

بررسی شرایط مختلف هیدرولیکی و بهره‌برداری دریاچه سالونی و توسعه مدل ریاضی سازه در انطباق با مدل هیدرودینامیک ICSS

ریحانه نقائی¹، محمد جواد منعم^{2*} و سید مهدی هاشمی شاهدانی³

تاریخ دریافت: 1394/9/10 تاریخ پذیرش: 1394/12/26

چکیده

به منظور اجرای برنامه‌های توزیع و تحویل آب و کنترل و تنظیم جریان، تاکنون سازه‌های متعددی برای شبکه‌های آبیاری طراحی شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. دریاچه سالونی یکی از سازه‌های کنترل و تنظیم سطح آب بوده که دارای مزایای مختلفی نظیر روگذر بودن جریان، اتوماسیون آسان، عبور هم‌زمان رسوبات و... می‌باشد. ارزیابی عملکرد سازه با توجه به تنوع روابط هیدرولیکی و روش‌های مختلف بهره‌برداری با استفاده از مدل‌های ریاضی، میسر است. با توجه به طبیعت غیرماندگار جریان در کانال‌های آبیاری، تلفیق مدل ریاضی با مدل هیدرودینامیک ضرورت دارد. در این تحقیق، شرایط مختلف هیدرولیکی و اجرایی که ممکن است دریاچه، تحت آن‌ها بهره‌برداری شود مورد بررسی قرار گرفت. سپس مدل ریاضی دریاچه سالونی برای کلیه حالات کاربردی توسعه داده شد و با مدل هیدرودینامیک ICSS، تلفیق شد. مدل توسعه داده شده توسط داده‌های آزمایشگاهی مورد صحت-سنجی قرار گرفت و حداکثر خطای عمق، 6% برآورد شد. سپس، مدل ریاضی در کانال EIR1، از شبکه آبیاری دز تحت شرایط کاربردی مختلف، شبیه-سازی شد و نتایج نشان داد مدل تهیه شده برای انواع شرایط کاربردی به‌خوبی عمل می‌نماید و از آن می‌توان در انواع مطالعات مرتبط با این نوع سازه در کانال‌ها و شبیه‌سازی شبکه‌های مجهز به این نوع آب‌بند استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: دریاچه سالونی، شرایط هیدرولیکی و بهره‌برداری، مدل هیدرودینامیک ICSS

مقدمه

کانال‌ها چندان شناخته شده نیست و عملکرد سازه در کانال‌های آبیاری مورد بررسی قرار نگرفته است لذا لازم است شرایط کاربردی سازه در کانال‌های آبیاری شناسایی و مورد ارزیابی واقع شود. در تحقیق حاضر، پس از معرفی شرایط مختلف هیدرولیکی و بهره‌برداری سازه در کانال‌های آبیاری، روابط هیدرولیکی سازه در کلیه حالات کاربردی در قالب شرایط مرزی مدل هیدرودینامیک ICSS تدوین و سپس با آن تلفیق شد و مورد آزمون قرار گرفت.

معرفی دریاچه سالونی

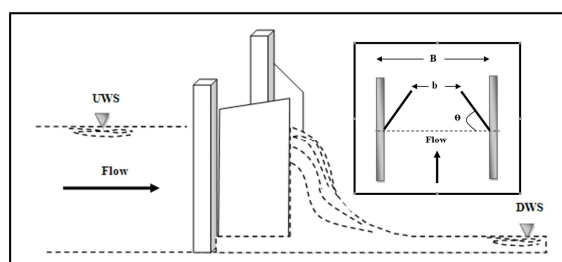
دریاچه سالونی سازه کنترل و تنظیم سطح آب بالادست است. این سازه به صورت دو دروازه به دیواره مستطیلی در امتداد کانال لولا می‌شود. دریاچه در امتداد جریان باز شده و با تغییر بازشدگی، امکان تنظیم ارتفاع آب برای دبی‌های متفاوت در بالادست دریاچه را فراهم می‌کند (شکل 1).

دریاچه سالونی در دهه 1980 توسط پیترانگمن جهت مدیریت نوسانات سطح آب در کانال‌های آبیاری ابداع شد، شرکت آکوا سیستم (AS2I) (Aqua System 2000) به‌منظور ارائه یک راه حل

ارزیابی دقیق عملکرد سازه‌ها در کانال‌های آبیاری، مستلزم تعیین رفتار هیدرولیکی سازه می‌باشد. با توجه به پیچیدگی‌های رفتار هیدرولیکی سیستم‌های کنترل و تنظیم در تعامل با جریان غیرماندگار در کانال‌های آبیاری و ضرورت ارزیابی عملکرد آن‌ها در شرایط مختلف هیدرولیکی و بهره‌برداری، لازم است در گام اول، مدل ریاضی هیدرودینامیک این سیستم‌ها تهیه و عملکرد آن‌ها شبیه‌سازی و ارزیابی گردد. دریاچه سالونی به‌عنوان سازه کنترل عمق آب بالادست قابلیت‌های مفیدی نظیر روگذر بودن جریان، سهولت نصب و بهره‌برداری، قابلیت خودکارسازی و امکان عبور رسوبات و اجسام شناور به‌طور هم‌زمان را دارد، لذا برای تنظیم سطح آب در کانال‌ها می‌تواند مؤثر واقع شود. با این حال، رفتار هیدرولیکی این سازه در

- 1- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد رشته سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، ایران
 - 2- دانشیار گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، ایران
 - 3- استادیار گروه آبیاری زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ابریحان، ایران
- * - نویسنده مسئول : (Email: monem_mj@modares.ac.ir)

انعطاف‌پذیر و اقتصادی، برای کنترل جریان در کانال‌های کوچک و متوسط، مدل ساده دریاچه سالونی را با یک سیستم محرک خودکار ترکیب کرده است. (شکل 2).



