

شبیه‌سازی سه بعدی حفره‌ی آب‌شستگی اطراف تکیه‌گاه پل با دیواره‌ی قائم با نرم‌افزار FLOW-3D

هاجر حسینی* (دانشجوی کارشناسی ارشد)

نادر هاتف (استاد)

ناصر طالب‌بیدیختی (استاد)

بخش مهندسی راه و ساختمان و محیط زیست، دانشگاه شیراز

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۳ (۱۳۹۳)
دوره ۲-۳، شماره ۲، ص. ۱۱۷-۱۲۳، (پادداست شی)

آب‌شستگی اطراف تکیه‌گاه پل‌ها یکی از عوامل اصلی شکست پل‌هاست و شکست پل‌ها خود ممکن است منجر به تلفات مالی و حتی جانی شود. به همین دلیل پیش‌بینی عمق آب‌شستگی قبل از طراحی پل برای پیشگیری از شکست آن امری ضروری است. در این نوشتار، با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D، که یک نرم‌افزار قوی در مدل‌سازی جریان و انتقال رسوب است، آب‌شستگی اطراف تکیه‌گاه پل با دیواره‌ی قائم شبیه‌سازی شده است. از این نرم‌افزار برای حل معادلات سه بعدی ناویر-استوکس به روش حجم محدود استفاده شده است. مدل آشفتگی RNG برای مدل‌سازی میدان جریان در اطراف تکیه‌گاه، محلی که گردابه‌های نعل اسبی تشکیل شده و جریان آشفته غالب است، به کار برده شده است. مدل مورد استفاده، مقدار عمق میانگین جریان و مقدار بیشینه‌ی عمق آب‌شستگی و محل وقوع آن را با دقت خوبی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌کند؛ به طوری که بیشینه‌ی عمق آب‌شستگی پیش‌بینی شده در شبیه‌سازی فقط ۷٪ با مقدار مدل آزمایشگاهی تفاوت دارد.

واژگان کلیدی: آب‌شستگی، تکیه‌گاه پل، FLOW-3D، دینامیک سیالات محاسباتی.

۱. مقدمه

آب‌شستگی اطراف تکیه‌گاه پل‌ها، یکی از دلایل معمول شکست پل‌هاست و شکست پل‌ها معمولاً منجر به اختلال در ترافیک می‌شود و گاهی نیز تلفات جانی در بردارد. این پدیده موجب فرسایش هیدرولیکی مرزهای آبراهه‌ی اطراف آن و زوال ژئوتکنیکی خاک ریز می‌شود. بر این اساس لازم است که سازه‌ی تکیه‌گاه پل همان‌گونه که در برابر شکست ژئوتکنیکی مقاوم می‌شود، در برابر فرسایش هیدرولیکی نیز محافظت شود. شکست پل‌ها در اثر آب‌شستگی در محل پی، که شامل تکیه‌گاه‌ها و پایه‌هاست، اتفاق راجع است. نتایج مطالعه سازمان فدرال بزرگ راه‌های آمریکا در سال ۱۹۷۳ نشان داد که از بین ۳۸۳ شکست پل، ۲۵٪ ناشی از خرابی پایه و ۷۲٪ به علت خرابی تکیه‌گاه بوده‌اند.^[۱] در زمینه‌ی آب‌شستگی تکیه‌گاه پل‌های واقع در کانال‌های مرکب و مدل‌سازی جریان اطراف آن‌ها پژوهش‌های وسیعی صورت گرفته است، که در آن‌ها با بررسی عوامل متعدد تأثیرگذار در آب‌شستگی تکیه‌گاه‌ها، روابطی جهت تعیین عمق آب‌شستگی ارائه شده است.^[۲] برای مطالعه‌ی میدان جریان و آب‌شستگی ناشی از آن در اطراف تکیه‌گاه پل‌ها، پژوهش‌های متعددی صورت گرفته است. به علت اثرات مقیاس‌سازی در مدل‌های آزمایشگاهی، پیچیدگی‌های رودخانه‌های طبیعی یا

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۲/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۱/۹/۲۲، پذیرش ۱۳۹۲/۱/۳۱.

hajar_h26@yahoo.com
nhataf@shirazu.ac.ir
taleb@shirazu.ac.ir

بسیار ساده فرض می‌شوند یا چشم‌پوشی می‌شوند؛ و اکثر آزمایش‌ها با فرض جریان یکنواخت، عمق جریان ثابت و مصالح بستر غیرچسبیده انجام می‌شوند. بنابراین معادلات عمق آب‌شستگی، که بر اساس اطلاعات فلوم‌های آزمایشگاهی به دست آمده‌اند، این عمق را بیشتر از مقدار واقعی آن محاسبه می‌کنند.^[۳] پژوهشگرانی نیز با مطالعه‌ی جریان اطراف تکیه‌گاه، یک گردابه‌ی اولیه را تشخیص داده‌اند که شبیه گردابه‌ی نعل اسبی اطراف پایه‌ی پل بوده، که در امتداد جریان رو به پایین و علت اصلی آب‌شستگی در تکیه‌گاه پل می‌باشد.^[۴] در وجه بالادست یک تکیه‌گاه، یک گردابه‌ی فشار عمودی به علت ایستایی جریان عبوری به وجود می‌آید. این گردابه‌ی فشار جریان را به سمت پایین هدایت می‌کند و این تلاطم تبدیل به گردابه‌ی اولیه می‌شود، که اندازه‌ی آن با گسترش حفره‌ی آب‌شستگی بزرگ‌تر می‌شود. بر اساس نتایج مطالعاتی در سال ۲۰۰۰، تنش برشی بستر نزدیک دماغه‌ی تکیه‌گاه با دیواره‌ی قائم تقریباً ۳/۶۳ برابر بیشتر از تنش برشی بستر کانال است.^[۵] همچنین پژوهشگرانی با استفاده از مدل دو بعدی $depth - averaged k - \epsilon$ ، جریان اطرف تکیه‌گاه با دیواره‌ی عمودی واقع در دشت سیلابی یک کانال مرکب را شبیه‌سازی کردند.^[۶] بیشتر پژوهش‌ها در زمینه‌ی آب‌شستگی تکیه‌گاه پل‌ها بر اساس آنالیز ابعادی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی با مقیاس کوچک بر مصالح بستر یکنواخت چسبیده یا غیرچسبیده تحت شرایط جریان پایدار صورت گرفته‌اند.^[۷-۱۱]

