

واسنجی پارامترهای حاکم بر مدل شیونو و نایت بمنظور تخمین تنش برشی در کانال‌های دوزنقه‌ای

بابک لشکرآرا^{۱*} و ایراندخت دهقانی^۲

^{۱*} - نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول

^۲ - دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی عمران دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول

تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۲/۲۷

تاریخ دریافت: ۹۳/۳/۱۷

چکیده

مدل شیونو و نایت برای تعیین توزیع عرضی سرعت متوسط عمقی و تنش برشی نیازمند واسنجی است. تحقیق حاضر در راستای تدقیق پارامترهای مؤثر بر واسنجی مدل شیونو و نایت در کانال‌های دوزنقه‌ای روباز تدوین شده است. انتخاب صحیح پارامترهای ضریب اصطکاک (f)، جریان ثانویه (Γ) و لزجت گردابی (λ) در تخمین دقیق توزیع عرضی تنش برشی نقش به‌سزایی دارند. برای این منظور از نتایج آزمایشگاهی محققین پیشین برای بهینه‌سازی پارامترهای سه‌گانه مذکور استفاده شد. برای این منظور سطح مقطع جریان با توجه به میزان نسبت ظاهری P_b/P_w ، به تعدادی زیربخش و سلول‌های جریان ثانویه تقسیم گردید و سپس با استفاده از روش بهینه‌سازی تکاملی، عملیات واسنجی پارامترهای ضریب اصطکاک (f)، جریان ثانویه (Γ) و لزجت گردابی (λ) در تعیین میزان تنش برشی در هر یک از زیربخش‌ها انجام گردید. نتایج حاکی از آن است که پارامتر ضریب زبری (f) به ازای مقادیر نسبت ظاهری بزرگتر از دو و پارامتر لزجت گردابی (λ) به ازای مقادیر P_b/P_w بزرگتر از شش مستقل از نسبت P_b/P_w می‌باشند. نتایج نشان داد که گرادیان تغییرات پارامترهای (f)، (λ) و (Γ) به ازاء نسبت ظاهری P_b/P_w کوچکتر از چهار، از افزایش نسبی شدیدی برخوردار است. هرچند که بررسی منابع پیشین حاکی از آن است که مقدار لزجت گردابی در مسائل کاربردی معادل 0.67 در نظر گرفته می‌شود ولی نتایج تحقیق حاضر نشان داد که برای واسنجی مدل شیونو و نایت مقدار پارامتر لزجت گردابی ثابت نبوده و در شرایط مختلف مقدار متناسب با شرایط مسئله را طلب می‌نماید. مقایسه نتایج تنش برشی بستر و جداره حاصل از تحقیق حاضر با نتایج آزمایشگاهی، حاکی از دقت مطلوب واسنجی پارامترهای (f)، (λ) و (Γ) می‌باشد.

کلید واژه‌ها: مدل شیونو و نایت، تنش برشی، جریان ثانویه، گردابه، کانال‌های دوزنقه‌ای.

Calibration of Shiono and Knight Model to Estimate Shear Stress for Trapezoidal Channel

B. Lashkar-Ara^{1*} and I. Dehghani²

^{1*} -Assistant Professor, Civil Engineering Department, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran

² -M.sc. student in Civil Engineering Department, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran

Received: 7 June 2014

Accepted: 18 March 2015

Abstract

Aim of this study is to calibrate Shiono and Knight model for better determination of shear and velocity distribution in trapezoidal open channels. To do this, correct estimation of friction factor (f), secondary current (Γ), and eddy viscosity (λ) is proposed as key affecting parameters. Available data in literature are used to optimize these three parameters. Using channel aspect ratio P_b/P_w , the channel subsections are selected. Non-dominated Sorting Genetic Algorithm is used to optimize the parameters and estimate shear and velocity distribution for each subsection. Results reveal that effects of friction factor and eddy viscosity are significant for aspect ratios of less than 2 and 6, respectively. Rate of change of the parameters with the aspect ratio show a considerable increase for aspect ratios of less than 4. In oppose to the literature for

suggestion of a constant eddy viscosity of 0.67, calibration of the Shiono and Knight model in this study showed a variable eddy viscosity for variable flow conditions. Comparison of the model and experimental results confirms correct estimation of the aforementioned parameters.

Keywords: Shiono and Knight Model, Shear stress, Secondary flow, Eddy viscosity, Trapezoidal channel

پیشنهادی خود گردیدند. این مدل با علامت اختصاری SKM

نمایش داده می‌شود. پارامترهایی هم‌چون ضریب اصطکاک (f)، لزجت گردابی عرضی (λ) و جریان ثانویه (Γ) در واسنجی نتایج این مدل نقش به‌سزایی بازی می‌نمایند. عدم انتخاب صحیح هر یک از این پارامترها منجر به تعیین غیر واقع‌گرایانه تنش برشی خواهد شد. شکل سطح مقطع جریان و نوع زبری آن از جمله عوامل مؤثر در نوع ساختار و شدت سلول‌های جریان ثانویه می‌باشند. عموماً به‌دلیل عدم آگاهی کامل از این نوع پارامترها، کاربران ملزم به استفاده از رابطه مانینگ و یا داریسی و بسپاخ برای تعیین مقاومت هیدرلیکی جریان می‌شوند.

شکل (۱) برگرفته از مطالعات شیونو و نایت (۱۹۹۱) می‌باشد که توسط نگارندگان تحقیق حاضر، اصلاحاتی در آن اعمال شده تا با اهداف تحقیق همسو گردد. در شکل (۲) نمایی از اندرکنش سلول‌های جریان ثانوی و توزیع عرضی تنش برشی را در کانالی با مقطع دوزنقه‌ای به تصویر کشیده است که حاصل تحقیقات نایت و همکاران (۱۹۹۴) می‌باشد.

مدل شیونو و نایت (۱۹۹۱) مانند بسیاری از روش‌های مشابه دیگر، بر اساس معادله‌های ناویر استوکس متوسط‌گیری شده رینولدز استوار است که در شرایط جریان یکنواخت ماندگار به‌صورت زیر بیان می‌شود.

$$\begin{aligned} \rho g H S_o - \rho \frac{f}{8} U_d^2 \sqrt{1 + \frac{1}{S^2}} \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \lambda H^2 \sqrt{\frac{f}{8}} U_d \frac{\partial U_d}{\partial y} \right) \\ = \frac{\partial}{\partial y} [H (\rho UV)_d] = \Gamma \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن (ρ) دانسیته آب، (g) شتاب ثقل، (H) عمق آب، (S_o) شیب کف بستر، (U_d) متوسط عمقی سرعت و (S) شیب جانبی، (U) و (V) متوسط مولفه‌های سرعت در راستای طولی x و عرضی y می‌باشند. پارامترهای (f) و (λ) به‌ترتیب ضریب زبری داریسی، لزجت گردابی بدون بعد و (Γ) معرف جریان ثانویه می‌باشد. شیونو و نایت (۱۹۸۸) فرض کردند که مقاطع عرضی می‌توانند به‌چندین مقطع کوچک با دامنه عمق ثابت و دامنه شیب جانبی تقسیم شوند. این تقسیم‌بندی در شکل (۳) نمایش داده شده است.