شکل 1- نمای طولی و پلان دریاچه سالونی (نقانی و منعم، 1392)



شکل 2- نمایی از پایین دست و بالادست دریاچه سالونی (Oad, 2006)

$$C_d = \left[0.454 - 0.434 \left(\frac{h_d}{h_u} \right)^2 + \frac{0.359}{h_d/h_u} \right] \quad (3)$$

$$C_d = \left[0.544 - 0.471 \left(\frac{h_d}{h_u} \right)^2 + \frac{0.24}{h_d/h_u} \right] \quad (4)$$

مرز بین جریان آزاد و مستغرق (s، درصد)، تابع زاویه بازشدگی (θ ، درجه)، بوده و برای شرایط با و بدون تبدیل به ترتیب به صورت روابط 5 و 6 استخراج گردید (یوسفوند، 1393):

$$S = \frac{(0.001\theta^2 + 0.434\theta - 2.7)}{100} \quad (5)$$

$$S = \frac{(0.008\theta^2 + 0.067\theta + 14.4)}{100} \quad (6)$$

اگر نسبت استغراق (h_d/h_u)، بیش‌تر از مرز استغراق (S) باشد جریان مستغرق و در غیر این‌صورت جریان عبوری از دریاچه، آزاد است.

معرفی مدل ICSS

هسته اصلی مدل ICSS توسط (Manz and schaalje., 1992)، به منظور شبیه‌سازی هیدرولیک، هیدرولوژی و بهره‌برداری از سیستم‌های انتقال و توزیع آب، طراحی و سپس توسط محققین مختلف از جمله (Monem and Manz., 1994)، به‌منظور ارزیابی شبکه‌های آبیاری و روش‌های بهره‌برداری بهینه از آن‌ها، توسعه

روابط هیدرولیکی دریاچه سالونی

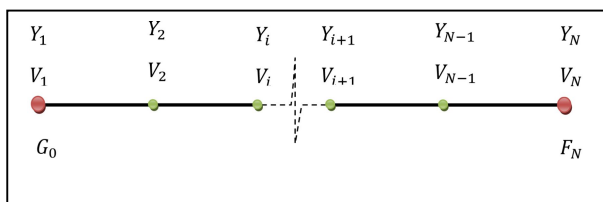
جریان عبوری از دریاچه در شرایط جریان آزاد و مستغرق به ترتیب به صورت روابط 1 و 2 پیشنهاد شده است (Aqua System 2000 Inc. (AS2I):

$$Q_{free} = C_f b h_u^{1.5} \quad (1)$$

$$Q_{submerge} = C_d C_e b \sqrt{\left(h_u^2 - h_d^2 \right) \left(\frac{1}{h_d} - \frac{1}{h_u} \right)^{-1}} \quad (2)$$

در این روابط، Q دبی عبوری از دریاچه (برحسب متر مکعب بر ثانیه)، C_f ضریب دبی دریاچه در حالت جریان آزاد، b عرض بازشدگی دریاچه (برحسب متر)، h_u عمق آب بالادست (برحسب متر)، h_d عمق آب پایین دست (برحسب متر)، C_d ضریب دبی بی بعد دریاچه در حالت جریان مستغرق، C_e ضریب دبی با بعد دریاچه در حالت جریان مستغرق (برحسب جذر متر بر ثانیه) می‌باشد. ضریب دبی دریاچه در شرایط جریان آزاد (C_f) برای شرایط با و بدون تبدیل به ترتیب برابر $1/961$ و $2/271$ جذر متر بر ثانیه به دست آمده (یوسفوند و منعم، 1393). ضریب دبی با بعد دریاچه در شرایط جریان مستغرق (C_e)، برابر $2/215$ جذر متر بر ثانیه، و ضریب دبی بدون بعد دریاچه در شرایط جریان مستغرق (C_d)، برای حالت با و بدون تبدیل به ترتیب به صورت روابط 3 و 4 معرفی شد:

می آیند.



شکل 4- گره ها، مجهولات و شرایط مرزی در یک بازه از کانال

برای حل دستگاه 2N معادله، 2N مجهولی تشکیل شده ابتدا ماتریس ژاکوبی مشتقات معادلات نسبت به متغیرهای عمق و سرعت تشکیل می شود سپس به دلیل غیرخطی بودن معادلات این ماتریس به روش سعی و خطا با به کار بردن روش نیوتن حل می گردد. پس از محاسبه عمق و سرعت در کلیه نقاط بازه، مدل وارد گام زمانی بعدی می شود.

مدل ICSS در ارزیابی های تجربی با داده های آزمایشگاهی (Treske., 1980)، جریان غیرماندگار را با دقت بالا شبیه سازی نمود همچنین در ارزیابی دقت مدل، اطلاعات خروجی مدل و روش به کار برده شده در سال 1990، توسط کمیته کاری مدل های ریاضی جامعه مهندسی عمران کانادا (Canadian Society of Civil Engineers) در برنامه ارزیابی مدل های ریاضی - هیدرودینامیک به طور دقیق بررسی گردیده و نتایج آن مورد تایید قرار گرفت (Skutsch., 1993). مدل ICSS در مطالعاتی نظیر (Jean Shahverdi and Monem., 2012 & Goussard., 2000)، مورد آزمون قرار گرفته و موفق ارزیابی شده است.

در مدل ICSS، در چهار قسمت از برنامه، شرایط مرزی احضار می شوند که این چهار قسمت عبارتند از، محاسبات جریان ماندگار (زیربرنامه D)، انجام عملیات بهره برداری (زیربرنامه C)، شبیه سازی جریان غیرماندگار (زیربرنامه A) و به روزرسانی پارامترهای محاسبه شده (زیربرنامه B) (شکل 5).

در شکل 5، IQ شاخص هدایت مدل به زیربرنامه ها، BC مخفف Boundary Condition و علامت # بیان کننده نوع شرایط مرزی (نوع سازه) می باشد که با عدد، مشخص می گردد. در مدل اصلی برای تعیین شرایط اولیه، جریان ماندگار محاسبه می شود. با توجه به جریان زیربرحالی در کانال های آبیاری، نقطه کنترل جهت محاسبه جریان ماندگار، انتهای کانال می باشد. لذا با معلوم بودن عمق و دبی در انتهای کانال، از آخرین بازه، محاسبات جریان ماندگار به سمت بالادست شروع شده و با حل معادله انرژی به روش تکراری نیوتن رافسون، مقدار عمق و سرعت در هر گره از بازه محاسبه می گردد به محض رسیدن به مرز میان دو بازه با توجه به وجود سازه از معادله مربوط به سازه جهت تعیین عمق و سرعت استفاده می شود.