به طور متفاوت تعیین می‌شود. معادله‌ی قانون لگاریتمی ترکیب دیواره با سطح صاف و زبر (رابطه‌ی ۴) به صورت سعی و خطا برای حل سرعت برشی، u_* ، به کار برده می‌شود: [۲۰]

$$u_* = u_* \left[\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{\rho u_* y_0}{\mu + \rho a u_* k_s} \right) + \Delta r^0 \right] \quad (4)$$

که در آن، κ ثابت Van Karman، a یک ثابت است که مقدار آن مساوی ۰٫۲۴۷ برای مدل $k - \epsilon$ و ۰٫۲۴۶ برای مدل RNG است، k_s زبری مانع، و y_0 فاصله‌ی بین مانع تا سرعت مماسی، u_* ، است. مخرج رابطه‌ی ۴، گران روی مؤثر به علت اثرات دیواره‌ی زبر است، $(\mu_{eff} = \mu + \rho a u_* k_s)$.

اگر سلول در زیر لایه‌ی جریان آرام قرار گرفته باشد، $Re_* = \rho u_* y_0 / \mu \leq 5$ ، رابطه‌ی ۵ برای محاسبه‌ی سرعت برشی خواهد بود:

$$u_* = \sqrt{\frac{\mu u_*}{\rho y_0}} \quad (5)$$

که از این رابطه، برای محاسبه‌ی سرعت برشی، u_* ، به عنوان شرایط مرزی در معادلات انتقال آشفستگی استفاده می‌شود. سپس اثرات زبری از طریق گران روی دینامیکی کل، μ_{tot} ، و مستقیماً از طریق تنش برشی جداره، ω_{si} ، (رابطه‌ی ۶) وارد معادلات حرکت می‌شوند:

$$\omega_{si} = \sum_j \frac{\tau \rho |u_{*i}| u_{*i}}{\Delta x_j} \quad (6)$$

برای جریان‌ات ورقه‌یی و آرام و بدون انتقال آشفستگی، تنش برشی جداره، ω_{si} ، از طریق رابطه‌ی ۷ محاسبه می‌شود:

$$\omega_{si} = \frac{(\mu + \rho a u_* k_s) u_*}{y_0} \quad (7)$$

سپس تنش برشی جداره‌ی محاسبه‌شده مستقیماً وارد معادله‌ی مومتم (رابطه‌ی ۳) می‌شود.

نرم افزار FLOW-۳D از روش حجم سیال (VOF) برای بررسی سطح مشترک سیال - سیال و سیال - هوا استفاده می‌کند. روش VOF حجم سیال در هر سلول مستطیلی را ثبت می‌کند. این حجم با احجام سلول‌های مجاور مقایسه می‌شود تا شیب، موقعیت، و انحنای سیال درون سلول مشخص شود. [۲۱] سطح مشترک مرزهای solid با روش FAVOR^۲ شبیه‌سازی می‌شود. این روش، مساحت و فضاهای باز سلول‌ها در هر سلول مستطیلی را برای تعیین مناطق درون سلول، که توسط مانع اشغال شده‌اند، محاسبه می‌کند.

۲.۲. مدل رسوب

مدل آب شستگی رسوب در FLOW-۳D رفتار رسوبات در جریان سه بعدی، که در فرسایش اطراف پایه‌ی پل و سایر سازه‌های مشابه کاربرد دارد، را شبیه‌سازی می‌کند. برای رسوبات موجود دو حالت وجود دارد: ۱. حالتی که رسوبات تحت گرادبان فشار محلی به صورت شناور و معلق در می‌آیند، ۲. حالتی که رسوبات ته‌نشین شده تحت فرسایش قرار می‌گیرند و به حرکت در می‌آیند. این مدل شامل دو بخش اصلی است: ۱. شناوری، ۲. بلندشدگی. [۲۲] مدل شناوری، نیروی محرک بر ذره‌ی رسوب معلق برای معلق شدن در جریان را تولید می‌کند، که مدل drift-flux نامیده می‌شود. مدل بلندشدگی، به منزله‌ی نیروی بالا برنده‌ی ناشی از تنش برشی موضعی اعمال شده، از

مطالعاتی نیز در مورد عمق آب شستگی تکیه‌گاه و پایداری سنگ چین اطراف آن انجام شد. [۱۲] همچنین پژوهشگرانی تنش‌های آشفستگی در سطح زیرین اطراف یک تکیه‌گاه را برآورد کردند. [۱۳] و برخی دیگر با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی، روند آب شستگی موضعی اطراف تکیه‌گاه‌های نیم بیضوی قرار گرفته بر بستر رودخانه‌یی مسلح شده را با روند آب شستگی موضعی تکیه‌گاه‌های نیم دایره‌یی مقایسه، و روابطی تجربی جهت تخمین عمق آب شستگی تعادلی ارائه کردند. [۱۴] در پژوهشی نیز ساختار جریان آشفته و گردابه‌ی نعل اسبی تشکیل شده در اطراف تکیه‌گاه پل‌ها شبیه‌سازی و تأثیر طول تکیه‌گاه بر تنش برشی بستر بررسی گردید. [۱۵] همچنین پژوهشگرانی با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی جریان اطراف تکیه‌گاه‌های واقع در کانال‌های مرکب و مستطیلی، رابطه‌ی جهت تخمین اندازه‌ی شبکه‌ی بهینه در هنگام استفاده از عمق میانگین جریان ارائه کردند. [۱۶]

در این نوشتار، جریان و نحوه‌ی انتقال رسوب اطراف تکیه‌گاه پل با دیواره‌ی قائم توسط مدل عددی FLOW-۳D شبیه‌سازی شد. چگونگی تشکیل گردابه‌های نعل اسبی و برخاستگی اطراف تکیه‌گاه بررسی و آنالیز حساسیت بر مش‌بندی جهت پیش‌بینی عمق متوسط جریان و بیشینه‌ی عمق آب شستگی صورت گرفت.

