شبيه‌سازي عملكرد دريچه‌هاي كنترل كانالها با استفاده از مدل هيدروديناميك

داود فرسادي‌زاده — مربي و دانشجوي دوره دكتري گروه آبياري، دانشگاه تبريز
يوسف حسن زاده — استاد گروه آب، دانشكده مهندسي عمران، دانشگاه تبريز
محمد جواد منعم — استاديار گروه آبياري، دانشگاه تربيت مدرس

چكيده

در اين تحقيق اثرات هيدروليكي ناشي از عملكرد دريچه‌هاي كنترل كانالها با كاربرد مدل هيدروديناميك شبيه‌سازي شد. آزمونهايي با چهار دريچه كشويي در كانال آزمايشگاهي مجهز به ابزارهاي دقيق اندازه‌گيري و ذخيره‌سازي تغييرات زماني عمق آب انجام گرفت. عمقهاي اندازه گيري شده با نتايج شبيه‌سازي مدل هيدروديناميك مورد مقايسه قرار گرفت. متوسط خطاي برآورد مدل در طول كانال براي تغيير وضعيت دريچه‌هاي كنترل در حالت تدريجي ۰/۶۰ درصد و در حالت سريع برابر با ۳/۷۴ درصد بوده است. نتايج بدست آمده نشان مي دهد كه مدل هيدروديناميك مبتني بر روش ضمني تفاضلهاي محدود معادلات جريان غيرماندگار مي تواند عملكرد تدريجي دريچه‌هاي كنترل را بادقت خوبي شبيه‌سازي نمايد. اين مدل را مي‌توان براي اهداف مختلف مانند طراحي سيستم‌هاي كنترل در كانالهاي انتقال آب بكار برد.

كلمات كليدی: دريچه‌هاي كنترل، كانال ، شبيه سازي, جريان غيرماندگار.

Simulation of Canal Control-Gates Operations Using Hydrodynamic Model

D. Farsadizadeh — Dept. of Irrigation, University of Tabriz, Tabriz, Iran
Y. Hassanzadeh — Dept. of Civil Eng., Faculty of Eng., University of Tabriz, Tabriz, Iran
M. J. Monem — Dept. of Irrigation, University of Tarbiat Modarres, Tehran, Iran

Abstract

In this research, hydraulic effects of canal control-gates operations have been simulated using hydrodynamic model. A few tests were performed with four slide gates in the laboratory canal equipped by sensitive instruments for measuring and saving the time variation of the water depths. The measured depths were compared with the hydrodynamic model simulation results. Average error of the model estimation along the canal was 0.60% for gradually opening changes and 3.74% for sudden opening changes of the control gates. The results showed that the hydrodynamic model based on the implicit F.D.M of the unsteady flow equations would be able to simulate the gradually operation of control gates with good accuracy. This model can be used for different purposes such as design of control systems in water conveyance canals.

Key words: Control gates, Canal, Simulation, Unsteady flow.

۱- مقدمه

سازه‌هاي هيدروليكي به منظور بهره‌برداري از كانالها ساخته مي‌شوند. اين سازه‌ها را مي‌توان در دو گروه سازه‌هاي كنترل و سازه‌هاي انحراف آب تقسيمبندي نمود. سازه‌هاي كنترل دريچه‌دار براي تنظيم سطح آب و كنترل جريان در كانالهاي انتقال آب مورد استفاده قرار مي‌گيرند. عملكرد اين دريچه‌ها باعث ايجاد جريان غيرماندگار دركانالها مي شود كه بررسي آن بدون استفاده از مدلهاي رياضي امكان‌پذير نمي‌باشد.

معادلات حاكم بر جريانهاي غيرماندگار يك بعدي در كانالهاي روباز (معادلات سن- ونان) توسط محققين هيدروليك مانند چاو [۵] در سال ۱۹۵۹، هندرسون [۹] در سال ۱۹۶۶, فرنچ [۷] در سال ۱۹۸۷ بيان شده است. روشهاي عددي مختلفي مانند روش مشخصه و تفاضلهاي محدود براي حل اين معادلات بكار گرفته شده‌اند. روش مشخصه براي حل معادلات جريان غيرماندگار تدريجي و سريع در رودخانه‌ها و كانالها توسط محققين بكار برده شده است[۷]. حسنزاده [۸ و ۱۹] در سال ۱۹۹۱ و ۱۹۹۴ روش مشخصه را براي بررسي جريان متغير سريع غيرماندگار و انتشار امواج ناشي از شكست سد در رودخانه‌ها بكار برد. با توجه به محدوديت روش مشخصه به‌لحاظ حل معادلات فقط در امتداد خطوط مشخصه, محققين در سالهاي اخير از روش تفاضلهاي محدود براي حل معادلات جريان غيرماندگار در كانالها استفاده زيادي نموده‌اند. حل معادلات سن- ونان با روش تفاضلهاي محدود و با شماي ضمني چهار نقطهاي وزني توسط آمين [۱] در سال ۱۹۶۸ ارائه شده و به وسيله آمين و فنگ [۲]در سال ۱۹۷۰ مورد ارزيابي قرار گرفته است. استروكف [۱۸] در سال ۱۹۷۰, ليگت و كونج [۱۰] در سال ۱۹۷۵ روش حل عددي معادلات سن- ونان را بيان نمودند. چادري و كونتراكتور [۴] در سال ۱۹۷۳ روش ضمني را در مورد انتشار امواج در كانالهاي روباز بكار بردند. لي يو و همكارانش [۱۱] در سال ۱۹۹۲ يك روش محاسباتي براي جريان غيرماندگار در كانالهاي روباز ارائه نمودند.

مدلهاي هيدروديناميك مختلفي مانند ICSS, SIC, CanalCAD, COBRA, PROCAN و CanalMan با تلفيق روشهاي حل عددي معادلات سن- ونان و روابط جريان در سازه‌هاي هيدروليكي براي شبيه‌سازي جريان در كانالهاي انتقال آب ارائه شده است[۳]. مدل ICSS (1) توسط مانز در سال ۱۹۸۵ براي شبيه‌سازي جريان غيرماندگار در كانالهاي انتقال و توزيع آب در شبكه‌هاي آبياري ارائه شد [۲۰]. مدل ICSS-POM با تلفيق مدل هيدروديناميك و شاخصهاي مديريت بهره‌برداري توسط منعم ومانز [۵] در سال ۱۹۹۴ براي بهينه‌سازي عملكرد كانالهاي انتقال آب بكار گرفته شد. آزمون اين مدل توسط منعم [۲۱] در سال ۱۹۹۹ براي بررسي جريان متغير ورودي به كانال با ايجاد دو هيدروگراف ورودي تدريجي و ناگهاني در كانال انتخابي از شبكه آبياري دشت قزوين انجام گرفت.

هدف از اين تحقيق بررسي كاربرد مدل هيدروديناميك براي شبيه‌سازي اثرات هيدروليكي ناشي از عملكرد دريچه‌هاي كنترل در كانالها ميباشد. اين تحقيق با آزمونهاي مختلف برروي چهار دريچه كشويي در كانال آزمايشگاهي مجهز به ابزارهاي دقيق اندازه‌گيري و ذخيره‌سازي تغييرات زماني عمق آب و مقايسه آن با نتايج شبيه‌سازي مدل هيدروديناميك انجام گرفت.