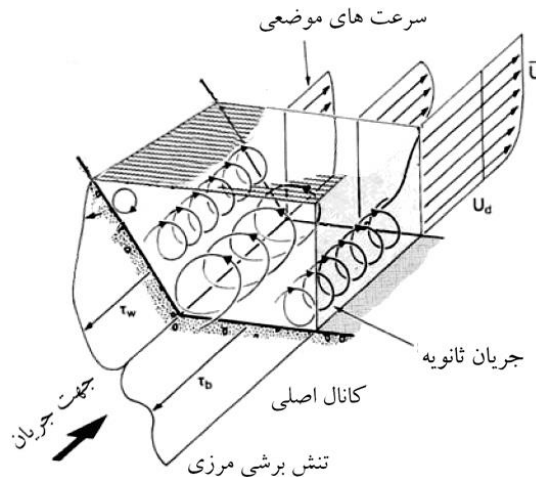
مقدمه

امروزه به واسطه اهمیت منابع آب و افزایش بهره‌وری از آن، شناخت و بررسی جریان در سیستم‌های انتقال آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. آگاهی از چگونگی توزیع عرضی سرعت در مجاری انتقال آب روباز یکی از مسائل چالش برانگیز در طراحی این گونه سیستم‌ها می‌باشد. توزیع تنش برشی و پروفیل سرعت عمقی از مشخصه‌های مهم هیدرولیکی در کانال‌های روباز می‌باشند که آگاهی از چگونگی توزیع آنها می‌تواند در مطالعه پیرامون آشفتگی جریان و انتقال رسوب مفید واقع شود. تبادل ممتد بین بخش‌های مختلف جریان به‌صورت گردابه و جریان‌های ثانویه ظاهر می‌شوند (شیونو و نایت^۱، ۱۹۹۱). یکی از دلایل عمده تغییر شکل مقطع جریان در مجاری روباز و کاهش ظرفیت انتقال آنها را می‌توان به ایجاد سلول‌های جریان ثانوی نسبت داد. علاوه بر آن این عامل می‌تواند بستر رویش علف‌های هرز را نیز فراهم آورد. جریان‌های ثانویه نقش مؤثری در انتقال رسوب یک سیستم رودخانه بازی می‌کند. شناخت بهتر این پارامترها می‌تواند در تشخیص میزان فرسایش پذیری دیواره سیل‌بندها، رسوبگذاری در مسیر رودخانه و همچنین تغییرات زمانی ریخت‌شناسی رودخانه و نیز بهبود شرایط زیست محیطی مؤثر باشد.

نخستین بار شیونو و نایت (۱۹۸۸) یک مدل ریاضی شبه دوجدی را بر اساس انتگرال‌گیری در عمق از معادلات ناویر-استوکس و حل تحلیلی آن ارائه نمودند. این مدل با حذف اثر جریان ثانویه قادر است توزیع عرضی سرعت و تنش برشی کف کانال در مقطع مرکب را مدل‌سازی نماید. شایان توجه است که به‌دلیل حذف اثر جریان‌های ثانویه، هرچند که این مدل توزیع عرضی سرعت را به خوبی شبیه‌سازی می‌نماید ولی توزیع عرضی تنش برشی مرزی را با خطای زیادی تخمین می‌زند.

شیونو و نایت (۱۹۹۱) در مطالعات خود نشان دادند که چند سری جریان ثانویه حلزونی^۲ در راستای طولی کانال اصلی و دیواره‌های جانبی آن شکل می‌گیرد (شکل ۱). این دوران‌های طولی^۳ در تمامی جریان‌های متلاطم ظاهر می‌شوند و می‌توانند باعث اختلال در توزیع تنش برشی بستر و نیز الگوی نقاط هم‌سرعت^۴ شوند (شکل ۲). مطابق با مطالعات شیونو و نایت (۱۹۹۱) وجود گرادیان سرعت و تنش برشی بستر بین زیربخش‌های مختلف آبراهه، باعث ایجاد مکانیزم گردابه‌هایی در بین فصل مشترک آنها شود. شیونو و نایت (۱۹۹۱) با اعمال اثر جریان‌های ثانوی موفق به اصلاح مدل

- 1 -Shiono and Knight
- 2 -Helical secondary flows
- 3 -Longitudinal vorticity
- 4 -Isovels



شکل ۱- نمایی از جریان ثانویه حلزونی، پروفیل عرضی تنش برشی و پروفیل سرعت در کانال با سطح مقطع دوزنقه‌ای

$$\eta = -\frac{\Gamma}{\frac{(1+s^2)^{1/2}}{s} \rho (f/8)} \quad (9)$$

$$\xi = H \pm \frac{y+b}{s} \quad (10)$$

ضرائب A_1 الی A_4 ثابت‌های معادله‌ها می‌باشند که با استفاده از شرایط مرزی مربوطه محاسبه می‌گردند. هنگامی که سطح مقطع آبراهه به زیر بخش‌های مختلفی تقسیم شود، با بهره‌گیری از شرایط مرزی مناسب می‌توان به مجموعه‌ای از معادله‌های خطی دست یافت که در آنها ضرائب معادله‌های (۲) و (۶) مجهول می‌باشند. از این‌رو محاسبه تنش برشی مرزی با استفاده از مقادیر (U_d) و (f) امکان پذیر خواهد بود. معادله‌های (۲) و (۶) به سادگی برای هر سطح مقطعی قابل حل می‌باشند. یک تخمین واقع گرایانه توسط مدل SKM به طور مستقیم به انتخاب مناسب پارامترهای (f) ، (λ) و (Γ) برای هر زیربخش بستگی دارد.

بر اساس مطالعات نایت و همکاران (۲۰۰۷) در کانال‌های دوزنقه‌ای به ازای نسبت‌های ظاهری $2h/b > 2.2$ پنج زیر بخش و به ازای نسبت‌های ظاهری $2h/b < 2.2$ چهار زیر بخش تشکیل می‌گردد. فرضیه آنان در راستای تشکیل جریان‌های ثانویه حلزونی در هریک از زیر بخش‌های مفروض در شکل‌های (۴) و (۵) نمایش داده شده‌اند. در شکل‌های یاد شده پارامتر b' نشانگر نصف عرض مجرای ناحیه با بستر مسطح و پارامتر b'' نشانگر عرض ناحیه با دیواره شیبدار است.

شیونو و نایت (۱۹۹۱) یک راه حل تحلیلی برای حل معادله (۱) ارائه نمودند که برای یک کانال با عمق ثابت بصورت زیر می‌باشند:

$$U_d = (A_1 e^{\gamma y} + A_2 e^{-\gamma y} + k)^{1/2} \quad (2)$$

که در آن

$$k = \frac{8gS_0H}{f} (1-\beta) \quad (3)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{2}{\lambda}} \left(\frac{f}{8}\right)^{1/4} \frac{1}{H} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{\Gamma}{\rho g S_0 H} \quad (5)$$

و برای محدوده سطوح شیبدار با شیب جانبی S روابطی به صورت زیر ارائه گردید:

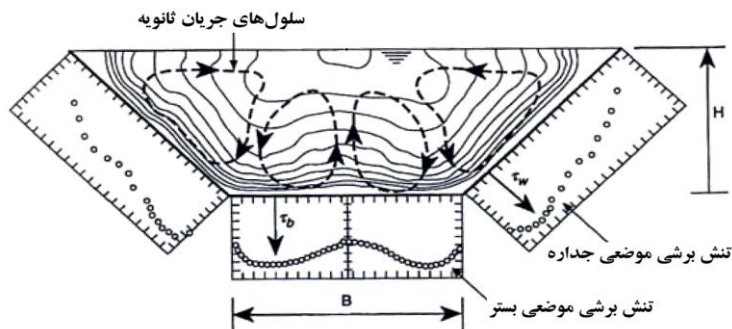
$$U_d = (A_3 \xi^\alpha + A_4 \xi^{-\alpha-1} + \omega \xi + \eta)^{1/2} \quad (6)$$

که در آن

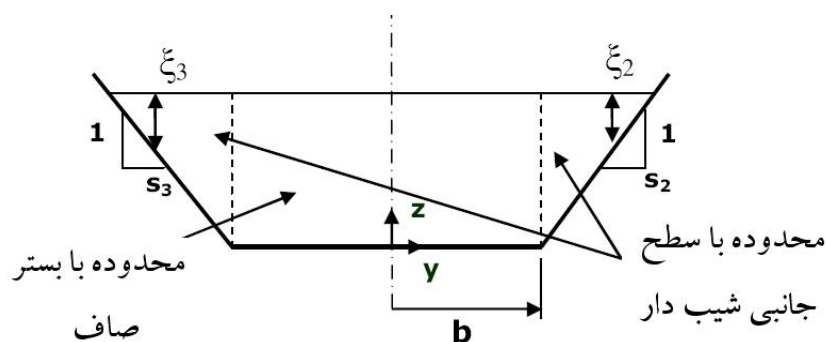
$$\alpha = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{s(1+s^2)^{1/2}}{\lambda} (8f)^{1/2}} \quad (7)$$

$$\omega = \frac{g S_0}{\frac{(1+s^2)^{1/2}}{s} (f/8) - \frac{\lambda}{s^2} (f/8)^{1/2}} \quad (8)$$

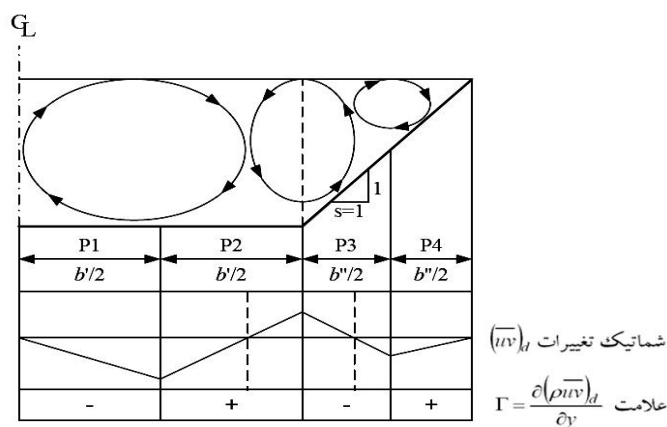
لشکر آرا و دهقانی: واسنجی پارامترهای حاکم بر مدل شیونو...



