چارچوبی مبتنی بر پردازش تصویر برای استخراج پارامترهای هیدرولیکی

چکیده

مدیریت بهینه منابع آب در شبکه‌های آبیاری، نیازمند پایش دقیق پارامترهای هیدرولیکی مانند تراز آب و بازشدگی دریچه‌هاست. روش‌های سنتی پرهزینه، دارای خطای انسانی و محدودیت پایش پیوسته هستند. در این پژوهش، چارچوبی مبتنی بر پردازش تصویر کلاسیک و الگوریتم قطعه‌بندی K-means ارائه شده است که با شناسایی ناحیه آب در زیر دریچه‌های معیوب و فرسوده، و با استفاده از تراز سطح آب، دبی عبوری از دریچه را براورد می‌کند. روش پیشنهادی شامل پیش‌پردازش، تبدیل به فضای CIELAB، کاهش ابعاد به ۶۰۰×۸۰۰، قطعه‌بندی با K-means (تعداد بهینه خوشه‌ها برابر با ۲ یا k=2)، پالایش مورفولوژیکی و محاسبه پارامترهای هندسی است. ضریب مقیاس با استفاده از OCR و عرض دریچه تعیین شد. ارزیابی کاربرد الگوریتم بر روی تصاویر نشان داد که شاخص کفایت بیش از ۰/۹۹۲۰۰۶ و شاخص کارایی بیش از ۰/۹۲۱۵۶۱ بوده و ریشه میانگین مربع خطاها در شرایط ایده‌آل ۰/۰۱۰۷۴۱ و در خرابی‌های شدید ۰/۱۴۶۸۹۶ به‌دست آمد. همچنین، نشان داد که ۱۰٪ خطا در دبی، به‌ترتیب ۶/۹٪ و ۴/۶٪ خطا در کفایت و راندمان ایجاد می‌کند.

کلیدواژه‌ها: *پردازش تصویر، خوشه‌بندی، دریچه‌های کنترل، شبکه‌های آبیاری.*

An Image Processing-Based Framework for Hydraulic Parameter Extraction

Abstract

Optimal management of water resources in irrigation networks requires accurate monitoring of hydraulic parameters such as water level and gate opening. Traditional methods are costly, prone to human error, and limited in continuous monitoring. In this research, a framework based on classical image processing and the K-means segmentation algorithm is presented that estimates the flow rate through the gate by identifying the water region beneath defective and worn gates and using the water surface level. The proposed method includes preprocessing, conversion to CIELAB space, dimensionality reduction to 800×600, segmentation with K-means (optimal number of clusters equal to 2, i.e., k=2), morphological refinement, and calculation of geometric parameters. The scale coefficient was determined using OCR and the gate width. Evaluation of the algorithm's application on images showed that the adequacy index was more than 0.992006 and the efficiency index was more than 0.921561, and the root mean square error was 0.010741 under ideal conditions and 0.146896 under severe failures. It also showed that a 10% error in flow rate causes 6.9% and 4.6% errors in adequacy and efficiency, respectively.

Keywords: *Clustering, Control gates, Image processing, Irrigation networks*.

Extended Abstract

Introduction

Optimal water resources management in irrigation networks, particularly in arid and semi-arid regions facing severe water scarcity, represents one of the most critical challenges in water engineering and natural resource management. Accurate and continuous monitoring of hydraulic parameters—specifically upstream water level and gate opening degree at control structures—is essential for discharge computation, flow regulation, and the successful implementation of volumetric water delivery systems. Traditional field-based measurement techniques, including limnigraphs, flowmeters, and manual staff gauge readings, although reasonably accurate under ideal conditions, suffer from significant drawbacks: high procurement and maintenance costs, susceptibility to human reading errors, difficult physical access to remote structures, and—most critically—the inability to provide continuous, real-time monitoring at fine temporal resolutions. These limitations lead to delayed and spatially sparse hydraulic data, which in turn reduce water delivery efficiency and increase operational losses.

In recent years, machine vision and image processing technologies have emerged as promising, cost-effective alternatives for hydraulic information extraction from images of control gates and canals. Using CCTV cameras or unmanned aerial vehicle (UAV) imagery, these methods enable

non-contact, continuous monitoring at a fraction of the cost of conventional instrumentation. Despite considerable progress, most existing studies have focused either solely on water level detection using edge-detection techniques, or on deep learning-based segmentation requiring massive labeled datasets and substantial computational resources (e.g., high-end GPUs). The simultaneous extraction of gate opening status—especially in aged and deteriorated structures with irregular geometries—and its integration with volumetric water delivery management has received far less attention. Moreover, the sensitivity of performance indices to measurement uncertainties has rarely been quantified. The present study proposed a classical image-processing framework for extracting water-related geometric parameters from images of control gates, with particular attention to deteriorated gate structures.

Methodology

The proposed framework relies on classical image processing and K-means clustering, organized in preprocessing, segmentation, morphological refinement, and geometric parameter extraction stages. Input RGB images—synthetically generated for the main dataset and field-acquired images for real-condition assessment—are transformed into CIELAB space. K-means is then applied in CIELAB space, with the optimal cluster number determined via the Silhouette Score. Testing across k = 2, 3, 4, and random selection confirmed k = 2 as optimal, since the problem is defined as binary water/non-water separation: the water region occupies one cluster while the gate body and background occupy the other. Morphological refinement then applies closing to fill small holes, opening to remove fine noise, and largest-connected-component selection to discard isolated artifacts. For scale determination, an OCR system reads the geometric information inscribed in a predefined upper region of each image, where the gate width is the first numerical attribute; the gate width in pixels is then measured, and the spatial scale is computed as the ratio of real to image width. For a 0.6 m gate, the image width was 311 pixels and the scale 518.3 px/m. Because the location and order of this information are predefined and known to the algorithm, the width is selected structurally rather than randomly. The real water area is then obtained by counting water-mask pixels and multiplying by the inverse square of the scale; dividing by the constant canal width (0.6 m) gives the equivalent gate opening height, while upstream water level is read directly via OCR. These values feed a HEC-RAS model in unsteady mode.Performance was assessed using R^2, RMSE, NRMSE, and NSE, plus pixel-overlap indices IoU and Dice and relative area error for segmentation quality, and MAPE and Bias for morphological sensitivity. Delivery accuracy was evaluated with the adequacy index (Pa, reflecting shortage) and efficiency index (Pf, reflecting excess).

Results

Among clustering scenarios, the first (k = 2) achieved the highest R^2 and NSE and the lowest RMSE and NRMSE, confirming k = 2 as optimal. Segmentation quality on 200 generated images (0.6 m reference width) yielded mean IoU of 0.9825, mean Dice of 0.9911, and mean relative area error of 1.1928%. On real images, reference versus extracted areas were 0.0401 vs 0.04098 m^2 (Image 1), 0.0267 vs 0.0289 m^2 (Image 2), and 0.0535 vs 0.05266 m^2 (Image 3), giving relative area errors of about 2.2%, 8.24%, and 1.57%. Reference discharges for Images 1–3 were 0.0511, 0.0225, and 0.0751 m^3/s versus simulated 0.05, 0.02, and 0.07 m^3/s, with relative errors of 2.15%, 11.1%, and 6.79%. Morphological sensitivity analysis identified radii of 5, 3, and 5 pixels (initial closing, opening, final closing) as optimal, with MAPE of 0.5183% and Bias of 0.1659%. Sensitivity analysis of discharge error showed that a 10% error in discharge produces 6.9% error

in adequacy and 4.6% error in efficiency, while a 20% error raises these to 13.6% and 8.9%, respectively. Adequacy is thus substantially more sensitive than efficiency, with a near-linear amplification—when discharge error doubles, adequacy error roughly doubles—implying that volumetric delivery systems prioritizing adequacy must control discharge measurements more tightly.

Conclusions

This study proposed an efficient, low-cost, training-data-independent framework for simultaneous extraction of water level and gate opening at irrigation control structures. The K-means method with optimal cluster selection (k = 2) and morphological refinement accurately segments the water region from gate and background, while OCR-based autonomous scale determination—reading gate width from a predefined image location and computing pixel-to-metre scale—enhances flexibility across imaging conditions and removes fixed calibration dependencies. Evaluation using R^2, RMSE, NRMSE, and NSE confirmed k = 2 as superior, with segmentation quality on 200 generated images reaching mean IoU of 0.9825, mean Dice of 0.9911, and mean relative area error of 1.1928%; morphological sensitivity analysis identified radii of 5, 3, and 5 pixels as optimal (MAPE = 0.5183%, Bias = 0.1659%). Performance assessment with RMSE, Pf, and Pa demonstrated excellent accuracy under ideal conditions (RMSE < 0.011, indices near unity); although severe deterioration raised RMSE to 0.08123, consistently high adequacy (> 0.9999) confirms practical reliability. The sensitivity analysis further showed that adequacy is more sensitive to discharge error than efficiency, with a 10% discharge error causing 6.9% and 4.6% errors, respectively.