۲. مشخصات مدل عددی FLOW-۳D

۱.۲. مدل هیدرودینامیک

مدل دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به کار گرفته شده در این پژوهش، FLOW-۳D است. این مدل توانایی پی‌گیری و بررسی سیال - مرزو تحلیل سطح مشترک سیال - سیال و سیال - هوا را با مختصات نامحدود مستطیلی و با استوانه‌یی دارد. این مدل برای طیف وسیعی از مسائل هیدرولیکی و مهندسی سواحل به کار گرفته شده است، برای مثال، جریان و آب شستگی پایه‌ی پل، [۱۷] جریان عبوری از سرریز لبه‌ی تیز، و تغییر شکل امواج نزدیک ساحل. [۱۸، ۱۹] این مدل به طور هم‌زمان معادلات سه بعدی ناویر - استوکس و معادله‌ی پیوستگی را حل می‌کند. معادله‌ی پیوستگی (رابطه‌ی ۱) و رابطه‌ی ناویر - استوکس برای سیالات تراکم‌ناپذیر (رابطه‌ی ۲) به این صورت است:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} u_i A_i = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V_f} \left(u_j A_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + G_i + f_i - K u_i \quad (2)$$

که:

$$\rho V_f f_i = \omega_{si} - \left[\frac{\partial}{\partial x_j} (A_j S_{ij}) \right]$$

$$S_{ii} = -2 \mu_{tot} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right],$$

$$S_{ij} = -\mu_{tot} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (3)$$

که در آن، u_i سرعت متوسط، P فشار، A_i کسر سطح آزاد به جریان در جهت i ، V_f کسر حجم باز به جریان، G_i بیان‌گر شتاب‌های جرم، f_i شتاب‌های ویسکوز، K ترم نیروی پسی^۲ بین ذره‌یی رسوب، S_{ij} تانسور نرخ کرنش، ω_{si} تنش برشی جداره، ρ چگالی آب و μ_{tot} گران روی دینامیکی کل است، که اثرات آشفستگی را لحاظ می‌کند ($\mu_{tot} = \mu + \mu_T$).

شرایط مرزی جداره‌ی بسته به مدل آشفستگی انتخابی (برای مثال مدل $k - \epsilon$ ،

سایش ذره از مرز رسوبات بستر است، که با پارامتر بحرانی شیلدز تعیین می‌شود (رابطه‌ی ۱۳):

$$\theta_{crit} = \frac{\tau_{crit}}{g(\rho_s - \rho_l)d} \quad (13)$$

در مدل شناوری، به‌عنوان یک مدل بستر رسوبات معلق، فرض می‌شود که معلق شدن و advection بر انتقال بیشتر ذرات رسوب از بستر غالب است. آب‌شستگی به تنش برشی سیال بستگی دارد، تنش برشی بحرانی باعث شروع آب‌شستگی و اختلاف چگالی بین سیال و ذرات رسوب می‌شود. در FLOW-۳D، غلظت رسوب در سطح مشترک بستر با سیال تابعی از $(\tau - \tau_{crit})^{1/5}$ است. مدل بلندشدگی حرکت بار بستر را شبیه‌سازی می‌کند و شار موضعی رسوبات فرسایش‌یافته از مرز بستر را پیش‌بینی می‌کند. شار رسوبات زمانی رخ می‌دهد که تنش برشی نرمال‌شده‌ی بستر بیشتر از مقدار بحرانی آن شود.

پارامتر مهم دیگر، زاویه‌ی قرارگیری مصالح^۸ رسوبات است که اثر شیب بستر بر آغاز به حرکت ذرات رسوبات packed را لحاظ می‌کند. زاویه‌ی قرارگیری مصالح کوچک شرایط راحت‌تری برای لغزش در جهت شیب را فراهم می‌کند، در حالی‌که زاویه‌ی قرارگیری مصالح بزرگ سبب آغاز به حرکت سخت‌تر ذرات خواهد شد. در مدل آب‌شستگی رسوب FLOW-۳D، این زاویه می‌تواند توسط کار بر به‌عنوان یک ثابت تعریف شود. تنش برشی بحرانی در سطح شیب رسوب تابعی از نسبت شیب واقعی به زاویه‌ی قرارگیری مصالح به‌صورت رابطه‌ی ۱۴ است:

$$\tau_{crit} = \tau_{crit}^0 \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \varphi}{\sin^2 \omega}} \quad (14)$$

که در آن، τ_{crit} تنش برشی بحرانی در بستر رسوب packed دارای شیب، τ_{crit}^0 تنش برشی بحرانی بستر افقی است. φ زاویه‌ی واقعی بین بردار نرمال سطح بستر و بردار گرانش و ω زاویه‌ی قرارگیری مصالح است. هنگامی که $\varphi = \omega$ ، تنش برشی بحرانی موضعی (τ_{crit}) صفر خواهد شد، بدین معنی که هر آشفتگی از ناحیه‌ی جریان می‌تواند باعث لغزش دانه‌های رسوب بر روی شیب شود؛ زمانی که $\varphi = 0$ ، تنش برشی بحرانی موضعی همان تنش برشی بحرانی شیب افقی خواهد بود.