۲- معادلات حاكم

معادله حاكم بر جريان متغير ماندگار در كانالها معادله هندرسون [۹] ميباشد. اين معادله با اعمال تغييراتي براي در نظر گرفتن مقاطع غيرهندسي كانال و جريانهاي جانبي به دو صورت زير در مدل به كار برده شده است [۱۲]:

$$\frac{dy}{dx} = [S_0 - S_f - \frac{2Q}{gA^2}P + \frac{1}{gA}(\frac{Q^2}{A^2})A_x^y]/(1-F^2) \quad (۱)$$

$$\frac{dy}{dx} = [S_0 - S_f - \frac{Q}{gA^2}I + \frac{1}{gA}(\frac{Q^2}{A^2})A_x^y]/(1-F^2) \quad (۲)$$

1 - Irrigation conveyance system simulation

که درآن y عمق جریان، x فاصله طولي، S_0 شیب کـف کانـال، S_f شیب خط انرژي که از رابطه مانینگ محاسبه میشود، Q دبي جریان، g شتاب ثقل، A سطح مقطع جریان، P جریـان جـانبي ورودي در واحد طول کانال، I جریان جـانبي خروجـي در واحـد طول کانال، A_x^y تغییرات سطح مقطع جریان نـسبت بـه x بـا فرض ثابت بودن y و F عدد فرود میباشند.

معادلات حاکم بر جریان متغیر غیرماندگار در کانال معادلات پیوستگي و اندازه حرکت سن- ونـان مـیباشـند [۵، ۷ و ۹]. ایـن معادلات با در نظر گرفتن جریانهاي جانبي کانال به صـورت زیـر در مدل بکار برده شدهاند [۱۳]:

$$\frac{\partial y}{\partial t}+\left(\frac{A}{B}\right)\frac{\partial V}{\partial x}+V\frac{\partial y}{\partial x}+\frac{V}{B}(A_x^y)-\frac{1}{B}(P-I)=0 \qquad (۳)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+V\frac{\partial V}{\partial x}+g\frac{\partial y}{\partial x}+g(S_f-S_0)+\frac{V}{A}(P-I)=0 \qquad (۴)$$

در این روابط V سرعت متوسط جریان، B عرض فوقاني مقطع جریان و t زمان میباشد.

۳- حل عددي معادلات

معادلـه جریان متغیر ماندگار (معادلــه ۱ یـا ۲) بـه صـورت تفاضلهاي محدود نوشـته شـده و بـا روش تکـراري نیـوتن حـل میشود [۶ و۱۲ و ۱۷]. معادلـه (۲) به عنـوان نمونـه بـه صـورت تفاضلي زیر نوشته میشود:

$$f(y_i)=-y_{i+1}+y_i-\frac{\Delta x}{2g}I\left(\frac{Q_{i+1}}{A_{i+1}^2}+\frac{Q_i}{A_i^2}\right)+\frac{Q_{i+1}^2}{2g}\left(\frac{1}{A_{i+1}^2}-\frac{A_i}{A_{i+1}^3}\right)+\frac{Q_i^2}{2g}\left(\frac{A_{i+1}}{A_i^3}-\frac{1}{A_i^2}\right)-(Z_{i+1}-Z_i)-\frac{\Delta x n^2}{2}\left(\frac{Q_{i+1}^2P_{i+1}^{4/3}}{A_{i+1}^{10/3}}+\frac{Q_i^2P_i^{4/3}}{A_i^{10/3}}\right) \qquad (۵)$$

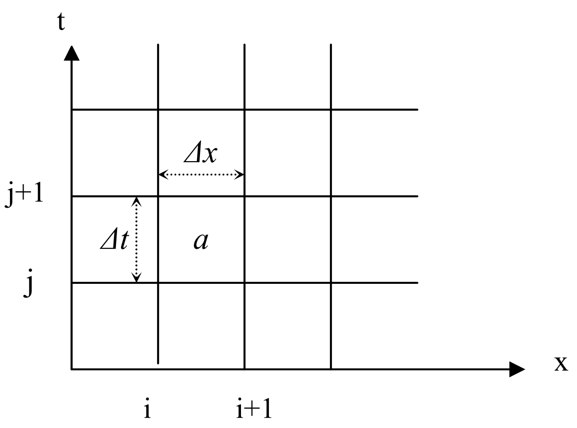
که در آن n ضریب زبري مانینگ, Δx فاصله طولي بین دو نقطه مجاور, P محیط ترشده و Z ارتفاع کف کانال ميباشد.

برآورد $k+1$ ام y با محاسبه مشتق رابطه فوق براساس روش تکراري نیوتن از رابطه زیر به دست ميآيد:

$$y_i^{k+1}=y_i^k-\frac{f(y_i^k)}{f'(y_i^k)} \qquad (۶)$$

پروفیل سطح آب در کل بازههاي کانال با حل معادله جریان متغیر ماندگار در مدل بازاي مقادیر مختلف دبي جریان براسـاس خـصوصیات فیزیکـي ـ هیـدرولیکي کانـال و سـازههـا، وضـعیت عملیاتي سازههاي کنترل و شرط مرزي انتهـاي کانـال محاسـبه میشود.

معادلات سن- ونان با روش تفاضـلهاي محـدود و بـا شـماي ضمني چهار نقطهاي وزني حل ميشوند [۱۳]. شبکهاي از زمـان و مکان براي حل معادلات در این روش مطابق شکل (۱) درنظـر گرفته ميشود.



شکل ۱- شبکه تفاضلهاي محدود چهار نقطهاي وزني

مقدار کمیتي مانند y و مشتقات آن نسبت به زمان و مکان در نقطه a با روابط زیر بیان ميشوند:

$$y(a)=\frac{\theta}{2}(y_i^{j+1}+y_{i+1}^{j+1})+\frac{1-\theta}{2}(y_i^j+y_{i+1}^j) \qquad (۷)$$

$$\frac{\partial y(a)}{\partial x}=\theta\left(\frac{y_{i+1}^{j+1}-y_i^{j+1}}{\Delta x}\right)+(1-\theta)\left(\frac{y_{i+1}^j-y_i^j}{\Delta x}\right)$$

(۸)

$$\frac{\partial y(a)}{\partial t}=\frac{1}{2}\left(\frac{y_{i+1}^{j+1}-y_{i+1}^{j}}{\Delta t}\right)+\frac{1}{2}\left(\frac{y_{i}^{j+1}-y_{i}^{j}}{\Delta t}\right) \quad (۹)$$

θ ضریب وزني، Δx و Δt گامهاي مكاني و زماني ميباشند.

معادلات سن- ونان با كاربرد روابط فوق در مورد تمام جملات اين معادله به صورت تفاضلهاي محدود نوشته ميشود. فرم منفصل شده اين معادلات براي هر نقطه محاسباتي شامل چهار پارامتر $y^{j}, y^{j+1}, V^{j}, V^{j+1}$ ميباشند كه مقادير y^{j+1}, V^{j+1} (در گام زماني j+1) مجهول هستند.

