توسعه مدل ریاضی سیستم کنترل CARDD برای کانال‌های آبیاری، تلفیق آن با مدل ریاضی ICSS و ارزیابی آن توسط آزمون‌های استاندارد پیشنهادی ASCE

محمدجواد منعم* و سید پویان احمدپناه[1]

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۵/۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۲/۲۰)

چکیده

سامانه‌های مختلف کنترل پایین دست خودکار برای تأمین انعطاف‌پذیری بیشتر در شبکه‌های آبیاری پیشنهاد شده است که سیستم کنترل CARDD یکی از سیستم‌های ابتکاری و خاص می‌باشد. در این تحقیق پس از توسعه مدل ریاضی سیستم کنترل CARDD در انطباق با مدل هیدرودینامیک ICSS، امکان ارزیابی و آزمون عملکرد آن تحت شرایط گوناگون فراهم گردید. به منظور ارزیابی عملکرد این سیستم کنترل، از کانال استاندارد شماره ۲ پیشنهادی ASCE و گزینه‌های پیشنهادی این مؤسسه که در آنها الگوریتم کنترل توسط تغییرات ملایم و شدید جریان در کانال تازه احداث (Tuned) ارزیابی می‌شود، استفاده شد و شاخص‌های ارزیابی عملکرد محاسبه گردید و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در تغییرات تدریجی جریان، حداکثر انحراف عمق حدود ۵ درصد بوده که همواره در محدوده مجاز قرار داشته است. در تغییرات ناگهانی این مقدار حدود ۸ درصد بوده که حدوداً پس از ۱ ساعت تثبیت شده است که زمان قابل توجهی است. نمودار تغییرات عمق جریان و شاخص‌های به‌دست آمده نشانگر عملکرد مطلوب مدل توسعه یافته برای تغییرات ملایم جریان می‌باشد. برای تغییرات شدید جریان حداکثر تغییرات عمق محدود بوده اما زمان عکس‌العمل نسبتاً طولانی بوده است.

واژه‌های کلیدی: سیستم‌های کنترل، کانال‌های آبیاری، کنترل پایین دست، CARDD، ICSS

۱. گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: monem_mj@modares.ac.ir

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.2.9]

مقدمه

پایین بودن سطح عملکرد بسیاری از پروژه‌های آبیاری از نظر شاخص‌هایی مانند راندمان، کفایت و عدالت در توزیع، انجام تحقیقات گسترده‌ای را در زمینه بهبود روش‌های بهره‌برداری و ارتقاء عملکرد ایجاب کرده است. سیستم‌های کنترل و سازه‌های مربوط، نقش مهمی را در توزیع آب در شبکه‌های آبیاری برعهده دارند و میزان موفقیت شبکه، به چگونگی عملکرد آنها بستگی دارد. با توجه به ضرورت توسعه سیستم‌های کنترل، سیستم‌های کنترل متعددی در دو دهه اخیر ارائه شدند که هر یک از آنها دارای منطق خاص می‌باشد. یکی از این سیستم‌های کنترل، سیستم کنترل CARDD (Canal Automation for Rapid Demand Deliveries) می‌باشد که یک سیستم کنترل پایین دست خاص محسوب می‌شود. پس از ابداع یک سیستم کنترل باید عملکرد آن در شبکه کانال آبیاری مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گیرد. از آنجا که پیاده‌سازی این سیستم‌ها بر روی مدل فیزیکی هزینه بر و وقت‌گیر می‌باشد، امروزه معمولاً مدل ریاضی این سیستم‌ها ساخته می‌شود و در شرایط مختلف مورد آزمون قرار می‌گیرند. اولین آزمونی که برای ارزیابی سیستم کنترل CARDD انجام گرفت با استفاده از مدل ریاضی شبیه‌سازی جریان غیرماندگار USM که توسط پرسنل USBR (United States Bureau of Reclamation) توسعه یافته است صورت گرفت که دقت بسیار خوبی در کنترل میزان جریان پس از اعمال این منطق کنترل بر روی کانالی با بازه‌های طولانی دیده شد (۵).

هم‌چنین این سیستم کنترل در سه مدل فیزیکی کانال‌های مختلف مربوط به شبکه LHWD (Lost Hills Water District) آزمایش گردیده است و در پایان منطق کنترل CARDD بر روی سه کانال شبیه‌سازی شده عملکرد کاملاً موفقی از خود به نمایش گذارد (۵). پس از آن سیستم کنترل CARDD در ۷ کانال مختلف و با استفاده از مدل ریاضی CARIMA مطالعه گردید و در این آزمون نیز سیستم کنترل CARDD عملکرد رضایت‌بخشی به نمایش گذاشت (۸). این سیستم کنترل در یک مدل فیزیکی کانال ساخته شده در بخش تجهیزات انتقال آب دانشگاه صنعتی کالیفرنیا نیز آزمایش گردیده است و در این مورد نیز عملکرد قابل قبولی داشته است (۸). برخی سیستم‌های کنترل خودکار مانند P+PR (Proportional + Proportional reset) (۴)، BIVAL (۳) و فازی (۲) در انطباق با مدل ICSS (Irrigation Conveyance Systems Simulation) قبلاً تدوین شده‌اند. به منظور توسعه مدل و تجهیز آن به سیستم‌های کنترل شناخته شده لازم بود سیستم کنترل CARDD نیز برای این مدل تدوین گردد و مورد ارزیابی قرار گیرد. به منظور ارزیابی الگوریتم‌های کنترل مختلف در شرایط مشابه و مقایسه عملکرد آنها، ASCE (American Society of Civil Engineers) نمونه‌های آزمون استاندارد در دو نوع کانال را پیشنهاد نمود که در این تحقیق الگوریتم کنترل CARDD توسط گزینه‌های پیشنهادی ASCE برای کانال تازه احداث (Tuned) در کانال شماره ۲ پیشنهادی این مؤسسه مورد ارزیابی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

تعریف سیستم کنترل

هر سیستم کنترل شامل دو بخش سخت‌افزار (تجهیزات) و نرم‌افزار (الگوریتم یا منطق کنترل) است که به منظور اجرای عملیات بهره‌برداری از سازه‌های نصب شده در کانال‌ها براساس اطلاعات گرفته شده در سطح شبکه، طراحی می‌شود. در سیستم کنترل، اطلاعات به‌دست آمده از حسگرهای نصب شده در محل‌های مورد نظر در شبکه، به عنوان اطلاعات ورودی به الگوریتم کنترل در نظر گرفته شده و براساس نوع برنامه و الگوریتم کنترلی، بهره‌برداری از سازه‌ها انجام می‌شود تا متغیر مورد کنترل در محدوده مجاز هدف قرار گیرد (۱۰).

سیستم کنترل CARDD

این منطق که یکی از الگوریتم‌های کنترل خودکار از نوع کنترل از پایین دست خاص محسوب می‌گردد، اولین‌بار توسط چارلز ام برت (Charles M. Burt) در سال ۱۹۸۳ به‌صورت کاملاً

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.2.9]

ابداعی توسعه یافت و سیستم کنترل CARDD نامیده شد (۵). پس از کاربرد این سیستم به‌منظور اصلاح و ارتقاء عملکرد آن در سال ۱۹۸۹ وی تغییرات قابل توجهی در الگوریتم این کنترل خودکار ایجاد نمود اگرچه به اذعان وی این الگوریتم کماکان نیازمند اصلاح و تغییر می‌باشد (۶). در این تحقیق منطق کنترل CARDD جدید که آخرین تغییرات اعمال شده توسط مبدع در آن لحاظ شده است توسعه یافته است.