مقدمه

مدیریت بهینه منابع آب در بخش کشاورزی، بهویژه در مناطق با محدودیت آبی، مستلزم بهره‌وری پایدار و افزایش کارایی سامانه‌های آبیاری است که در این میان، عملکرد صحیح کانال‌ها و سازه‌های تنظیم‌کننده جریان مانند دریچه‌ها، نقش کلیدی در تأمین دبی موردنیاز و توزیع عادلانه آب ایفا می‌کند؛ با این حال، روش‌های سنتی پایش که مبتنی بر اندازه‌گیری‌های میدانی و تجهیزات متعارف هستند، در شبکه‌های گسترده با چالش‌هایی نظیر هزینه‌های بالا، خطای انسانی، دشواری دسترسی و عدم پایش مستمر روبرو می‌باشند. در سال‌های اخیر تحقیقات متعددی در این زمینه انجام شده است (Shahverdi and Maestre, 2022, Fatemeh et al., 2020). در سال‌های اخیر، فناوری‌های تصویربرداری و پردازش تصویر با امکان استخراج اطلاعات هیدرولیکی همچون تراز سطح آب و میزان بازشدگی دریچه از روی تصاویر دیجیتال، رویکردی نوین برای پایش خودکار فراهم آورده‌اند که با پیش‌پردازش و تفکیک نواحی آب در اطراف سازه (مانند دریچه و سرریز) در تصویر، می‌تواند وابستگی به اندازه‌گیری‌های مستقیم را کاهش داده و به بهبود عملکرد هیدرولیکی و بهره‌وری آبیاری کمک نماید.

یکی از روش‌های مناسب برای تفکیک نواحی تصویری، الگوریتم K-means است که به‌عنوان یکی از روش‌های یادگیری بدون ناظر در پردازش تصویر، با گروه‌بندی پیکسل‌ها بر اساس ویژگی‌های مشابه، امکان جداسازی بخش‌های مختلف تصویر را فراهم می‌کند. این روش به دلیل ساختار نسبتاً ساده، هزینه محاسباتی پایین و عدم نیاز به داده‌های برچسب‌گذاری‌شده، می‌تواند در کاربردهای پردازش تصویر مرتبط با سامانه‌های آبیاری مورد توجه قرار گیرد. استفاده از فضای رنگی مناسب و اعمال الگوریتم K-means می‌تواند به تفکیک ناحیه آب از سایر اجزای موجود در تصویر کمک کرده و زمینه را برای استخراج اطلاعات هندسی و هیدرولیکی از تصاویر فراهم ساخته و امکان براورد دقیق‌تر دبی عبوری از سازه را فراهم می‌آورد. بر این اساس، استفاده از پردازش تصویر می‌تواند به‌عنوان

رویکردی مکمل برای پایش شرایط سازه‌های آبی و استخراج اطلاعات موردنیاز در مدیریت و بهره‌برداری از شبکه‌های آبیاری مطرح شود. چنین رویکردی می‌تواند ضمن کاهش وابستگی به اندازه‌گیری‌های دستی، امکان پایش سریع‌تر و منظم‌تر وضعیت سازه و جریان را فراهم کرده و اطلاعات لازم برای تصمیم‌گیری در خصوص تحویل و توزیع آب را در اختیار بهره‌برداران قرار دهد. در ادامه، برخی از تحقیقات انجام شده با روش فوق‌الذکر ارائه و تشریح می‌شود.

روشی مبتنی بر ترکیب تحلیل مؤلفه‌های اصلی و الگوریتم K-means برای قطعه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای ارائه شد. در این روش، نخست فضای رنگی تصاویر تغییر داده شده و با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی، ماتریس‌های کوواریانس و مؤلفه‌های اساسی هر تصویر به دست می‌آیند. سپس ویژگی‌های مهم از بردارهای ویژه انتخاب شده و به متغیرهای جدید و مستقل از هم تبدیل می‌شوند تا بتوان نواحی آب را در تصویر بهتر تشخیص داد. در مرحله بعد، ویژگی‌های استخراج‌شده با استفاده از الگوریتم K-means طبقه‌بندی شدند و نواحی مربوط به پهنه‌های آبی از سایر بخش‌های تصویر جدا شدند. برای بهبود عملکرد الگوریتم، از Kernel PCA خطی برای هدایت فرایند K-means و اصلاح بخش‌هایی از تصاویر که در فرایند طبقه‌بندی اولیه دچار نقص شده بودند استفاده شد. نتایج نشان داد که اصلاح نحوه انتخاب مؤلفه‌های اصلی، موجب افزایش دقت استخراج و قطعه‌بندی پهنه‌های آبی شد (Yousefi et al., 2018).

در پژوهشی، یک سامانه مبتنی بر بینایی ماشین و پردازش تصویر برای پایش تراز آب در کانال‌های آبیاری ارائه شد. اندازه‌گیری دقیق تراز آب برای محاسبه دبی جریان و در نتیجه تأمین دقیق آب موردنیاز محصولات ضروری است. در روش پیشنهادی، دوربین به‌صورت خودکار از خط‌کش نصب‌شده در کانال تصویربرداری کرده و با تشخیص رنگ، خط‌کش کانال را در تصویر شناسایی می‌کند. سپس طول خط‌کش برحسب پیکسل اندازه‌گیری شده و با تبدیل مقیاس پیکسلی به مقیاس واقعی، تراز آب محاسبه می‌شود. نتایج نشان داد که اگرچه روش پیشنهادی در شرایط معمولی قادر به تعیین تراز سطح آب با دقت مناسب است، اما تغییر شدت نور می‌تواند رنگ ظاهری خط‌کش را تغییر داده و موجب شناسایی نادرست یا غیر دقیق آن شود. ازاین‌رو، انجام پیش‌کالیبراسیون محدوده رنگ متناسب با شدت نور، نصب ثابت دوربین برای ثبت تصاویر با موقعیت یکسان و استفاده از روش‌های تصویربرداری مقاوم‌تر نسبت به تغییرات روشنایی، مانند تصویربرداری دید در شب، پیشنهاد شد (Kuswidiyanto et al., 2021).

در پژوهشی، به‌منظور توسعه روشی کارآمد برای اندازه‌گیری تراز آب بر پایه بینایی ماشین، رویکردی مبتنی بر پردازش تصویر و یادگیری عمیق ارائه شد. در این رویکرد، ابتدا ناحیه شامل خط‌کش اندازه‌گیری سطح آب به‌عنوان منطقه اصلی شناسایی شده و با گسترش آن، اطلاعات زمینه‌ای پیرامون خط‌کش نیز در پردازش‌های بعدی لحاظ گردید. سپس، با به‌کارگیری یک روش نگاشت، ناحیه گسترش‌یافته به تصویر تبدیل‌شده، منتقل شده و مدل رگرسیون یادگیری عمیقی با قابلیت حفظ اطلاعات با وضوح بالا، برای تعیین دقیق موقعیت خط آب توسعه داده شد. به‌منظور افزایش مقاومت مدل در برابر تغییرات ظاهری تصاویر، دو راهبرد افزایش داده شامل تغییرات مبتنی بر ظاهر و گسترش تصادفی در امتداد تصویر به‌کار گرفته شده است. ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی بر روی مجموعه داده‌ای گسترده و در شرایط محیطی متغیر انجام شده و نتایج با خروجی سایر روش‌های بینایی ماشین مقایسه گردیده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که به‌کارگیری اطلاعات زمینه‌ای، افزایش داده و مدل با وضوح بالا، به‌طور معناداری دقت تعیین موقعیت خط آب را بهبود می‌بخشد؛ به‌گونه‌ای که روش ارائه‌شده در مواجهه با عواملی همچون تغییرات آب‌وهوا، شدت نور، کیفیت آب، وضعیت خط‌کش و شرایط تصویربرداری، از پایداری بیشتری نسبت به روش‌های پیشین برخوردار است (Zhang and Tong, 2023).

مطالعه‌ای نشان داد که اندازه‌گیری میدانی رایج‌ترین روش جمع‌آوری داده برای ارزیابی عملکرد سامانه‌های آبی بوده است و بررسی بیشتر فناوری‌های مبتنی بر تصاویر و توسعه نرم‌افزارها و مدل‌هایی برای تسهیل ارزیابی عملکرد سامانه‌های پیچیده آبیاری توصیه شده است (Ahmad et al., 2024). با هدف بهبود پیش‌بینی وضعیت دریچه‌های سد و افزایش ایمنی در شرایط وقوع بارش‌های شدید، کاربرد روش‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی باز و بسته شدن دریچه‌ها مورد بررسی قرار گرفت و مدل‌های K-means، KNN، SVM، درخت تصمیم، Random Forest، Gradient Boosting، ANN و LSTM مورد ارزیابی قرار گرفتند. مدل‌ها با استفاده از داده‌های روزانه بارش و اطلاعات مربوط به عملکرد دریچه‌های سد آموزش داده شده و عملکرد آنها ارزیابی شد. نتایج نشان داد که K-

ویرایش نشده

means، Random Forest و ANN در میان مدل‌های بررسی شده عملکرد مناسب‌تری برای پیش‌بینی وضعیت دریچه داشتند (Chaitanya et al., 2024).

به‌منظور بررسی قابلیت بینایی ماشین در اندازه‌گیری تراز آب رودخانه، یک روش مبتنی بر پردازش تصاویر و یادگیری عمیق ارائه و با یک روش متداول پردازش تصویر مقایسه شد. در این پژوهش، روش تفریق پیوسته تصاویر در کنار شبکه عصبی SegNet برای اندازه‌گیری تراز آب مورد استفاده قرار گرفت و عملکرد SegNet با شبکه‌های U-Net و FCN مقایسه شد. برای آموزش و ارزیابی شبکه‌ها، ۳۷۲ تصویر ثبت‌شده از رودخانه Yufeng Creek در شمال تایوان، شامل تصاویر مربوط به شرایط جریان عادی و رخدادهای طوفانی، مورد استفاده قرار گرفت. نتایج آموزش نشان داد که دقت شبکه‌های SegNet، U-Net و FCN به‌ترتیب ۹۷، ۹۴ و ۹۸ درصد بوده و ضرایب خطای آن‌ها به‌ترتیب ۰/۱۹، ۰/۲۲ و ۰/۱۵ به دست آمد. با توجه به عملکرد و زمان آموزش، شبکه SegNet برای تحلیل تراز آب در شرایط مختلف انتخاب شد. مقایسه نتایج این شبکه با اندازه‌گیری‌های ایستگاه هیدرومتری نشان داد که مقدار ریشه میانگین مربع خطاها در چهار دوره مورد بررسی بین ۰/۰۱۳ تا ۰/۰۶۶ متر و ضریب همبستگی به ۰/۹۹۸ رسید. همچنین، بررسی اثر ویژگی‌های مجموعه داده نشان داد که افزایش تعداد تصاویر آموزشی، تنوع شرایط موجود در تصاویر و افزایش وضوح تصویر موجب بهبود عملکرد شبکه می‌شود؛ به‌طوری که با افزایش تعداد تصاویر، دقت شبکه از ۸۸/۲ به ۹۸/۲۵ درصد افزایش و ریشه میانگین مربع خطاها از ۰/۱۶۳ به ۰/۰۲۸ متر کاهش یافت (Liu and Huang, 2024).