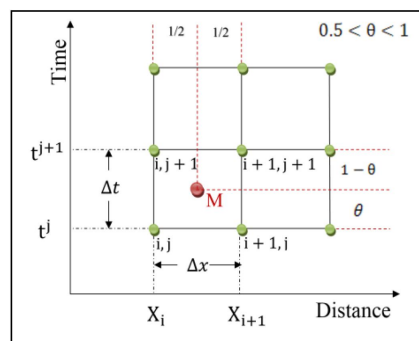
یافت. محاسبات جریان ماندگار در مدل با استفاده از حل معادله جریان متغیر تدریجی (Henderson., 1966)، به روش تکراری نیوتن، صورت می گیرد (Skutsch., 1993).

فرم معادلات سنت و نانت که مدل ICSS برای حل جریان غیرماندگار استفاده می کند به صورت روابط 7 و 8 می باشد. این روابط به ترتیب بیان گر روابط پیوستگی و اندازه حرکت می باشند.

$$\left(\frac{A}{B}\right) \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial Y}{\partial X} + \frac{\partial Y}{\partial t} + \frac{V}{B} (A \frac{Y}{X}) - \frac{1}{B} (p - i) = 0 \quad (7)$$

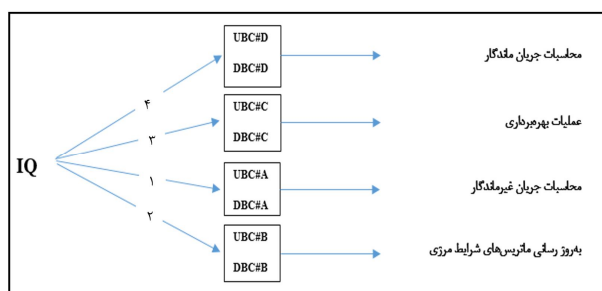
$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial X} + g(S_f - S_o) + \frac{V}{A} (p - i) = 0 \quad (8)$$

در این روابط، B عرض کانال در سطح فوقانی جریان، V سرعت متوسط جریان، t زمان، Y عمق جریان، X فاصله در طول کانال، p جریان گسترده ورودی، A سطح مقطع جریان، g شتاب ثقل، S_o شیب کف کانال، S_f شیب خط انرژی در رابطه مانینگ، i جریان گسترده خروجی، $A \frac{Y}{X}$ تغییرات سطح مقطع جریان نسبت به X با فرض Y ثابت، می باشند. معادلات سنت و نانت در مدل ICSS با استفاده از الگوی پرایزمن (روش تفاوت های محدود بر اساس شمای ضمنی چهار نقطه ای وزنی) (شکل 3)، ارائه شده توسط (Amein., 1968) و تست شده توسط (Amein and Fang., 1970) حل می شوند. این روش از دقت، همگرایی، پایداری و صحت بالایی برخوردار است. (Skutsch., 1993).



شکل 3- الگوی شمای ضمنی چهار نقطه ای وزنی

اگر در یک میدان حل تعداد N گره محاسباتی داشته باشیم، تعداد کل مجهول ها برابر با 2N خواهد بود (متناظر با هر نقطه دو مجهول y^{i+1} و V^{i+1} وجود دارد). از طرف دیگر تعداد بازه ها برابر N-1 بوده و چون برای هر بازه دو معادله منفصل شده (متناظر با معادلات پیوستگی و اندازه حرکت) برقرار می گردد لذا تعداد کل معادلات به دست آمده برابر با 2(N-1) می باشد (شکل 4). جهت قابل حل شدن این دستگاه ضروری است که تعداد دو معادله دیگر نیز تعیین گردیده و به دستگاه معادلات مزبور اضافه گردد. این دو معادله از طریق شرایط مرزی ابتدا و انتهای کانال (F_N و G_0)، به دست



شکل 5- زیربرنامه‌های شرایط مرزی

شرایط مختلف بهره‌برداری

زاویه بازشدگی دریاچه سالونی از 0 تا 90 درجه قابل تغییر می‌باشد، در حالت اول (کاملاً باز)، زاویه بازشدگی برابر 90 درجه می‌باشد و دریاچه حداکثر عرض بازشدگی را دارد (شکل 6- الف). در حالت دوم (نیمه باز)، زاویه بازشدگی، بین 0 تا 90 درجه تغییر کرده و تراز سطح آب بالادست دریاچه تنظیم می‌گردد (شکل 6- ب). در حالت سوم (کاملاً بسته)، زاویه بازشدگی معادل 0 درجه می‌باشد. در این حالت، جریان فقط از روی دریاچه عبور کرده و دریاچه نقش سرریز مستطیلی را دارد (شکل 6- ج) (نقائی و منعم، 1394)

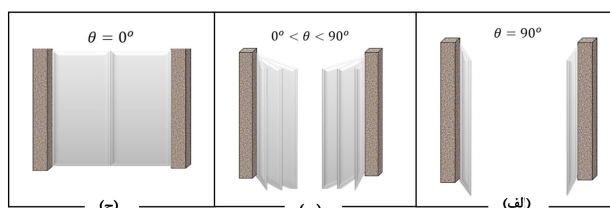
وضعیت استقرار سازه در کانال

در برخی شرایط ضروری است استقرار سازه در کانال به همراه یک تبدیل صورت گیرد. لذا استقرار دریاچه در دو حالت دریاچه با فشردگی جانبی و دریاچه بدون فشردگی جانبی امکان‌پذیر است. فشردگی دریاچه ممکن است به صورت تدریجی (شکل 7- الف) یا ناگهانی (شکل 7- ب) باشد. حالت بدون فشردگی جانبی بیش‌تر زمانی اتفاق می‌افتد که مقطع عرضی کانال، مستطیلی باشد و امکان استقرار دریاچه بدون تبدیل وجود داشته باشد (نقائی و منعم، 1394).