چگونگی عملکرد سیستم CARDD

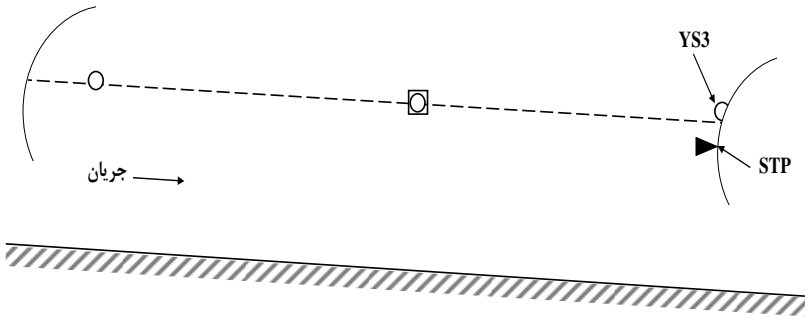
در این الگوریتم کنترل پردازش اطلاعات و اتخاذ تصمیم نهایی با عبور از یک سری عبارات شرطی صورت می‌گیرد. در این الگوریتم اطلاعات ورودی تراز سطح آب در ۳ یا ۵ نقطه در طول بازه و میزان بازشدگی دریچه بالادست بازه می‌باشد و هدف آن تثبیت تراز سطح آب در انتهای پایین دست بازه (YS3) در تراز سطح آب هدف (STP) می‌باشد (شکل ۱)(۷). متغیرهای مورد نیاز در الگوریتم کنترل CARDD در جدول ۱ معرفی شده‌اند. هر یک از این متغیرها در مراحل مختلف فرآیند کنترل استفاده می‌شوند. شکل ۲ بخش ابتدایی زیر برنامه CARDD جدید را نشان می‌دهد. ابتدا ۳ عمق مورد نظر و بازشدگی دریچه بالادست خوانده می‌شود و میانگین تراز سطح آب در طول بازه محاسبه می‌شود. این الگوریتم علاوه بر اطلاعات مربوط به زمان حال از اطلاعات ۳ گام زمان قبل نیز استفاده می‌کند. برنامه پس از طی چند مرحله شرطی، مقادیر ۳ پارامتر اصلی مورد نیاز خود را که عبارتند از: میانگین عمق‌های مشاهده شده در طول بازه (MEANE)، میانگین عمق در نقطه کنترل در ۳ گام زمانی قبل (ZINT) و زمان تخمینی بازگشت تراز سطح آب به تراز هدف در نقطه کنترل (CHK) را با توجه به میزان انحراف YS3 از عمق هدف و متوسط عمق در نقطه کنترل در ۳ گام زمانی، برآورد می‌نماید. پس از این مرحله بالا یا پایین بودن YS3 نسبت به STP را تعیین کرده و به‌ترتیب کار به شاخه B یا C ارجاع داده می‌شود. شاخه B مشابه ولی معکوس شاخه C است. در هر یک از این دو شاخه برنامه با توجه به مقادیر به‌دست آمده برای ۳ پارامتر اصلی و عبور از چندین عبارت شرطی ابداعی که در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده‌اند و براساس سایر عوامل هیدرولیکی و ضرایب ثابت سیستم کنترل، پارامتری با عنوان DELG را برآورد می‌کند. در مرحله بعد (شاخه D، شکل ۵) با ضرب پارامتر DELG در یکی از ثابت‌های ۱۱گانه موجود، میزان تغییر مورد نیاز در بازشدگی دریچه حاصل می‌شود. درصورتی‌که این میزان از حد تعیین شده برای برنامه بیشتر باشد، الگوریتم فرمان تغییر در میزان بازشدگی دریچه را صادر می‌کند ولی چنانچه میزان تغییر برآورد شده کوچک‌تر از حد تعیین شده باشد، این مقدار ذخیره می‌شود تا مقادیر تغییرات برآورد شده در گام‌های زمانی بعدی با آن جمع شود. بدین ترتیب از حرکت مداوم دریچه جلوگیری می‌شود. پس از این مرحله برنامه اطلاعات مربوط به گام زمانی کنونی را ذخیره کرده و به برنامه اصلی باز می‌گردد.

مدل ICSS و چگونگی تلفیق مدل CARDD با آن

مدل ICSS این توانایی را دارد که تمام ویژگی‌های مهم هیدرولیکی و بهره‌برداری شناخته شده و مورد نیاز در کانال‌های آبیاری را در شرایط جریان ماندگار و غیرماندگار متغیر تدریجی یک بعدی، شبیه‌سازی کند. به دلیل در اختیار داشتن اصل این مدل و با توجه به این‌که مدل به‌صورت یک هسته مرکزی متشکل از زیر مجموعه‌های ثابت طراحی گردیده است و سایر زیر مجموعه‌های مورد نیاز می‌توانند به مدل اضافه یا کم شوند، در این تحقیق از این مدل استفاده شده است. در مدل ICSS امکان شبیه‌سازی گستره وسیعی از سازه‌های آبی وجود دارد که هر یک به‌صورت شرایط مرزی در نظر گرفته شده و در چهار مرحله متفاوت در محاسبات احضار می‌شوند. این مراحل به‌ترتیب عبارت‌اند از: محاسبات جریان ماندگار، انجام عملیات بهره‌برداری، محاسبات جریان غیرماندگار و به روز رسانی ماتریس‌های شرایط مرزی. در این تحقیق مدل ریاضی الگوریتم کنترل CARDD با توجه به این چهار مرحله تهیه و با مدل ICSS تلفیق گردید (۱). شکل ۶ به‌صورت ساده و شماتیک

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.2.9]



شکل ۱. نمای شماتیک یک بازه از کانال مجهز به سیستم کنترل CARDD

چگونگی تلفیق زیر برنامه CARDD با مدل ICSS را نشان می‌دهد.

مشخصات کانال و آزمون در نظر گرفته شده برای ارزیابی سیستم CARDD

شکل ۷ کانال شماره ۲ پیشنهادی ASCE را که در این تحقیق از آن استفاده شده است نشان می‌دهد. این کانال، کانالی نسبتاً طولانی با شیب ملایم و دارای ۸ بازه و ۸ آبگیر در انتهای پایین دست هر بازه می‌باشد. این کانال طولی معادل ۲۸ کیلومتر دارد که عرض کف آن در ابتدای کانال ۷ متر و در انتهای آن به ۵ متر می‌رسد. مدت زمان این آزمون ۲۴ ساعت می‌باشد که در آن تغییرات شدید و ملایم جریان هم به‌صورت افزایشی و هم به‌صورت کاهشی لحاظ گردیده است. جداول ۲ و ۳ به‌ترتیب شرایط جریان در آزمون‌های پیشنهادی ASCE مربوط به تغییرات ملایم و شدید را نشان می‌دهد. در این آزمون در تغییرات شدید افزایشی، مجموع دبی آبگیرهای جانبی پایین دست کانال در یک گام زمانی از ۲/۷ مترمکعب در ثانیه به ۱۳/۷ مترمکعب در ثانیه افزایش یافته و در تغییرات کاهشی پس از ۱۲ ساعت مجدداً در یک گام زمانی به ۲/۷ مترمکعب در ثانیه باز می‌گردد. در تغییرات ملایم افزایشی نیز، مجموع دبی آبگیرهای جانبی پایین دست کانال در یک گام زمانی از ۱۱ مترمکعب در ثانیه به ۱۳/۵ مترمکعب در ثانیه افزایش یافته و در تغییرات ملایم کاهشی پس از ۱۲ ساعت در یک گام زمانی به ۱۱/۵ مترمکعب در ثانیه کاهش می‌یابد.