روشی برای شناسایی آسیب‌های ظاهری سازه‌های بتنی هیدرولیکی ارائه شد که در آن به‌منظور کاهش وابستگی مدل به حجم زیاد داده‌های آموزشی، از یک مدل از پیش‌آموزش‌دیده و یادگیری انتقالی استفاده شد و با تنظیم پارامترهای لایه‌های بالایی مدل، ویژگی‌های مربوط به آسیب‌های سطحی استخراج گردید. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی توانست آسیب‌های ترک، شکستگی و سوراخ و همچنین سطوح سالم را به‌ترتیب با دقت ۸۷/۶۵، ۸۷/۸۲، ۹۶/۹۹ و ۹۵/۲۵ درصد شناسایی کند. نتایج نشان داد که استفاده از یادگیری انتقالی امکان استخراج ویژگی‌های مناسب را با تعداد محدودی نمونه آموزشی فراهم کرده و جایگزینی لایه طبقه‌بندی شبکه با یک طبقه‌بند یادگیری تجمیعی موجب افزایش دقت شناسایی شده است (Yang et al., 2024).

روشی مبتنی بر بینایی ماشین و پردازش تصاویر برای اندازه‌گیری تراز آب ارائه شده است. هدف اصلی مطالعه، افزایش دقت و قابلیت تعمیم روش‌های اندازه‌گیری تراز آب مبتنی بر دوربین و امکان استفاده از آن‌ها در شرایط و محیط‌های مختلف است. روش پیشنهادی شامل دو مرحله اصلی کالیبراسیون و اندازه‌گیری است. در مرحله اندازه‌گیری، یک مدل آشکارساز متشکل از زیرشبکه‌های سراسری و محلی توسعه داده شده است که با استفاده از رویکرد از درشت به ریز (Coarse-to-Fine)، ابتدا موقعیت تقریبی و سپس موقعیت دقیق خط آب را شناسایی می‌کند. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌های موجود، دقت بالاتر و قابلیت تعمیم بهتری داشته و از ظرفیت مناسبی برای کاربردهای عملی در اندازه‌گیری خودکار تراز آب برخوردار است (Zhang and Qiu, 2025).

با هدف توسعه روش‌های خودکار برای ارزیابی وضعیت سازه‌های هیدرولیکی، یک چارچوب مبتنی بر یادگیری عمیق برای شناسایی و قطعه‌بندی آسیب‌های سطحی سازه‌های بتنی از تصاویر تهیه‌شده توسط پهپاد ارائه شد. در این روش، یک شبکه Fast-SCNN بهبودیافته برای استخراج کارآمد ویژگی‌ها به همراه ماژول توجه هرم ویژگی سبک‌وزن و ماژول توجه لبه به کار گرفته شد تا اطلاعات چندمقیاسی و مرزهای آسیب با دقت بیشتری استخراج شوند. عملکرد روش پیشنهادی با استفاده از یک مجموعه‌داده اختصاصی از تصاویر پهپادی و در شرایط مختلف آسیب، نویز و پیچیدگی هندسی ارزیابی شد. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی در مقایسه با مدل‌های U-Net، Attention U-Net، SegNet، DeepLab v3+، I-ST-UNet و SegFormer عملکرد بهتری دارد. همچنین، سرعت پردازش ۵۶/۳۱ فریم بر ثانیه نشان داد که روش پیشنهادی قابلیت استفاده در کاربردهای پایش بلادرنگ را دارد (Han and Gu, 2025).

نمونه آزمایشی

در یک مطالعه مروری، پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه کنترل بهره‌برداری و زمان‌بندی بهینه سامانه‌های کانال آبیاری بررسی و پیشرفت‌های حاصل در این حوزه جمع‌بندی شده است. در این مطالعه، مباحث مرتبط با جریان ناپایدار، شیوه‌های بهره‌برداری، مدل‌ها و الگوریتم‌های مورد استفاده برای کنترل بهره‌برداری و همچنین روش‌های بهینه‌سازی توزیع آب در سامانه‌های کانال مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که توسعه روش‌های دقیق‌تر برای کنترل و بهره‌برداری از کانال‌ها، امکان بهبود انتقال و توزیع آب، تخصیص منطقی‌تر منابع، کاهش تلفات آب و افزایش کارایی و بهره‌وری مصرف آب را فراهم می‌کند. همچنین، نویسندگان با بررسی مشکلات موجود در مطالعات پیشین، زمینه‌های موردنیاز برای توسعه تحقیقات آینده را مشخص کردند و بر اهمیت پیشرفت روش‌های کنترل و زمان‌بندی بهینه در راستای نوسازی سامانه‌های آبیاری و توسعه فناوری دوقلوی دیجیتال در مدیریت شبکه‌های آبیاری تأکید کردند (Zhou et al., 2025a).

با هدف هماهنگ‌سازی فرایند تحویل و توزیع آب در سامانه‌های کانال روباز، یک مدل کوپل‌شده برای تنظیم همزمان توزیع بهینه آب و کنترل کانال در شرایط مختلف تأمین جریان ارائه شد. در این روش، ابتدا یک برنامه اولیه برای توزیع آب تعیین شد و سپس با استفاده از محاسبات هیدرولیکی مربوط به نواحی جریان یکنواخت و پس‌آب در کانال، برنامه توزیع اصلاح و بهینه شد. در ادامه، سطح آب هدف تعیین و هماهنگی میان برنامه توزیع بهینه‌شده و برنامه بهره‌برداری از دریچه‌های کنترل برقرار شد. مدل پیشنهادی همچنین امکان تدوین راهبردهای تنظیم تحویل و توزیع آب را برای شرایط مختلف تأمین جریان فراهم کرد. این مدل در منطقه آبیاری Bojili در سه شرایط تأمین جریان کم، متوسط و زیاد مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل قادر است برای شرایط مختلف، سطح آب هدف، برنامه توزیع آب و برنامه بهره‌برداری از دریچه‌ها را تعیین کند و در عین حال تعداد و دامنه تغییرات تنظیم دریچه‌ها، کمبود یا تأمین بیش از نیاز آب را کاهش داده و بهره‌برداری ایمن از کانال را فراهم کند (Zhou et al., 2025b).

با هدف پایش لحظه‌ای سطح آب در کانال‌های آبیاری، یک سامانه ترکیبی مبتنی بر اینترنت اشیا و اینترنت اشیای مبتنی بر بینایی ارائه شد که در آن حسگر اولتراسونیک، دوربینIP، پردازش تصویر در لبه شبکه با استفاده ازRaspberry Pi، ارتباط بی‌سیم و منبع تغذیه خورشیدی در یک سامانه یکپارچه به کار گرفته شدند. در بخش بینایی سامانه، تصاویر ویدئویی با استفاده از کالیبراسیون شاخص اندازه‌گیری، تشخیص لبه Canny و تبدیل مختصات پیکسلی به مقیاس متریک پردازش شدند تا ارتفاع سطح آب به‌صورت خودکار تعیین شود. مقادیر حاصل از روش تصویری با اندازه‌گیری‌های حسگر اولتراسونیک به‌صورت همزمان ترکیب و مقایسه شدند تا قابلیت اطمینان پایش افزایش یابد. آزمایش‌های میدانی که طی یک دوره ۱۴ روزه در رودخانه Merke در منطقه Zhambyl قزاقستان انجام شد، تطابق بسیار بالایی میان اندازه‌گیری‌های حسگر و روش مبتنی بر تصویر نشان داد؛ به‌طوری‌که ریشه میانگین مربع خطاها برابر ۰/۳۱۱ سانتی‌متر، خطای حداکثر برابر ۰/۲۷۹ سانتی‌متر و ضریب همبستگی برابر ۰/۹۹ به دست آمد (Tungatarova et al., 2026).

با هدف بررسی روند توسعه و کاربرد فناوری‌های بینایی ماشین در مهندسی آب، پژوهش‌های منتشرشده طی دو دهه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ مورد بررسی کتاب‌سنجی قرار گرفته و ۱۰۵۹ رکورد علمی استخراج‌شده از پایگاه Web of Science با استفاده از شاخص‌های تحلیل عملکرد و نگاشت علمی بررسی شدند. بررسی کلیدواژه‌ها نشان داد که پردازش تصویر، بینایی ماشین و سنجش از دور از مهم‌ترین موضوعات پژوهش‌های انجام‌شده بوده‌اند و در مطالعات جدیدتر، استفاده از یادگیری عمیق و هوش مصنوعی نیز افزایش یافته است. بررسی مطالعات انجام‌شده نشان داد که فناوری‌های بینایی ماشین در زمینه‌های مختلف مهندسی آب از جمله پایش سازه‌های هیدرولیکی، تشخیص گرفتگی و ارزیابی وضعیت مجاری انتقال آب و فاضلاب و شناسایی ترک در سازه‌های هیدرولیکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این حال، حوزه‌هایی مانند پایش سازه‌های هیدرولیکی و گرفتگی سازه‌های هیدرولیکی همچنان ظرفیت توسعه کاربرد فناوری‌های بینایی ماشین را دارند (Iqbal et al., 2023).