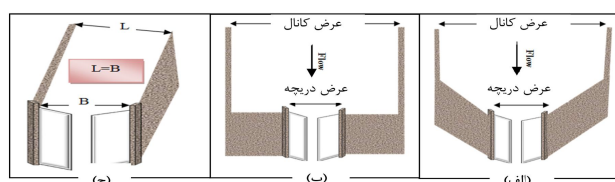
در اینجا است که IQ برابر چهار شده و شرایط مرزی D (BC#D)، احضار می‌شود. پس از انجام محاسبات جریان ماندگار، با انتخاب گزینه بهره‌برداری، توسط کاربر، میزان IQ برابر سه شده و شرایط مرزی C (BC#C)، احضار می‌شود. پس از تعیین عملیات بهره‌برداری، محاسبات گام‌های زمانی جریان غیرماندگار شروع شده و در هر گام ابتدا مقدار IQ برابر یک شده و زیربرنامه A از شرایط مرزی (BC#A)، احضار می‌شود. در هر گام زمانی پس از حل دستگاه معادلات، مقادیر دبی و عمق در ماتریس‌های شرایط مرزی با تبدیل IQ به دو و احضار زیربرنامه B (BC#B)، به‌روز شده و جایگزین اجزاء مربوطه در این ماتریس‌ها می‌گردد.

توسعه مدل ریاضی دریاچه سالونی

توسعه مدل ریاضی سازه و بررسی عملکرد آن در کانال‌های آبیاری، مستلزم آن است که کلیه شرایط کاربردی سازه شناسایی شده و روابط مربوط استخراج گردد و در تدوین مدل در نظر گرفته شود. در ادامه کلیه حالات مختلف هیدرولیکی و بهره‌برداری سازه تشریح شده است.



شکل 6- شرایط بهره‌برداری دریاچه سالونی



شکل 7- شرایط استقرار سازه در کانال

شرایط مختلف هیدرولیکی

جریان عبوری از دریاچه، بسته به میزان بازشدگی دریاچه و ارتفاع آب بالادست ممکن است در سه حالت میان‌گذر، توام و روگذر اتفاق بیفتد. در حالت میان‌گذر جریان فقط از بین دروازه‌ها عبور می‌کند (شکل 8- الف). برخی مواقع ممکن است سطح آب بالادست به حدی بالا بیاید که علی‌رغم باز بودن دریاچه، جریان به‌طور هم‌زمان میان‌گذر و روگذر باشد (شکل 8- ب). جریان را زمانی روگذر می‌نامند که دریاچه کاملاً بسته بوده و همانند سرریز مستطیلی جریان فقط از روی دریاچه عبور کند (شکل 8- ج). در شرایطی که جریان صرفاً میان‌گذر و یا روگذر است بسته به نسبت ارتفاع آب در پایین‌دست و بالادست دریاچه (نسبت استغراق) جریان ممکن است آزاد یا مستغرق باشد. لیکن در شرایط جریان توام (میان‌گذر و روگذر)، ممکن است سه حالت وجود داشته باشد. در حالت اول هنگامی که نسبت استغراق خیلی کم باشد ممکن است هم جریان میان‌گذر و هم جریان روگذر هر دو آزاد باشند. در حالت دوم با افزایش تدریجی نسبت استغراق، ممکن است جریان میان‌گذر، مستغرق شود ولی جریان روگذر، همچنان آزاد باشد. و در حالت سوم با افزایش بیش‌تر نسبت استغراق هم جریان میان‌گذر و هم جریان روگذر هر دو مستغرق می‌شوند (نقائی و منعم، 1394).

در شرایط جریان توام می‌توان فرض کرد محدوده‌ای از جریان که از فاصله عرض بازشدگی دریاچه عبور می‌کند میان‌گذر و قسمتی که خارج از این محدوده است به صورت سرریز عمل می‌کند (شکل 9).

نوع سرریز با توجه به حالت بازشدگی دریاچه، سرریز مایل و عرض سرریز برابر عرض دریاچه است (نقائی و منعم، 1394).

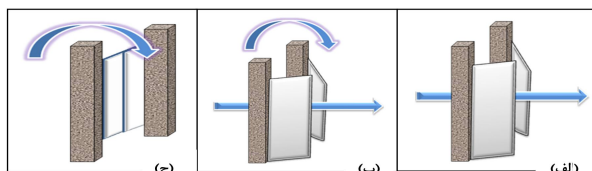
با ترکیب شرایط مختلف هیدرولیکی، بهره‌برداری و شرایط استقرار سازه در کانال، 14 حالت کاربردی برای دریاچه سالونی تعریف می‌شود (جدول 1). پس از بررسی شرایط مختلف هیدرولیکی و بهره‌برداری دریاچه سالونی، معادله هیدرولیکی کلیه حالت‌های کاربردی به‌عنوان شرط مرزی در قالب مدل هیدرودینامیک ICSS تدوین و با آن تلفیق گردید.

مدل ریاضی دریاچه سالونی

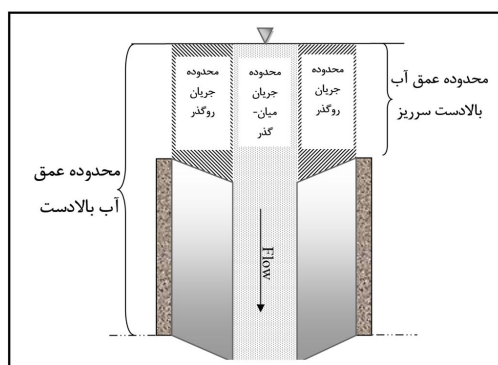
دریاچه سالونی با عنوان شرط مرزی شماره 45، (BC 45)، با مدل ICSS، تلفیق شد. چهار زیربرنامه‌ای که شرایط مرزی در آن‌ها احضار می‌شود در این قسمت تشریح می‌گردد (شکل 9).

شبیه‌سازی جریان ماندگار (BC45D)

هنگام انجام محاسبات جریان ماندگار از آخرین بازه (به سمت بالادست) به‌محض رسیدن به شرط مرزی دریاچه سالونی، زیربرنامه (BC45D) احضار می‌شود. دبی و مشخصات فیزیکی کانال و دریاچه از اطلاعات ورودی دریافت و عمق پایین‌دست دریاچه توسط مدل محاسبه می‌شود. با توجه به مشخصات دریاچه و عمق پایین‌دست، برنامه به سمت یکی از 14 حالت جدول 1، هدایت و روابط مربوط به هر حالت، جهت محاسبه عمق بالادست مورد استفاده قرار می‌گیرد.