شاخص‌های ارزیابی

در این تحقیق برای بررسی و ارزیابی عملکرد منطق کنترل CARDD شاخص‌های ارزیابی ارائه شده توسط ASCE(۹و۴) مورد استفاده قرار گرفته است. این شاخص‌ها عبارت‌اند از:

۱. حداکثر خطای مطلق:

$$\text{Max Absolute Error (MAE)} = \frac{\max\left(\left|y_t - y_{target}\right|\right)}{y_{target}} \qquad [۱]$$

که در این رابطه y_t تراز سطح آب مشاهده شده در زمان t و y_{target} تراز سطح آب هدف می‌باشد.

۲. خطای مطلق تجمعی:

$$\text{Integral of Absolute Magnitude of Error (IAE)} = \frac{\frac{\Delta t}{T}\sum_{t=0}^{T}\left(\left|y_t - y_{target}\right|\right)}{y_{target}} \qquad [۲]$$

که در این رابطه Δt فاصله بین گام‌های زمانی اعمال تنظیمات و T دوره زمانی اجرای آزمون (۱۲ یا ۲۴ ساعت) می‌باشد. نکته قابل توجه در اینجا این است که فاصله بین گام‌های زمانی باید در دوره زمانی اجرای آزمون در نظر گرفته شده (T) ثابت باشد.

۳. خطای حالت ماندگار:

$$\text{Steady-State Error (StE)} = \frac{\max\left(\left|y_{10,12} - y_{target}\right|, \left|y_{22,24} - y_{target}\right|\right)}{y_{target}} \qquad [۳]$$

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.2.9]

جدول ۱. پارامترهای به‌کار رفته در الگوریتم کنترل CARDD

پارمتر	شرح	واحد
CNST1	مدت زمانی که انتظار می‌رود تراز سطح آب در انتهای پایین دست بازه به تراز سطح آب هدف برگردد.	دقیقه
CNST2	پارامتر ثابت	دقیقه
CNST3-CNST9	پارامتر ثابت	بدون بعد
CNST10	حداقل میزان تغییرات مجاز در بازشدگی دریچه	میلی‌متر
CNSTM	ضریب اصلاح‌کننده که برای کانال‌های مختلف متفاوت است	بدون بعد
DELG	میزان تغییرات مورد نیاز در بازشدگی دریچه	فوت
GA	میزان بازشدگی دریچه در هر لحظه	فوت
GTF	باز شدگی نسبی دریچه (GA/STP)	بدون بعد
MEANE	میانگین تراز سطح آب در طول بازه طی ۳ گام زمانی گذشته	فوت
SDELG	میزان تغییرات تجمعی بازشدگی دریچه. این مقدار میزان تغییرات کوچک را به صورت تجمعی ذخیره می‌کند تا میزان آن به حداقل تغییرات مجاز برای اعمال بر روی دریچه برسد.	فوت
DELG	عاملی که در شاخه B یا C محاسبه شده و با توجه به آن در شاخه D بازشدگی دریچه محاسبه می‌شود	فوت
STP	تراز سطح آب هدف در انتهای پایین دست بازه	فوت
YBAR	میانگین تراز سطح آب در طول بازه	فوت
YS1	تراز سطح آب بلافاصله بعد از دریچه	فوت
YS2	تراز سطح آب در نقطه میانی بازه	فوت
YS3	تراز سطح آب در انتهای پایین دست بازه، هدف ثابت نگاه داشتن تراز سطح آب در همین ناحیه می‌باشد.	فوت
ZINT	میانگین YS3 طی ۳ گام زمانی گذشته	فوت
YS3U	تراز سطح آب بلافاصله بالادست دریچه	فوت
CHK	زمانی که طی آن احتمال می‌رود YS3 به STP برگردد	دقیقه
GMIN,GMAX	حداقل و حداکثر مجاز باز شدگی دریچه	فوت

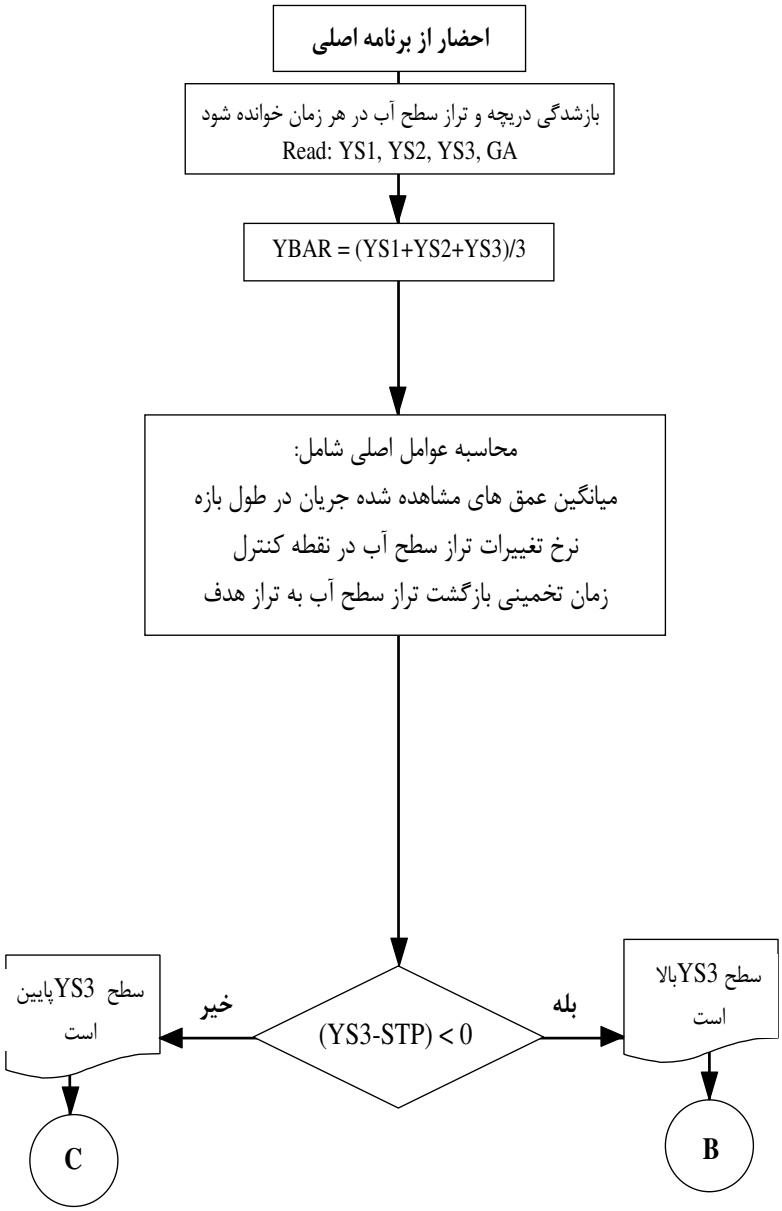
که در این رابطه $y_{۱۰,۱۲}$ میانگین تراز سطح آب بین ساعات ۱۰ تا ۱۲ و $y_{۲۲,۲۴}$ میانگین تراز سطح آب بین ساعات ۲۲ تا ۲۴ از شروع آزمایش است.