در FLOW-۳D معادله‌ی همرفت - پخش^۹ به کارگرفته‌شده جهت مدل‌سازی حرکت رسوب معلق در دامنه‌ی جریان به‌صورت رابطه‌ی ۱۵ است:

$$\left(\frac{\partial C_s}{\partial t} \right)_x + \mathbf{u} \cdot \nabla C_s = D \nabla^2 C_s - \mathbf{u}_{lift} \cdot \nabla C_s - \mathbf{u}_{drift} \cdot \nabla C_s \quad (15)$$

که در آن، \mathbf{u} بردار سرعت محلی انتقال، C_s غلظت محلی رسوبات معلق، D ضریب پخشودگی^{۱۰} است. در معادله‌ی همرفت - پخش، دو ترم اضافی دیگر ناشی از بلندشدگی و شناوری رسوب است. \mathbf{u}_{lift} در ناحیه‌هایی که تنش برشی موضعی نتواند از مقدار بحرانی (τ_{crit}) بیشتر شود، مساوی صفر خواهد بود؛ بنابراین، شناوری در بیشتر قسمت‌های دامنه‌ی جریان بر حرکت رسوبات معلق اثری نخواهد داشت؛ به جز در مجاورت مرز مشترک رسوبات انباشته‌شده و سیال.

۳. نحوه‌ی شبیه‌سازی

پژوهشی در سال ۲۰۰۵، برای مطالعه‌ی آب‌شستگی اطراف تکیه‌گاه پل‌ها و نیز تأثیر قراردادن طوقه^{۱۱} اطراف آن‌ها، بر کنترل آب‌شستگی آزمایش‌های متعددی ترتیب

طرف جریان بر بستر در سطح مشترک‌شان برای جداسازی ذرات از بستر رسوب عمل می‌کند. رفتار رسوب توسط مدل نیروی پسا کنترل می‌شود. هنگامی که تمرکز رسوب از مقدار کسر ذرات چسبنده، که توسط کار بر تعریف می‌شود، بیشتر شود؛ برای شبیه‌سازی رفتار جامد مانند رسوب مدل drag فعال می‌شود. گران روی و چگالی تابع تمرکز رسوب هستند. برای پیش‌بینی رفتار شبه جامد، یک ترم drag خطی اضافی، $-K\mathbf{u}$ ، به معادله‌ی مومنتم به‌صورت رابطه‌ی ۸ اضافه می‌شود (FLOW-۳User Manual):

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = \frac{-\nabla P}{\bar{\rho}} + \frac{\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}}{\bar{\rho}} + \mathbf{g} - K\mathbf{u} \quad (8)$$

و چگالی متوسط در بستر رسوب به‌صورت رابطه‌ی ۹ محاسبه می‌شود:

$$\bar{\rho} = \rho_l + f_s(\rho_s - \rho_l) \quad (9)$$

که در آن، ρ_l و ρ_s به ترتیب چگالی محلی سیال و ذرات رسوب هستند. τ تنش برشی ناشی از گران روی سیال، و K ضریب drag ذرات است که می‌توان آن را از رابطه‌ی ۱۰ با فرض رفتار شبه جامد محاسبه کرد:

$$K = \begin{cases} 0 & f_s < f_{s,co} \\ \left(\frac{f_{s,cr} - f_{s,co}}{f_{s,cr} - f_s} \right) \left(\frac{f_{s,cr} - f_{s,co}}{f_{s,cr} - f_s} - 1 \right) & f_{s,co} < f_s < f_{s,cr} \\ \infty & f_s > f_{s,cr} \end{cases} \quad (10)$$

که در آن، f_s کسر جامد رسوب^۴، $f_{s,co}$ کسر جامد چسبنده^۵ در زمانی است که گران روی جریان با تمرکز رسوب افزایش نیابد، و $f_{s,cr}$ کسر جامد بحرانی^۶ در زمانی که جریان سیال متوقف می‌شود و مثل جامد رفتار می‌کند.

بردارهای سرعت محلی ذرات، که شامل ۲ مؤلفه است: u_{lift} و u_{drift} ، با معادلات ۱۱ مدل می‌شوند:

$$u_{drift} = \frac{f_l d^3 \nabla P}{18 \mu \bar{\rho}} (\rho_s - \rho_l) \quad (11)$$

$$u_{lift} = \alpha n_s \sqrt{\frac{\tau - \tau_{crit}}{\bar{\rho}}}$$

که در آن، d میانگین قطر رسوب، و μ گران روی جریان (که با گران روی آشفتگی در مدل آشفته افزایش می‌یابد)، که از رابطه‌ی ۱۲ محاسبه می‌شود:

$$\mu = \mu_l \left(1 - \frac{\min(f_s, f_{s,co})}{f_{s,cr}} \right)^{-1.55} \quad (12)$$

که در آن، μ_l گران روی مولکولی سیال است. این رابطه نشان می‌دهد که گران روی متوسط جریان با افزایش کسر جامد یا تمرکز رسوب افزایش می‌یابد، تا زمانی که کسر جامد با کسر جامد چسبنده برابر شود؛ یعنی جایی که مدل شبه‌جامد فعال شود و گران روی جریان نتواند افزایش یابد. هنگامی که کسر جامد با کسر جامد بحرانی مساوی شود، گران روی جریان بی‌نهایت می‌شود؛ که به معنی حالت جامد کامل است، که منطبق با مدل ضریب پاساست.

f_l کسر سیال است و u_{drift} زمانی که fl صفر می‌شود، α ($0 < \alpha < 1$) یک پارامتر بی‌بعد و نمایان‌گر احتمال کنده‌شدن یک ذره از سطح ته‌نشین‌شده است. n_s بردار عمود بر سطح بستر است. τ_{crit} تنش برشی بحرانی مورد نیاز جهت

جدول ۱. جزئیات شبکه‌بندی شبیه‌سازی‌ها.

