابراین، در پیش بینی مقدار رسوب انتقال یافته تاثیر ی چندان نخواهد داشت. به همین دلیل در جهت عمودی با انتگرال گیری روی عمق جریان، جهت عمود بر صفحه را می توان حذف نمود.

در معادله ی ۱ ضرایب نفوذ موثر را می توان با فرض یکسان بودن ویژگی های جریان در جهت های  $X$  و  $Y$  از رابطه ی پیشنهادی **Texas Water Development** بدست آورد.

$$\begin{aligned} D_x &= 18.53n\bar{u}H^{.833} \\ D_y &= 18.53n\bar{v}H^{.833} \end{aligned} \quad (2)$$

$n$  ضریب مانینگ و  $H$  عمق بالای جریان بر حسب  $m$  می باشد. همچنین، به دلیل سرعت بالای جریان در اطراف پایه ها، در عمل ته نشینی رسوبات در این محدوده وجود نداشته و بنابراین تنها رسوبات به صورت افزایشنده مقادیر معتناهی مواد معلق را وارد جریان می کنند که میزان آن ها ضرورتا باید مشخص و محاسبه گردد. همچنین  $\Phi$  از رابطه ی زیر بدست می آید:

$$\begin{aligned} \Phi &= \left( \frac{dc}{dt} \right)_e = \frac{1}{H} \left( \frac{dm}{dt} \right)_e \\ \left( \frac{dm}{dt} \right)_e &= M \left( \frac{\tau_b}{\tau_{cr}} - 1 \right) \end{aligned} \quad (3)$$

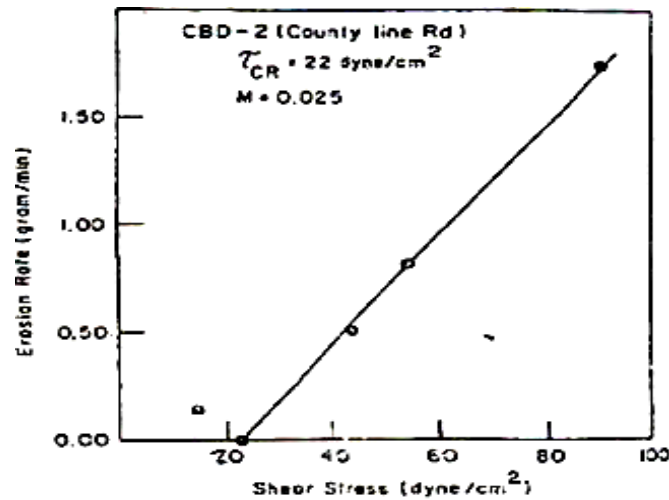
که  $M$  ثابت فرسایش بر حسب  $kg/s$ ،  $\tau_b$  تنش برشی کف و  $\tau_{cr}$  تنش برشی بحرانی  $kg/m^2$  و  $m$  جرم بر حسب  $kg$  می باشند.

$$\tau_b = \gamma RS = \frac{\gamma b H}{b + 2H} S = \frac{\gamma b s q}{v \left( b + 2 \frac{q}{v} \right)} = \frac{\gamma b s q}{bv + 2q} \quad (4)$$

$$\tau_{cr} = 0.06 * (\gamma_s - \gamma) d_{50} \quad (5)$$

که:

$S =$  شیب بستر بر حسب  $m/m$



شکل ۲- تغییرات نرخ فرسایش برای یک نوع خاک.

- ۱- آب تراکم ناپذیر است .
- ۲- جریان سیال یکنواخت است.
- ۳- از نیروهای حجمی صرفنظر می شود.
- ۴- مساله به صورت دو بعدی بررسی می شود.

### روش حل

#### توابع درون یاب

توابع درون یاب توابعی هستند که مقادیر مجهولات در داخل واحد ها را بر حسب مقادیر معلوم در گره ها بیان می کنند . در مسایل سیالات توابع درون یاب استفاده شده برای عامل های سرعت و فشار از دو نوع هستند . در حل معادله ی ناویر - استوکس درجه ی تابع سرعت باید حداقل یک درجه از تابع درون یاب فشار بیشتر باشد. زیرا که در این معادله ها مشتق مرتبه ی اول فشار و مرتبه ی دوم سرعت بوجود می آید.