با وجود پیشرفت‌های اخیر در کاربرد بینایی ماشین برای پایش سامانه‌های آبیاری، اغلب مطالعات موجود یا بر اندازه‌گیری تراز سطح آب متمرکز بوده‌اند یا به توسعه شبکه‌های عصبی پیچیده برای قطعه‌بندی تصاویر پرداخته‌اند، در حالی که استخراج اطلاعات مربوط به وضعیت دریچه‌های کنترل و میزان بازشدگی آن‌ها، به‌ویژه در سازه‌های فرسوده و با هندسه نامنظم، کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

ویراستاری نشده

این در حالی است که در رویکرد تحویل حجمی آب (از نظر فنی)، اطلاع دقیق از میزان بازشدگی دریچه و تراز آب بالادست، برای محاسبه دبی عبوری و تنظیم جریان تحویلی به شبکه، نقشی اساسی ایفا می‌کند. ازاین‌رو، در پژوهش حاضر، چارچوبی مبتنی بر پردازش تصویر کلاسیک و الگوریتم قطعه‌بندی K-means ارائه شده است که با شناسایی ناحیه دریچه در تصاویر، امکان تعیین میزان بازشدگی مناسب دریچه برای سازه فرسوده را فراهم می‌آورد. تمرکز این پژوهش بر یکپارچه‌سازی پردازش تصویر و تحلیل هیدرولیکی برای استخراج ناحیه آب، تعیین بازشدگی معادل دریچه‌های فرسوده و بررسی پاسخ هیدرولیکی سازه است؛ به‌گونه‌ای که با ترکیب اطلاعات تراز آب و بازشدگی دریچه، دبی جریان عبوری از سازه بر اساس روابط هیدرولیکی مناسب محاسبه می‌شود.

مواد و روش‌ها

این بخش، شامل تولید پایگاه داده تصویری دریچه کشویی معیوب، برداشت میدانی، پردازش تصویر، مدل HEC-RAS، آنالیز حساسیت و شاخص‌های ارزیابی است که در ادامه تشریح می‌شوند. لازم به ذکر است که در تحقیق حاضر، دو دسته داده مورد استفاده قرار گرفت که شامل پایگاه تولید داده تصویری دریچه کشویی معیوب و داده‌های حاصل از برداشت میدانی بود.

تولید پایگاه داده تصویری دریچه کشویی معیوب

به‌منظور فراهم‌آوردن مجموعه‌ای متنوع از عیوب هندسی دریچه کشویی، شرایط جریان و ابعاد هندسی، یک پایگاه داده تصویری در محیط MATLAB تولید شد. ابعاد استاندارد دریچه‌ها (ارتفاع × عرض) در چهار گروه ۰/۶×۰/۸، ۰/۸×۰/۸، ۱×۰/۸ و ۱/۲×۰/۸ متر در نظر گرفته شد. برای هر عرض، ۲۰۰ تصویر مجزا با انتخاب تصادفی ارتفاع بازشدگی دریچه در بازه ۰/۱۵ تا ۰/۴ متر و هد آب بالادست در بازه ۰/۸ تا ۱/۲ متر تولید شد. در مجموع، ۸۰۰ تصویر از دریچه کشویی با تنوع در ابعاد هندسی، شرایط جریان و انواع عیوب فرسایشی تولید گردید.

برای مدل‌سازی عیوب هندسی در لبه پایینی دریچه، چهار مدل مختلف با استفاده از توابع ریاضی سینوسی، امواج دندانه‌ای، نویز تصادفی و ترکیب توابع فوق تولید شد. دامنه عیوب بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۵ متر و فرکانس (تعداد نوسان در عرض کانال) بین ۲ تا ۱۰ در نظر گرفته شد. این عیوب در سه دسته کلی قرار می‌گیرند: نقص ترکیبی نامنظم (ترکیب سینوسی و دندانه‌ای)، نقص نویز تصادفی (اعمال نویز بر موج پایه سینوسی) و نقص لبه نامتقارن (یک پیک برآمدگی یا فرورفتگی در نقطه‌ای تصادفی از عرض کانال). از آنجا که هد آب بالادست برای هر تصویر به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شود، در هر سناریو یک تصویر متناظر ذخیره گردید. برای محاسبه دبی تخلیه در هر تصویر، از رابطه استاندارد دریچه کشویی، با محاسبه بازشدگی دریچه از تقسیم مساحت ناحیه آب به عرض دریچه، استفاده شد. مقدار ضریب دبی بر اساس روابط تجربی محاسبه شد.

برداشت میدانی

به‌منظور ارزیابی دقت روش توسعه‌یافته در شرایط واقعی، برداشت میدانی از یک دریچه کشویی واقعی در دریاچه دانشگاه بوعلی سینا در شهر همدان انجام شد. این دریاچه از دو بخش تشکیل شده است: یک دریاچه بزرگ و یک دریاچه کوچک‌تر که آب از طریق چندین دریچه کشویی از دریاچه بزرگ وارد دریاچه دوم می‌شود. یکی از این دریچه‌ها با عرض ۰/۵۳۵ متر برای برداشت میدانی انتخاب گردید که بالادست آن دریاچه بزرگ با سطح آب ثابت و پائین‌دست آن جریان آزاد با عمق ثابت بود. با استفاده از گوشی هوشمند Samsung Galaxy A25 و دوربین اصلی آن، با وضوح ۵۰ مگاپیکسل، دیافراگم f/1.8، فوکوس خودکار و لرزش‌گیر اپتیکال تصویر (OIS)، در حالت روبه‌روی دریچه از پایین‌دست و در فاصله ثابت، در تاریخ ۲۸ اردیبهشت ماه ۱۴۰۵، عکسبرداری انجام شد. در مجموع، سه تصویر از این دریچه با بازشدگی‌های مختلف تهیه گردید. لازم به ذکر است که مشخصات دوربین بر اساس مشخصات فنی دستگاه گزارش شده است.

مشخصات سه تصویر واقعی حاصل از برداشت میدانی به این صورت است: در تصویر شماره ۱، بازشدگی دریچه (Go) برابر با ۰/۰۷۵ متر، ارتفاع آب (H) برابر با ۰/۲۳ متر، در تصویر شماره ۲، بازشدگی دریچه برابر با ۰/۰۵ متر، ارتفاع آب برابر با ۰/۱۰ متر و در تصویر شماره ۳، بازشدگی دریچه برابر با ۰/۱۰ متر، ارتفاع آب برابر با ۰/۲۸ متر است که همگی با استفاده از خط‌کش اندازه‌گیری شدند. با توجه به ابعاد برداشت شده، مساحت سطح آب (A) برای تصاویر ۱–۳ به ترتیب برابر با ۰/۰۴۰۱، ۰/۰۲۶۷ و ۰/۰۵۳۵ مترمربع (حاصل‌ضرب عرض در بازشدگی دریچه) به دست آمد. ضریب دبی جریان برابر با ۰/۶ بر اساس رابطه سابرامانیا، Cd=0.589+0.0297Go/H (Rajaratnam and Subramanya, 1967)، و بر اساس اطلاعات میدانی برداشت شده فوق‌الذکر، محاسبه شد. در نهایت، مقادیر دبی جریان (Q) برای تصاویر ۱–۳ به ترتیب برابر با ۰/۰۵۱۱، ۰/۰۲۲۵ و ۰/۰۷۵۱ مترمکعب بر ثانیه با استفاده از رابطه متداول دریچه به دست آمد و به‌عنوان دبی مرجع در نظر گرفته شد. با وارد کردن داده‌های برداشت‌شده میدانی به HEC-RASو اجرای آن، دبی‌های تحویل‌شده در دوره تحویل ۲۴ ساعته با گام زمانی ۶ دقیقه شبیه‌سازی شد. سپس، مقادیر به‌دست‌آمده با دبی مرجع مقایسه و شاخص‌های ارزیابی از جمله شاخص‌های ارزیابی تحویل آب محاسبه گردید. با توجه به ماهیت غیرماندگار جریان، مقادیر دبی در ابتدای شبیه‌سازی غیرماندگار هستند؛ به همین دلیل، شبیه‌سازی باید در کل دوره تحویل انجام شود و صرفا با استفاده از رابطه متداول دریچه نمی‌توان، شاخص‌های مذکور را محاسبه کرد.