فرم منفصل شده معادله پيوستگي بهصورت زير ميباشد:

$$F_i(y_i^{j+1},V_i^{j+1},y_{i+1}^{j+1},V_{i+1}^{j+1})=\left(y_{i+1}^{j+1}+y_i^{j+1}\right)+$$
$$C_1+\frac{\Delta t}{\Delta x}\theta^2\left[\left(\frac{A}{B}\right)_{i+1}^{j+1}+\left(\frac{A}{B}\right)_i^{j+1}\right]\left(V_{i+1}^{j+1}-V_i^{j+1}\right)$$
$$+\frac{\Delta t}{\Delta x}\theta\, C_2\left(V_{i+1}^{j+1}-V_i^{j+1}\right)+\frac{\Delta t}{\Delta x}\theta\, C_3\left[\left(\frac{A}{B}\right)_{i+1}^{j+1}+\left(\frac{A}{B}\right)_i^{j+1}\right]+$$
$$C_4+\frac{\Delta t}{\Delta x}\theta^2\left(V_{i+1}^{j+1}+V_i^{j+1}\right)\left(y_{i+1}^{j+1}-y_i^{j+1}\right)$$
$$+\frac{\Delta t}{\Delta x}\theta\, C_5\left(y_{i+1}^{j+1}-y_i^{j+1}\right)+\frac{\Delta t}{\Delta x}\theta\, C_6\left(V_{i+1}^{j+1}+V_i^{j+1}\right)+$$
$$C_7-\Delta t\cdot q\theta\left[\left(\frac{1}{B}\right)_{i+1}^{j+1}+\left(\frac{1}{B}\right)_i^{j+1}\right]-C_8=0$$

(۱۰)

كه در آن:

$$C_1=-\left(y_{i+1}^{j}+y_i^{j}\right) \quad (۱۱)$$

$$C_2=(1-\theta)\left[\left(\frac{A}{B}\right)_{i+1}^{j}+\left(\frac{A}{B}\right)_i^{j}\right] \quad (۱۲)$$

$$C_3=(1-\theta)\left(V_{i+1}^{j}-V_i^{j}\right) \quad (۱۳)$$

$$C_4=\frac{\Delta t}{\Delta x}C_2\ C_3 \quad (۱۴)$$

$$C_5=(1-\theta)\left(V_{i+1}^{j}+V_i^{j}\right) \quad (۱۵)$$

$$C_6=(1-\theta)\left(y_{i+1}^{j}-y_i^{j}\right) \quad (۱۶)$$

$$C_7=\frac{\Delta t}{\Delta x}C_5\ C_6 \quad (۱۷)$$

$$C_8=\Delta t\cdot q(1-\theta)\left[\left(\frac{1}{B}\right)_{i+1}^{j}+\left(\frac{1}{B}\right)_i^{j}\right] \quad (۱۸)$$

فرم منفصل شده معادله اندازه حركت بهصورت زير ميباشد:

$$G_i(y_i^{j+1},V_i^{j+1},y_{i+1}^{j+1},V_{i+1}^{j+1})=\frac{1}{g}\frac{\Delta x}{\Delta t}\left(V_{i+1}^{j+1}+V_i^{j+1}\right)$$
$$+C_9+\frac{\theta^2}{g}\left[\left(V_{i+1}^{j+1}\right)^2-\left(V_i^{j+1}\right)^2\right]$$
$$+C_{10}\frac{\theta}{g}\left(V_{i+1}^{j+1}-V_i^{j+1}\right)+C_{11}\frac{\theta}{g}\left(V_{i+1}^{j+1}+V_i^{j+1}\right)$$
$$+C_{12}+2\theta\left(y_{i+1}^{j+1}-y_i^{j+1}\right)+C_{13}+C_{14}$$
$$+\Delta x\theta\left[\left(S_f\right)_{i+1}^{j+1}+\left(S_f\right)_i^{j+1}\right]+$$
$$C_{15}+q\frac{\Delta x}{g}\theta\left[\left(\frac{V}{A}\right)_{i+1}^{j+1}+\left(\frac{V}{A}\right)_i^{j+1}\right]+C_{16}=0 \quad (۱۹)$$

كه در آن:

$$C_9=-\frac{1}{g}\frac{\Delta x}{\Delta t}\left(V_{i+1}^{j}+V_i^{j}\right) \quad (۲۰)$$

$$C_{10}=(1-\theta)\left(V_{i+1}^{j}+V_i^{j}\right) \quad (۲۱)$$

$$C_{11}=(1-\theta)\left(V_{i+1}^{j}-V_i^{j}\right) \quad (۲۲)$$

$$C_{12}=\frac{(1-\theta)^2}{g}\left[\left(V_{i+1}^{j}\right)^2-\left(V_i^{j}\right)^2\right] \quad (۲۳)$$

$$C_{13}=2\,(1-\theta)\left(y_{i+1}^{j}-y_i^{j}\right) \quad (۲۴)$$

$$C_{14}=2\left(z_{i+1}^{j}-z_i^{j}\right) \quad (۲۵)$$

$$C_{15}=\Delta x\,(1-\theta)\left[\left(S_f\right)_{i+1}^{j}+\left(S_f\right)_i^{j}\right] \quad (۲۶)$$

$$C_{16}=q\frac{\Delta x}{g}(1-\theta)\left[\left(\frac{V}{A}\right)_{i+1}^{j}+\left(\frac{V}{A}\right)_i^{j}\right] \quad (۲۷)$$

$$\left(S_f\right)_i^j=\frac{\left(n_i^j\right)^2 V_i^j\left|V_i^j\right|\left(P_i^j\right)^{4/3}}{\left(A_i^j\right)^{4/3}} \quad (۲۸)$$

q تفاضل جريان جـانبي ورودي و خروجـي (P-I) در واحـد طـول كانـال مـي‌باشـد. A_i^j , B_i^j , P_i^j , n_i^j و $(S_f)_i^j$ به‌ترتيب سطح مقطع جريان، عرض فوقاني سـطح آب در مقطـع جريان، محيط ترشده، ضـريب مانينـگ و شـيب خـط انـرژي در نقطه i و زمان j مي‌باشند. در فرم منفصل شده معادلات به‌دليـل منشوري بودن كانال $A_x^y = 0$ در نظر گرفته شده است.