در این پژوهش از روش تغییراتی باقی مانده های وزنی گالرکین برای حل معادله های حاکم استفاده می شود. منطقه ی مورد نظر به تعدادی واحد هشت گرهی ایزپارامتریک تقسیم شده است. از توابع درون یاب مرتبه ی دوم برای سرعت و مرتبه ی اول برای فشار استفاده شده است ، زیرا در معادله های ناویر - استوکس سرعت از مشتق دوم و فشار از مشتق مرتبه ی اول است . با انتخاب اعمال روش تغییراتی گالرکین در معادله ی

#### مرتب کردن معادله ی جریان

معادله های جریان شامل معادله های پیوستگی و ناویر - استوکس می باشد. چنانچه اصل بقاء جرم را در مورد یک سیال به کار بریم و فرض کنیم که حجم ثابت بوده و چگالی سیال مستقل از زمان است ، خواهیم داشت:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

که معادله ی ۹ معادله ی پیوستگی در سه بعد می باشد. در این رابطه  $u, v, w$  مولفه های سرعت لحظه ای در جهت های  $X, Y, Z$  می باشند.

همچنین ، معادله ی ناویر- استوکس همان اندازه ی حرکت سیال است. بنابراین چنانچه یک واحد سیال را در نظر بگیریم و مجموع نیروهای داخلی و خارجی روی آن را مساوی صفر قرار دهیم (قانون دوم نیوتن) ، خواهیم داشت:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (10)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

فشار،  $\rho$  چگالی و  $\mu$  لزجت سیال می باشند، در این پژوهش برای سیال فرضیه های زیر در نظر گرفته شده است:

$$K = [k_{ij}]$$

$$k_{ij} = \int \left[ N_i \left( u \frac{\partial N_j}{\partial x} + v \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) - \left( D_x \frac{\partial N_i}{\partial y} - \frac{\partial N_i}{\partial x} \right) + D_y \left( \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) \right] dA^{(e)} \quad (22)$$

$$P = \{p_i\}$$

$$p_i = \int_{c^{(e)}} N_i \left( D_x \frac{\partial c}{\partial x} I_x + D_y \frac{\partial c}{\partial y} I_y \right) dC^{(e)} + \int N_i \Phi dA^{(e)} \quad (23)$$

K = ماتریس سختی،

P = بردار نیروها،

M = ماتریس جرم،

C = بردار مجهولات می باشند. چون معادله ی حاصل

زمانمند است، با استفاده از روش تفاضل محدود می توان

قسمت زمانمند را بر حسب قسمت غیر زمانمند بسط داد.

$$mass = (C_{max} - C_{in})(1 + fac)q \Delta x T$$

$$volume = mass / \gamma_s \quad (24)$$

$$H_s = volum / (\Delta x \cdot \Delta y)$$

mass = جرم کل رسوبات انتقال یافته در زمان مورد نظر.

volum = حجم کل رسوبات انتقال یافته در زمان مورد

نظر.

T = زمان لازم برای رسیدن به حالت تعادل،

H<sub>s</sub> = حداکثر عمق آبشستگی،

C<sub>max</sub> = بیشینه ی غلظت در گره ها،

C<sub>in</sub> = غلظت اولیه،

Δx و Δy = میانگین اختلاف مختصات گره مورد بررسی با

گره های قبل و بعد از آن در جهت های X و Y و

q و γ<sub>s</sub> به ترتیب چگالی رسوبات و بده در واحد عرض

می باشند. همچنین، با توجه به جنس بستر و مواد معلق

می توان درصدی از مواد معلق را به عنوان بار کف به نظام

اضافه نمود که این مورد با توجه به جدول ۱ و با استفاده

از عامل fac در شبیه وارد می شود.

جریان خواهیم داشت:

$$[k(u_n, v_n)] \bar{\Phi}_{n+1}^{(e)} = \bar{P}_{n+1}^{(e)} \quad (11)$$

Φ<sub>n+1</sub> = بردار مجهولات گره ها،

k<sup>e</sup>(u<sub>n</sub>, v<sub>n</sub>) = ماتریس ضرایب،

P = مقادیر اولیه و معلوم گره ها

n+1, n = نشانگر مرتبه تکرار.