۴. زمان عکس‌العمل سیستم (System Response Time):

شاخص زمان عکس‌العمل سیستم عبارت است از فاصله زمانی بین خارج شدن سطح آب از محدوده مجاز عمق حول عمق هدف، تا زمانی که عمق آب مجدداً به این محدوده باز گردد و در آن تثبیت می‌شود. محدوده مجاز عمق محدوده‌ای است پیرامون عمق هدف که دامنه تغییر آن به میزان $\pm\ 0.5xy_{target}$ می‌باشد و مقدار x در این شاخص درصدی است که توسط کاربر تعریف می‌شود و در این تحقیق ۱۰ درصد در نظر گرفته شده است.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.2.9]



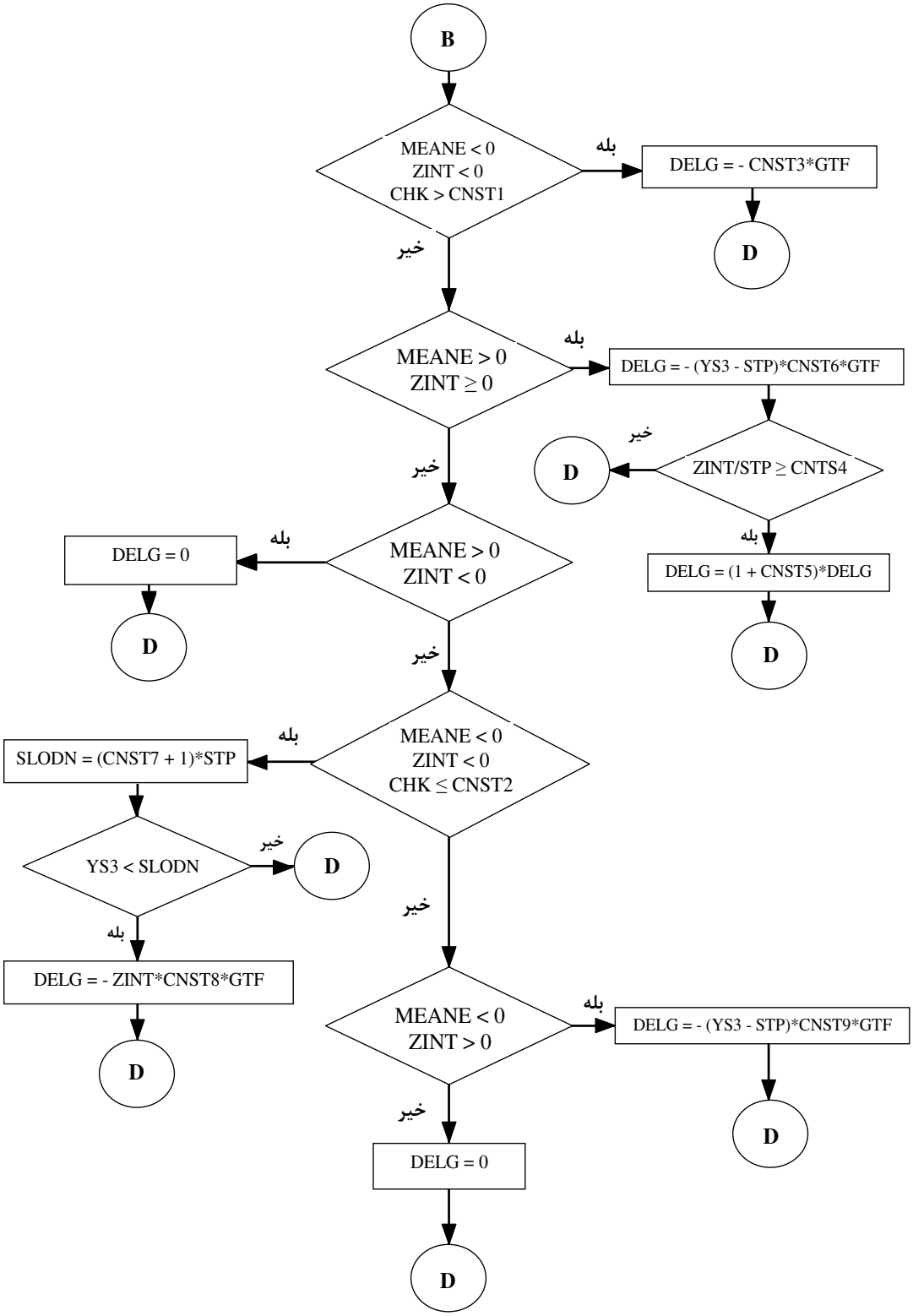
شکل ۲. بخش نخست فلوچارت الگوریتم CARDD (۸)

شرح کار و تجزیه و تحلیل نتایج

پس از تلفیق الگوریتم کنترل CARDD با مدل ICSS، مقادیر مناسب ثابت‌های ۱۱ گانه به‌کار رفته در این منطق کنترل که متضمن رفتار پایدار و سریع سیستم کنترل بوده است پس از چندین آزمون سعی و خطا برای کانال مورد نظر تعیین گردید. پس از آن الگوریتم کنترل CARDD تحت شرایط آزمون‌های پیشنهادی ASCE اجرا گردید و عملکرد آن مورد ارزیابی قرار گرفت و شاخص‌های ارزیابی مورد نظر برای این آزمون‌ها محاسبه شد (جداول ۴ و ۵). علاوه بر این تغییرات عمق در محل آبگیرها، دبی تحویلی به آبگیرها و میزان بازشدگی دریچه تنظیم‌کننده بالادست هر آبگیر برحسب زمان به‌صورت نمودار ترسیم شد و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-06]

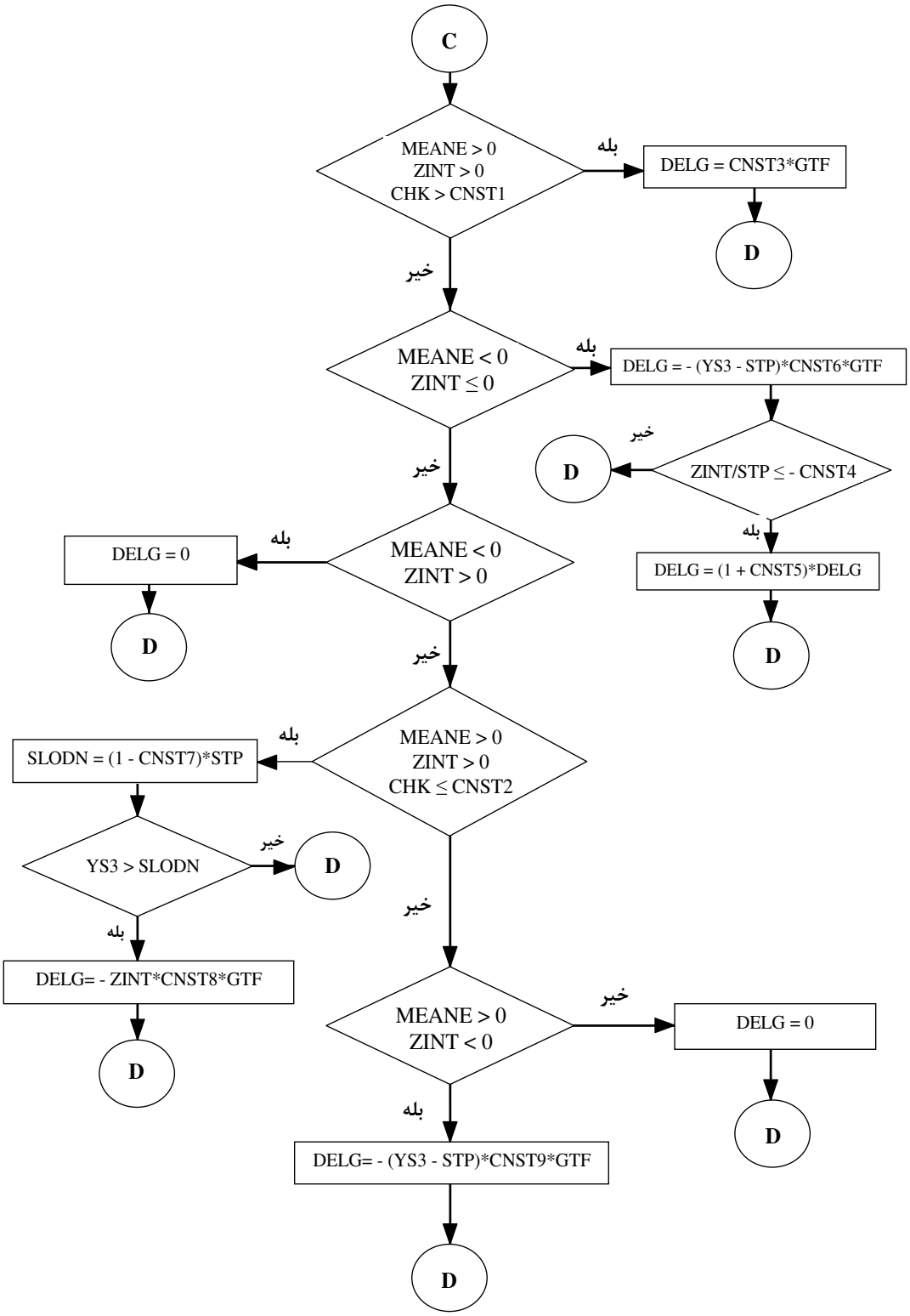
[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.2.9]