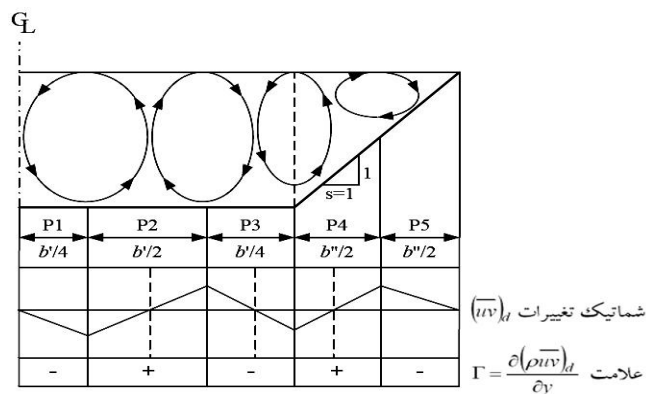
شکل ۲- اندرکنش سلول‌های جریان ثانویه و توزیع عرضی تنش برشی در تحقیقات نایت و همکاران (۱۹۹۴)



شکل ۳- محدوده‌های بستر صاف و سطوح شیب دار در مطالعات شیونو ونایت (۱۹۸۸)



شکل ۴- تعداد قطعات و علامت جریان ثانویه (Γ) برای یک کانال دوزنقه‌ای ساده به ازای $2b/h < 2.2$



شکل ۵- تعداد قطعات و علامت جریان ثانویه (Γ) برای یک کانال دوزنقه‌ای ساده به ازای $2b/h > 2.2$

اژدری مقدم و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی نسبت به مدل سازی جریان‌های ثانویه در کانال‌های دوزنقه‌ای اقدام نمودند. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که شبیه سازی سلول‌های جریان ثانویه با استفاده از نرم افزار ANSYS CFX با نتایج آزمایشگاهی تطابق مطلوبی نشان می‌دهد.

به دلیل وجود حساسیت مدل SKM به ضریب اصطکاک (f)، لزجت گردابی عرضی (λ) و جریان ثانویه (Γ) ارائه یک الگوی صحیح از روند تغییرات این پارامترها ضروری به نظر می‌رسد. لذا تحقیق حاضر از دو جنبه دارای اهمیت است. در مرحله اول به شناخت گردابه‌های تشکیل شده در مقاطع دوزنقه‌ای با بستر صاف هیدرولیکی پرداخته شده است و در مرحله دوم با انجام واسنجی مدل شیونو و نایت (۱۹۹۱) نسبت به افزایش دقت مدل مذکور در تخمین متوسط توزیع تنش برشی بستر و جداره مبادرت ورزیده شده است. در این راستا از نتایج آزمایشگاهی موسسه کانال سیل بریتانیا^۱ برای واسنجی پارامترهای مؤثر در مدل شبه دوزنقه‌ای شیونو و نایت (۱۹۹۱) بهره‌گیری شده است. سپس با استفاده از نتایج آزمایشگاهی لشکرآرا و همکاران (۱۳۹۰) نسبت به صحت سنجی نتایج اقدام شده است.

بررسی منابع علمی حاکی از آن است که مطالعات انجام شده پیرامون چگونگی ساختار و روند تغییرات سلول جریان‌های ثانویه، لزجت گردابی و مقاومت هیدرولیکی جریان در پیرامون کانال‌های دوزنقه‌ای صورت نگرفته است. لذا بهینه سازی الگوی تغییرات پارامترهای (f)، (λ) و (Γ) در این دسته کانال‌ها به عنوان نوآوری تحقیق حاضر به‌شمار می‌رود.

مواد و روش‌ها

هدف از تحقیق حاضر فراهم آوردن شرایط لازم برای تخمین پارامترهای (f)، (λ) و (Γ) برای هر زیربخش به ازای نسبت‌های مختلف ظاهری P_b/P_w می‌باشد که در آن P_b و P_w به ترتیب معرف محیط مرطوب بستر و جداره می‌باشند. برای این منظور از نتایج حاصل از تحقیقات موسسه کانال سیل بریتانیا استفاده شده است. در این راستا با تشکیل معادلات تحلیلی شیونو و نایت (۱۹۹۱) و تعیین شرایط مرزی حاکم بر هر یک از زیر بخش‌ها نسبت به بهینه‌سازی پارامترهای (f)، (λ) و (Γ) در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی اقدام گردید. معادله‌های (۱۱) و (۱۲) بترتیب نشانگر ماتریس ضرائب مجهول در کانال دوزنقه‌ای با چهار و پنج قطعه می‌باشد.

علاوه بر مطالعات شیونو و نایت در زمینه تعیین توزیع عرضی سرعت و تنش برشی مطالعات متعددی بصورت آزمایشگاهی و عددی صورت گرفته است. لامبرت و سلین^۱ (۱۹۹۶) مدلی شبه دوزنقه‌ای بر اساس طول اختلاط پراوتل برای حل توزیع عرضی سرعت در مقاطع مرکب ارائه نمودند. این مدل تنها به‌صورت محدود در چند مقطع مرکب آزمایشگاهی کاربرد داشته است. اروین و همکاران^۲ (۲۰۰۰) مدل ریاضی شبه دوزنقه‌ای تحلیل مشابه مدل شیونو و نایت (۱۹۹۱) برای مقاطع مرکب مستقیم و پیچانرود ارائه نمودند. نتایج واسنجی و کاربرد این مدل ریاضی نشان داد که اثر جریان‌های ثانویه در مقاطع مرکب آزمایشگاهی با مسیر پیچانرود حدود ۱۰ برابر مقدار متناظر آن در مقاطع مرکب با مسیر مستقیم می‌باشد.

ایوب زاده و ظهیری (۱۳۸۲) به تحقیق پیرامون محدودیت حل تحلیل مدل شیونو و نایت (۱۹۸۸) در مقاطع مرکب پرداختند. آنان ابراز داشتند که نتایج این مدل به دلیل فرض تقارن جریان در محور مرکزی کانال، در بعضی از مقاطع مرکب با ایجاد ناپوستگی در توزیع عرضی سرعت همراه می‌باشد. آنان با در نظر گرفتن کل سطح مقطع و با اعمال تغییر جزئی در شرایط مرزی توانستند به نتایج مناسبی جهت رفع این محدودیت دست یابند.

عمران و همکاران^۳ (۲۰۰۷) هیدرولیک جریان و رسوب مقاطع ساده مستطیلی را با مدل ریاضی شیونو و نایت (۱۹۹۱) مورد بررسی قرار دادند. نتایج این بررسی نشان داد که مدل یاد شده قابلیت مدل سازی جریان و رسوب معلق را بصورت هم زمان دارد. ظهیری و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از حل عددی تفاضل‌های محدود مدل ریاضی شیونو و نایت (۱۹۸۸)، بدون اعمال اثر جریان‌های ثانویه، توزیع عرضی سرعت در رودخانه کارون (ایستگاه هیدرومتری ملاثانی) را با احتساب زبری ثابت برای کل عرض رودخانه شبیه سازی نمودند. فغفور مغربی و گیوه چی (۱۳۸۹) با استفاده از مدل شیونو و نایت (۱۹۹۱) نسبت به تعیین متوسط سرعت عمقی و تنش برشی در کانال‌های مثلثی باز اقدام نمودند. آنان نشان دادند که استفاده از فرضیه‌های مرسوم هیدرولیکی نتایج غیرقابل قبولی از تخمین سرعت متوسط عمقی و تنش برشی در کانال‌های مثلثی ارائه می‌نماید. نتایج تحقیقات آنان منجر به واسنجی پارامترهای ضریب اصطکاک و مؤلفه جریان ثانویه در کانال‌های مثلثی گردید.