نوع شبکه در مرز رسوب و جریان آب	تعداد سلول در راستای x	تعداد سلول در راستای y	تعداد سلول در راستای z	تعداد کل
ریز	۱۵°	۱۰۰۰	۴۶	۶,۹۰۰,۰۰۰
متوسط	۱۵°	۱۰۰۰	۴۴	۶,۶۰۰,۰۰۰
درشت	۱۵°	۱۰۰۰	۴۲	۶,۳۰۰,۰۰۰

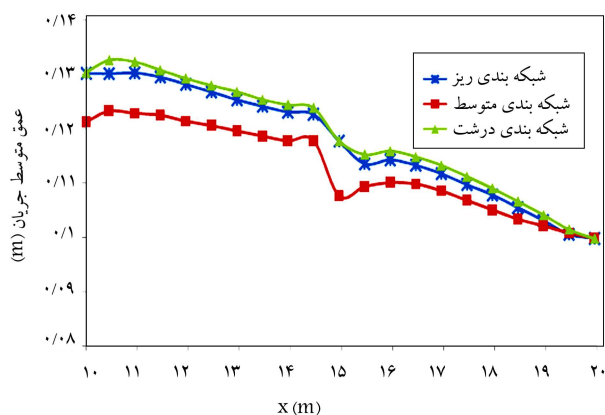
لگاریتمی برسد؛ در غیر این صورت، جریان کاملاً توسعه نیافته در مرز بستر منجر به اشتباه در آستانه‌ی حرکت پروسه‌ی آب شستگی به علت گزاردان بالای سرعت خواهد شد. شبیه‌سازی اول برای مدت زمان ۱۵۰ ثانیه صورت گرفت و دامنه‌ی جریان به حالت پایدار رسید. پس از آن شبیه‌سازی با پارامتر واقعی شیلدز بستر رسوبی به مدت ۶۰ ثانیه ادامه و روند فرسایش مورد مطالعه قرار گرفت.

۴. نتایج شبیه‌سازی عددی

پروفیل سطح آب برای هر سه مدل در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در محل تکیه‌گاه به علت وجود آمدن جریان‌ات آشفته و گردابه‌ها، عمق جریان کاهش می‌یابد. همچنین به علت برگشت آب و ایجاد گردابه‌های نعل اسبی در بالادست و به وجود آمدن گردابه‌های برخاستگی در پایین دست تکیه‌گاه، سرعت‌های منفی در اطراف آن مشاهده می‌شود (شکل ۴).

با گذشت ۵ ثانیه از مرحله‌ی دوم، توزیع سرعت به حالت قابل قبول‌تری از توزیع لگاریتمی می‌رسد؛ به گونه‌ی که مقدار سرعت در سطح بستر رسوبی به صفر نزدیک‌تر می‌شود و جریان نمی‌تواند به درون لایه‌ی ماسه نفوذ کند. شکل ۵، بردارهای توزیع سرعت در ثانیه‌ی شروع مرحله‌ی دوم و ۵ ثانیه پس از آن را نمایش می‌دهد. شکل ۵الف و ۵ب نشان می‌دهد که مرحله‌ی گذار از حالت (الف) به حالت (ب) تأثیر کمی بر پروفیل آب شستگی اولیه بر اساس شرایط ابتدایی جایگزین شده با حالت پایدار حاصل از پارامتر بحرانی شیلدز ۱۰۰ دارد.

اگر اندازه‌ی بُعد قائم سلول در مرز مشترک بستر رسوبی و جریان بسیار بزرگ باشد، گزاردان سرعت نزدیک به بستر ماسه‌ی منطقی نخواهد بود و منجر به توزیع نادرست تنش برشی می‌شود. همچنین جریان ممکن است به تعدادی از سلول‌ها در



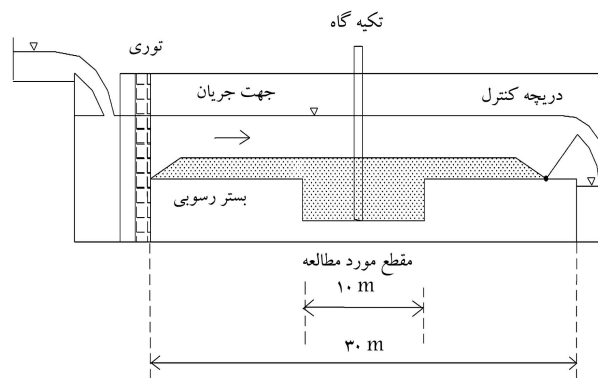
شکل ۳. نیم‌رخ سطح آب مدل شبیه‌سازی شده برای اندازه‌ی شبکه‌بندی‌های مختلف.

داده شده است. [۲۳] در این نوشتار، سری ۳ آزمایش‌های پژوهش مذکور بدون وجود طوقه برای شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار FLOW-۳D انتخاب شد. بر این اساس، تکیه‌گاه با دیواره‌ی عمودی به ابعاد طول ۲۰ سانتی‌متر و عرض ۱۰ سانتی‌متر در فلوم آزمایشگاهی به طول ۱۰ متر، عرض ۱/۵ متر و عمق ۰/۵ متر در نرم‌افزار شبیه‌سازی شد (شکل ۱). آزمایش‌هایی برای قطر ذرات رسوبی ۱/۴۸ میلی‌متر، چگالی ۲۶۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و زاویه‌ی قرارگیری مصالح ۳۰°، تحت دبی ورودی ۰/۰۵ مترمکعب در ثانیه و عمق جریان ۰/۱ متر صورت پذیرفت. شرایط مرزی به صورت تعیین دبی و تراز سطح آب در بالادست، تراز سطح آب در مقطع خروجی (معادل عمق پایاب)، دیواره‌ی بدون لغزش با زبری ۰/۰۳ میلی‌متر (معادل زبری شیشه) برای کف و جداره‌های فلوم و شرایط متقارن در قسمت بالا تعریف شد (شکل ۲). برای شبیه‌سازی آشفتگی از مدل RNG استفاده شد. شبکه‌بندی با یک بلوک سه بعدی و با ابعاد سلول‌های متفاوت جهت آنالیز حساسیت انجام شد، که در جدول ۱ ارائه شده است.