شکل ۳. شاخه B فلوچارت الگوریتم CARDD (۸)

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-06]

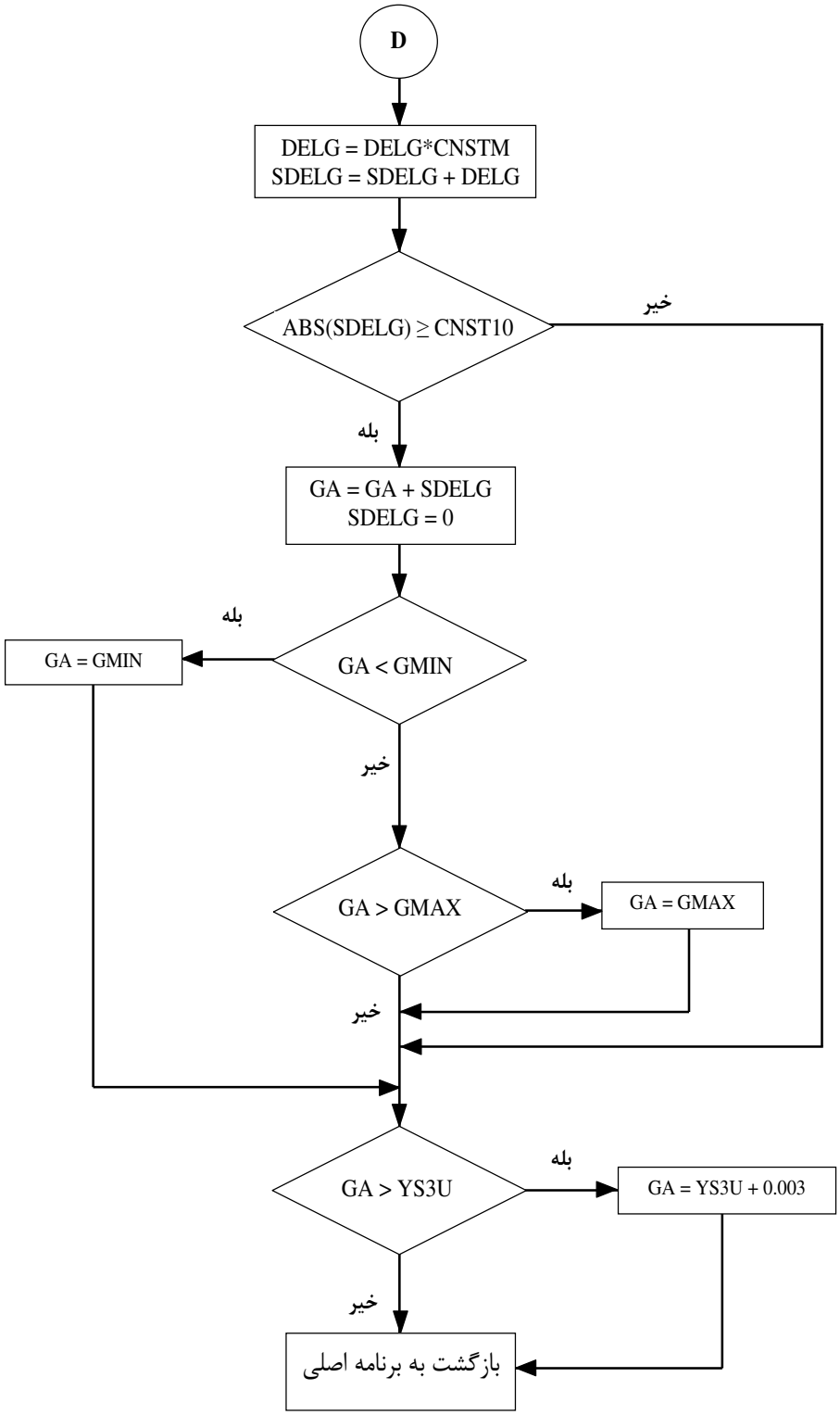
[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.2.9]



شکل ۴. شاخه C فلوچارت الگوریتم CARDD (۸)

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-06]

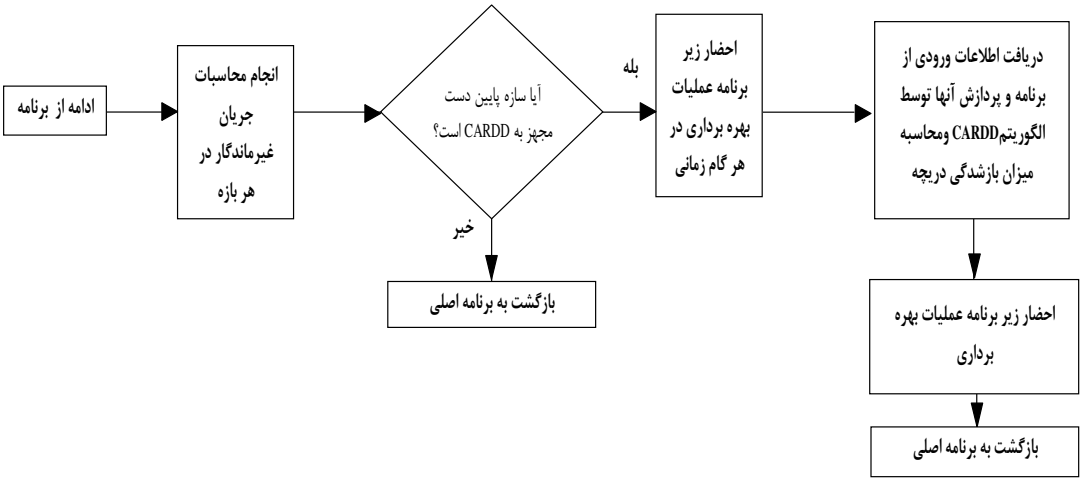
[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.2.9]