شریفی (۲۰۰۹) در رساله دکتری خود با استفاده از محاسبات تکاملی نسبت به شبیه سازی جریان در کانال‌های روباز اقدام نمود.

هو و همکاران^۴ (۲۰۱۰) با ارائه یک مدل ریاضی شبه دوزنقه‌ای، توزیع عرضی سرعت و تنش برشی در یک مقطع مرکب مستطیلی را مورد بررسی قرار دادند.

1 - Lambert and Sellin

2 - Ervine *et al.*

3 - Omran *et al.*

4 - Hu *et al.*

لشکر آرا و دهقانی: واسنجی پارامترهای حاکم بر مدل شیونو...

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (H/2)^{\alpha_3} & (H/2)^{-(\alpha_3+1)} & -(H/2)^{\alpha_4} & -(H/2)^{-(\alpha_4+1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_3 \alpha_3 (H/2)^{(\alpha_3-1)} & -\mu_3 (\alpha_3 + 1) (H/2)^{-(\alpha_3+2)} & -\mu_4 \alpha_4 (H/2)^{(\alpha_4-1)} & \mu_4 (\alpha_4 + 1) (H/2)^{-(\alpha_4+2)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{7pb} & e^{-7pb} & -H^{\alpha_3} & -H^{-(\alpha_3+1)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\mu_2 \gamma_2 S e^{7pb} & \mu_2 \gamma_2 S e^{-7pb} & -\mu_3 \alpha_3 H^{(\alpha_3-1)} & \mu_3 (\alpha_3 + 1) H^{-(\alpha_3+2)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e^{\gamma_1(b/2)} & e^{-\gamma_1(b/2)} & -e^{-\gamma_1(b/2)} & -e^{-\gamma_1(b/2)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_1 \gamma_1 e^{\gamma_1(b/2)} & -\mu_1 \gamma_1 e^{-\gamma_1(b/2)} & -\mu_2 \gamma_2 e^{\gamma_2(b/2)} & \mu_2 \gamma_2 e^{-\gamma_2(b/2)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \\ A_7 \\ A_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ (H/2)(\omega_4 - \omega_3) + \eta_4 - \eta_3 \\ \mu_4 \omega_4 - \mu_3 \omega_3 \\ \omega_3 H + \eta_3 - k_2 \\ \mu_3 \omega_3 \\ k_2 - k_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (H/2)^{\alpha_4} & (H/2)^{-(\alpha_4+1)} & -(H/2)^{\alpha_5} & -(H/2)^{-(\alpha_5+1)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_4 \alpha_4 (H/2)^{(\alpha_4-1)} & -\mu_4 (\alpha_4 + 1) (H/2)^{-(\alpha_4+2)} & -\mu_5 \alpha_5 (H/2)^{(\alpha_5-1)} & \mu_5 (\alpha_5 + 1) (H/2)^{-(\alpha_5+2)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{7pb} & e^{-7pb} & -H^{\alpha_4} & -H^{-(\alpha_4+1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_2 \gamma_2 S e^{7pb} & \mu_2 \gamma_2 S e^{-7pb} & -\mu_4 \alpha_4 H^{(\alpha_4-1)} & \mu_4 (\alpha_4 + 1) H^{-(\alpha_4+2)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{\gamma_2(3b/4)} & e^{-\gamma_2(3b/4)} & -e^{-\gamma_2(3b/4)} & -e^{-\gamma_2(3b/4)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_2 \gamma_2 e^{\gamma_2(3b/4)} & -\mu_2 \gamma_2 e^{-\gamma_2(3b/4)} & -\mu_2 \gamma_2 e^{\gamma_2(3b/4)} & \mu_2 \gamma_2 e^{-\gamma_2(3b/4)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e^{\gamma_1(b/4)} & e^{-\gamma_1(b/4)} & -e^{-\gamma_1(b/4)} & -e^{-\gamma_1(b/4)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_1 \gamma_1 e^{\gamma_1(b/4)} & -\mu_1 \gamma_1 e^{-\gamma_1(b/4)} & -\mu_2 \gamma_2 e^{\gamma_2(b/4)} & \mu_2 \gamma_2 e^{-\gamma_2(b/4)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \\ A_5 \\ A_6 \\ A_7 \\ A_8 \\ A_9 \\ A_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ (H/2)(\omega_5 - \omega_4) + \eta_5 - \eta_4 \\ \mu_5 \omega_5 - \mu_4 \omega_4 \\ \omega_4 H + \eta_4 - k_3 \\ \mu_4 \omega_4 \\ k_3 - k_2 \\ k_2 - k_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

هدفه می باشد. برای این منظور در ادامه نسبت به تشریح نحوه عملکرد الگوریتم ژنتیک چند هدفه با مرتب سازی غیرغالب^۱ پرداخته شده است. الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی غیر غالب یکی از الگوریتم‌های شاخص و پر کاربرد در زمینه بهینه سازی چند هدفه می‌باشد. دب (۱۹۹۹) این روش را برای حل مسائل بهینه سازی چند هدفه معرفی نمودند. دب و همکاران (۲۰۰۲) نسخه دوم الگوریتم ژنتیک چند هدفه با مرتب سازی غیر غالب را ارائه کردند. نسخه دوم این الگوریتم یکی از پرکاربردترین قدرتمندترین الگوریتم‌های موجود برای حل مسائل بهینه سازی چند هدفه است و کارایی آن در حل مسائل مختلف، به اثبات رسیده است. توانایی این الگوریتم در برخورد با مسائل بهینه سازی چند هدفه، توسط محققین پیشین به اثبات رسیده است. بدون شک این الگوریتم یکی از اساسی ترین اعضای کلکسیون الگوریتم بهینه سازی چندهدفه تکاملی است که می‌توان آنها را نسل دوم این گونه روش‌ها نامید. ویژگی‌های عمده این الگوریتم عبارتند از:

- تعریف فاصله تراکمی^۲ به عنوان ویژگی جایگزین برای شیوه‌هایی مانند اشتراک برزندگی
- استفاده از عملگر انتخاب تورنمنت دو-دویی
- ذخیره و آرشیو کردن جواب‌های نامغلوب که در مراحل قبلی الگوریتم به دست آمده اند (نخبه گرایی)
- در نسخه دوم الگوریتم ژنتیک چند هدفه با مرتب سازی غیر غالب از میان جواب‌های هر نسل، تعدادی از آن‌ها با استفاده از روش انتخاب تورنمنت دودویی انتخاب می‌شوند. در روش انتخاب دودویی، دو جواب به تصادف از میان جمعیت انتخاب شده و از مقایسه این دو پاسخ هر کدام که بهتر باشد، نهایتاً انتخاب

برای بهینه سازی پارامترهای (f) ، (λ) و (Γ) برای هر زیربخش توابع هدف اولیه به صورت معادله‌های (۱۳) و (۱۴) تعریف گردید:

$$f_1(X) = \min \sum_{i=1}^N ((U_{d-SKM})_i - (U_{d-Exp})_i)^2 \quad (13)$$

$$f_2(X) = \min \sum_{i=1}^N ((\tau_{b-SKM})_i - (\tau_{b-Exp})_i)^2 \quad (14)$$

$$f_3(X) = \min \left| \frac{Q_{Exp.Total} - Q_{SKM.Total}}{Q_{Exp.Total}} \right| \times 100 \quad (15)$$

$$f_4(X) = \min \left| \frac{(\tau_b)_{Exp.Total} - (\tau_b)_{SKM.Total}}{(\tau_b)_{Exp.Total}} \right| \times 100 \quad (16)$$

که در آنها $X = (f_1, \lambda_1, \Gamma_1, \dots, f_N, \lambda_N, \Gamma_N)$ و N تعداد زیر بخش‌ها می‌باشد.