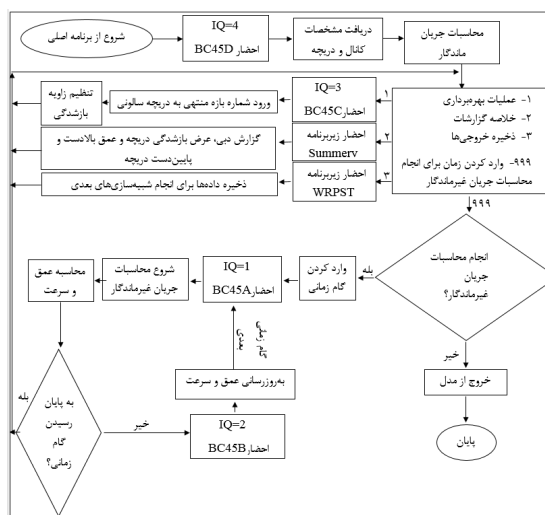
شکل 8- شرایط هیدرولیکی دریاچه سالونی



شکل 9- حالت هیدرولیکی توام

جدول 1- حالات کاربردی دریاچه سالونی (نقائی و منع، 1392)

ردیف	حالت جریان	شرایط استقرار	شرایط بهره‌برداری	شرایط هیدرولیکی
1	دریاچه آزاد	با تبدیل		
2	دریاچه مستغرق		نیمه باز	میان گذر
3	دریاچه آزاد	بدون تبدیل		
4	دریاچه مستغرق			
5	سرریز آزاد	با تبدیل		
6	سرریز مستغرق		کاملاً بسته	روگذر
7	سرریز آزاد	بدون تبدیل		
8	سرریز مستغرق			
9	سرریز آزاد دریاچه آزاد			
10	سرریز آزاد دریاچه مستغرق	با تبدیل		
11	سرریز مستغرق دریاچه مستغرق		نیمه باز	توأم میان گذر و روگذر
12	سرریز آزاد دریاچه آزاد			
13	سرریز آزاد دریاچه مستغرق	بدون تبدیل		
14	سرریز مستغرق دریاچه مستغرق			



شکل 9- نمودار گردش مدل ریاضی دریاچه سالونی

شبیه‌سازی عملیات بهره‌برداری (BC45C)

پس از محاسبه جریان ماندگار با انتخاب گزینه بهره‌برداری توسط کاربر، برنامه، وارد عملیات بهره‌برداری شده و با انتخاب شماره بازه منتهی به دریاچه سالونی، زیربرنامه (BC45C) احضار می‌شود و می‌توان زاویه بازشدگی دریاچه را تغییر داد.

شبیه‌سازی جریان غیرماندگار (BC45A) و به‌روزرسانی عمق و سرعت (BC45B)

برای محاسبه جریان غیرماندگار در بازه‌ها نیاز به روابط G_o و F_N می‌باشد. برای مشخص کردن این روابط نیاز به عمق و سرعت محاسبه شده در تکرار قبلی است، این مجهولات در تکرار قبلی توسط

برنامه اصلی محاسبه شده و توسط زیربرنامه به‌روزرسانی در حافظه برنامه ذخیره می‌شوند. لذا در ابتدای زیربرنامه جریان غیرماندگار، مقادیر عمق و سرعت در بالادست و پایین‌دست سازه فراخوانی می‌شود. در ادامه نمونه‌های از روابط F_N و G_o برای شرط مرزی دریاچه سالونی در حالت جریان آزاد و مستغرق معرفی می‌گردد.

در شرایط جریان آزاد، شرط مرزی پایین‌دست و بالادست دریاچه سالونی به ترتیب به صورت روابط 9 و 10، نوشته می‌شود (نقائی و منع، 1392).

$$G_o: A_1 V_1 - Q_1 = 0 \quad (9)$$

$$F_N: A_N V_N - C_f b Y_N^{1.5} = 0 \quad (10)$$

در شرایط جریان مستغرق، وضعیت جریان در انتهای بازه

شرایط با و بدون تبدیل، توسط (یوسفوند، 1393) در آزمایشگاه موسسه تحقیقات آب تهران، استخراج شد. مشخصات فلوم و دریچه در جدول ۲ نشان داده شده است

در آزمایشگاه، عمق بالادست دریچه سالونی برای زوایای بازشدگی 45، 52/5، 60، و 67/5 درجه و دی‌های 20، 30، 40 و 60 لیتر بر ثانیه و نسبت‌های استغراق 0، 0/5، 0/7 و 0/9، اندازه‌گیری شد. مدل ریاضی دریچه سالونی نیز برای شرایط مشابه، شبیه‌سازی و عمق بالادست استخراج شد. نتایج نشان داد، حداکثر خطای عمق بین مدل ریاضی و مدل فیزیکی، 6 درصد است (جدول 3) که این مقدار خطا برای اهداف عملی در کانال‌های آبیاری قابل قبول بوده و مدل ریاضی توسعه یافته می‌تواند با اطمینان در کانال‌های آبیاری مورد استفاده قرار گیرد.

پس از صحت‌سنجی و اطمینان از عملکرد مدل ریاضی، دریچه سالونی با استفاده از شبیه‌سازی ریاضی در شرایط هیدرولیکی و بهره‌برداری مختلف مورد آزمون قرار گرفت. برای مطالعه عملکرد دریچه، بخشی از کانال E1R1 از شبکه آبیاری دز، انتخاب شد. مقطع کانال دوزنقه‌ای با پوشش بتنی بوده و ضریب زبری مانینگ آن در طول مسیر 0/017 گزارش شده است.

بالادست دریچه سالونی (F_N) علاوه بر شرایط جریان بالادست تابع شرایط جریان پایین‌دست نیز می‌باشد. در این حالت شرط مرزی پایین‌دست و بالادست دریچه سالونی به ترتیب به صورت روابط 11 و 12 نوشته می‌شود (نقائی و منعم، 1392).

$$G_O: A_1 V_1 - A_n V_n = 0 \quad (11)$$

$$F_n: A_n V_n - C_d C_e b \sqrt{\left[(h_u^2 - h_d^2) \left(\frac{1}{h_d} - \frac{1}{h_u} \right)^{-1} \right]} = 0 \quad (12)$$

در این روابط، A_1 و V_1 سطح مقطع و سرعت در گره اول بازه بعد از دریچه سالونی، A_n و V_n سطح مقطع و سرعت در گره آخر بازه قبل از دریچه سالونی و Q_1 دبی ورودی به بازه می‌باشد (بقیه پارامترها در روابط 1 و 2، معرفی شده‌اند).