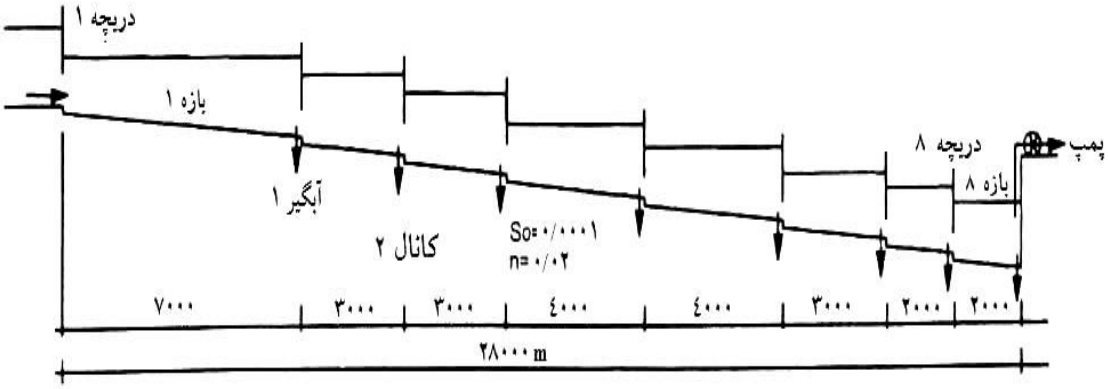
شکل ۵. شاخه D فلوچارت الگوریتم CARDD (۸)

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.2.9]



شکل ۶. چگونگی تلفیق زیر برنامه CARDD با مدل ICSS



شکل ۷. کانال استاندارد شماره ۲ پیشنهادی ASCE (۹)

نتایج حاصل از عملکرد الگوریتم CARDD در شرایط تغییرات ملایم جریان

جدول ۴ شاخص‌های ارزیابی محاسبه شده برای این آزمون را نشان می‌دهد و شکل ۸ تغییرات عمق در محل آبگیر، دبی تحویلی به آبگیر و میزان بازشدگی دریچه تنظیم‌کننده بالادست برحسب زمان را در محل آبگیر شماره ۴ که محل وقوع شدیدترین تغییرات جریان می‌باشد نشان می‌دهد. در این آزمون، مطابق نتایج ارائه شده در جدول ۴، حداکثر خطای مطلق و انحراف تراز سطح آب از تراز هدف در هر دو مرحله آزمون، در محل آبگیر شماره ۴ ایجاد شده است. با وجودی که در طول آزمون، در دبی دریافتی این آبگیر تغییری داده نشده است ولی به دلیل اثر موج منفی حاصله از اعمال تغییر در دبی دریافتی دو آبگیر پایین دست آن (آبگیرهای ۵ و ۶) در ۱۲ ساعت ابتدایی آزمون حداکثر انحراف تراز سطح آب از تراز هدف به میزان ۴/۵ درصد در محل این آبگیر رخ داده است. در ۱۲ ساعت دوم نیز به دلیل رسیدن موج مثبت حاصل از بسته شدن آبگیر شماره ۶ و بالاتر بودن تراز سطح آب در بالادست سازه تنظیم‌کننده مربوط به آبگیر شماره ۴ نسبت به تراز سطح آب در بالادست سازه‌های تنظیم‌کننده پایین دست میزان انحراف حداکثر تراز سطح آب به میزان حدود ۳/۵ درصد در

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-06]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.2.9]

جدول ۲. شرایط جریان در آزمون استاندارد ASCE مربوط به تغییرات ملایم جریان

بازه	دبی اولیه آبگیر m^3/s	دبی اولیه آبند m^3/s	تغییرات دبی آبگیر در ساعت دوم m^3/s	دبی عبوری از آبند پس از تغییرات m^3/s	تغییرات دبی آبگیر در ساعت چهاردهم m^3/s	دبی عبوری از آبند پس از تغییرات m^3/s
سرآب	–	۱۱/۰	–	۱۳/۵	–	۱۱/۵
۱	۱/۰	۱۰/۰	–	۱۲/۵	–	۱۰/۵
۲	۱/۰	۹/۰	–	۱۱/۵	–	۹/۵
۳	۱/۰	۸/۰	–	۱۰/۵	–	۸/۵
۴	۱/۰	۷/۰	–	۹/۵	–	۷/۵
۵	۱/۰	۶/۰	۱/۵	۷/۰	–	۵/۰
۶	۱/۰	۵/۰	۱/۰	۵/۰	–۲/۰	۵/۰
۷	۱/۰	۴/۰	–	۴/۰	–	۴/۰
۸	۱/۰	۳/۰	–	۳/۰	–	۳/۰

جدول ۳. شرایط جریان در آزمون استاندارد ASCE مربوط به تغییرات شدید جریان

بازه	دبی اولیه آبگیر m^3/s	دبی اولیه آبند m^3/s	تغییرات دبی آبگیر در ساعت دوم m^3/s	دبی عبوری از آبند پس از تغییرات m^3/s	تغییرات دبی آبگیر در ساعت چهاردهم m^3/s	دبی عبوری از آبند پس از تغییرات m^3/s
سرآب	–	۲/۷	–	۱۳/۷	–	۲/۷
۱	۰/۲	۲/۵	۱/۵	۱۲/۰	–۱/۵	۲/۵
۲	۰/۳	۲/۲	۱/۵	۱۰/۲	–۱/۵	۲/۲
۳	۰/۲	۲/۰	۲/۵	۷/۵	–۲/۵	۲/۰
۴	۰/۳	۱/۷	–	۷/۲	–	۱/۷
۵	۰/۲	۱/۵	–	۷/۰	–	۱/۵
۶	۰/۳	۱/۲	۰/۵	۶/۲	–۰/۵	۱/۲
۷	۰/۲	۱/۰	۱/۰	۵/۰	–۱/۰	۱/۰
۸	۰/۳	۰/۷	۲/۰	۲/۷	–۲/۰	۰/۷

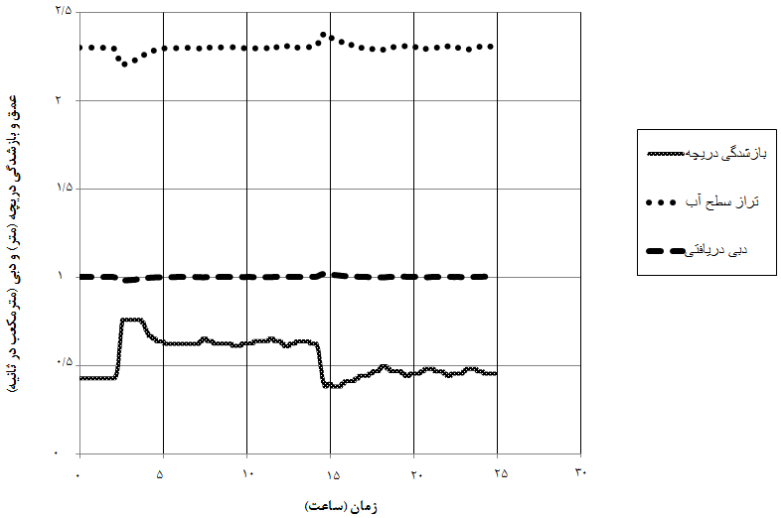
محل این آبگیر رخ داده است. با توجه به نمودارهای به‌دست آمده برای تغییرات عمق در محل آبگیرها، دبی تحویلی به آبگیرها و میزان بازشدگی دریچه تنظیم‌کننده بالادست هر آبگیر برحسب زمان در محل هر آبگیر و با توجه به این‌که تمامی مقادیر به‌دست آمده برای شاخص SRT در جدول ۵ برابر با صفر می‌باشند، الگوریتم کنترل تحت آزمون، عملکرد کاملاً قابل قبولی داشته است و هنگام رخ داد نوسان در تراز سطح آب در طول ۲۴ ساعت آزمون، چه در برابر تغییرات افزایشی و چه در برابر تغییرات کاهشی دبی توانسته است انحراف تراز سطح آب را جبران نموده و پایداری جریان را در کانال حفظ نماید.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.2.9]