با توجه به تجزیه و تحلیل صورت گرفته در نتایج آزمایشگاهی الحمید (۱۹۹۱) و یوان (۱۹۸۹) محدوده متغیرهای مسئله در بستر صاف هیدرولیکی به ترتیب $0.005 \leq f_i \leq 0.01$ ، $-3.5 \leq \Gamma_i \leq 3.5$ ، $0.005 \leq \lambda_i \leq 2.5$ تعیین گردید. سپس با استفاده از روش بهینه سازی تکاملی توابع هدف معرفی شده بهینه شدند. از آنجایی که توابع $f_1(X)$ با $f_3(X)$ و هم چنین توابع $f_2(X)$ با $f_4(X)$ از آهنگ و جنس تغییرات هم‌سویی برخوردارند لذا بهینه سازی مورد نظر در واقع یک بهینه سازی دو

1- Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
2- Crowding distance

$$\bar{\tau}_w = \frac{-0.011 + 2.133(B/H)}{\gamma H S \left(1 + 3.07(B/H) + 0.021(B/H)^{0.021} \right)} \quad (18)$$

نتایج

همان‌طوری که در بخش مواد و روش‌ها بدان اشاره شد برای بهینه‌سازی پارامترهای موثر در مدل SKM از نتایج آزمایشگاهی موسسه کانال سیل بریتانیا استفاده شده است. در این میان از نتایج رساله دکتری الحمید (۱۹۹۱) و رساله دکتری یوان (۱۹۸۹) که تحقیقات خود را در کانال دوزنقه‌ای از جنس پلکسی گلاس به انجام رسانده بودند استفاده گردید.

گزینه‌های مورد استفاده جهت عملگرهای تعداد جمعیت، تعداد نسل، احتمال تقاطع و شاخص توزیع تقاطع در الگوریتم ژنتیک چند هدفه مورد استفاده در این تحقیق در جدول (۱) خلاصه شده است. نتایج تجمعی جبهه‌های پاراتو حاصل از الگوریتم ژنتیک چند هدفه با مرتب‌سازی نامغلوب در راستای بهینه‌سازی توابع هدف معرفی شده در تحقیق حاضر در شکل (۷) به نمایش گذاشته شده است. در شکل (۸) محدوده راه حل‌های قابل قبول در مقابل جبهه بهینه براساس مقدار توابع هدف ارائه شده در روابط (۱۵) و (۱۶) جهت تخمین دبی و تنش برشی با خطای میانگین کمتر از پنج درصد به نمایش گذاشته شده است.

با استفاده از قالب واسنجی انجام شده، ارزش انفرادی هر یک از پارامترهای ضریب زبری، لزجت گردابی بدون بعد و پارامتر جریان ثانویه در هر یک از زیر بخش‌ها تعیین گردید. شکل‌های (۹) الی (۱۴) نحوه تغییر پارامترهای (f) ، (λ) و (F) را در مقایسه با نسبت P_f/P_w در هر یک از قطعات مفروض پس از عملیات بهینه‌سازی را نمایش می‌دهند.

همان‌طوری که بخش مواد و روش‌ها بدان اشاره شد برای صحت سنجی نتایج واسنجی از نتایج تحقیقات لشکرآرا و همکاران (۱۳۹۰) استفاده شده است. ایشان با انجام آزمایش‌های متعددی در اندازه‌گیری مستقیم و غیر مستقیم تنش برشی و چگونگی توزیع آن در پیرامون محیط مرطوب کانال‌های منشوری صاف و زبر تحقیقات گسترده‌ای را انجام داده‌اند.

برای فراهم ساختن بستری مناسب به منظور صحت سنجی نتایج لازم است تا تغییراتی در شکل ساختار معادله‌های داده شود. برای این منظور از فرمول ضریب زبری داری بهره‌گیری شده است. با استفاده از مفهوم ضریب مقاومت داری و بسپاخ می‌توان نوشت:

$$f = 8 \frac{\tau_o}{\rho U_d^2} \quad (19)$$

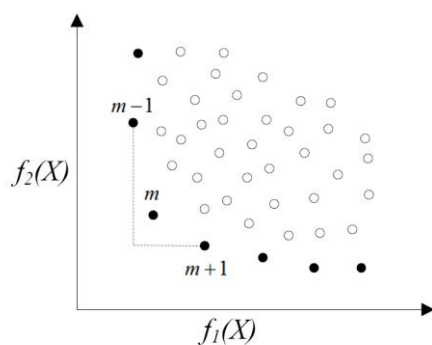
می‌شود. معیارهای انتخاب در این الگوریتم در درجه اول، رتبه جواب و در درجه دوم فاصله تراکمی مربوط به جواب است. هر چه قدر رتبه جواب کمتر باشد و دارای فاصله تراکمی بیشتری باشد، از درجه مطلوب تری برخوردار است. با تکرار عملگر انتخاب دودویی بر روی جمعیت هر نسل، مجموعه‌ای از افراد آن نسل برای شرکت در تقاطع^۱ و جهش^۲ انتخاب می‌شوند. بر روی بخشی از مجموعه افراد انتخاب شده، عمل تقاطع و بر روی بقیه، عمل جهش انجام می‌شود و جمعیتی از فرزندان و جهش یافتگان ایجاد می‌شود. در ادامه، این جمعیت با جمعیت اصلی ادغام می‌شود. اعضای جمعیت تازه تشکیل یافته، ابتدا برحسب رتبه و به صورت صعودی مرتب می‌شوند. اعضای از جمعیت، که دارای رتبه یکسانی هستند، برحسب فاصله تراکمی و به صورت نزولی مرتب می‌شوند. حال اعضای جمعیت در درجه اول بر حسب رتبه، و در درجه دوم بر حسب فاصله تراکمی مرتب‌سازی شده‌اند. برابر با تعداد افراد جمعیت اصلی، اعضای از بالای فهرست مرتب شده انتخاب می‌شوند و بقیه اعضای جمعیت دور ریخته می‌شوند. اعضای انتخاب شده، جمعیت نسل بعدی را تشکیل می‌دهند و چرخه مذکور در این بخش تا محقق شدن شرایط خاتمه، تکرار می‌شود. جواب‌های نامغلوب به دست آمده از حل مسأله بهینه‌سازی چند هدفه، غالباً به نام جبهه پارتو^۳ شناخته می‌شوند. هیچ کدام از جواب‌های جبهه پاراتو، بر دیگری ارجحیت ندارند و بسته به شرایط، می‌توان هر کدام را به عنوان یک تصمیم بهینه در نظر گرفت. شکل ۶ نمونه‌ای از جبهه پاسخ‌های بهینه را در یک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی دو هدفه نمایش می‌دهد. در این شکل m یک انتخاب تصادفی از درون جمعیت می‌باشد.

پس از بهینه‌سازی پارامترهای ضریب زبری، لزجت گردابی بدون بعد و پارامتر جریان ثانویه لازم است تا مدل بهینه شده صحت سنجی گردد. برای این منظور از نتایج آزمایشگاهی تحقیقات لشکرآرا و همکاران (۱۳۹۰) استفاده شده است. ایشان در مطالعات آزمایشگاهی خود نسبت به اندازه‌گیری تنش برشی در بستر و جداره کانال‌های منشوری با استفاده از ابزار دقیق اقدام نمودند. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که با استفاده از روابط (۱۷) و (۱۸) می‌توان تنش برشی بدون بعد بستر $\bar{\tau}_b/\gamma H S$ و جداره $\bar{\tau}_w/\gamma H S$ را در کانال‌های دوزنقه‌ای با شیب جانبی ۱:۱ با دقت مناسبی تقریب زد. معادله‌های (۱۷) و (۱۸) ملاک صحت سنجی نتایج حاصل از بهینه‌سازی پارامترهای ضریب زبری، لزجت گردابی بدون بعد و پارامتر جریان ثانویه در تحقیق حاضر می‌باشند.

$$\frac{\bar{\tau}_b}{\gamma H S} = \frac{17.6828 - 14.1357(B/H)^{-0.0486}}{6.1932 \times (B/H)^{-0.0486}} \quad (17)$$

- 1- Crossover
- 2- Mutation
- 3- Pareto front

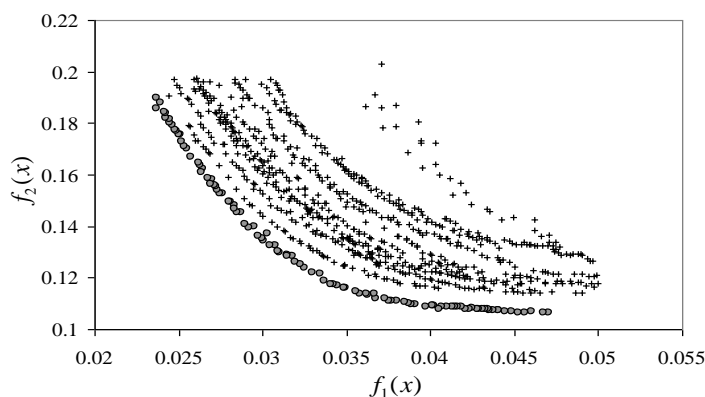
لشکر آرا و دهقانی: واسنجی پارامترهای حاکم بر مدل شیونو...