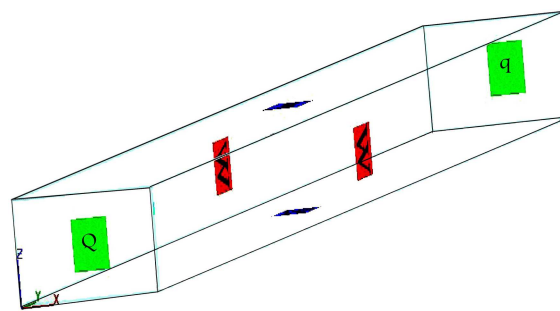
مش‌بندی در راستای x و y به صورت یکنواخت و با اندازه‌ی ۱ سانتی‌متر انتخاب شد. تنش برشی در مرز مشترک جریان و بستر رسوبی نسبت به رزولوشن شبکه بسیار حساس است. مشابه این حساسیت ممکن است در هر ناحیه از دامنه، که گزاردان بالایی دارد، اتفاق افتد و نیاز به مش‌بندی ریزتر در آن ناحیه باشد. بنابراین، در جهت z و در ناحیه‌ی نزدیک به سطح مشترک جریان و بستر رسوبی در عمق ۳ سانتی‌متری از بستر، مش‌ها ریزتر و آنالیز حساسیت انجام شد.

پروسه‌ی شبیه‌سازی شامل دو زیرشاخه است. اولین شبیه‌سازی به عنوان شرایط اولیه برای شبیه‌سازی دوم و اصلی، توسط روش restart نرم‌افزار قرار داده می‌شود. در اولین شبیه‌سازی، از فرسایش رسوب با در نظر گرفتن پارامتر بحرانی شیلدز بزرگ برابر با ۱۰۰ جلوگیری می‌شود تا سرعت موضعی در نزدیکی مرز بستر به توزیع

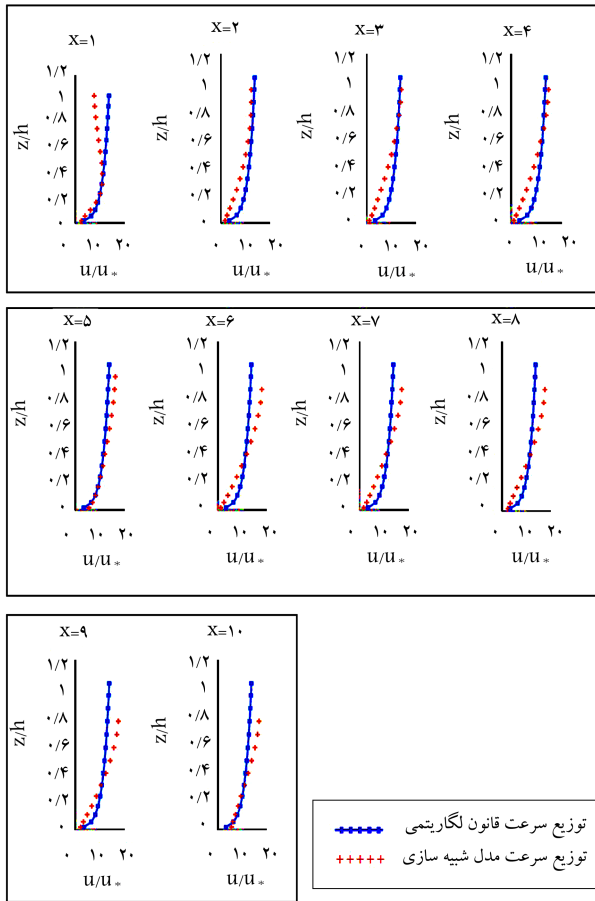
سر ریز مستطیلی



شکل ۱. نمای کلی مدل آزمایشگاهی. [۲۳]



شکل ۲. شرایط مرزی مدل.

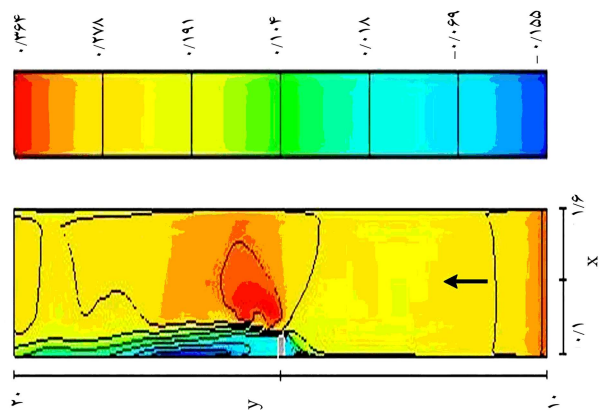


شکل ۶. مقایسه‌ی نیمرخ سرعت مدل با توزیع سرعت لگاریتمی در فواصل ۱ متری نیمرخ طولی.

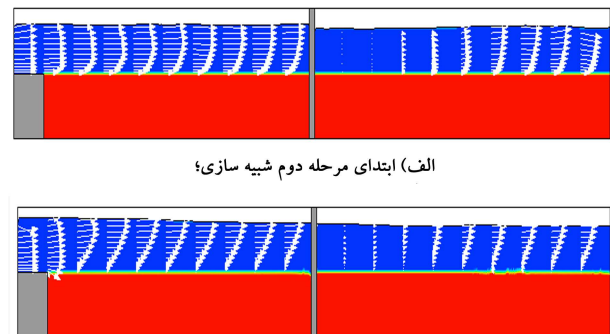
که مقدار 0.33 متر بر ثانیه اندازه‌گیری شده است، مقایسه شد. بدین منظور از روش‌های خطای مجذور میانگین مربعات (RMSE) و خطای نسبی (RE)^{۱۳} و میانگین خطای مطلق (MAE)^{۱۴} برای تعیین میزان خطا استفاده شده است. عمق متوسط جریان با استفاده از مقدار میانگین پروفیل طولی تعیین و با روش‌های ذکر شده، میزان خطا نسبت به عمق متوسط جریان اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه، 10 سانتی‌متر محاسبه شد (جدول ۲). همان‌گونه که در این جدول دیده می‌شود، شبکه‌بندی درشت با مقدار خطای نسبی کمتری سرعت متوسط را پیش‌بینی می‌کند. شبکه‌بندی متوسط نیز کمترین میزان خطا در مدل‌سازی عمق جریان را دارد. در مقایسه‌ی نتایج عمق جریان شبکه‌ی متوسط و درشت، تفاوت میزان خطا اندک

جدول ۲. میانگین سرعت و عمق جریان و میزان خطا برای شبکه‌بندی‌های مختلف.