اگر N نقطه محاسباتي وجود داشته باشد تعداد كل مجهولها برابر با $2N$ خواهد بود. چون تعداد نقاطي مانند a در شكل (۱) برابر با N-1 بوده و براي هر نقطه دو معادله (پيوستگي و مومنتم) منفصل شده وجود دارد بنابراين تعداد كل معادلات $2(N$-$1)$ خواهد بود. دو معادله ديگر نيز با استفاده از شرايط مرزي ابتد وانتهاي كانال به دستگاه معادلات افزوده مي‌شوند. دستگاه معادله فوق را براي گام زماني j+1 مي‌توان به‌صورت خلاصه شده زير نشان داد:

$$F_i(y_i^{j+1}, V_i^{j+1}, y_{i+1}^{j+1}, V_{i+1}^{j+1}) = 0 \,,\; i = 1, \ldots N$$

$$G_i(y_i^{j+1}, V_i^{j+1}, y_{i+1}^{j+1}, V_{i+1}^{j+1}) = 0 \,,\; i = 0, \ldots, N\text{-}1$$

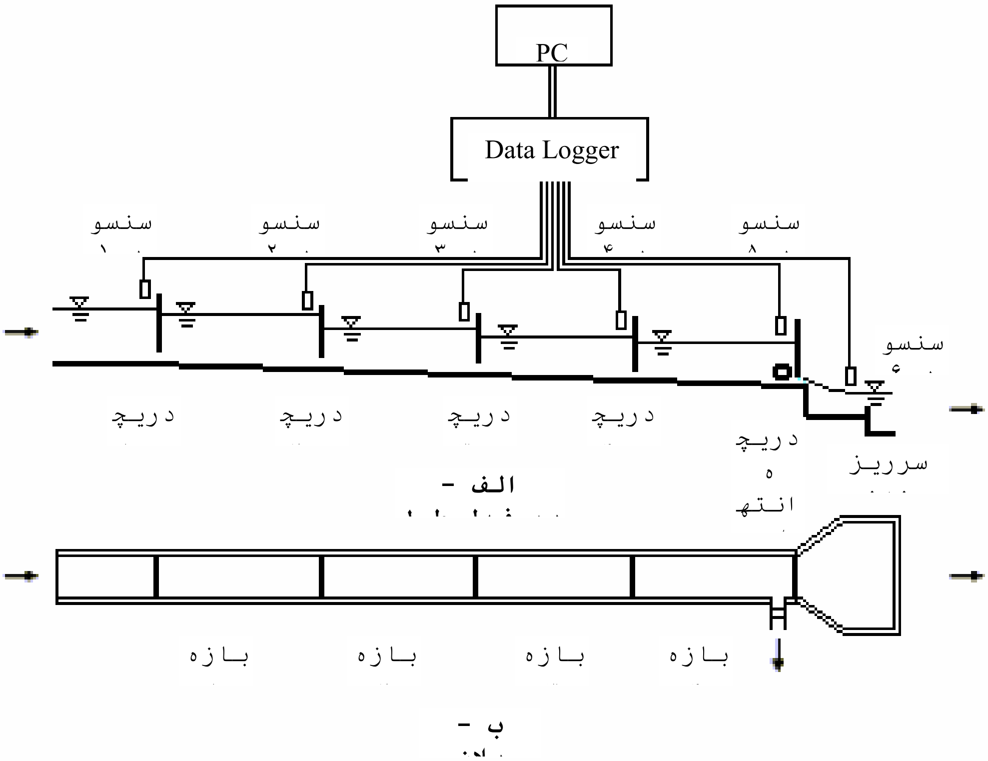
F فرم منفصل شده معادلـه پيوسـتگي و G فـرم منفـصل شـده معادلـه مومنتم مي‌باشند. دستگاه معادلات (۱۰) شامل معـادلات غيرخطي است كه با فرض مقادير اوليه بـراي متغيرهـا و اعمـال روش تكراري نيوتن حل مي‌شوند. درصورتي كه مقدار ضـريب θ بين ۰/۵ و ۱ باشد شماي محاسباتي براي همـه نـسبتهاي $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ پايدار مي‌باشد. همگرايي اين شماي محاسباتي بستگي به مقـدار ضريب وزني θ و نسبت $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ دارد [۲]. بررسي مقادير مختلـف ضريب θ در اين پژوهش نشان مي‌دهدكه مقـدار ۰/۵ بـراي ايـن ضريب از نظر همگرايي شماي محاسباتي نتايج مطلوبي به دسـت مي‌دهد.

۴- آزمونهاي عملكرد دريچه‌هاي كنترل

اين تحقيق برروي كانال پايه‌دار آزمايشگاه هيـدروليك گـروه آبياري دانشگاه تبريز انجام گرفت. اين كانال بـه طـول ۱۰ متـر، شيب كف ۰/۰۰۲ با مقطع مستطيلي به عرض ۲۵ سانتي متـر و ارتفاع ۴۰ سانتي متر است. كانال مجهز به شير دريچه‌اي تنظـيم جريان در ابتداي ورودي و سرريز مثلثي واسنجي شده نيرپيك[1] با زاويه رأس ۵۳ درجه در انتهاي خروجي براي اندازه‌گيري دقيق دبي جريان مي‌باشد. در اين تحقيق از ابزارهاي دقيق اندازه‌گيري عمق آب با دقت ۰/۱ ميليمتر و در فواصل زماني يك ثانيه بـراي بررسي اثرات عملكرد دريچه‌هاي كنترل در كانال استفاده شد. در هر بازه از كانال يك دستگاه سنسور اولتراسـونيك نـصب شـده و مجموعه آنها براي اندازه‌گيري و ثبت هم‌زمـان عمـق آب در كـل بازه‌هاي كانال به يك ديتالاگر متصل گرديد. يك دستگاه سنسور نيز در بالادست سرريز مثلثي براي اندازه‌گيـري دبـي جريـان در كانال با دقت ۰/۱ ليتر برثانيه نصب شـده و بـه ديتـالاگر اتـصال داده شـد. بـا اتـصال ديتـالاگر بـه كـامپيوتر و كـاربرد نـرمافزار VisiDAQ سيـستم مانيتورينـگ كامـل بـراي مـشاهده نحـوه تغييـرات جريـان غيرمانـدگار در كانـال آزمايـشگاه هيـدروليك ايجادگرديد. صفحه اصلي نمايش اطلاعـات مربـوط بـه تغييـرات عمق و دبي جريان و ذخيره آنها در فايلهاي خروجـي در محـيط نرم‌افـزاري VisiDAQ طراحـي گرديـد [۱۶]. شـكل (۲) تـصوير شماتيك سيستم كامپيوتري و ابزارهاي دقيق اندازه‌گيري بـرروي كانال را نشان مي‌دهد.

چهار دريچه كشويي به‌عنوان دريچه‌هاي كنترل در امتداد كانال نصب شد ه و جريان غيرماندگار ناشي از عملكرد تدريجي و سريع اين دريچه‌ها بررسي شد. مقادير ۲۰% , ۲۵% و ۳۰% بازشدگي اوليه در ۵ ثانيه به‌عنوان گزينه‌هايي از سناريوهاي بازشدگي تدريجي دريچه‌ها و مقادير ۷۰% , ۷۵% و ۸۰% بازشدگي اوليه در يك ثانيه به‌عنوان گزينه‌هايي از سناريوهاي بازشدگي سريع دريچه‌ها مورد آزمون قرار گرفتند.