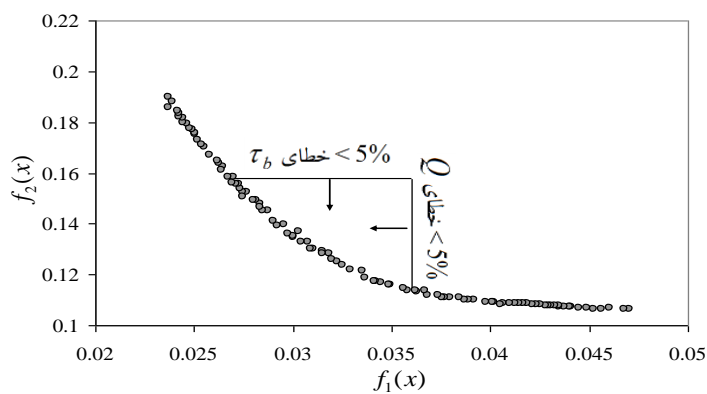
شکل ۶- نمونه ای از جبهه پاسخ های بهینه (جبهه پاراتو) در الگوریتم بهینه سازی تکاملی دو هدفه

جدول ۱- گزینه های مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک چند هدفه با مرتب سازی نامغلوب

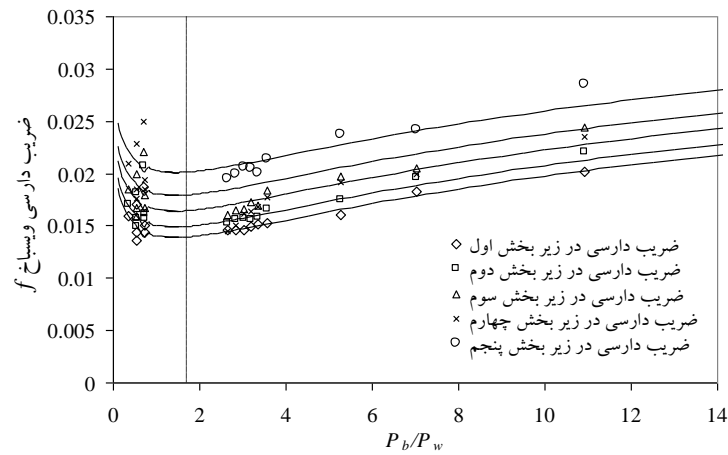
عملگر	نشانه	داوطلب	گزینه های مطرح شده
تعداد جمعیت	pop	۳	۵۰۰ ، ۳۰۰ ، ۱۰۰
تعداد نسل ها	gen	۳	۷۰۰ ، ۵۰۰ ، ۳۰۰
احتمال تقاطع	Pc	۳	۰/۹ ، ۰/۷ ، ۰/۵
شاخص توزیع تقاطع	η_c	۳	۳۰ ، ۲۰ ، ۱۰



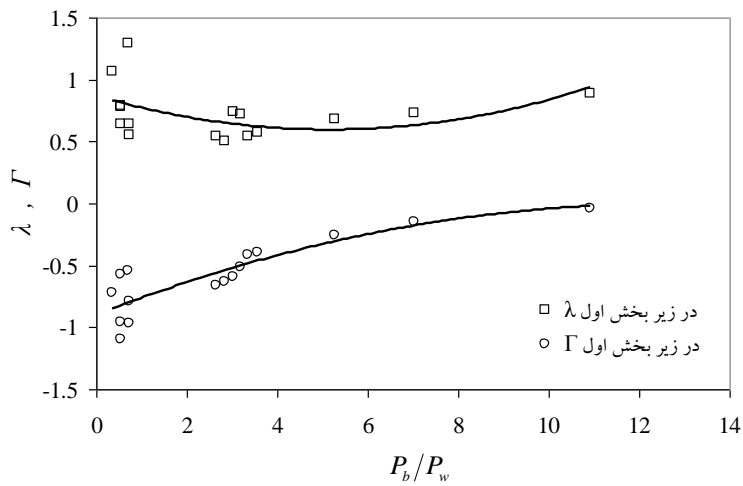
شکل ۷- نمایش تجمعی کلیه راه حل ها در بهینه سازی توابع $f_1(X)$, $f_2(X)$ و نمایش جبهه بهینه



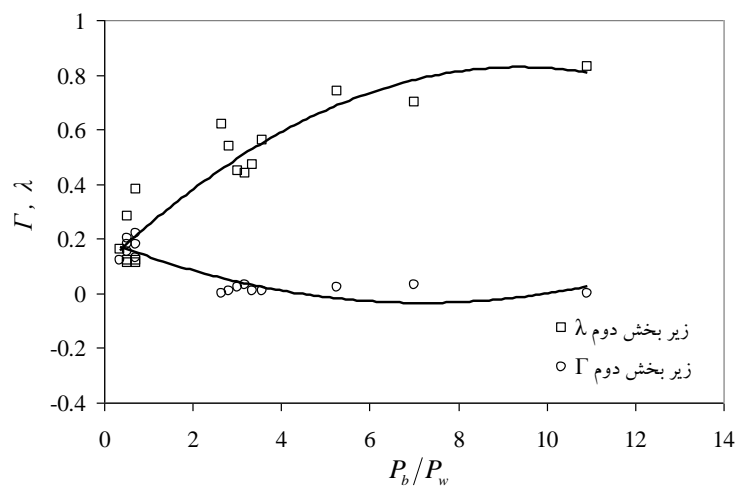
شکل ۸- انتخاب راه حل های قابل قبول در مقابل جبهه بهینه براساس مقدار توابع هدف ارائه شده در روابط (۱۵) و (۱۶)



شکل ۹- تخمین مقادیر ضریب زبری f داری در هر یک از زیر بخش‌های نشان داده شده در شکل‌های (۴) و (۵)

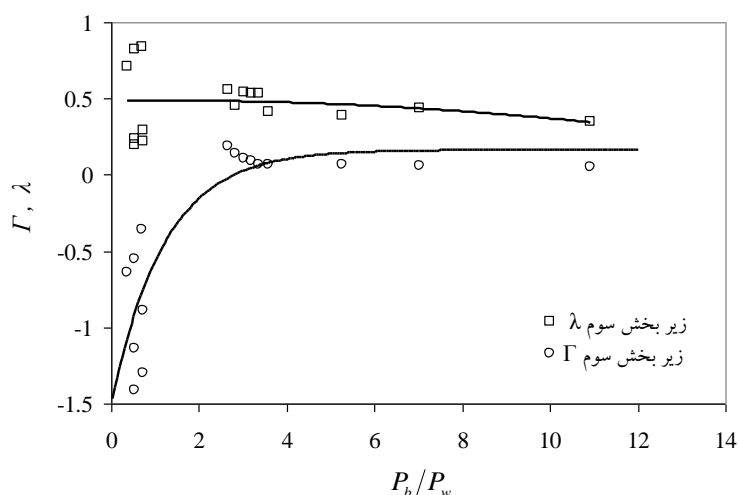


شکل ۱۰- تغییرات پارامتر لزجت گردابی λ و جریان ثانویه Γ در مقابل تغییرات P_b/P_w در زیر بخش شماره یک