سرعت جریان				عمق جریان				نوع شبکه در
MAE	RMSE	RE	سرعت متوسط جریان شبیه‌سازی (m/s)	MAE	RMSE	RE	عمق متوسط جریان شبیه‌سازی (cm)	مرز بستر رسوبی و جریان آب
(%)	(%)	(%)		(%)	(%)	(%)		
۵٫۷	۷٫۳	۲٫۳	۰٫۳۲۲	۱٫۷	۲	۱۶٫۱	۱۱٫۷	ریز
۲٫۷	۳٫۴	۶	۰٫۳۱	۱٫۳	۱٫۵	۱۲٫۶	۱۱٫۳	متوسط
۵٫۷	۷٫۴	۱٫۸	۰٫۳۲۴	۱٫۸	۱٫۲	۱۶٫۸	۱۱٫۸	درشت



شکل ۴. خطوط هم‌سرعت در نزدیکی سطح بستر رسوبی در جهت جریان (سرعت بر حسب m/s).



ب) ۵ ثانیه پس از شروع مرحله دوم.

شکل ۵. بردارهای توزیع سرعت.

مجاورت مرز رسوبات نفوذ کند و باعث ایجاد آب‌شستگی غیرواقعی در مراحل ابتدایی شود. بنابراین، در 1 سانتی‌متری از سطح مشترک درون بستر رسوبی برای همی مدل‌ها، اندازه‌ی بعد قائم، کوچک و برابر 0.33 سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. در شکل ۶، نمودارهای پروفیل سرعت حاصل از نتایج شبیه‌سازی با توزیع سرعت لگاریتمی در فواصل 1 متری پروفیل طولی مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج مدل شبیه‌سازی با رابطه‌ی تئوری توزیع لگاریتمی سرعت مطابقت خوبی را نشان می‌دهد.

جهت تعیین سرعت متوسط با استفاده از روش مجذور میانگین مربعات (RMS)^{۱۳} ابتدا در فواصل 1 متری از پروفیل طولی مقدار سرعت متوسط محاسبه شد. سپس میانگین سرعت‌های حاصل با سرعت متوسط نتایج آزمایشگاهی

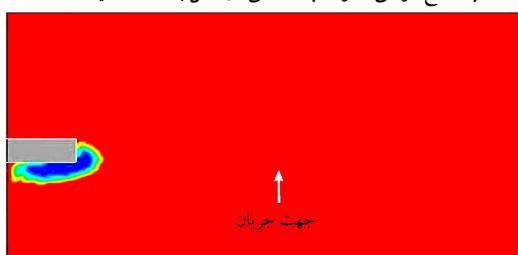
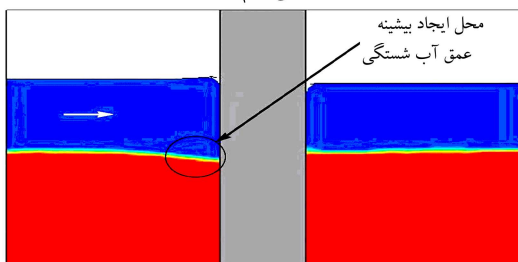
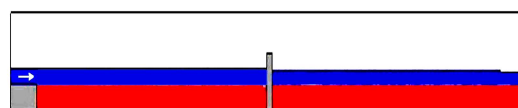
است؛ بنابراین می‌توان از شبکه‌ی درشت و شبکه‌ی متوسط به لحاظ صرفه‌جویی در زمان محاسبات منوط به پیش‌بینی عمق آب‌شستگی با خطای کم استفاده کرد.

پس از گسترش جریان، با استفاده از تکنیک restart نرم‌افزار، از نتایج مرحله‌ی اول به‌عنوان ورودی برای مرحله‌ی دوم شبیه‌سازی رسوب استفاده می‌شود. در این مرحله پارامتر بحرانی شیلدز واقعی مصالح وارد محاسبات می‌شود و به مدل اجازه‌ی فرسایش رسوبات داده می‌شود. شبیه‌سازی رسوب برای مدت زمان ۶۰ ثانیه انجام گرفت. پیشینه‌ی عمق آب‌شستگی طبق انتظار در بالادست کوله رخ می‌دهد و حفرة آب‌شستگی اطراف آن ایجاد می‌شود (شکل ۷).

نتایج حاصل از سه مدل و میزان خطا در مقایسه با مقدار پیشینه‌ی عمق آب‌شستگی مدل آزمایشگاهی، ۱/۴ سانتی‌متر، در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به این جدول، مدل با شبکه‌بندی درشت مقدار پیشینه‌ی عمق آب‌شستگی با خطای کمتری را پیش‌بینی می‌کند. البته کلیه‌ی شبیه‌سازی‌ها مقدار عمق آب‌شستگی را بیشتر از مقدار مدل آزمایشگاهی پیش‌بینی کرده‌اند؛ که با توجه به ماهیت بسیار پیچیده‌ی فرسایش اطراف کوله‌ها، در جهت احتیاط و قابل پذیرش است.