1- Neyrpic



شكل ۲- تصوير شماتيك سيستم كامپيوتري و ابزارهاي دقيق اندازه‌گيري برروي كانال

در هر آزمون ابتدا جريان ماندگار اوليه با دبي ثابت در كانال برقرار نموده و سپس وضعيت بازشدگي دريچه‌هاي كانال به‌طـور متـوالي در فواصـل زمـاني ۳ دقيقـه تغييـر داده شـد. وضـعيت بازشدگي دريچه‌هاي كانـال تـا ۲۸ دقيقـه (۱۶۸۰ ثانيـه) اول در همه آزمونها به صورت تدريجي و بعد از آن به حالت سريع تغيير داده شد. اين بررسي بـا تغييـر وضـعيت بازشـدگي دريچـه‌هـاي كنترل در شرايط مختلف و با دبي‌هاي اوليه متفاوت در مجموع با ۳۶ آزمون به صورت زير انجام گرفت:

آزمونهاي سري اول : عملكرد تدريجي به اندازه ۳۰% بازشدگي اوليه دريچه در ۵ ثانيه و عملكرد سريع به اندازه ۷۰% بازشدگي اوليـه دريچـه در يك ثانيه با دبيهاي اوليه ۴/۵, ۹, ۱۳/۵, ۱۸, ۲۱/۵ و ۲۵ ليتر بر ثانيه

آزمونهاي سري دوم: عملكرد تدريجي به اندازه ۲۵% بازشدگي اوليه دريچه در ۵ ثانيه و عملكرد سريع به اندازه ۷۵% بازشدگي اوليـه دريچـه در يك ثانيه با دبيهاي اوليه ۴/۵, ۹, ۱۳/۵, ۱۸, ۲۱/۵ و ۲۵ ليتر بر ثانيه

آزمونهاي سري سوم: عملكرد تدريجي به انـدازه ۲۰% بازشـدگي اوليه دريچه در ۵ ثانيه و عملكرد سريع به اندازه ۸۰% بازشـدگي اوليـه دريچـه در يك ثانيه با دبيهـاي اوليـه ۴/۵, ۹, ۱۳/۵, ۱۸, ۲۱/۵ و ۲۵ ليتر بر ثانيه

۵- شبيهسازي عملكرد دريچه‌هاي كنترل

شبيهسازي اثرات هيدروليكي ناشي از عملكـرد دريچـه‌هـاي كنترل در كانال با استفاده از مـدل هيـدرودیناميك ICSS انجـام گرفت. اين مدل بازاي شرايط مختلف جريان در كانـال واسـنجي شد. واسنجي مدل با تنظيم ضرايب مربوط به كانال و دريچه‌هاي كنترل انجام گرفت. برنامه‌اي در محـيط نـرم‌افـزاري VisiDAQ براي تعيين ضريب زبري كانال (n)، ضريب دبي دريچه‌هاي كانال (C_d) نوشته شد. اين ضرايب به‌ازاي مقادير مختلف دبي‌هاي اوليه و عمق‌هاي جريان در كانال تعيين شد.

محاسبات هيدروليكي جريان در مدل با تقسيمبنـدي كانـال به قطعات يا بازه‌هاي مختلف انجام گرفت. دريچه‌هاي كنتـرل در ابتدا و انتهاي هر بازه از كانال قرار گرفته و روابط هيدروليكي اين سازه‌ها به عنوان شرايط مرزي بالادست و پايين‌دست بازه در نظر گرفته مي‌شوند. ابتدا مشخصات جريان متغير ماندگار با دبي ثابت اوليـه در مـدل محاسـبه شـده و سـپس نتـايج حاصـل از ايـن محاسبات به عنوان شرط اوليه در شبيه‌سازي جريان غيرمانـدگار درنظر گرفته مي‌شود.

۶- معيارهاي ارزيابي مدل

خطـاي مـدل هيـدروديناميك در بـرآورد عمقهـاي جريـان غيرماندگار در آزمونهاي عملكـرد دريچـه‌هـاي كنتـرل كانـال بـا معيارهاي آمـاري مجـذور ميـانگين مربعـات خطـا (RMSE)[1] و ميانگين خطاي نسبي (RAE)[2] براساس روابط زير تعيين گرديد [۱۴].

$$RMSE=\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(y_{oi}-y_{ci}\right)^{2}\right]^{0.5} \tag{۳۰}$$

$$RAE=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left|\ \left(y_{oi}-y_{ci}\right)\ \right|}{\sum_{i=1}^{n}y_{oi}} \tag{۳۱}$$

y_{ci} عمق شبيه‌سازي شده با مدل و y_{oi} عمق اندازه‌گيري شده در آزمون و در گام زماني i بوده و n تعداد عمقهاي جريان مي‌باشد.

۷- تحليل و بررسي نتايج

خطـــاي بـــرآورد عمـــق جريـــان غيرمانـــدگار بـــا مـــدل هيدروديناميك براي هر سري از آزمونها در جداول (۱ تا ۶) ارائه شده است. مقادير اين خطـا در دو وضـعيت از تغييـر تـدريجي و سريع بازشدگي دريچه‌هاي كنتـرل كانـال و بـا دبـي‌هـاي اوليـه مختلف در هر بازه از كانال محاسبه شده اسـت. حـداقل خطـاي برآورد مدل در حالت عملكرد تدريجي دريچه‌هاي كنترل مربـوط به سري سوم آزمونها و دبي اوليـه ۲۵ ليتـر بـرثانيـه بـا RMSE (مجذور ميانگين مربعات) برابر با ۰/۶ ميليمتر و RAE (ميـانگين خطاي نسبي) معادل با ۰/۲۵ درصد در بازه سوم كانال به دسـت آمده است. حداكثر خطاي برآورد مـدل در سـري اول آزمونهـا و دبي اوليه ۲۱/۵ ليتر برثانيه با RMSE معادل بـا ۲/۵ ميلـيمتـر و RAE برابر با ۱/۱۴ درصد در بازه چهارم كانال بوده است. حداقل مقدار خطاي نسبي در كل كانال ۰/۴۲ درصد, حداكثر مقـدار آن ۰/۹۵ درصد و مقدار متوسط آن۰/۶۰ درصد بوده است. اين ارقام نشان مي دهند كه نتايج به دست آمده از مدل همخـواني خـوبي با مقادير اندازه‌گيري شده دارند.

حـداقل خطـاي بـرآورد مـدل در حالـت عملكـرد سـريع دريچه‌هاي كنترل مربوط به بازه اول كانال در سري اول آزمونهـا و دبي اوليه ۴/۵ ليتر برثانيه با RMSE برابر بـا ۲/۲ ميلـيمتـر و RAE معادل با ۲/۰۰ درصد بوده اسـت. حـداكثر خطـاي بـرآورد مدل در سري سوم آزمونهـا و دبـي اوليـه ۲۵ ليتـر بـر ثانيـه بـا RMSE معادل با ۱۳/۱ ميلـيمتـر و RAE برابـر بـا ۵/۴۶ درصـد بدست آمده است. حداقل مقدار خطاي نسبي در كل كانال ۳/۰۹ درصد, حداكثر مقدار آن ۴/۷۱ درصد و مقدار متوسـط آن ۳/۷۴ درصد بوده است. اين ارقام نشان مـي‌دهنـد كـه انطبـاق نتـايج بدست آمده از مدل هيدروديناميك با مقادير واقعي كمتر است.