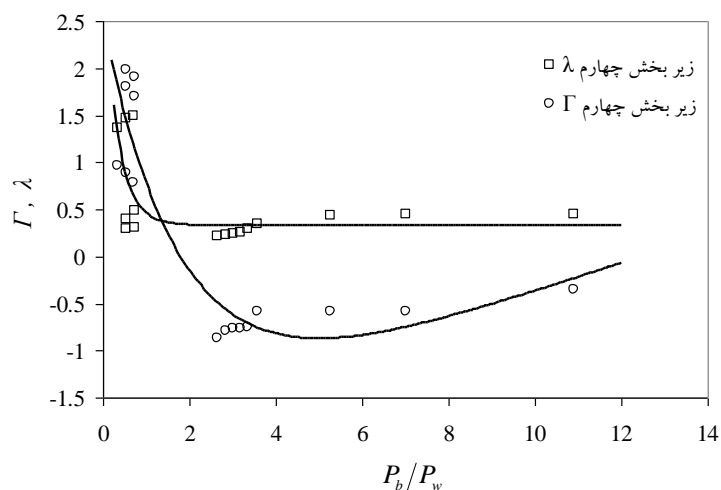


شکل ۱۱- تغییرات پارامتر لزجت گردابی λ و جریان ثانویه Γ در مقابل تغییرات P_b/P_w در زیر بخش شماره دو

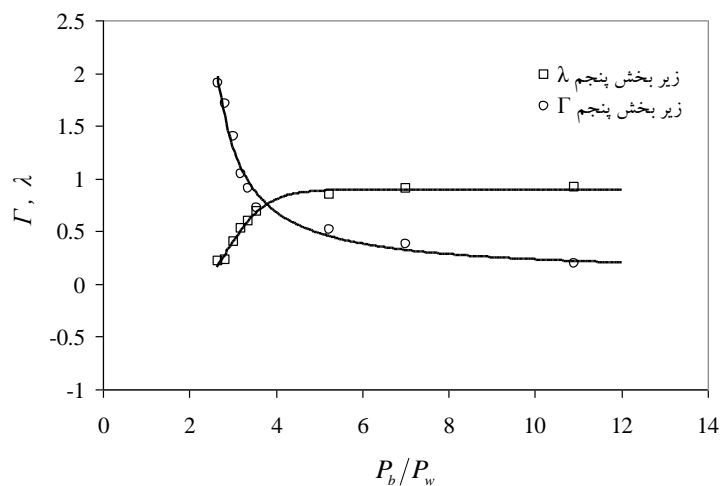
لشکرآرا و دهقانی: واسنجی پارامترهای حاکم بر مدل شیونو...



شکل ۱۲- تغییرات پارامتر لزجت گردابی λ و جریان ثانویه Γ در مقابل تغییرات P_b/P_w در زیر بخش شماره سه



شکل ۱۳- تغییرات پارامتر لزجت گردابی λ و جریان ثانویه Γ در مقابل تغییرات P_b/P_w در زیر بخش شماره چهار



شکل ۱۴- تغییرات پارامتر لزجت گردابی λ و جریان ثانویه Γ در مقابل تغییرات P_b/P_w در زیر بخش شماره پنج

و ضریب زاویه خط برازش داده شده از بین نتایج مشاهداتی و محاسباتی استفاده شد. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آماری بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل واسنجی شده شیونو و نایت (۱۹۹۱) در تحقیق حاضر در مقابل مشاهدات آزمایشگاهی لشکرآرا و همکاران (۱۳۹۰) در جدول (۲) خلاصه شده است. نتایج نشان داد که واسنجی پارامترهای ضریب زبری، لزجت گردابی بدون بعد و پارامتر جریان ثانویه منجر به تخمین تنش برشی بستر و جداره با دقت مطلوبی شده است. در این ارزیابی حداکثر میانگین خطا معادل ۱/۵۸- درصد و متعلق به تنش برشی بدون بعد بستر می باشد. مقایسه ضریب زاویه خط برازش شده از بین نتایج از یکسو و علامت منفی درصد میانگین خطا در تخمین هر دو پارامتر بدون بعد تنش برشی جداره و بستر از سوی دیگر حاکی از آن است که مقادیر نتایج محاسباتی از مقادیر نتایج مشاهداتی کمتر است. البته این میزان اختلاف با توجه به شاخص های معرفی شده در جدول (۲) بسیار ناچیز است.

با تفکیک تنش برشی جداره و کف و بدون بعد نمودن آنها با استفاده از تنش برشی کل می‌توان معادله (۱۹) را به صورت معادله‌های (۲۰) و (۲۱) تفکیک نمود:

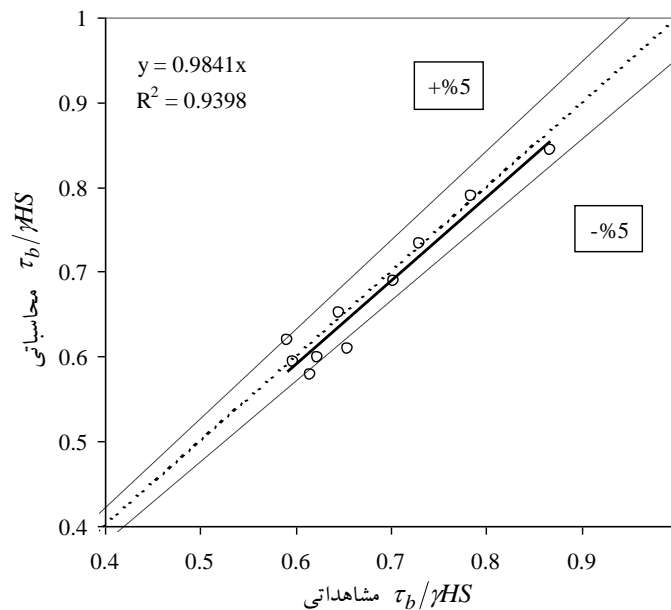
$$\frac{\bar{\tau}_w}{\gamma HS} = \frac{f_w U_d^2}{8 HS} \quad (20)$$

$$\frac{\bar{\tau}_b}{\gamma HS} = \frac{f_b U_d^2}{8 HS} \quad (21)$$

حال با استفاده از معادله‌های (۲۰) و (۲۱) نسبت به محاسبه مقادیر تنش برشی بدون بعد جداره $\bar{\tau}_w/\gamma HS$ و بستر $\bar{\tau}_b/\gamma HS$ اقدام گردید. سپس با بهره‌گیری از معادله‌های (۱۷) و (۱۸) مقادیر نظیر حاصل از مطالعات لشکرآرا و همکاران (۱۳۹۰) استخراج و نتایج در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) نمایش داده شدند. به منظور تجزیه و تحلیل آماری از توابع آماری معروف از جمله ریشه میانگین مربعات خطا، درصد میانگین خطا، خطای استاندارد تخمین

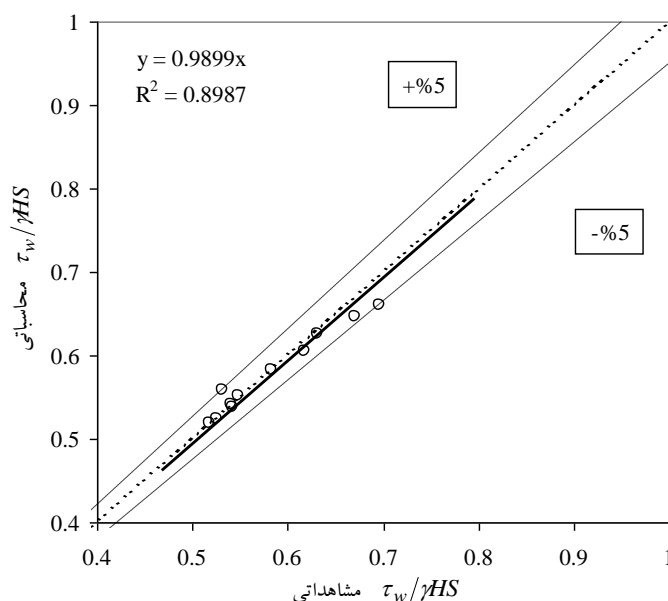
جدول ۲- مقایسه نتایج تخمین پارامترهای $\bar{\tau}_w/\gamma HS$ و $\bar{\tau}_b/\gamma HS$ توسط مدل واسنجی شده شیونو و نایت (۱۹۹۱) در مقایسه با مشاهدات آزمایشگاهی لشکرآرا و همکاران (۱۳۹۰)

پارامتر	ریشه میانگین مربعات خطا	درصد میانگین خطا	خطای استاندارد	ضریب زاویه تخمین
$\bar{\tau}_b/\gamma HS$	۰/۰۲۳۸	-۱/۵۸	۰/۰۲۳۷	۰/۹۸۴۱
$\bar{\tau}_w/\gamma HS$	۰/۰۱۶۲	-۰/۵۹۸	۰/۰۰۹۷	۰/۹۸۹۹



شکل ۱۵- مقایسه نتایج تخمین $\bar{\tau}_b/\gamma HS$ حاصل از تحقیق حاضر با مشاهدات تحقیق لشکرآرا و همکاران (۱۳۹۰)

لشکرآرا و دهقانی: واسنجی پارامترهای حاکم بر مدل شیونو...