جدول ۴. پارامترهای ارزیابی محاسبه شده پس از آزمون در شرایط تغییرات ملایم جریان

شاخص	زمان	مقادیر پارامترهای ارزیابی							
		آبگیر اول	آبگیر دوم	آبگیر سوم	آبگیر چهارم	آبگیر پنجم	آبگیر ششم	آبگیر هفتم	آبگیر هشتم
MAE%	۰–۱۲	۲/۵	۳/۳	۳/۳	۴/۴	۳/۹	۲/۰	۰/۷	۰/۳
	۱۲–۲۴	۲/۰	۲/۵	۲/۶	۳/۴	۳/۲	۳/۱	۱/۱	۰/۴
IAE%	۰–۱۲	۰/۴	۰/۵	۰/۵	۰/۶	۰/۵	۰/۲	۰/۱	۰
	۱۲–۲۴	۰/۴	۰/۴۴	۰/۵	۰/۵	۰/۴	۰/۵	۰/۲	۰/۱
StE%	۰–۲۴	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰	۰/۱	۰/۱	۰
$SRT_{10\%}$(hour)	۰–۱۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۱۲–۲۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰



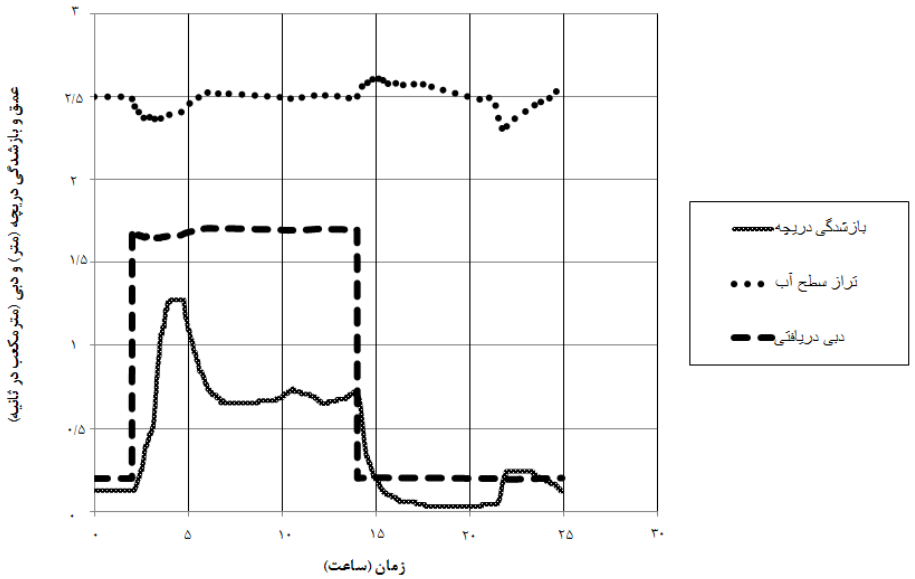
شکل ۸. تغییرات تراز سطح آب و دبی دریافتی در محل آبگیر شماره ۴ و بازشدگی دریچه سازه تنظیم‌کننده مربوط به آبگیر

جدول ۵. پارامترهای ارزیابی محاسبه شده پس از آزمون در شرایط تغییرات شدید جریان

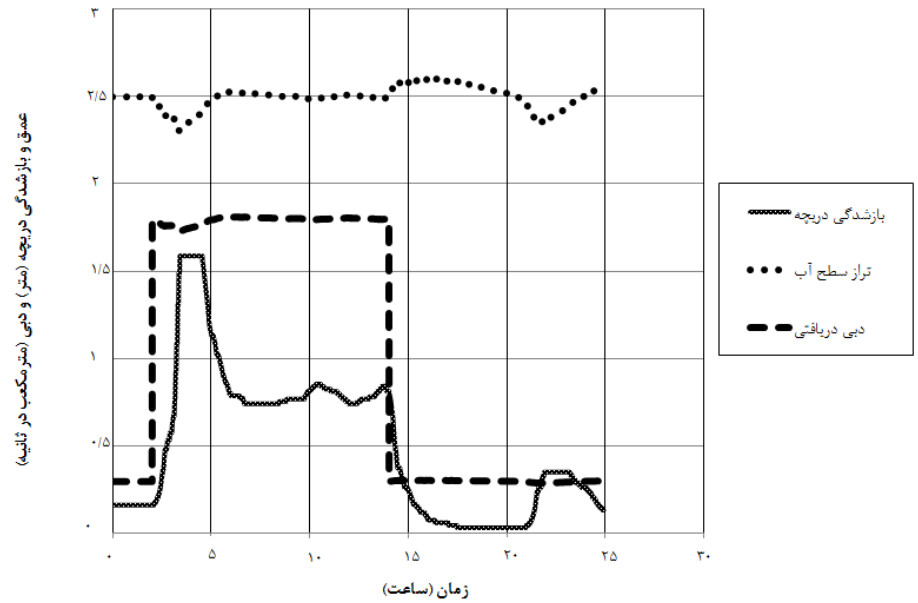
شاخص	زمان	مقادیر پارامترهای ارزیابی							
		آبگیر اول	آبگیر دوم	آبگیر سوم	آبگیر چهارم	آبگیر پنجم	آبگیر ششم	آبگیر هفتم	آبگیر هشتم
MAE%	۰–۱۲	۵/۹	۷/۸	۷/۴	۷/۳	۶/۲	۶/۶	۶/۰	۶/۱
	۱۲–۲۴	۷/۹	۶/۳	۵/۱	۴/۴	۴/۳	۴/۵	۴/۸	۵/۵
IAE%	۰–۱۲	۱/۳	۱/۳	۱/۲	۰/۹	۰/۸	۰/۸	۰/۷	۰/۹
	۱۲–۲۴	۲/۲	۲/۴	۲/۱	۱/۸	۱/۶	۱/۱	۱/۱	۱/۲
StE%	۰–۲۴	۳/۵	۲/۵	۱/۵	۰/۱	۰/۳	۰/۵	۰/۲	۰/۱
$SRT_{10\%}$(hour)	۰–۱۲	۰/۶	۱/۰	۰/۷	۰/۸	۰/۵	۰/۶	۰/۵	۰/۷
	۱۲–۲۴	۱/۰	۰/۷	۰/۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۳

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.2.9]



شکل ۹. تغییرات تراز سطح آب و دبی دریافتی در محل آبگیر شماره ۱ و بازشدگی دریچه سازه تنظیم‌کننده مربوط به آبگیر



شکل ۱۰. تغییرات تراز سطح آب و دبی دریافتی در محل آبگیر شماره ۲ و بازشدگی دریچه سازه تنظیم‌کننده مربوط به آبگیر

نتایج حاصل از عملکرد الگوریتم CARDD در شرایط تغییرات شدید جریان

جدول ۵ شاخص‌های ارزیابی محاسبه شده برای این آزمون را نشان می‌دهد و شکل‌های ۹ و ۱۰ تغییرات عمق در محل آبگیرها، دبی تحویلی به آبگیرها و میزان بازشدگی دریچه تنظیم‌کننده بالادست برحسب زمان را به‌ترتیب در محل آبگیر شماره ۱ و ۲ که محل وقوع شدیدترین تغییرات جریان می‌باشد نشان می‌دهد. در این آزمون، مطابق نتایج ارائه شده در جدول ۵، حداکثر خطای مطلق و انحراف تراز سطح آب از تراز هدف، در ۱۲ ساعت ابتدایی آزمون در محل آبگیر شماره ۲ به میزان