$$[k^{(e)}]_{20 \times 20} = \begin{bmatrix} [k_1^{(e)}]_{8 \times 8} & [0]_{8 \times 8} & [k_1^{(e)}]_{8 \times 4} \\ [0]_{8 \times 8} & [k_1^{(e)}]_{8 \times 8} & [k_3^{(e)}]_{8 \times 4} \\ -[k_2^{(e)}]_{4 \times 8} & & \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$k_1^{(e)} = \iint \left[ \mu \left( \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) - \mu N_i \frac{\partial N_j}{\partial x} - \rho_n^{(e)} N_i \frac{\partial N_j}{\partial y} \right] dA^{(e)} \quad (13)$$

$$k_2^{(e)}_{ij} = \iint_{A^{(e)}} \frac{\partial N_i}{\partial x} N_j^p dA^{(e)} \quad (14)$$

$$k_3^{(e)}_{ij} = \iint_{A^{(e)}} \frac{\partial N_i}{\partial y} N_j^p dA^{(e)} \quad (15)$$

$$P_i^{(e)} = - \int N_i \pm \left( \mu \frac{\partial u^{(e)}}{\partial x} - p^{(e)} \right) I_x dC^{(e)} \quad (16)$$

$$P_i^{(e)} = - \int N_i \pm \left( \mu \frac{\partial v^{(e)}}{\partial y} - p^{(e)} \right) I_y dC^{(e)} \quad (17)$$

i=9,10,000,16

$$\bar{\Phi}_{20 \times 1}^{(e)} = [U_1^{(e)}, U_2^{(e)}, \dots, U_8^{(e)}, V_1^{(e)}, V_2^{(e)}, \dots, V_8^{(e)}, -P_1^{(e)}, \dots, -P_4^{(e)}]^T \quad (18)$$

$$\bar{P}_{20 \times 1}^{(e)} = [P^{(1)}, P^{(2)}, \dots, P^{(16)}, 0, 0, 0, 0]^T \quad (19)$$

N<sub>i</sub>, A<sup>(e)</sup>, C<sup>(e)</sup>

به ترتیب نشان دهنده ی مرز، سطح واحد و توابع

درون یاب می باشند. در مورد مطالعه انتقال رسوب نیز به

همین صورت عمل می شود. از آنجایی که معادله ی انتقال

رسوب زمانمند است، خواهیم داشت:

$$M\dot{C} + KC = P \quad (20)$$

$$M = [m_{ij}]$$

$$m_{ij} = \int_{A^{(e)}} (N_i N_j) dA^{(e)} \quad (21)$$

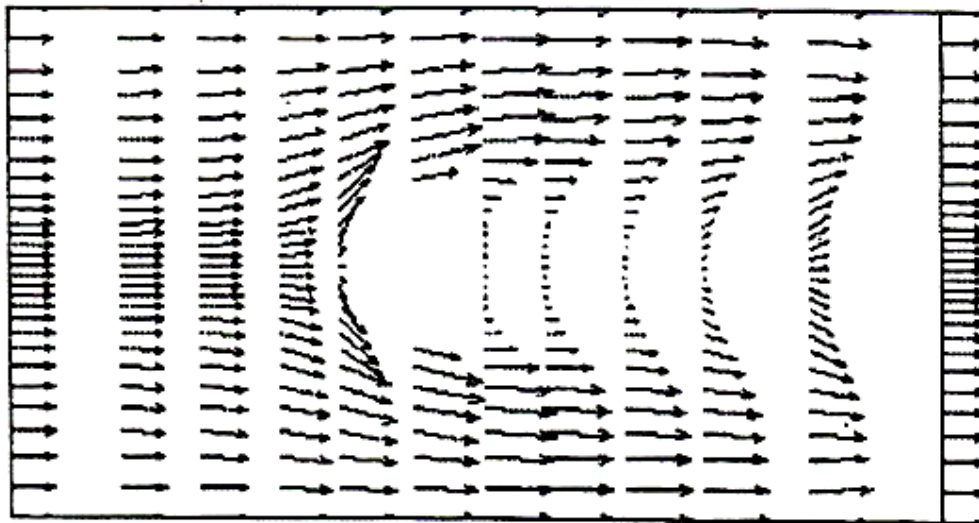
جدول ۱- درصد بار بستر برای بارهای معلق.