لازم به ذکر است که به دلیل زاویه دوربین و موقعیت عکاس، تصاویر میدانی دارای پرسپکتیو هستند؛ به این معنا که خطوط موازی در دنیای واقعی، در تصویر به‌صورت خطوط همگرا دیده می‌شوند و دریچه به شکل ذوزنقه یا چهارضلعی نامنظم مشاهده می‌گردد، در حالی که در شبیه‌سازی، دریچه باید به‌صورت مستطیل کامل با اضلاع عمود بر هم باشد، از این‌رو تصحیح هندسی تصاویر انجام شد. از آنجا که در الگوریتم توسعه‌یافته، رنگ آبی به‌عنوان مشخصه ناحیه آب به الگوریتم معرفی شده بود و رنگ آب در تصاویر واقعی و تولیدشده باید یکسان باشد، رنگ آب در تصاویر واقعی به آبی اصلاح شد. در این برنامه، کاربر با انتخاب متوالی نقاط روی مرز ناحیه آب، یک چندضلعی بسته پیرامون این ناحیه ترسیم می‌کند. پس از اتمام انتخاب نقاط، محدوده مشخص‌شده به‌عنوان ناحیه آب در نظر گرفته شده و یک ماسک باینری از آن ایجاد می‌شود. در ادامه، به‌منظور حذف نواحی خالی و تضمین پیوستگی کامل ناحیه انتخاب‌شده، عملیات پرکردن حفره‌ها بر روی ماسک اعمال می‌گردد. در گام بعد، تصویر اصلی به فضای خاکستری تبدیل می‌شود تا امکان اعمال رنگ‌بندی یکنواخت فراهم گردد. سپس تمامی پیکسل‌های متعلق به ناحیه آب، مطابق ماسک ایجادشده، به رنگ آبی با مقادیر ثابت (R=0, G=100, B=255) اختصاص می‌یابند. این رنگ به‌گونه‌ای انتخاب شده است که بیشترین تطابق را با رنگ آب در تصاویر شبیه‌سازی‌شده داشته باشد. همچنین تمامی پیکسل‌های خارج از ناحیه آب، شامل بدنه دریچه و دیواره‌های کانال، به رنگ خاکستری تبدیل می‌شوند. دقت این روش به دو عامل اصلی بستگی دارد: دقت کاربر در تعیین مرز ناحیه آب و کیفیت تصویر اولیه. در شرایط کنترل‌شده، خطای تعیین مرز عمدتاً ناشی از کلیک نقاط و مناطق انتقالی آب–بدنه در تصاویر با بازتاب نور است. در این پژوهش، این مرحله صرفاً برای آماده‌سازی و استانداردسازی تصاویر واقعی و ایجاد شرایط مناسب برای استخراج ناحیه آب انجام شد.

پردازش تصویر

پردازش تصویر روشی غیرتماسی برای استخراج اطلاعات کمی و کیفی از تصاویر دیجیتال است که در مهندسی آب می‌تواند برای اندازه‌گیری پارامترهایی مانند سطح آب، عرض و مساحت جریان، وضعیت بازشدگی دریچه‌ها و تغییرات هندسی کانال مورد استفاده قرار گیرد. این روش با حذف نیاز به تماس مستقیم با جریان، امکان پایش بدون ایجاد اختلال در شرایط هیدرولیکی را فراهم می‌کند. استفاده از روش بدون نظارت K-Means امکان بخش‌بندی تصاویر را بدون نیاز به ماسک‌های برچسب‌گذاری‌شده در فرایند خوشه‌بندی فراهم می‌کند. پس از انجام خوشه‌بندی در فضای رنگی CIELAB، خوشه متناظر با ناحیه آب با استفاده از شاخص Blue Score شناسایی شد. در این مرحله، برای هر خوشه، میانگین مؤلفه (b^*) و میانگین قدرمطلق مؤلفه (a^*) محاسبه و بر اساس ترکیب وزنی آن‌ها، امتیاز Blue Score تعیین شد؛ سپس خوشه دارای بیشترین امتیاز به‌عنوان ناحیه آب انتخاب گردید. در ادامه، به‌منظور کاهش

نویز و بهبود پیوستگی ناحیه استخراج‌شده، عملیات مورفولوژیکی شامل بستن و بازکردن اعمال شد. برای ارزیابی مستقیم کیفیت بخش‌بندی، ماسک‌های استخراج‌شده از تصاویر تولیدشده با ماسک‌های مرجع مستقل حاصل از هندسه تصاویر مقایسه شدند و شاخص‌های اشتراک بر اجتماع (IoU (Intersection over Union، ضریب Dice و خطای نسبی مساحت محاسبه گردیدند. پردازش تصویر شامل مراحل پیش‌پردازش، تبدیل RGB به CIELAB و استخراج ویژگی‌های رنگی، تعیین مقیاس با سامانه تشخیص نوری کاراکترها (OCR: Optical Character Recognition)، خوشه‌بندی تطبیقی K-Means، شناسایی ناحیه آب با Blue Score، پالایش مورفولوژیکی ماسک، و کالیبراسیون مقیاس و محاسبه مساحت است که در ادامه به‌صورت مختصر تشریح می‌شود.

پیش‌پردازش اولیه

در گام نخست، به‌منظور یکپارچه‌سازی فضای رنگی تصاویر، تصویر ورودی Grayscale، ابتدا به فضای RGB تبدیل می‌شود تا با مراحل بعدی پردازش سازگار گردد. برای کاهش هزینه‌های محاسباتی الگوریتم K-means، تصاویر با رزولوشن بالا به ابعاد ثابت ۶۰۰×۸۰۰ پیکسل تغییر اندازه داده می‌شوند. دلیل این کاهش ابعاد آن است که تعداد پیکسل‌ها به‌عنوان یکی از عوامل اصلی، تأثیر مستقیمی بر پیچیدگی محاسباتی الگوریتم‌های مبتنی بر فاصله دارد؛ به‌گونه‌ای که پیچیدگی کلی K-means تابعی از تعداد پیکسل‌ها، تعداد خوشه‌ها و تعداد تکرارها محسوب می‌شود. ازاین‌رو، کاهش تعداد پیکسل‌ها موجب کاهش چشمگیر زمان پردازش می‌گردد و میان حفظ جزئیات هندسی ناحیه جریان و کاهش بار محاسباتی تعادل مناسب ایجاد می‌کند. تغییر اندازه تصویر بر اساس نگاشت خطی مختصات انجام می‌شود. اگر ابعاد تصویر اولیه $(H \times W)$ و ابعاد تصویر جدید $(H' \times W')$ باشد، مختصات متناظر از رابطه ۱ به دست می‌آید:

رابطه ۱)
$$x' = x\frac{W'}{W} \qquad , \qquad y' = y\frac{H'}{H}$$

که در آن (x,y) مختصات پیکسل در تصویر اولیه و (x',y') مختصات متناظر در تصویر تغییر اندازه‌یافته هستند. خروجی این مرحله، یک تصویر استانداردشده RGB با ابعاد ثابت ۶۰۰×۸۰۰ پیکسل است.

انتقال تصویر از فضای RGB به CIELAB و استخراج ویژگی‌های رنگی

فضای رنگی RGB به شرایط تصویربرداری و شدت نور وابسته است و تغییرات نور، سایه و روشنایی می‌تواند مقادیر هر سه رنگ را تحت تأثیر قرار دهد. به‌منظور افزایش پایداری فرآیند طبقه‌بندی، تصویر از فضای RGB به فضای رنگی CIELAB منتقل می‌شود که منجر به تفکیک مؤلفه روشنایی از اطلاعات رنگی و استخراج ویژگی‌هایی با حساسیت کمتر نسبت به تغییرات نورپردازی می‌شود. پس از تبدیل، تصویر دارای سه مؤلفه L*، a* و b* خواهد بود. مؤلفه L* بیانگر روشنایی، مؤلفه a* بیانگر محور سبز–قرمز و مؤلفه b* بیانگر محور آبی–زرد است. در این پژوهش، مؤلفه روشنایی L* از فرآیند خوشه‌بندی حذف شده و تنها دو مؤلفه رنگی a* و b* مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین، برای هر پیکسل (i)، بردار ویژگی دوبعدی به‌صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود:

رابطه ۲)
$$x_i = \begin{bmatrix} a_i^* \\ b_i^* \end{bmatrix}$$

که در آن x_i بردار ویژگی ستونی مربوط به پیکسل شماره i، a_i^* مقدار عددی پیکسل i روی کانال فاز مستقل سبز–قرمز و b_i^* مقدار عددی پیکسل i روی کانال فاز مستقل آبی–زرد است. مبنای بخش‌بندی در مرحله بعد، محاسبه فاصله بین پیکسل‌ها و مراکز خوشه‌ها در فضای ویژگی [a*, b*] است. فاصله اقلیدسی بین دو پیکسل i و j، $d(i,j)$، به‌صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود:

رابطه ۳)
$$d(i,j) = \sqrt{\left(a_i^* - a_j^*\right)^2 + \left(b_i^* - b_j^*\right)^2}$$

تعیین مقیاس مکانی تصویر با استفاده از OCR

ویرایش اولیه

در تحلیل‌های مبتنی بر بینایی ماشین، خروجی پردازش تصویر ابتدا به‌صورت مقادیر پیکسلی استخراج می‌شود و برای تبدیل این مقادیر به کمیت‌های فیزیکی، به ضریب مقیاس مکانی نیاز است. با توجه به امکان تغییر شرایط تصویربرداری، موقعیت دوربین و هندسه صحنه، ضریب مقیاس برای هر تصویر به‌صورت مستقل و با استفاده از سامانه تشخیص نوری کاراکتر (OCR) استخراج می‌شود. به‌منظور کاهش حجم محاسبات و افزایش دقت متن‌خوانی، OCR تنها بر روی یک ناحیه مشخص از تصویر اجرا می‌شود. این ناحیه بر اساس ضرایب نسبی ابعاد تصویر اصلی تعریف می‌گردد. در صورتی که متن OCR شامل واحدهای فیزیکی مانند m، cm یا mm باشد، مقدار متناظر با عرض واقعی جسم استخراج و در صورت نیاز به متر تبدیل می‌شود.