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.2.9]

حدود ۷/۸۴ درصد و در ۱۲ ساعت دوم در محل آبگیر شماره ۱ به میزان حدود ۷/۹۲ درصد می‌باشد. در ۱۲ ساعت ابتدایی آزمون به دلیل رسیدن موج منفی حاصل از مجموع افزایش تقاضا در بازه‌های پایین دست، انتظار می‌رود که بیشترین افتادگی سطح آب در بالادست‌ترین بازه رخ دهد. ولی به دلیل بالاتر بودن تراز سطح آب در بالادست سازه تنظیم‌کننده مربوط به آبگیر ۱ و آبگیری این بازه از مخزن بالادست کانال که همیشه تراز سطح آب ثابتی دارد در مقایسه با سازه تنظیم‌کننده مربوط به آبگیر ۲، بیشترین افت در محل آبگیر شماره ۲ رخ داده است. در ۱۲ ساعت دوم، انتظار می‌رود بیشترین افزایش سطح آب در بالادست‌ترین بازه رخ دهد که این موضوع در عمل نیز مشاهده می‌شود.

با توجه به نتایج به‌دست آمده برای شاخص‌های ارزیابی در جدول شماره ۵، میزان حداکثر انحراف تراز سطح آب از تراز هدف کمتر از ۸ درصد بوده است و در محل آبگیر شماره ۱ رخ داده است. این مقدار انحراف با در نظر گرفتن شدت تغییرات جریان در این آزمون می‌تواند قابل قبول تلقی گردد ولی مقادیر به‌دست آمده برای شاخص SRT در بعضی موارد بالا می‌باشد. به عنوان مثال مقدار شاخص SRT در محل آبگیر شماره ۲ در ۱۲ ساعت ابتدایی آزمون و در محل آبگیر شماره ۱ در ۱۲ ساعت دوم آزمون حدود ۱ ساعت است و این مقدار حاکی از آن است که الگوریتم کنترل سرعت لازم جهت بازگرداندن شرایط پایدار در این بازه را ندارد. البته با توجه به شکل‌های شماره ۸ و ۹ و توجه به تغییرات حاصل شده در میزان بازشدگی دریچه تنظیم‌کننده تراز سطح آب می‌توان دریافت که سیستم کنترل در طول آزمون در جهت حفظ پایداری جریان کاملاً فعال بوده است. علت وجود این نارسایی در سرعت پاسخگویی الگوریتم کنترل در بازه‌های ۱ و ۲ را می‌توان در مقادیر ثابت‌های ۱۱گانه جستجو نمود. با توجه به این‌که مقادیر این ثابت‌ها با استفاده از آزمون‌های سعی و خطا اتخاذ شده‌اند، نمی‌توان ادعا نمود که این مقادیر بهترین مقادیر برای ثابت‌های به‌کار رفته در الگوریتم برای شرایط حاضر می‌باشند و عملکرد الگوریتم قابل ارتقاء نمی‌باشد. البته می‌توان عملکرد الگوریتم کنترل با توجه به شاخص SRT در سایر بازه‌ها به‌ویژه در ۱۲ ساعت دوم آزمون را مطلوب تلقی نمود و لازم به ذکر است علی‌رغم ضعف عملکرد الگوریتم در این آزمون همان‌طورکه از شکل‌های ۸ و ۹ مشخص است میزان دبی تحویلی به آبگیر در بدترین شرایط نیز تقریباً ثابت است و هدف اصلی به‌کارگیری سیستم کنترل خودکار که تحویل دبی یکنواخت و ثابت به آبگیر می‌باشد تأمین شده است. نکته قابل توجه دیگر این است که با توجه به مقادیر SRT، سرعت عملکرد الگوریتم کنترل در ۱۲ ساعت دوم آزمون به مراتب بهتر از سرعت آن در ۱۲ ساعت ابتدایی می‌باشد و از این موضوع می‌توان نتیجه گرفت که درحالتی‌که تغییرات در میزان جریان قابل توجه باشد، سرعت عملکرد الگوریتم کنترل CARDD در برابر تغییرات کاهشی جریان بهتر از سرعت عملکرد آن در برابر تغییرات افزایشی جریان است.

نتیجه‌گیری

با توجه به ارزیابی عملکرد الگوریتم کنترل خودکار CARDD در این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که این سیستم کنترل توانایی کنترل پایداری جریان در کانال را در شرایط تغییرات ملایم جریان به خوبی داراست. در تغییرات شدید جریان علی‌رغم این‌که حداکثر تغییرات عمق در حد مطلوب و قابل قبول است، این الگوریتم کنترل ممکن است در بخش‌هایی از عملکرد خود سرعت لازم جهت بازگرداندن تراز سطح آب به تراز هدف را دارا نباشد. از آنجایی‌که در عمل در شبکه‌های آبیاری به ندرت می‌توان چنین تغییرات شدید و قابل توجهی را مشاهده نمود لذا می‌توان نتیجه گرفت که سیستم کنترل CARDD می‌تواند در عمل نیز عملکرد قابل قبولی داشته باشد. نکته قابل ذکر دیگر این است که در آزمون‌هایی که تغییرات تقاضا شدید باشد الگوریتم CARDD در برابر تغییرات کاهشی تقاضا نسبت به تغییرات افزایشی آن عملکرد قابل قبول‌تری خواهد داشت.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.2.9]

منابع مورد استفاده

۱. احمدپناه، پ. و م.ج. منعم. ۱۳۸۸. توسعه و آزمون مدل ریاضی سامانه کنترل خودکار CARDD برای کانال‌های آبیاری. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

۲. کیاپاشا، م. و م.ج. منعم. (۱۳۸۷). توسعه مدل ریاضی سیستم کنترل فازی پایین دست در کانال‌های آبیاری. مجله هیدرولیک ۳(۴):۱۳-۲۶.

۳. مامی زاده، ج. و م.ج. منعم. ۱۳۸۴. ارائه مدل ریاضی برای سیستم کنترل پایین دست BIVAL در کانال‌های آبیاری. مجله هیدرولیک ۱(۲):۱-۱۳.

۴. مساح، ع. ۱۳۸۰. تهیه مدل ریاضی سیستم‌های کنترل نیرپیک، آمیل، آویس و P+PR در کانال‌های آبیاری. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد تأسیسات آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

5. Burt, C. M. 1984. Canal automation for rapid demand deliveries (CARDD). Water today and tomorrow conference, Pp:502-509.
6. Burt, C. M. 1990. Irrigation district canal automation_CARDD. Third national irrigation symposium. ASCE Publication 04-90: 495-500.
7. Burt, C. M. 2002. Advances in PLC based canal automation. USCID conference on benchmarking irrigation system performance using water measurment and water balances. ITRC paper No. P02-001.
8. Burt, C. M. and J. Parrish. 1989. Canal Automation Providing On-Demand Deliveries for Efficient Irrigation. Final Report to the Water Resources Program of the USGS. Grant 14-08-0001-G1280. NTIS. Access No. PB90119769/AS
9. Clemmens, A.J., T.F. Kacerek, B. Grawitz and J. Schuurmans. 1998. Test cases for canal control algorithms. J. Irrig. and Drain. Eng. ASCE, 124: 23-30.
10. Malaterre, P., D. C. Rogers and J. Schuurmans. 1998. Classification of canal control algorithms. J. Irrig. and Drain. Eng. ASCE. 124: 3-10.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-02-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.2.9]