مشابه روابط 9 تا 12، روابط مورد نیاز برای هر 14 حالت کاربردی دریچه سالونی تدوین شده و این روابط با برنامه اصلی مدل ICSS تلفیق شد.

صحت‌سنجی مدل ریاضی دریچه سالونی

پس از تهیه مدل ریاضی دریچه سالونی، داده‌های حاصل از مدل ریاضی و مدل آزمایشگاهی، مورد مقایسه و صحت‌سنجی قرار گرفت. داده‌های آزمایشگاهی، برای چهار حالت جریان آزاد و مستغرق در

جدول 2- مشخصات مدل آزمایشگاهی دریچه سالونی

مشخصات کانال				مشخصات دریچه			
طول (m)	ارتفاع (m)	عرض بدون تبدیل (m)	عرض با تبدیل (m)	عرض (m)	ارتفاع (m)	ارتفاع (m)	اختلاف تراز دو طرف دریچه (m)
10/3	1	1	0/5	0/017	0/5	0/6	0/3

جدول 3- نتایج حاصل از مقایسه مدل ریاضی و مدل فیزیکی دریچه سالونی

شرایط استقرار	شرایط هیدرولیکی	نسبت استغراق	دبی ($\frac{m^3}{s}$)	زاویه بازشدگی (°)	عمق اندازه گیری شده (m)	عمق محاسبه شده (m)	حداکثر خطا (%)
	آزاد	0	0/04	45	0/254	0/269	6/031
			0/06	45	0/337	0/335	4/302
			0/06	52/5	0/307	0/290	5/476
با تبدیل		0/9	0/06	45	0/519	0/497	4/276
			0/04	52/5	0/243	0/253	4/081
	مستغرق	0/7	0/04	67/5	0/201	0/192	4/287
			0/06	67/5	0/266	0/252	5/085
			0/02	45	0/235	0/222	5/532
			0/03	52/5	0/181	0/19	4/972
بدون تبدیل	مستغرق		0/03	52/5	0/17	0/177	4/118
		0/5	0/02	60	0/124	0/117	5/645

جدول 4- مشخصات مدل ریاضی کانال E1R1 از شبکه آبیاری دز

بازه	طول بازه (m)	رقوم بالادست (m)	رقوم پایین دست (m)	شیب طولی کف	عرض کف (m)	سازه بالادست	سازه پایین دست
1	1071	150/47	150/32	0/00012	1/5	ورودی با کنترل دبی	آبگیر روزنه‌ای 1
2	1	150/32	150/32	0/00012	1/5	آبگیر روزنه‌ای 1	آبگیر روزنه‌ای 2
3	3	150/32	150/32	0/00012	1/5	آبگیر روزنه‌ای 2	سازه آببند 1
4	4	150/02	150/02	0/00012	1	سازه آببند 1	ادامه کانال
5	267	150/02	149/8	0/00012	1	ادامه کانال	آبگیر روزنه‌ای 3
6	1	149/8	149/8	0/00012	1	آبگیر روزنه‌ای 3	آبگیر روزنه‌ای 4
7	3	149/8	149/8	0/00012	1	آبگیر روزنه‌ای 4	سازه آببند 2
8	4	149/7	149/7	0/00012	1	سازه آببند 2	ادامه کانال
9	428	149/7	148/93	0/00012	1	ادامه کانال	سیفون معکوس
10	814	148/57	148/47	0/00012	1	سیفون معکوس	آبگیر روزنه‌ای 5
11	1	148/47	148/47	0/00012	1	آبگیر روزنه‌ای 5	آبگیر روزنه‌ای 6
12	3	148/47	148/47	0/00012	1	آبگیر روزنه‌ای 6	سازه آببند 3

نتایج و بحث

مدل ریاضی دریاچه سالونی در دامنه وسیعی از شرایط کاربردی، مورد آزمون قرار گرفت. سناریوهای اصلی در شبیه‌سازی‌ها عبارتند از، تغییرات زاویه بازشدگی با توجه به دبی ورودی ثابت (جدول 5) و تغییرات تدریجی و ناگهانی دبی ورودی با توجه به زاویه بازشدگی ثابت (جدول 6). به علت حجم بالای خروجی‌ها، در این تحقیق نمونه‌ای از نتایج شبیه‌سازی‌ها مورد بحث قرار می‌گیرد نتایج سایر شرایط در تحقیقات مربوطه (نقائی، 1393) قابل دسترسی است.

شیب دیواره 1:1/5 (عمودی : افقی) می‌باشد. برای تهیه مدل ریاضی کانال E1R1، چهار بازه اولیه آن انتخاب شده است. طول این 4 بازه 2600 متر می‌باشد و دارای 13 سازه کنترل و تنظیم است. مشخصات مدل ریاضی کانال E1R1، در (جدول 4) نشان داده شده است. دریاچه سالونی با ارتفاع 1 متر به عنوان سازه تنظیم سطح آب بالادست در هر دو حالت با و بدون تبدیل به ترتیب در انتهای بازه سوم و هفتم کانال قرار گرفت.

جدول 5- سناریوهای شبیه‌سازی دریاچه سالونی با دبی ثابت و بازشدگی‌های مختلف

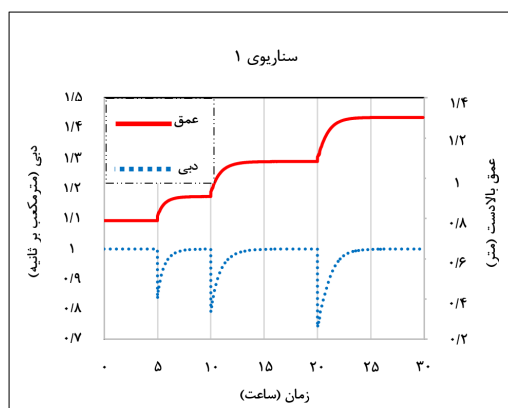
شماره	شرایط هیدرولیکی	شرایط استقرار	دبی (m^3/s)	ارتفاع دریاچه (m)	بازشدگی اولیه ($^{\circ}$)	عمق اولیه (m)	نوع شبیه سازی	تغییرات بازشدگی	عمق بالادست (m)
1	میان-گذر	دریاچه مستغرق	1	1/2	80	0/789	کاهش بازشدگی	70	0/909
								60	1/083
								50	1/302
2	روگذر	سرریز آزاد	0/2	0/3	0	0/524	افزایش بازشدگی	10	0/558
								20	0/526
								30	0/482
3	توام	دریاچه مستغرق سرریز مستغرق	2	0/4	70	1/062	کاهش بازشدگی	60	1/143
								50	1/24
								40	1/348
4	توام	دریاچه آزاد سرریز آزاد	0/3	0/8	30	0/683	کاهش بازشدگی	20	1/016
								10	1/107
								0	1/094