در صد بار کف (fac)	اجزا معلق	نوع مواد کف	بار معلق (mg / lit)
۲۵ تا ۵۰	شبیه به مواد بستر	ماسه	کمتر از ۱۰۰۰
۵ تا ۱۲	مقدار کمی ماسه	شن و سنگ	کمتر از ۱۰۰۰
۱۰ تا ۲۵	شبیه به مواد بستر	ماسه	بین ۱۰۰۰ تا ۷۵۰۰
۵ تا ۱۲	۲۵ درصد ماسه	شن و سنگ	بالای ۷۵۰۰
۲ تا ۸	شبیه به مواد بستر	شن و سنگ	بالای ۷۵۰۰

### بحث و نتیجه گیری

بسیار زیاد ند که همین موضوع باعث افزایش دقت شبیه می شود. البته تاثیر برخی از این عامل ها ناچیز است (مثل ضریب مانینگ) و برخی دیگر مستقل از هم نیستند (مثل سرعت و بده). بنابراین ، در این مقاله اثر عامل های مستقل موثر بر عمق آبشستگی مورد بررسی قرار می گیرد. برای نمونه در شکل ۳ به ترتیب بردارهای سرعت و خطوط جریان در اطراف پایه ای به قطر ۱/۶ متر و با سرعت ورودی یک متر بر ثانیه و درجهت X که به وسیله ی شبیه رسم شده، عرضه می گردد . در ادامه بین نتایج بدست آمده از این شبیه و مقادیر اندازه گیری شده و نتایجی که با حل معادله ی لاپلاس به عنوان معادله ی میدان جریان ، بدست آمده ، مقایسه ای انجام گرفته است.

روی هم رفته ، در این پژوهش روند محاسبه ی عمق آبشستگی با توجه به معادله ی ۱ و سایر معادله ها بدین صورت است که فرسایش زمانی شروع خواهد شد که تنش برشی کف بزرگتر از تنش برشی بحرانی گردد ، ولی همزمان با ادامه ی فرسایش عمق جریان در اطراف پایه و تنش برشی بحرانی به خاطر افزایش چگالی و میانگین اندازه ی رسوبات با افزایش عمق بستر زیاد می شود ، با ادامه ی فرسایش ، از میزان  $\Phi$  و در نتیجه از میزان آبشستگی در واحد زمان کاسته شده و در نهایت هنگامی که تنش برشی با تنش برشی بحرانی برابر گردد ، ( $\Phi=0$ ) فرآیند آبشستگی متوقف می شود. همان گونه که مشخص است، عامل های موثر بر عمق آبشستگی در این شبیه



شکل ۳- جهت بردارهای سرعت در اطراف پایه ی دایره ای.

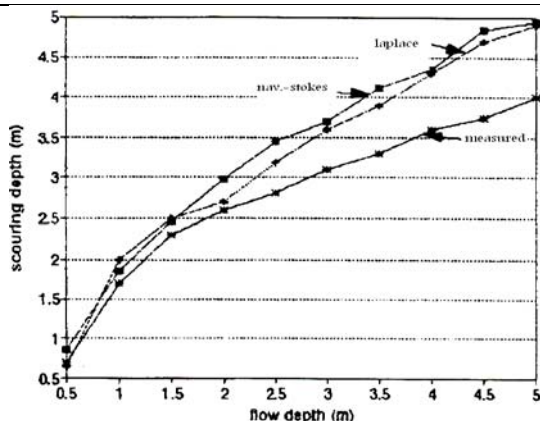
اندازه ی ذرات بستر بر این شکل است ، اما این تاثیر کمتر می باشد ، به گونه ای که در جریان با عمق ۵ متری مقدار عمق آبشستگی از ۷/۹ متر در ثابت فرسایش ۰/۰۰۷ به ۲/۳ متر در ثابت فرسایش ۰/۰۰۲ رسیده است. بنابراین در جریان های عمیق باید به اندازه ی ثابت فرسایش توجه کافی نمود.

### تاثیر ثابت فرسایش بر نمودار آبشستگی - عمق جریان

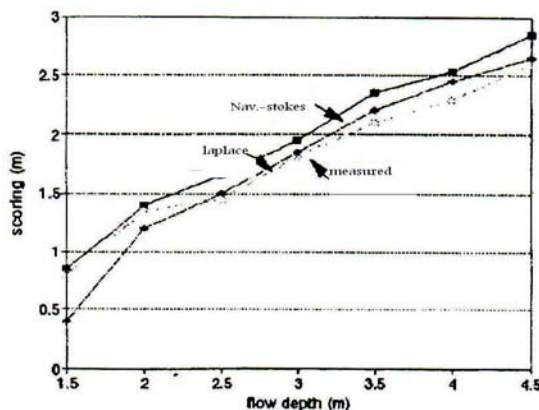
در شکل ۶ ، تغییرات عمق آبشستگی با عمق جریان برای ثابت های فرسایش مختلف بررسی شده است . همان گونه که مشخص است ، با افزایش ثابت فرسایش میزان و شیب منحنی عمق آبشستگی - عمق جریان نیز افزایش می یابد . به بیان دیگر ، تاثیر ثابت فرسایش بر نمودار عمق آبشستگی - عمق جریان برعکس تاثیر میانگین

جدول ۲- مختصات فیزیکی نمودارها.