۵. نتیجه‌گیری

پیش‌بینی عمق حفرة آب‌شستگی تکیه‌گاه پل قبل از طراحی آن برای پیشگیری از شکست پل امری ضروری است. در این پژوهش، با استفاده از نرم‌افزار FLOW-۳D چگونگی تشکیل گردابه‌های نعل اسبی و ایجاد حفرة آب‌شستگی ناشی از آن بررسی شد. این مدل CFD، قابلیت بالایی در شبیه‌سازی جریان و مدل‌سازی انتقال رسوب و پیش‌بینی عمق آب‌شستگی دارد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی، مقدار عمق میانگین جریان و مقدار پیشینه‌ی عمق آب‌شستگی و محل وقوع آن را با دقت خوبی نسبت به مدل آزمایشگاهی پیش‌بینی می‌کند. همچنین با توجه به آنالیز حساسیت برای شبکه‌بندی، شبکه با مش‌های درشت‌تر مقدار پیشینه‌ی عمق آب‌شستگی را بهتر پیش‌بینی می‌کند. اما باید توجه داشت که بزرگ‌تر شدن مش‌ها نباید بیش از حد شود، زیرا باعث خطای زیاد در تشکیل عمق جریان و در نتیجه، خطا در پیش‌بینی عمق آب‌شستگی خواهد شد.



شکل ۷. تشکیل حفرة آب شستگی در بالادست دست تکیه‌گاه

جدول ۳. مقادیر پیشینه‌ی عمق آب‌شستگی مدل‌های شبیه‌سازی.

RE	پیشینه‌ی عمق آب‌شستگی	نوع شبکه در مرز بستر
(%)	مدل شبیه‌سازی (cm)	رسوبی و جریان آب
۲۳	۱،۸۳	ریز
۱۶	۱،۶۷	متوسط
۷	۱،۵	درشت

پانوشته‌ها

1. computational fluid dynamics
2. drag
3. fractional area-volume obstacle representation
4. solid fraction of the sediment
5. cohesive solid fraction
6. critical solid fraction
7. liquid fraction
8. angle of repose
9. advection-diffusion
10. diffusion factor
11. collar
12. root mean square
13. relative error
14. mean absolute error

منابع (References)

1. Richardson, E.V., Harrison, L.J., Richardson, J.R. and Davies, S.R., *Evaluating Scour at Bridges*, Publ. FHWA-IP-90-017, Federal Highway Administration, US Department of Transportation, Washington, DC. (1993).
2. Ettema, R., Nakato, T. and Muste, M. "Estimation of scour depth at bridge abutments", Final Report, NCHRP 24-20, Transportation Research Board, Washington, DC (2010).
3. Mueller, D. and Wagner, C.R. "Analysis of pier scour predictions and real-time field measurements", In: *Proceedings of ICSF-1 First International Conference on Scour of Foundations*, Texas A&M University, College Station, Texas, US (2000).

4. Kwan, T.F. "A study of abutment scour", Rep. No. 451, School of Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand (1988).
5. Kwan, T.F. and Melville, B.W. "Local scour and flow measurements at bridge abutments", *J. Hydraul. Res.*, **32**(5), pp. 661-673 (1994).
6. Ahmed, F. and Rajaratnam, N. "Observations on flow around bridge abutment", *J. Eng. Mech., Am. Soc. Civ. Eng.*, **126**(1), pp. 51-59 (2000).
7. Biglari, B. and Sturm, T.W. "Numerical modeling of flow around bridge abutments in compound channel", *J. Hydraul. Eng., Am. Soc. Civ. Eng.*, **124**(2), pp. 156-164 (1998).
8. Kandasamy, J.K. and Melville, B.W. "Maximum local scour depth at bridge piers and abutments", *J. Hydraul. Res.*, **36**(2), pp. 183-197 (1998).
9. Garde, R.J., Subramanya, K. and Nambudripad K.D. "Study of scour around spur-dikes", *J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, **87**, pp. 23-37 (1961).
10. Sturm, T.W. and Janjua, N.S. "Clear-water scour around abutments in floodplains", *J. Hydraul. Eng., Am. Soc. Civ. Eng.*, **120**(8), pp. 956-972 (1994).
11. Lim, S.Y. "Equilibrium clear-water scour around an abutment", *J. Hydraul. Eng., Am. Soc. Civ. Eng.*, **123**(3), pp. 237-243 (1997).
12. Richardson, J.E. and Panchang, V.G. "Three-dimensional simulation of scour-inducing flow at bridge piers", *J. Hydraul. Eng.*, **124**(5), pp. 530-540 (1998).
13. Dey, S., Chiew, Y.M. and Kadam, M.S. "Local scour and riprap stability at an abutment in a degrading bed", *J. Hydraul. Eng., ASCE*, **134**(10), pp. 1490-1502 (2008).
14. Teruzzi, A., Ballio, F. and Armenio, V. "Turbulent stresses at the bottom surface near an abutment: Laboratory-scale numerical experiment", *J. Hydraul. Eng., ASCE*, **135**(2), pp. 106-117 (2009).
15. Sui, J., Afzalimehr, H., Kabiri, S.A. and Maherani M. "Clear-water scour around semi-elliptical abutments with armored beds", *International J. Sediment Research*, **25**(3), pp. 233-244 (2010).
16. Koken, M. and Gogus, M. "Effect of abutment length on the bed shear stress and the horseshoe vortex system", International Conference on Fluvial Hydraulics, Braunschweig, Germany (2010).
17. Morales, R. and Ettema, R. "Insights from depth-averaged numerical simulation of flow at bridge abutments in compound channels", Department of Civil and Architectural Engineering university of wyoming Laramie, wy 82071, **701** (2011).
18. Bradford, S.F. "Numerical simulation of surf zone dynamics", *J. Waterw. Port. C., ASCE*, **126**(1), pp. 1-13 (2000).
19. Chopakatla, S.C. "A CFD model for wave transformations and breaking in the Surf Zone", MS. Thesis, The Ohio State University (2003).
20. Flow Science, Inc., FLOW-3D User's Manual. Flow Science, Inc., 8.0 edition (2002).
21. Smith, H.D. "Modeling the flow and scour around an immovable cylinder", MS thesis, The Ohio State University (2004).
22. Brethour, J. "Modeling sediment scour", Technical Document No. FSI-03-TN62, pp. 1-6 (2003).
23. Kayaturk, S.Y. "Scour and scour protection at bridge abutments". MS Thesis, The Middle East Technical University (2005).