عکس‌العمل ناشی از آن دریاچه سالونی در شرایط زاویه بازشدگی ثابت و تغییرات دبی ورودی نیز، شبیه‌سازی شد. به عنوان نمونه، حالت هیدرولیکی دریاچه مستغرق-سرریز آزاد در جدول 6، نشان داده شده است. در تمامی سناریوها جریان اولیه برابر 1 متر مکعب در ثانیه بوده است.

با توجه به دبی اولیه کانال و حداکثر ظرفیت دبی عبوری از کانال (2/67 مترمکعب بر ثانیه)، تغییرات تدریجی دبی حدود 20 تا 30 درصد و تغییرات ناگهانی حدود 50 تا 70 درصد در نظر گرفته شد. همانطور که ملاحظه می‌شود، زمان ماندگاری برای جریان کاهشی، بیش‌تر از جریان افزایشی است و این امر ناشی از اختلاف رفتار جریان در امواج مثبت و منفی است. امواج مثبت پایدار بوده و می‌توانند به-عنوان یک موج پیش‌رونده یکنواخت مورد بررسی قرار گیرند، در صورتی که امواج منفی ناپایدار بوده و شکل آن‌ها با حرکت موج تغییر می‌یابد (ابریشمی و حسینی، 1372). رفتار هیدرولیکی مشاهده شده و تغییرات دبی و عمق آب بالادست دریاچه نشان از عملکرد مناسب مدل دارد (شکل 10).

نتایج حاصل از تغییرات زاویه بازشدگی با توجه به دبی ورودی ثابت نشان می‌دهد، در همه سناریوها الگوی جریان رعایت شده و با افزایش بازشدگی، رقوم سطح آب کاهش و با کاهش بازشدگی، رقوم سطح آب افزایش می‌یابد. به عنوان مثال نمودار تغییرات عمق و دبی در سناریوی شماره 1 در شکل 10 ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که با کاهش میزان بازشدگی عمق جریان افزایش می‌یابد. در گام‌های متوالی اگر چه میزان تغییرات زاویه در هر گام ثابت و برابر 10 درجه است لیکن میزان تغییرات عرض بازشدگی به‌صورت یکسان کاهش نمی‌یابد و در گام‌های متوالی کم‌تر کاهش می‌یابد. از طرفی ارتفاع مؤثر جریان در گام‌های متوالی افزایش یافته لذا با ثابت بودن ضریب دبی و کاهش تغییرات عرض بازشدگی در هر گام، برای دبی عبوری ثابت مقدار تغییرات عمق بیش‌تر می‌شود. به‌همین ترتیب با کاهش زاویه بازشدگی، تغییرات لحظه‌ای جریان در هر گام بیش‌تر شده و متعاقب آن زمان لازم برای پایداری جریان، افزایش می‌یابد (شکل 10).

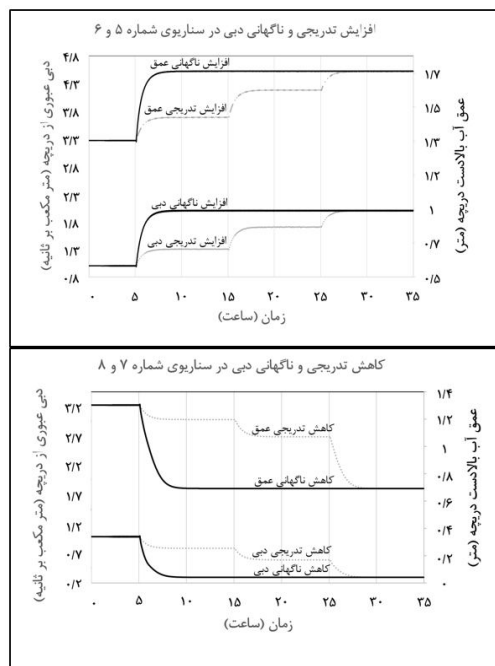
جهت بررسی وضعیت تغییرات موج افزایشی و کاهشی و زمان



شکل 10- تغییرات دبی و عمق نسبت به زمان

جدول 6- سناریوها و نتایج حاصل از شبیه‌سازی دریاچه سالونی با بازشدگی ثابت و دبی‌های مختلف

سناریو	مدت زمان ماندگاری (ساعت)	عمق آب بالادست (m)	تغییرات دبی (m ³ /s)	نوع شبیه‌سازی	عمق اولیه (m)	شرایط هیدرولیکی	زاویه باز شدگی (°)
5	3/5	1/441	1/3	تدریجی	1/304	دریاچه مستغرق سرریز آزاد	40
	3/24	1/601	1/7				
6	2/94	1/710	2	ناگهانی	1/304	دریاچه مستغرق سرریز آزاد	40
	3/79	1/710	2				
7	4/5	1/198	0/8	تدریجی	1/304	دریاچه مستغرق سرریز آزاد	40
	3/84	1/072	0/6				
8	5/7	0/692	0/3	ناگهانی	1/304	دریاچه مستغرق سرریز آزاد	40
	6/35	0/692	0/3				



شکل 11- تغییرات تدریجی و ناگهانی دبی و عمق، نسبت به زمان

نتیجه گیری

دریاچه سالونی می‌تواند جهت کنترل سطح آب بالادست و بهره‌برداری مناسب از شبکه‌های آبیاری مفید واقع شود. بدیهی است جهت بررسی عملکرد سازه می‌توان از دو روش مدل فیزیکی و مدل ریاضی بهره جست، لیکن هزینه‌های بالای ساخت مدل فیزیکی و ضرورت ارزیابی عملکرد سازه در دامنه وسیعی از شرایط مختلف هیدرولیکی و بهره‌برداری، استفاده از مدل ریاضی را ضروری می‌نماید. برای توسعه مدل ریاضی دریاچه سالونی 14 حالت کاربردی دریاچه شناسایی شد و روابط ریاضی مربوط به کار گرفته شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد عملکرد مدل ریاضی دریاچه سالونی در هر 14 حالت کاربردی دریاچه، مطلوب بوده و مدل ریاضی دریاچه سالونی می‌تواند در مطالعات کانال‌های آبیاری مجهز به این آب‌بند، مفید واقع شود.