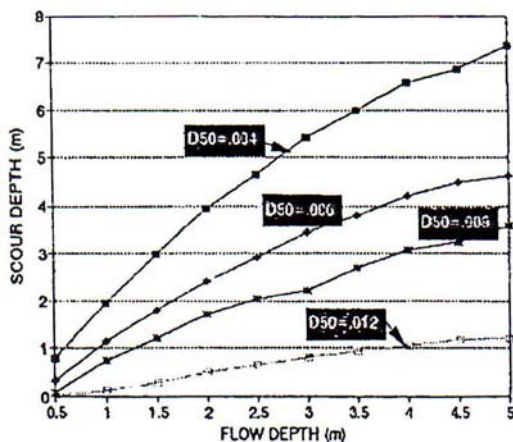
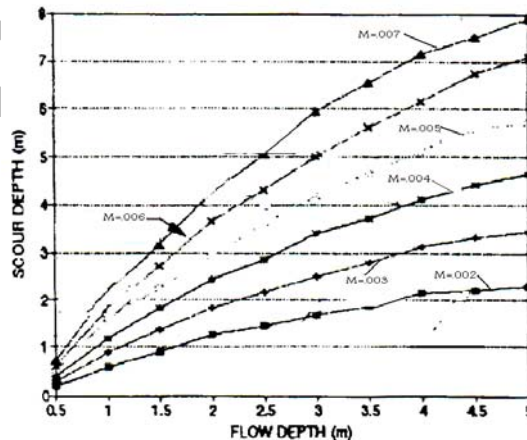
شماره نمودار مربوطه	$M (kg / m^2 s)$	n	SL (m/m)	$d_{50}$ (m)
۵	--	۰.۳۵	۰.۰۲	۰.۰۵
۷	۰.۰۵۲	۰.۳۵	۰.۰۲	--



شکل ۵- مقایسه ی نتایج شبیه با نتایج معادله ی لاپلاس و مقادیر اندازه گیری شده.



شکل ۴- مقایسه ی نتایج شبیه با نتایج معادله ی لاپلاس و مقادیر اندازه گیری شده.

شکل ۷- تغییرات عمق آبشستگی با عمق جریان برای اندازه ذرات گوناگون ( $d_{50}$ ).

شکل ۶- تغییرات عمق آبشستگی با عمق جریان برای ثابت فرسایش های گوناگون (M).

اندازه ی ذرات خیلی کم باشد ، تاثیر عمق جریان بسیار حساس بوده، به گونه ای که در جریان های عمیق با عمق بیش از ۴ متر خطرات جدی برای پل ایجاد خواهد شد. افزون بر این ، نرخ تغییرات عمق آبشستگی با عمق جریان نیز در این حالت در رودخانه های با بستر ریزدانه زیاد می باشد ، اما با افزایش اندازه ی ذرات بستر عمق آبشستگی نیز به میزانی چشمگیر کاهش می یابد . این

### تاثیر میانگین اندازه ی ذرات بر نمودار آبشستگی

#### - عمق جریان

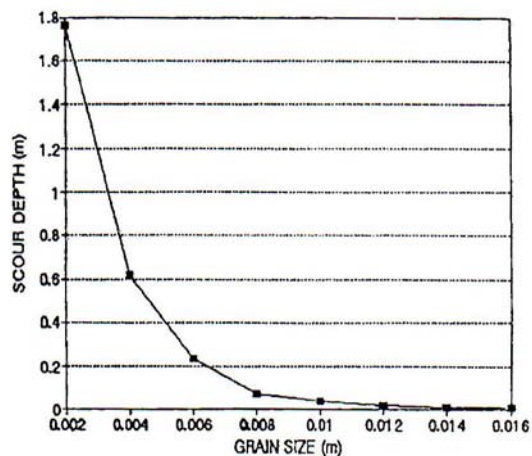
در شکل ۷ چگونگی و میزان تاثیر میانگین اندازه ی ذرات بر نمودار عمق آبشستگی - عمق جریان آورده شده است. بدین ترتیب ، حالت های بحرانی و خطرناک که ممکن است در اطراف پایه رخ دهد، معلوم می شود. بر اساس این نمودار مشخص است که چنانچه میانگین



رفتار به خاطر این است که با افزایش میانگین اندازه ی رسوبات بستر ، مقدار تنش بحرانی نیز افزایش می یابد و بنابراین امکان فرسایش بستر نیز کم می شود. نتیجه ی نهایی این است که در جریان های عمیق باید میانگین اندازه ی ذرات به دقت تعیین شود.