بررسي مقادير جداول (۱ تا ۶) نشان مي‌دهد كه در حالت عملكرد تدريجي دريچه‌هاي كنترل كانال مقدار خطا از سري اول تا سري سوم آزمونها به‌لحاظ كاهش سرعت تغيير بازشدگي دريچه‌ها داراي روند كاهشي مي‌باشد. مقدار خطا در حالت عملكرد سريع دريچه‌هاي كنترل كانال از سري اول تا سري سوم آزمونها افزايش مي‌يابد و اين روند افزايشي به علت افزايش سرعت تغيير بازشدگي دريچه‌ها مي‌باشد. در هر دو حالت روند خاصي از نظر تغييرات خطا در بين آزمونها با دبي‌هاي اوليه مختلف مشاهده نمي‌شود.

نمودار عمقهاي واقعي اندازه‌گيري شده و شبيه‌سازي شـده به صورت نمونه در آزمون سري اول با دبي اوليه ۲۵ ليتر بر ثانيه براي دريچه‌هاي ۱ تا ۴ در شكل (۳) ارائه شده است.

1- Root mean square of error
2- Relative average error

جدول ۱ - خطاي مدل در سري اول آزمونهاي بررسي عملكرد تدريجي دريچه‌هاي كنترل كانال

Q = ۲۵ lit/s		Q = ۲۱/۵ lit/s		Q =۱۸ lit/s		Q = ۱۳/۵ lit/s		Q = ۹ lit/s		Q = ۴/۵ lit/s		دریچه
RAE %	RMSE mm	RAE %	RMSE mm	RAE %	RMSE mm	RAE %	RMSE mm	RAE %	RMSE mm	RAE %	RMSE mm	
۱/۰۴	۲/۳	۰/۹۵	۲/۱	۰/۸۲	۱/۸	۰/۵۴	۰/۶	۱/۰۰	۱/۱	۰/۸۲	۰/۹	۱
۰/۷۳	۱/۶	۰/۷۲	۱/۷	۰/۶۴	۱/۴	۰/۷۳	۰/۸	۰/۵۴	۰/۶	۰/۶۴	۰/۷	۲
۰/۶۴	۱/۴	۰/۸۶	۱/۹	۰/۵۹	۱/۳	۰/۸۲	۰/۹	۰/۹۱	۱/۰	۰/۷۳	۰/۸	۳
۱/۰	۲/۲	۱/۱۴	۲/۵	۰/۷۳	۱/۶	۰/۴۵	۰/۵	۰/۶۴	۰/۷	۱/۰۹	۱/۲	۴
۰/۸۶	۱/۹	۰/۹۵	۲/۱	۰/۶۸	۱/۵	۰/۶۴	/۷۰	۰/۷۷	۰/۸۵	۰/۸۲	۰/۹۰	کل کانال

جدول ۲ - خطاي مدل در سري دوم آزمونهاي بررسي عملكرد تدريجي دريچه‌هاي كنترل كانال

Q = ۲۵ lit/s		Q = ۲۱/۵ lit/s		Q =۱۸ lit/s		Q = ۱۳/۵ lit/s		Q = ۹ lit/s		Q = ۴/۵ lit/s		دریچه
RAE %	RMSE mm	RAE %	RMSE mm	RAE %	RMSE mm	RAE %	RMSE mm	RAE %	RMSE mm	RAE %	RMSE mm	
۰/۶۹	۱/۶	۰/۵۶	۱/۳	۰/۶۵	۱/۵	۰/۴۵	۰/۵	۰/۵۴	۰/۶	۰/۷۳	۰/۸	۱
۰/۳۰	۰/۷	۰/۳۹	۰/۹	۰/۴۷	۱/۱	۰/۷۳	۰/۸	۰/۴۵	۰/۵	۰/۵۴	۰/۶	۲
۰/۳۵	۰/۸	۰/۴۷	۱/۱	۰/۵۲	۱/۲	۰/۵۴	۰/۶	۰/۶۴	۰/۷	۰/۵۴	۰/۶	۳
۰/۶۱	۱/۴	۰/۶۵	۱/۵	۰/۷۴	۱/۷	۰/۶۴	۰/۷	۰/۶۴	۰/۷	۰/۳۶	۰/۴	۴
۰/۴۸	۱/۱	۰/۵۲	۱/۲	۰/۶۱	۱/۴	۰/۵۹	۰/۶۵	۰/۵۶	۰/۶۲	۰/۵۵	۰/۶۰	کل کانال

جدول ۳ - خطاي مدل در سري سوم آزمونهاي بررسي عملكرد تدريجي دريچه‌هاي كنترل كانال

Q = ۲۵ lit/s		Q = ۲۱/۵ lit/s		Q =۱۸ lit/s		Q = ۱۳/۵ lit/s		Q = ۹ lit/s		Q = ۴/۵ lit/s		دریچه
RAE %	RMSE mm	RAE %	RMSE mm	RAE %	RMSE mm	RAE %	RMSE mm	RAE %	RMSE mm	RAE %	RMSE mm	
۰/۵۴	۱/۳	۰/۶۲	۱/۵	۰/۵۸	۱/۴	۰/۵۰	۰/۶	۰/۳۳	۰/۴	۰/۴۱	۰/۵	۱
۰/۲۹	۰/۷	۰/۳۳	۰/۸	۰/۳۷	۰/۹	۰/۳۳	۰/۴	۰/۵۸	۰/۷	۰/۵۰	۰/۶	۲
۰/۲۵	۰/۶	۰/۴۱	۱/۰	۰/۳۳	۰/۸	۰/۴۱	۰/۵	۰/۵۰	۰/۶	۰/۶۶	۰/۸	۳
۰/۵۸	۱/۴	۰/۵۴	۱/۳	۰/۶۷	۱/۶	۰/۵۸	۰/۷	۰/۳۳	۰/۴	۰/۵۸	۰/۷	۴
۰/۴۲	۱/۰	۰/۴۵	۱/۱	۰/۵۰	۱/۲	۰/۴۶	۰/۵۵	۰/۴۳	۰/۵۲	۰/۵۴	۰/۶۵	کل کانال