در تصاویر تولید شده و مورد استفاده، عرض واقعی دریچه از اطلاعات درج‌شده در خود تصویر استخراج شده و برای تعیین مقیاس مکانی مورد استفاده قرار گرفت. محاسبه مقیاس مکانی با OCR به این ترتیب است: اطلاعات هندسی دریچه در بخش بالایی هر تصویر درج شده و عرض دریچه نخستین مشخصه عددی آن است. سامانه OCR این مقدار را از همان محل مشخص و از پیش تعریف‌شده استخراج می‌کند (نه انتخاب تصادفی از کل تصویر). سپس، عرض دریچه در فضای تصویر (بر حسب پیکسل) نیز محاسبه می‌شود. در ادامه، مقیاس مکانی از نسبت میان عرض واقعی دریچه (به‌دست‌آمده از OCR) و عرض متناظر آن در تصویر (پیکسلی) محاسبه می‌شود. این مقیاس برای تبدیل اندازه‌گیری‌های پیکسلی به مقادیر فیزیکی به کار می‌رود. بر اساس محاسبات انجام‌شده، برای عرض واقعی دریچه ۰/۶ متر، عرض متناظر در تصویر ۳۱۱ پیکسل و مقیاس مکانی ۵۱۸/۳ پیکسل بر متر به دست آمد. برای عرض‌های ۰/۸، ۱ و ۱/۲ متر، عرض دریچه در تصویر به‌ترتیب ۳۵۱، ۳۵۱ و ۳۵۱ پیکسل بود و مقیاس‌های مکانی متناظر به‌ترتیب برابر با ۴۳۸/۷۵، ۳۵۱/۰ و ۲۹۲/۵ پیکسل بر متر محاسبه شدند.

پس از تعیین مقیاس تبدیل پیکسل به متر برای هر تصویر، از این ضریب به‌منظور محاسبه مساحت واقعی ناحیه آب استفاده شد. ابتدا ماسک نهایی ناحیه آب استخراج و تعداد پیکسل‌های متعلق به این ناحیه شمارش شد. سپس، با توجه به اینکه مقیاس بیانگر تعداد پیکسل در هر متر است، مساحت متناظر هر پیکسل از مربع معکوس مقیاس محاسبه گردید. در نهایت، مساحت ناحیه آب از حاصل‌ضرب تعداد پیکسل‌های آب در مساحت متناظر هر پیکسل به دست آمد. در خصوص دقت تشخیص عرض دریچه، مقدار عرض مورد استفاده توسط سامانه OCR از میان اطلاعات مشخصات درج‌شده در بخش بالایی تصویر استخراج می‌شود و به‌دلیل آنکه محل و ترتیب این اطلاعات در تصاویر تولیدشده از قبل مشخص است و به الگوریتم معرفی شده است، انتخاب مقدار عرض بر اساس ساختار مشخص اطلاعات تصویر انجام می‌شود، نه انتخاب تصادفی یک عدد از کل تصویر.

لازم به ذکر است که در تصاویر میدانی، اندازه‌گیری عرض و ارتفاع با استفاده از خط‌کش انجام شد. برای این تصاویر میدانی، در OCR مقدار عرض دریچه در مدل تعریف شد. برای تصاویر واقعی، به‌منظور کاهش اثر پرسپکتیو، ابتدا تصحیح پرسپکتیو انجام شد. در این مرحله، چهار گوشه دریچه شامل نقاط بالا–چپ، بالا–راست، پایین–راست و پایین–چپ به‌صورت دستی مشخص شدند و با استفاده از تبدیل پروژه‌ای(Projective Transformation) ، تصویر به نمای مستطیلی اصلاح‌شده نگاشت شد. سپس، عرض واقعی دریچه برابر با ۰/۵۳۵ متر، که با خط‌کش اندازه‌گیری شده بود، به‌عنوان مرجع هندسی برای محاسبه مساحت ناحیه آب با استفاده از روش تشریح شده در مورد عکس‌های تولید شده، مورد استفاده قرار گرفت.

خوشه‌بندی تطبیقی با الگوریتم K-Means

در تصاویر مورد استفاده، تغییرات نوری، سایه‌ها و ناهمگونی بازتاب سطح آب باعث می‌شوند تعداد مناسب خوشه‌ها از پیش ثابت نباشد. مقدار بهینه خوشه‌ها از میان مجموعه مقادیر کاندید تعریف‌شده انتخاب گردید. در پژوهش حاضر، از الگوریتم K-Means با تعداد خوشه‌های برابر با ۲ استفاده شد. این مقدار بر اساس مقایسه نتایج عملکردی حاصل از تعداد خوشه‌های مختلف به‌دست آمد. پس از تعیین K، الگوریتم K-means بر روی کل داده‌های تصویر اجرا می‌شود. برای افزایش پایداری خوشه‌بندی و جلوگیری از همگرایی به کمینه‌های محلی، از چندین مقداردهی اولیه تصادفی استفاده می‌شود. تابع هدف K-means به‌صورت رابطه ۴ تعریف می‌شود:

رابطه ۴)

$$\arg\min_{\{S_k\}} \sum_{k=1}^{best\ K} \sum_{x_i \in S_k} \|x_i - \mu_k\|^2$$

که در آن S_k مجموعه نقاط متعلق به خوشه k، x_i بردار ویژگی پیکسل i، μ_k مرکز خوشه k و $\| \quad \|$ فاصله اقلیدسی است. پس از پایان خوشه‌بندی، تصویر بخش‌بندی‌شده‌ای حاصل می‌شود که در آن هر پیکسل به یکی از خوشه‌های رنگی اختصاص یافته و این خروجی برای مرحله شناسایی ناحیه آب مورد استفاده قرار می‌گیرد.

شناسایی ناحیه آب با Blue Score

پس از اجرای الگوریتم K-Means، پیکسل‌های تصویر بر اساس شباهت رنگی به چند خوشه تقسیم می‌شوند. از آنجا که K-Means یک روش بدون نظارت است، شماره‌گذاری خوشه‌ها بیانگر ماهیت فیزیکی آن‌ها نیست و ممکن است در هر اجرا تغییر کند. بنابراین، برای شناسایی خوشه متناظر با ناحیه آب، از یک تابع امتیازدهی رنگی اختصاصی در فضای CIELAB استفاده می‌شود. ابتدا برای هر خوشه k، میانگین مقادیر کانال‌های a* و b* محاسبه می‌شود. از آنجا که محور a^* بیانگر تغییرات رنگی بین سبز و قرمز و محور b^* بیانگر تغییرات بین آبی و زرد است، این دو پارامتر اطلاعات اصلی مورد نیاز برای تشخیص رنگ هر خوشه را فراهم می‌کنند.

برای تعیین میزان شباهت هر خوشه به رنگ آبی، شاخص Blue Score تعریف می‌شود. در این شاخص، با توجه به اینکه رنگ‌های متمایل به آبی دارای مقادیر منفی در کانال b^* هستند، مقدار b^* با علامت منفی در امتیازدهی وارد می‌شود. همچنین، قدرمطلق میانگین a^*برای کاهش اثر مؤلفه‌های قرمز یا سبز در نظر گرفته می‌شود. ضرایب وزنی مورد استفاده در این رابطه ۰/۷ و ۰/۳، بر اساس تحقیقات پیشین، هستند که اهمیت بیشتر کانال b^* را در شناسایی ناحیه آب نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که ضرایب ۰/۷ و ۰/۳ در کد مورد استفاده به‌صورت ثابت تعریف شده‌اند و در این پژوهش مطالعه مستقلی برای بهینه‌سازی این ضرایب یا مقایسه نظام‌مند مقادیر مختلف آن‌ها بر اساس ویژگی‌های رنگی تصویر، تغییرات قابل‌توجه در کدورت، رسوب، جلبک، بازتاب سطح آب، سایه و شرایط روشنایی، می‌تواند بر عملکرد الگوریتم اثرگذار باشد، انجام نشده است. پس از محاسبه Blue Score برای تمامی خوشه‌ها، خوشه دارای بیشترین امتیاز به‌عنوان خوشه آب انتخاب می‌شود. در صورتی که شاخص Blue Score برای برخی خوشه‌ها مقدار معتبر تولید نکند، از معیار پشتیبان استفاده می‌شود. در این حالت، خوشه‌ای با کمترین میانگین مقدار کانال b* انتخاب می‌گردد. پس از تعیین خوشه متناظر با آب، ماسک دودویی ناحیه آب تشکیل می‌شود. در این ماسک، پیکسل‌های متعلق به خوشه منتخب مقدار یک و سایر پیکسل‌ها مقدار صفر دریافت می‌کنند. ماسک حاصل، تخمین اولیه ناحیه آب را تشکیل می‌دهد و برای اصلاح هندسه، حذف نویز و استخراج نهایی ناحیه آب در مرحله پردازش مورفولوژیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

پالایش مورفولوژیکی ماسک

پس از قطعه‌بندی اولیه تصویر توسط الگوریتمK-means ، ناحیه‌ای که به‌عنوان آب شناسایی شده ممکن است همچنان دارای نقص‌هایی باشد؛ برای مثال، ممکن است بخش‌هایی از ناحیه آب به‌صورت ناپیوسته دیده شوند، یا لکه‌های کوچک و جزایر جداافتاده‌ای در خارج از ناحیه آب وجود داشته باشد، و حتی ممکن است درون ناحیه آب، حفره‌ها و شکاف‌های کوچکی دیده شود. برای رفع این نواقص و دستیابی به یک ناحیه آب یکپارچه و پیوسته، مجموعه‌ای از عملیات اصلاحی بر روی تصویر انجام می‌شود. ابتدا، با استفاده از عملیاتی به نام بستن مورفولوژیکی (شامل گسترش (Dilation) و سپس فرسایش (Erosion) است)، شکاف‌های کوچک موجود در ناحیه آب پر شده و بخش‌های جداافتاده به هم متصل می‌شوند. پس از تشکیل ماسک اولیه ناحیه آب، به‌منظور بهبود پیوستگی ناحیه شناسایی‌شده و حذف نواحی نامتصل، عملیات بستن مورفولوژیکی (Closing) با استفاده از عنصر ساختاری دیسکی‌شکل با شعاع ۵ پیکسل اعمال شد. سپس، برای حذف لکه‌های کوچک و نویزهای باقی‌مانده، عملیات بازکردن مورفولوژیکی (Opening) با عنصر ساختاری دیسکی‌شکل با شعاع ۳ پیکسل انجام گرفت. عملیات بازکردن شامل فرسایش (Erosion) و به‌دنبال آن گسترش (Dilation) است. در

مورد استفاده قرار نشده

ادامه، پس از بازگرداندن ابعاد ماسک به ابعاد اولیه تصویر، یک مرحله بستن مورفولوژیکی دیگر با عنصر ساختاری دیسکی‌شکل با شعاع ۵ پیکسل و سپس پرکردن حفره‌های داخلی ناحیه شناسایی‌شده با استفاده از تابع Fill انجام شد.