منابع

- ابریشمی، ج و حسینی، س.م. 1372. هیدرولیک کانال‌های باز چاپ اول، مشهد، انتشارات آستان قدس
- نقائی، ر. 1393. توسعه مدل ریاضی دریاچه سالونی و تلفیق آن با مدل هیدرودینامیک ICSS. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس تهران.
- نقائی، ر و منعم، م.ج. 1392. تدوین روابط سازه دریاچه سالونی در قالب

شرایط مرزی مدل هیدرودینامیک ICSS به‌منظور تهیه مدل ریاضی آن. در اولین همایش ملی سازه‌های آبی و آبیاری. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

نقائی، ر و منعم، م.ج. 1392. معرفی شرایط مختلف هیدرولیکی و بهره‌برداری دریاچه سالونی در کانال‌های آبیاری. اولین همایش ملی آبیاری و بهره‌وری آب. انجمن آبیاری و زهکشی ایران. دانشگاه فردوسی مشهد، 10 بهمن 92.

نقائی، ر و منعم، م.ج. 1394. شبیه‌سازی انواع شرایط کاربردی دریاچه سالونی و ارائه دستورالعمل بهره‌برداری از سازه در کانال EIRI از شبکه آبیاری دز. اولین کنگره ملی آبیاری و زهکشی، انجمن آبیاری و زهکشی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، 23 و 24 اردیبهشت 94.

یوسفوند، ف و منعم، م.ج. 1393. استخراج معادله دبی دریاچه سالونی به عنوان سازه نوین آب‌بند با فشردگی جانبی با استفاده از رابطه انرژی در شرایط جریان آزاد. اولین سمینار مدیریت آب در مزرعه، موسسه تحقیقات آب و خاک، کرج

یوسفوند، ف. 1393. تأثیر شرایط هیدرولیکی و بهره‌برداری بر عملکرد دریاچه‌های سالونی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس تهران.

Amein, M. 1968. An Implicit Method for Numerical Flood Routing, Water Resources Research, 4.4: 719-726.

- Efficiently. Colorado Water Newsletter of the Water Center at Colorado State University.
- Shahverdi,K., Monem,M.J. 2012. Construction and Evaluation of BIVAL Automatic Control System for Irrigation Canals in Laboratory Flume, Jour. of Irrigation and Drainage. 61. 2: 201-207.
- Shahverdi,K., Monem,M.J. 2015. Application of Reinforcement Learning Algorithm for Automation of Canal Structures, Journal of Irrigation and Drainage. 64. 1: 77-84.
- Skutsh,J.C. 1993. Irrigation Water Delivery Models, Proceedings of the FAO Expert Consultation. Water Report. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 16.4: pp: 664- 675.
- The Canadian Society for Civil Engineering Task Committee on River Models. 1990. Comparative evaluation of river models, Vol. V of the Proceeding of the Annual Conference of the CSCE. May 1990, Hamilton Ontario, Canada. 282-300.
- Treske,A. 1980. Experimental Überpristung Numerischer Berechnungsuertatinen von Hoch was serwellen, in Blind, Report of of Hydraulic Research S.tation, TU Munchen, 44:1-133.
- Amein,M and Fang,C.S. 1970. Implicit Flood Routing in Natural Channels, Hydraulic Division, ASCE, December 1970, 2481-2500.
- AS2I (Aqua Systems 2000). (2005). "Hydra LOPAC gate."
(http://www.as2i.net/products/control_gates/hydra-lopac-gate) (Mar. 10, 2013).
- Henderson,F.M. 1966. Open Channel flow, Macmillan Publishing Company, New York.
- Jean Gousard. 2000. Canal Operation Simulation Models (Provisional Catalogue of Models Currently Available), International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), September 2000, PP. 1-27.
- Manz,D. and Schaaljez,M. 1992. Development and application of the irrigation conveyance system simulation model. CEMAGREF-IIMI International Workshop on the Application of mathematical modeling for Improvement of Irrigation Canal Operation, Oct. 26-30, Montpellier, France.
- Monem,M.J and Manz,D.H. 1994. Application of simulation techniques for improving the performance of irrigation conveyance systems. Journal of Water Resources Engineering. 2.1:1-22
- Oad,R and Kinzli,k. 2006. SCADA Employed in Middle Rio Grande Valley to Help Deliver Water

Evaluating Various Hydraulic and Operation Conditions of Lopac Gate and Developing its Mathematical Model in Accordance with the ICSS Hydrodynamic Model

R. Naghaei¹, M. J. Monem^{2*} and S. M. Hashemy Shahedany³

Recived: Nov.30, 2015

Accepted: Mar.16, 2016

Abstract

In order to delivery and distribution programs of water in irrigation network have been used the design and implementation of different structures. Lopac gate is one of the upstream control structures having some advantages such as, performing as overflow structure, easy automation, crossing sediments and floating bodies simultaneously. One of the effective tools to study control structures is mathematical model. Due to the unsteady nature of flow in irrigation canals, incorporation of mathematical model of control structure with hydrodynamic models, is necessary. In this research, the Various Hydraulic and Operation Conditions of Lopac Gate is introduced and mathematical model of Lopac gate is developed and linked with ICSS hydrodynamic model. The developed model is validated using physical model data. The maximum error obtained as 6%, which is acceptable for practical purposes. The model was tested on a canal of DEZ irrigation network in Iran under many different conditions. Results showed that, the model is performing well for tested applications and could be used in various studies of irrigation canals equipped with this structure.

Keywords: Lopac gate, Hydraulic and Operation Conditions, ICSS Model, hydrodynamic Model

1- M. Sc. Graduate, Department of Water Structures, The University of Tarbiat Modares
2- Associate Professor, Department of Water Structures, The University of Tarbiat Modares
3- Assistant Professor, Department of Irrigation and Drainage, The University of Abureyhan
(*-Corresponding Author Email: monem_mj@modares.ac.ir)