جدول ۴- خطاي مدل در سري اول آزمونهاي بررسي عملكرد سريع دريچه‌هاي كنترل كانال

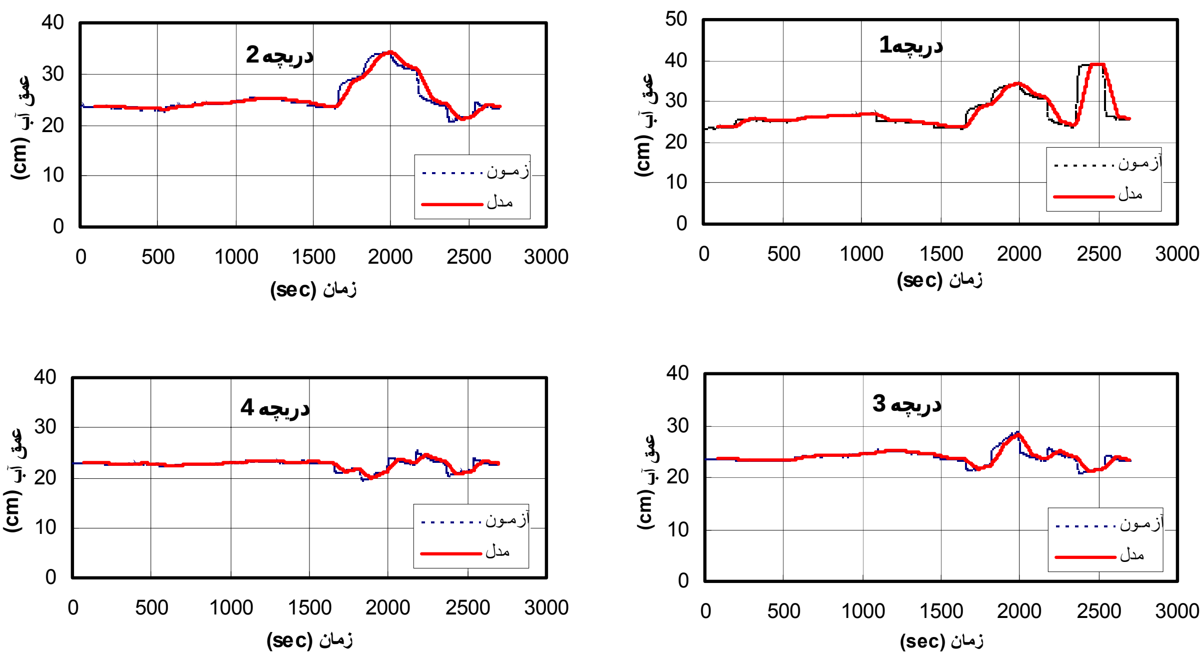
Q = ۲۵ lit/s		Q = ۲۱/۵ lit/s		Q =۱۸ lit/s		Q = ۱۳/۵ lit/s		Q = ۹ lit/s		Q = ۴/۵ lit/s		دریچه
RAE %	RMSE mm	RAE %	RMSE mm	RAE %	RMSE mm	RAE %	RMSE mm	RAE %	RMSE mm	RAE %	RMSE mm	
۳/۹۱	۸/۶	۴/۲۷	۹/۴	۳/۴۱	۷/۵	۲/۴۵	۲/۷	۳/۰۹	۳/۴	۲/۰۰	۲/۲	۱
۳/۰۴	۶/۷	۲/۶۴	۵/۸	۲/۴۵	۵/۴	۳/۱۸	۳/۵	۲/۴۵	۲/۷	۲/۵۴	۲/۸	۲
۲/۶۸	۵/۹	۳/۲۳	۷/۱	۲/۸۲	۶/۲	۴/۴۵	۴/۹	۳/۴۵	۳/۸	۳/۷۲	۴/۱	۳
۳/۲۷	۷/۲	۳/۹۵	۸/۷	۳/۶۸	۸/۱	۳/۸۲	۴/۲	۴/۲۷	۴/۷	۴/۱۸	۴/۶	۴
۳/۲۳	۷/۱	۳/۵۰	۷/۷	۳/۰۹	۶/۸	۳/۴۷	۳/۸۲	۳/۳۲	۳/۶۵	۳/۱۱	۳/۴۲	کل کانال

جدول ۵ - خطاي مدل در سري دوم آزمونهاي بررسي عملكرد سريع دريچه‌هاي كنترل كانال

Q = ۲۵ lit/s		Q = ۲۱/۵ lit/s		Q =۱۸ lit/s		Q = ۱۳/۵ lit/s		Q = ۹ lit/s		Q = ۴/۵ lit/s		دریچه
RAE %	RMSE mm	RAE %	RMSE mm	RAE %	RMSE mm	RAE %	RMSE mm	RAE %	RMSE mm	RAE %	RMSE mm	
۳/۶۵	۸/۴	۴/۵۲	۱۰/۴	۴/۲۶	۹/۸	۳/۸۲	۴/۲	۳/۲۷	۳/۶	۴/۳۶	۴/۸	۱
۲/۶۹	۶/۲	۳/۳۵	۷/۷	۳/۱۳	۷/۲	۳/۲۷	۳/۶	۳/۰۹	۳/۴	۴/۶۴	۵/۱	۲
۳/۱۷	۷/۳	۲/۹۶	۶/۸	۳/۳۹	۷/۸	۴/۵۴	۵/۰	۳/۵۴	۳/۹	۲/۹۱	۳/۲	۳
۴/۵۶	۱۰/۵	۴/۱۳	۹/۵	۳/۷۰	۸/۵	۲/۶۴	۲/۹	۴/۴۵	۴/۹	۲/۸۱	۳/۱	۴
۳/۵۲	۸/۱	۳/۷۴	۸/۶	۳/۶۱	۸/۳	۳/۵۶	۳/۹۲	۳/۵۹	۳/۹۵	۳/۶۸	۴/۰۵	کل کانال

جدول ۶ - خطاي مدل در سري سوم آزمونهاي بررسي عملكرد سريع دريچه‌هاي كنترل كانال

Q = ۲۵ lit/s		Q = ۲۱/۵ lit/s		Q =۱۸ lit/s		Q = ۱۳/۵ lit/s		Q = ۹ lit/s		Q = ۴/۵ lit/s		دریچه
RAE %	RMSE mm	RAE %	RMSE mm	RAE %	RMSE mm	RAE %	RMSE mm	RAE %	RMSE mm	RAE %	RMSE mm	
۵/۰۸	۱۲/۲	۵/۲۱	۱۲/۵	۳/۷۹	۹/۱	۳/۲۵	۳/۹	۵/۰۸	۶/۱	۴/۹۲	۵/۹	۱
۴/۳۷	۱۰/۵	۳/۸۳	۹/۲	۳/۴۲	۸/۲	۳/۴۲	۴/۱	۵/۳۳	۶/۴	۴/۷۵	۵/۷	۲
۳/۹۲	۹/۴	۴/۰۸	۹/۸	۳/۱۷	۷/۶	۴/۸۳	۵/۸	۴/۲۵	۵/۱	۴/۰۰	۴/۸	۳
۵/۴۶	۱۳/۱	۴/۲۱	۱۰/۱	۴/۶۷	۱۱/۲	۴/۳۳	۵/۲	۳/۹۲	۴/۷	۴/۵۸	۵/۵	۴
۴/۷۱	۱۱/۳	۴/۳۳	۱۰/۴	۳/۷۶	۹/۰۲	۳/۹۵	۴/۷۵	۴/۶۴	۵/۵۷	۴/۵۶	۵/۴۷	کل کانال



شكل ۳ - عمقهاي واقعي و شبيه‌سازي شده در سري اول آزمون عملكرد دريچه‌هاي كنترل كانال با دبي اوليه ۲۵ ليتر برثانيه

اين نمودارها نشان مي‌دهند كه در حالت عملكرد تدريجي دريچه‌هاي كنترل كانال تا ۲۸ دقيقه (۱۶۸۰ ثانيه) از شروع آزمون روند تغييرات عمق آب در طول كانال با دقت خوبي به وسيله مدل شبيه‌سازي شده است. بعد از ۲۸ دقيقه از شروع آزمون به لحاظ عملكرد سريع دريچه‌هاي كنترل كانال نمودار تغييرات عمق اندازه‌گيري شده با نمودار به دست آمده از مدل انطباق كمتري دارد.