در گام بعدی، هرگونه حفره یا روزنه‌ی بسته‌ای که درون ناحیه آب باقی‌مانده باشد، به‌کلی پر می‌شود. از آنجا که این مراحل بر روی تصویر کوچک‌شده (با ابعاد ۶۰۰×۸۰۰) انجام شده است، در این مرحله ناحیه آب اصلاح‌شده، با استفاده از روش نزدیک‌ترین همسایه به ابعاد اصلی تصویر بازگردانده می‌شود. سپس، برای اطمینان از حذف هرگونه بخش اضافی و نامرتبط، تمام اجزای مجزای تصویر بررسی شده و تنها بزرگ‌ترین بخش (که همان ناحیه اصلی آب است) انتخاب می‌گردد؛ سایر بخش‌های کوچک و پراکنده حذف می‌شوند. در پایان، برای صاف‌تر کردن لبه‌ها و برطرف کردن هرگونه ناهمواری یا شکستگی جزئی در مرز ناحیه آب، یک مرحله‌ی نهایی پُرکردن تکمیلی با صفحه‌ای با شعاع بزرگ‌تر انجام می‌گیرد. نتیجه نهایی، یک تصویر دودویی (سیاه‌وسفید) است که در آن ناحیه‌ی آب به‌صورت یکپارچه و پیوسته مشخص شده و آماده‌ی استفاده برای محاسبه مساحت و سایر پارامترهای هیدرولیکی است. لازم به ذکر است به‌منظور بررسی اثر پارامترهای عملیات مورفولوژیکی بر مساحت استخراج‌شده، تحلیل حساسیت انجام شد. در این تحلیل، شعاع‌های بستن اولیه، بازکردن و بستن نهایی به‌صورت مستقل تغییر داده شدند و در هر آزمایش، دو پارامتر دیگر ثابت نگه داشته شدند. ترکیب اولیه پارامترها شامل شعاع‌های ۵ پیکسل برای بستن اولیه، ۳ پیکسل برای بازکردن و ۷ پیکسل برای بستن نهایی بود. عملکرد ترکیب‌های مختلف بر اساس میانگین قدرمطلق خطای نسبی و بایاس (Bias) نسبت به مقادیر مرجع ارزیابی شد.

کالیبراسیون مقیاس و محاسبه مساحت

پس از تشکیل ماسک نهایی ناحیه آب، مساحت ناحیه شناسایی‌شده بر اساس تعداد پیکسل‌های متعلق به آب محاسبه شد. برای تبدیل ابعاد پیکسلی جعبه محیطی به مقادیر فیزیکی برای عکس‌های واقعی، مقیاس مکانی بر اساس عرض واقعی مرجع هر تصویر تعیین شد. در پایگاه داده تولیدشده، تصاویر مربوط به چهار عرض مرجع ۰/۶، ۰/۸، ۱ و ۱/۲ متر ایجاد شدند و هر تصویر پس از تولید برای پردازش به ابعاد ۶۰۰ × ۸۰۰ پیکسل تغییر اندازه داده شد. بنابراین، برای هر تصویر، ضریب تبدیل طول از نسبت عرض واقعی مرجع همان تصویر به عرض متناظر تصویر پس از تغییر اندازه به دست آمد. سپس، مساحت واقعی ناحیه آب از حاصل‌ضرب تعداد پیکسل‌های متعلق به آب در مربع ضریب تبدیل طول محاسبه شد:

رابطه ۵)

$$A_{Water} = N_{Water}\left(\frac{W_{real}}{W_{image}}\right)^2$$

که در آن A_{Water} مساحت واقعی ناحیه آب بر حسب مترمربع، N_{Water} تعداد پیکسل‌های متعلق به ناحیه آب، W_{real} عرض واقعی مرجع (برای عرض‌های استفاده شده در تحقیق حاضر) و W_{image} عرض تصویر مرجع برابر ۸۰۰ پیکسل است. همانطور که اشاره شد برای تصاویر واقعی، پیش از انجام اندازه‌گیری‌های هندسی، تصحیح پرسپکتیو انجام شد. در این مرحله، چهار گوشه دریچه به‌صورت دستی مشخص و تصویر به نمای مستطیلی اصلاح‌شده نگاشت شد. سپس، عرض واقعی دریچه، که با خط‌کش اندازه‌گیری شده بود، به‌عنوان مرجع هندسی برای محاسبه مساحت ناحیه آب مورد استفاده قرار گرفت.

مدل HEC-RAS

نرم‌افزار HEC-RAS یک نرم‌افزار تخصصی برای تحلیل و شبیه‌سازی جریان در مجاری روباز است که توسط مرکز مهندسی هیدرولوژیک ارتش ایالات متحده (Hydrologic Engineering Center) توسعه یافته است. این نرم‌افزار امکان تعریف هندسه مسیر جریان، مقاطع عرضی، سازه‌های هیدرولیکی و شرایط مرزی و همچنین شبیه‌سازی جریان در شرایط مختلف را فراهم می‌کند. HEC-RAS قابلیت تحلیل جریان‌های ماندگار و غیرماندگار را دارد.

ویرایش اولیه

علت استفاده از HEC-RAS در این تحقیق آن است که این نرم‌افزار امکان محاسبه خروجی‌ها را در طول یک دوره تحویل آب و به‌صورت شبیه‌سازی فراهم می‌کند تا از این خروجی‌ها برای محاسبه شاخص‌های ارزیابی از جمله شاخص‌های کفایت و راندمان استفاده شود. استفاده از یک دبی منفرد و رابطه روزنه‌ای، چنین اطلاعاتی (یعنی رفتار زمانی و شرایط هیدرولیکی در طول دوره تحویل آب) را در اختیار نمی‌گذارد.

بازه زمانی شبیه‌سازی ۲۴ ساعت و گام زمانی محاسبات برابر با ۶ دقیقه بود. هندسه مدل شامل دریاچه (به عنوان مخزن آب) با فاصله مقاطع نیم متر در اطراف دریچه با ابعاد ۰/۶ متر در عرض و ۰/۸ متر در ارتفاع بود. فاصله طولی بین مقاطع در نزدیکی سازه برابر با نیم متر بود. ضریب زبری مانینگ در نواحی مختلف مقاطع، که به‌صورت بتنی در قسمت بالائی است، برابر با ۰/۰۱۷ با مقایسه بتن با تصاویر استاندارد ارائه شده در مطالعات پیشین انتخاب شد. شرایط مرزی بالادست در ورودی دریاچه و پایین‌دست به‌ترتیب به‌صورت دبی جریان و تراز سطح آب تعریف شدند. ضریب دبی جریان برابر با ۰/۶ بر اساس رابطه سابرامانیا، Cd=0.589+0.0297Go/H، (Rajaratnam and Subramanya, 1967)، و بر اساس اطلاعات میدانی برداشت شده، محاسبه گردید.

به‌طور کلی در این پژوهش، اطلاعات هندسی و هیدرولیکی مورد نیاز به مدل وارد شد و پس از ایجاد ساختار محاسباتی کانال، شرایط جریان در مقاطع مختلف مورد بررسی قرار گرفت. اطلاعات ورودی به مدل، پارامترهای فوق‌الذکر بود و خروجی مدل، سری زمانی دبی عبوری از دریچه در گام‌های زمانی مختلف در طول دوره شبیه‌سازی بود که با مقایسه آن با دبی مرجع، شاخص‌های ارزیابی محاسبه شد. شبیه‌سازی جریان به‌صورت غیرماندگار انجام شد؛ در نتیجه معادلات سنت و نانت در HEC-RAS حل شد.

آنالیز حساسیت

به‌منظور بررسی میزان تأثیر تعداد خوشه‌ها بر عملکرد الگوریتم K-means در بخش‌بندی تصاویر، تحلیل حساسیت نسبت به پارامتر K انجام شد. از آنجا که مقدار K تعیین‌کننده تعداد خوشه‌های ایجادشده در فضای ویژگی رنگی تصویر است، تغییر این پارامتر می‌تواند بر تفکیک ناحیه آب از سایر اجزای تصویر و در نتیجه بر دقت استخراج ناحیه موردنظر تأثیرگذار باشد. بنابراین، به‌منظور ارزیابی پایداری و حساسیت فرآیند بخش‌بندی نسبت به این پارامتر، چهار سناریوی مختلف در نظر گرفته شد.