شکل ۱۶- مقایسه نتایج تخمین $\bar{\tau}_w/\gamma HS$ حاصل از تحقیق حاضر با مشاهدات تحقیق لشکرآرا و همکاران (۱۳۹۰)

علت به حداقل رسیدن ضریب داری را در این ناحیه می‌توان ناشی از وقوع شرایط بهترین مقطع هیدرولیکی دانست. همچنین می‌توان دریافت که پارامتر ضریب زبری (f) به ازای مقادیر نسبت ظاهری P_b/P_w بزرگتر از دو و پارامتر لزجت گردابی (λ) به ازای مقادیر P_b/P_w بزرگتر از شش مستقل از نسبت P_b/P_w می‌باشند.

نتایج گویای آن است که آهنگ تغییرات پارامترهای (f)، (λ) و (Γ) به ازاء نسبت ظاهری کوچک‌تر از چهار، از افزایش نسبی شدیدی برخوردار است.

علی‌رغم آنکه در تحقیقات پیشین مقدار لزجت گردابی در مسائل کاربردی ثابت و معادل 0.67 در نظر گرفته می‌شود ولی نتایج این تحقیق گویای این مطلب است که به‌منظور واسنجی مدل شیونو و نایت (۱۹۹۱)، مقدار پارامتر لزجت گردابی ثابت نبوده و مقدار آن متناسب با شرایط مسئله در هر یک از زیر بخش‌ها متفاوت است.

مقایسه نتایج مطالعه حاضر با مطالعات آزمایشگاهی لشکرآرا و همکاران (۱۳۹۰) نشان داد که تخمین صورت گرفته برای تنش برشی بدون بعد جداره $\bar{\tau}_w/\gamma HS$ و بستر $\bar{\tau}_b/\gamma HS$ از دقت مطلوبی برخوردار است.

نتیجه‌گیری

دامنه عملکرد مطالعه حاضر در راستای تدقیق پارامترهای مؤثر بر واسنجی مدل شیونو و نایت (۱۹۹۱) در کانال‌های دوزنقه‌ای روباز تعریف شده است. برای این منظور با توجه به نسبت محیط مرطوب بستر به جداره (نسبت ظاهری) P_b/P_w سطح مقطع جریان به تعدادی زیر بخش و سلول‌های جریان ثانویه تقسیم گردید. سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک چند هدفه با مرتب سازی غیرغالب عملیات بهینه سازی و واسنجی پارامترهای ضریب اصطکاک (f)، جریان ثانویه (Γ) و لزجت گردابی (λ) در تعیین میزان تنش برشی در هر یک از زیر بخش‌ها انجام گردید. نتایج نشان داد که انتخاب پارامترهای (f)، (λ) و (Γ) نقش به سزایی در تخمین سرعت و همچنین تنش برشی ایفا می‌نماید. بررسی‌ها نشان داد که تأثیر λ در تخمین سرعت در هر یک از زیر بخش‌های یک، سه و چهار به ازاء $P_b/P_w > 2$ مستقل از نسبت ظاهری P_b/P_w می‌باشد.

واسنجی انجام شده در راستای تخمین ارزش انفرادی پارامتر ضریب زبری f داری و بسپاخ در هر یک از زیر بخش‌ها نشان داد که روند تغییرات ضریب زبری داری f در زیر بخش‌های مختلف دارای یک نقطه اکسترمم در $P_b/P_w = 1.6$ می‌باشد.

منابع

- ۱- اژدری مقدم، م.، تاج نسایی، م. و گیوه چی، م.، ۱۳۹۲. به کارگیری دینامیک سیالات محاسباتی در مدل سازی سلول های جریان ثانویه در کانال دوزنقه‌ای، نشریه مهندسی عمران فردوسی، ۲۵(۱): ۲۸-۱۵
- ۲- ایوب زاده، س.ع. و ظهیری، ع.، ۱۳۸۲. محدودیت حل تحلیل مدل دوبعدی شیونو-نایت برای توزیع عرضی سرعت در مقاطع مرکب و ارائه روش اصلاحی، چهارمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز.

- ۳- فغفور مغربی، م. و گیوه‌چی، م.، ۱۳۸۹. تخمین سرعت متوسط عمقی و تنش برشی در کانال مثلثی باز، مجله آب و فاضلاب، ۲: ۷۱-۸۰.
- ۴- ظهیری، ع.ر.، ایوب زاده، ع. و دهان زاده، ب.، ۱۳۸۸. حل توزیع عرضی سرعت جریان در رودخانه‌ها (مطالعه موردی: ایستگاه هیدرومتری ملائانی-رودخانه کارون)، مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۶ (۲): ۲۸۳-۲۷۳.
- ۵- لشکرآرا، ب.، فتحی مقدم، م. و جاعل، آ.، ۱۳۹۰. توزیع تنش برشی در کانالهای منشوری روباز. دهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، گیلان.
- 6- Al-Hamid, A. A. I. 1991, Boundary shear stress and velocity distributions in differentially roughened trapezoidal open channels. Ph.D Thesis, University of Birmingham, Birmingham, UK.
- 7- Deb, K. 1999, Multi-objective genetic algorithms: Problem difficulties and construction of test problems. *Evolutionary Computation*, MIT Press, 7 (3): 205-230.
- 8- Deb, K, Pratap, A., Agarwal, S. and Meyerivan, T., 2002, A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transaction on Evolutionary Computation*, 6(2) : 182-197.
- 9- Ervine, D.A., Babaeyan-Koopaei, K. and Sellin, R.H.J. 2000, Two-dimensional solution for straight and meandering overbank flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 126 (9): 653-669.
- 10-Hu, C., Ju, Z., and Guo, Q. 2010, Flow movement and sediment transport in compound channels. *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, 48 (1): 23-32.
- 11-Knight, D.W., Yuen, K.W.H. and Al-Hamid, A .A. I. 1994, Boundary shear stress distributions in open channel flow. In Beven, K., Chatwin, P. & Millbank, J. (Eds.) *Physical Mechanisms of Mixing and Transport in the Environment*. John Wiley & Sons, 51-87.
- 12-Knight, D.W., Omran, M. and Tang, X. 2007, Modeling depth-averaged velocity and boundary shear in trapezoidal channels with secondary flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 133 (1): 39-47.
- 13-Lambert, M. F. and Sellin, R. H. J. 1996, Discharge prediction in straight compound channels using the mixing length concept. *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, 34 (3): 381-394.
- 14-Omran, M., Atabay, S., and Knight, D.W. 2007,. Modelling sediment transport in simple rectangular channels using a depth-averaged approach, 32nd Congress of IAHR on Harmonizing the Demands of Art and Nature in Hydraulics, Venice.
- 15-Sharifi, S. 2009, Application of evolutionary computation to open channel flow modeling, Ph.D Thesis, University of Birmingham, UK.
- 16-Shiono, K. and Knight, D.W. 1988, Two dimensional analytical solution for a compound channel. 3rd International Symposium on Refined Flow Modeling and Turbulence Measurements. Japan, Tokyo.
- 17-Shiono, K. and Knight, D.W. 1991, Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, 222 : 617-646
- 18-Yuen, K. W. H. 1989, A study of boundary shear stress, flow resistance and momentum transfer in open channels with simple and compound trapezoidal cross sections. Ph.D Thesis, University of Birmingham, Birmingham, UK.