۸- نتيجه‌گيري

نتايج كلي زير از شبيه‌سازي عملكرد دريچه‌هاي كنترل كانال با مدل هيدروديناميك در اين تحقيق به دست آمد:

۱- ميانگين خطاي نسبي مدل در مورد تغيير وضعيت تدريجي دريچه‌هاي كنترل برابر با ۰/۶۰ درصد بوده است كه نشان ميدهد نتايج به دست آمده از مدل همخواني خوبي با مقادير اندازه‌گيري شده دارد. اين مدل را ميتوان براي شبيه‌سازي جريان غيرماندگار ناشي از عملكرد تدريجي دريچه‌هاي كنترل كانالها با دقت بسيار خوبي بكار برد.

۲- ميانگين خطاي نسبي مدل در مورد تغيير وضعيت سريع دريچه‌هاي كنترل برابر با ۳/۷۴ درصد بوده است كه نشان ميدهد انطباق نتايج مدل با مقادير واقعي نسبت به حالت قبل كمتر است. باوجود اينكه مقدار اين خطا از نظر كاربردي قابل قبول مي‌باشد, توصيه مي‌شود در سيستمهايي كه از مدل هيدروديناميك براي شبيه‌سازي جريان غيرماندگار استفاده مي‌شود از تغيير وضعيت سريع دريچه‌هاي كنترل اجتناب شود.

۳- خطاي مدل در هر دو حالت عملكرد تدريجي و سريع دريچه‌هاي كنترل با افزايش سرعت تغيير بازشدگي دريچه‌ها افزايش مي‌يابد.

۴- براساس آزمونهاي انجام گرفته با دبي‌هاي اوليه مختلف روند خاصي از نظر تغييرات خطا مشاهده نمي‌شود و نشان ميدهد كه اين مدل را مي‌توان براي شبيه‌سازي جريان غيرماندگار ناشي از

عملكرد دريچه‌هاي كنترل كانالها با دبي‌هاي اوليه مختلف بكار برد. با اين حال توصيه مي‌شود عملكرد دريچه‌هاي كنترل در كانال آزمايشگاهي بزرگتر نيز به عنوان كار پژوهشي در آينده مورد آزمون قرار گيرد.

۵- كاربرد مدل هيدروديناميك در سيستمهاي مديريت هيدروليكي سازه‌هاي كنترل و تنظيم جريان در كانالهاي انتقال آب به عنوان كار پژوهشي در آينده پيشنهاد مي‌شود.

۶- نتايج به دست آمده در حالت كلي نشان ميدهد كه مدل هيدروديناميك مبتني بر حل معادلات جريان غيرماندگار با روش ضمني تفاضلهاي محدود را مي‌توان براي شبيه‌سازي عملكرد دريچه‌هاي كنترل به‌لحاظ عملكرد غيرسريع اين دريچه‌ها در كانالهاي انتقال آب با دقت خوبي بكار برد.

مراجع

[1] Amein, M. “An Implicit method for numerical flood routing,” J. Water Resources Research, Vol. 4(4), pp. 719-726, 1968.

[2] Amein, M. and C.S. Fang “Implicit flood routing in natural channels,” J. Hydraulics Div., ASCE, Vol. 96 (HY12), pp. 2481-2500, 1970.

[3] ASCE Task Committee on irrigation canal system hydraulic modeling “Unsteady flow modeling of irrigation canals,” J. Irrig. And Drain. Engrg., ASCE, Vol. 119(4), 1993.

[4] Chaudhry, Y.M. and D.N. Contractor “Application of the implicit method to surge in open channel,” J. Water Resources Research, Vol. 9(6), pp. 1605-1612, 1973.

[5] Chow, V.T. “Open channel hydraulics,” Mc Graw-Hill Pub.Co. Inc., New York, 1959.

[6] Fread, D.L. and T.E. Harbaugh “Open channel flow profiles by Newton’s iteration technique,” J. Hydrology, Vol. 13, pp. 70-80, 1971.

[7] French, R.H. “Open channel hydraulics,” Mc Graw-Hill Pub.Co. Inc., New York, 1987.

[8] Hassanzadeh, Y. “Rapidly varied unsteady flow study in a small-scale model,” Proceeding of the International conference on hydrodynamics, Wuxi, China, pp. 596-603, 1994.

[9] Henderson, F.M. “Open channel flow,” Macmillan Pub. Co. Inc., New york, 1966.

[10] Liggett, J.A. and J.A. Cunge “Numerical methods of solution of the unsteady flow equations, In: K. Mahmood and V. Yevjevich (eds.). Unsteady flow in open channels,” Vol. 1. Water Res. Pub., pp. 89-182, 1975.

[11] Liu, F., Feyen, J. and J. Berlamont “Computational method for regulating unsteady flow in open channels” J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE, Vol. 118(10), pp. 647-689, 1992.

[12] Manz, D.H. “Newton iterative solution for the one dimensional steady spatially varied flow equations expressed in finite difference form,” Department of Civil Eng., University of Calgary, Research Report No. CE85-7, 1985.

[13] Manz, D.H. “Implicit finite difference solution of the one-dimensional equations of unsteady gradually varing open channel flow,” Department of Civil Eng., University of Calgary, Research Report No. CE85-6, 1985.

[14] Mendenhall, W. and T. Sincich “Statistics for engineering and sciences,” Prentice-Hall Pub. Co. Inc., London, 1994.

[15] Monem, M.J. and D.H. Manz “Application of simulation techniques for improving the performance of irrigation conveyance systems,” I.J. Water Resources Eng., Vol. 2(1), pp. 21-38, 1994.

[16] Noname, “VisiDAQ user’s guide (ver 3.1),” American Advantech Corp., U.S.A, 1995.

[17] Rhodes, D.G. “Newton-Raphson solution of gradually varied flow,” J. Hydraulic Research, Vol. 33(2), pp. 213-218, 1995.

[18] Strelkoff, T. “Numerical solution of Saint-Venant equations,” J. Hydraulics Div., ASCE, Vol. 96(Hy1), pp. 223-252, 1970.

[۱۹] حسنزاده, يوسف, بررسي انتشار امواج ناشي از شكست سـد, مجله دانشكده فني دانشگاه تهران, شماره ۵۱, ۱۳۷۰.

[۲۰] منعم، محمد جواد, معرفي مدل مشابه‌سازي شبكه‌هاي آبياري و بهينه‌سازي بهره‌برداري از آنها, مجموعه مقالات هشتمين سمينار كميته ملي آبياري و زهكشي ايران، دانشگاه تهران, ۱ و ۲ آبان، صفحات ۱۱۳ تا ۱۳۶, ۱۳۷۵.

[۲۱] منعم، محمـد جـواد, آزمـون كاربرد مدل رياضي ICSS – POM در شرايط واقعي كانالهاي آبياري, مجموعه مقالات دومين كنفرانس هيدروليك ايران، دانشگاه علم وصنعت ايران, ۲۵ تا ۲۷ آبان، صفحات ۱۱۹ تا ۱۲۶, ۱۳۷۸.