### بررسی تغییرات عمق آبستگی با میانگین اندازه ی ذرات

تاثیر میانگین اندازه ی ذرات بر عمق آبستگی ناشی از تاثیر آن بر میزان تنش بحرانی بستر رودخانه است که آن نیز کاهش می یابد. بنابراین ، عمق آبستگی افزایش می یابد که این امر به خوبی در شکل ۸ مشخص است. در رسوبات خیلی ریزدانه (با قطر کمتر از ۴ میلیمتر) ، میزان تغییرات عمق آبستگی یا میانگین اندازه ی ذرات بسیار شدید است ، ضمن این که مقدار آبستگی نیز در این محدوده خیلی زیاد است. اما با افزایش اندازه ی ذرات نرخ تغییرات عمق آبستگی با اندازه ی ذرات کاهش چشمگیری را نشان می دهد ، به گونه ای که در رسوبات بزرگتر از ۱۴ میلیمتر نمودار عمق آبستگی - اندازه ذرات تقریبا به حالت افقی در می آید.



شکل ۸- تغییرات عمق آبستگی با میانگین اندازه ی ذرات.

**منابع:**

- Breusers HNC, Nicollet G, W. Shen H. 1977. Local scour around cylindrical piers . Journal of Hydraulic Research. 15: 211-252.
- Dargahi B. 1977. Controlling mechanism of local scouring. Journal of Hydraulic Division, ASCE 113(10): 1209-1213.
- Elliot KR, Baker CJ. 1985. Effect of pier spacing on scour around bridge piers , Journal of Hydraulic Engineering 111(7): 1105-1109.
- Jain SC . 1981. Maximum clear-water scour around circular bridge piers . journal of Hydraulic Division Vol.107,No.5.
- Johnson PA, 1995 . Comparison of pier-scour equation using field data Journal of Hydraulic Engineering Vol.121,No.8, August, pp.626-629.
- Laursen EA, Toch A, 1975 Scour around bridge piers and abutments, Iowa Highway Res.Board, Board Bulletin No.4, Vol.60pp.
- Melville BW, Dongal DM , 1992 Bridge piers scour with debris accumulation , Journal of Hydraulic Engineering Vol.118,no.9, September, pp.1307-1311.
- Mirbagheri SA, Tanji KK . 1981 sediment characterization and transport modeling in Clousa Basin Drain . Dept . of land, Air and Water Sciences, University of California, Davis, Water Science and Engineering papers, No.4021.
- Mirbagheri SA, Tanji KK . 1988 sediment characterization and transport in Clousa Basin Drain . Journal of Environmental Engineering ASCE Vol.114,No.6 , pp.1257-1273.
- Mirbagheri SA, Tanji KK, 1988. "simulation of suspended sediment in clousa basin drain Journal of Environmental Engineering ASCE Vol.114,No.6, pp.1275-1294.
- Raudkivi AJ, Ettema R. 1990. Effect of sediment gradation on clear water scour, Journal of Hydraulic Division , ASCE 116(10): 1197-1214.
- Raudkivi AJ. 1986. Functional Trends of scour at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering 112: 1-3.
- Shen HW, et al., 1966 . Mechanics of local scour, U.S.Dept-of Commerce,National Bureau of standards, Institute for Applied Technology.
- Stevens MA, Gassar MM, Saad BAM. 1991 Wake vortex scour at bridge piers . Journal of Hydraulic Engineering, Vol.117,No.7, July, pp.891-904,.
- United States Department of the Interior , Bureau of Reclamation . po, washington DC 1977. Design of small dams, A water resource technical publication.
- Yanmaz AM, Altinbilek HD . 1991."Study of time dependent local scour around bridge piers , Journal of hydraulic Engineering Vol. 117, No. 10, pp.1247-1268.