در سناریوی اول، مقدار K=2 به‌صورت ثابت برای تمامی تصاویر در نظر گرفته شد. در این حالت، فضای ویژگی تصویر به دو خوشه تقسیم شده و بر اساس ویژگی‌های رنگی، خوشه متناظر با ناحیه آب شناسایی و استخراج گردید. در سناریوی دوم، مقدار K=3 برای تمامی تصاویر ثابت در نظر گرفته شد تا تأثیر افزایش تعداد خوشه‌ها بر تفکیک ناحیه آب بررسی شود. در سناریوی سوم نیز مقدار K=4 به‌صورت ثابت برای کل مجموعه تصاویر اعمال شد. انتخاب این سه مقدار امکان بررسی عملکرد الگوریتم را در شرایطی با تعداد کم، متوسط و نسبتاً بیشتر از خوشه‌ها فراهم می‌کند. در سناریوی چهارم، به‌منظور بررسی عملکرد الگوریتم در شرایطی که مقدار K برای تصاویر مختلف یکسان نباشد، مقدار K برای هر تصویر به‌صورت تصادفی از مجموعه (2,3,4) انتخاب شد. بدین ترتیب، برخلاف سه سناریوی نخست که مقدار K در کل مجموعه داده ثابت بود، در این حالت تعداد خوشه‌ها متناسب با هر تصویر تغییر می‌کرد، بدون آنکه انتخاب مقدار K بر اساس نتیجه بخش‌بندی یا شاخص ارزیابی انجام شود. این سناریو امکان بررسی میزان وابستگی عملکرد روش پیشنهادی به یک مقدار ثابت از K و همچنین میزان پایداری آن در برابر تغییرات این پارامتر را فراهم می‌کند.

در تمامی سناریوها، سایر مراحل پردازش تصویر و تنظیمات الگوریتم ثابت نگه داشته شد تا اثر تغییر پارامتر K به‌صورت مستقل بررسی شود. پس از اجرای الگوریتم در هر سناریو، ناحیه آب استخراج و مساحت متناظر آن محاسبه شد. در ادامه، عملکرد هر سناریو با استفاده از شاخص‌های ارزیابی مقایسه گردید. نتایج حاصل از این مقایسه، مبنای ارزیابی حساسیت فرآیند بخش‌بندی نسبت به تعداد خوشه‌ها و انتخاب مناسب‌ترین مقدار K قرار گرفت.

به‌منظور بررسی اثر پارامترهای عملیات مورفولوژیکی بر مساحت استخراج‌شده نیز، تحلیل حساسیت انجام شد. در این تحلیل، شعاع‌های بستن اولیه، بازکردن و بستن نهایی به‌صورت مستقل تغییر داده شدند و در هر آزمایش، دو پارامتر دیگر ثابت نگه داشته

شدند. ترکیب اولیه پارامترها شامل شعاع‌های ۵ پیکسل برای بستن اولیه، ۳ پیکسل برای بازکردن و ۷ پیکسل برای بستن نهایی بود. عملکرد ترکیب‌های مختلف بر اساس میانگین قدرمطلق خطای نسبی مساحت (MAPE) و بایاس (Bias) نسبت به مقادیر مرجع ارزیابی شد. خطای نسبی مساحت و دبی نیز محاسبه گردید.

شاخص‌های ارزیابی

به‌منظور ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در استخراج کمیت فیزیکی موردنظر و بررسی میزان حساسیت نتایج نسبت به مقدار K در الگوریتمK-means ، خروجی حاصل از هر یک از سناریوهای مورد بررسی با مقادیر مرجع مقایسه شد. برای این منظور، چهار شاخص آماری شامل ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (NRMSE) و ضریب کارایی نش—ساتکلیف (NSE) مورد استفاده قرار گرفتند. استفاده هم‌زمان از این شاخص‌ها امکان ارزیابی میزان انطباق، اندازه خطا و عملکرد کلی روش پیشنهادی را فراهم می‌کند.

ضریب تعیین (R^2) برای بررسی میزان تطابق مقادیر برآوردشده با مقادیر مرجع و تعیین میزان تغییرپذیری داده‌های مرجع که توسط روش پیشنهادی قابل توضیح است، به کار گرفته شد. مقدار بالاتر این شاخص نشان‌دهنده همبستگی و انطباق بیشتر بین نتایج حاصل از پردازش تصویر و مقادیر مرجع است؛ بنابراین، مقادیر نزدیک‌تر به یک بیانگر عملکرد مطلوب‌تر روش هستند که از رابطه ۶ بدست می‌آید:

رابطه ۶)

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^{n}(P_i - \bar{P})^2}} \right)^2$$

که در آن، P_i مقدار پیش‌بینی شده (برآوردشده، محاسبه شده)، O_i مقدار مشاهده‌ای (مرجع)، n تعداد داده‌ها، $\bar{P}$ میانگین داده‌های پیش‌بینی شده و $\bar{O}$ میانگین داده‌های مشاهداتی است. ریشه میانگین مربعات خطا به‌منظور اندازه‌گیری میزان اختلاف بین مقادیر برآوردشده (محاسبه شده) و مقادیر مرجع استفاده شد. این شاخص نسبت به خطاهای بزرگ حساسیت بیشتری دارد و بنابراین می‌تواند اختلاف‌های قابل‌توجه بین نتایج حاصل از الگوریتم و مقادیر مرجع را به‌خوبی نشان دهد. در این شاخص، مقدار کمتر بیانگر خطای کمتر و عملکرد دقیق‌تر روش پیشنهادی است. که از رابطه ۷ بدست می‌آید:

رابطه ۷)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{n}}$$

ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده برای ارزیابی میزان خطا به‌صورت نرمال‌شده مورد استفاده قرار گرفت. این شاخص امکان مقایسه خطای حاصل از سناریوهای مختلف را مستقل از مقیاس داده‌ها فراهم می‌کند و در کنار RMSE، دید مناسب‌تری از میزان خطای نسبی روش ارائه می‌دهد. مقدار کمتر NRMSE نشان‌دهنده دقت بالاتر و خطای نسبی کمتر در نتایج برآوردشده است. که از رابطه ۸ بدست می‌آید:

رابطه ۸)

$$NRMSE = \frac{RMSE}{O_{max} - O_{min}}$$

که در آن، O_{max} و O_{min} به ترتیب حداکثر و حداقل مقادیر داده‌های مشاهداتی است. ضریب کارایی نش—ساتکلیف (رابطه ۹) نیز برای ارزیابی عملکرد کلی روش پیشنهادی در بازتولید تغییرات موجود در مقادیر مرجع مورد استفاده قرار گرفت. این شاخص علاوه بر میزان خطای برآورد، توانایی روش را در بازنمایی رفتار و تغییرات داده‌های مرجع نیز مورد توجه قرار می‌دهد. مقدار نزدیک به یک نشان‌دهنده عملکرد مطلوب و انطباق مناسب نتایج برآوردشده با مقادیر مرجع است، در حالی که کاهش مقدار آن بیانگر افت عملکرد روش است.

ویراستاری نشده

رابطه ۹)
$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2}$$

به‌منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم K-means در استخراج ناحیه آب، از دو شاخص هم‌پوشانی پیکسلی شامل اشتراک بر اجتماع (IoU)و ضریب Dice استفاده گردید. همچنین، خطای نسبی مساحت نیز محاسبه شد. در این ارزیابی، ماسک پیش‌بینی‌شده توسط الگوریتم با ماسک مرجع متناظر مقایسه شد. شاخص IoU از نسبت تعداد پیکسل‌های مشترک بین ماسک پیش‌بینی‌شده (M_p) و ماسک مرجع (M_r) به تعداد پیکسل‌های موجود در اجتماع آن‌ها محاسبه شد (رابطه ۱۰):

۱۰)
$$IoU = \frac{|M_p \cap M_r|}{|M_p \cup M_r|}$$

ضریب Dice نیز از رابطه ۱۱ محاسبه شد:

رابطه ۱۱)
$$Dice = \frac{2|M_p \cap M_r|}{|M_p| + |M_r|}$$

محدوده هر دو شاخص فوق، بین ۰ و ۱ تعریف می‌شوند؛ IoU از ۰ (بدون هیچ هم‌پوشانی) تا ۱ (هم‌پوشانی کامل) و Dice از ۰ (بدون شباهت) تا ۱ (تطابق کامل). به‌طور کلی می‌توان سطوح کیفیت زیر را در نظر گرفت: سطح ضعیف با IoU کمتر از ۰/۵ و Dice کمتر از ۰/۶۷؛ سطح قابل قبول با IoU بین ۰/۵ تا ۰/۷ و Dice بین ۰/۶۷ تا ۰/۸۲؛ سطح خوب با IoU بین ۰/۷ تا ۰/۸۵ و Dice بین ۰/۸۲ تا ۰/۹۲؛ و سطح عالی با IoU بیشتر از ۰/۸۵ و Dice بیشتر از ۰/۹۲. برای ارزیابی اختلاف مساحت ناحیه آب، خطای نسبی مساحت با استفاده از رابطه ۱۲ محاسبه گردید:

رابطه۱۲)
$$\mathrm{RAE} = \frac{|A_P - A_r|}{A_r}$$

که در آن، A_P مساحت استخراج‌شده از ماسک پیش‌بینی‌شده و A_r مساحت متناظر در ماسک مرجع است.

به‌منظور بررسی اثر پارامترهای عملیات مورفولوژیکی بر مساحت استخراج‌شده، عملکرد ترکیب‌های مختلف بر اساس میانگین قدرمطلق خطای نسبی مساحت (MAPE) و بایاس (Bias) نسبت به مقادیر مرجع ارزیابی شد. میانگین قدرمطلق خطای نسبی میزان اختلاف نسبی مساحت استخراج‌شده با مقدار مرجع را نشان می‌دهد. در محاسبه این شاخص، قدرمطلق خطای نسبی هر تصویر محاسبه و سپس میانگین آن برای تمام تصاویر به دست می‌آید؛ بنابراین، خطاهای مثبت و منفی یکدیگر را خنثی نمی‌کنند و مقدار کمتر آن نشان‌دهنده تطابق بیشتر مساحت‌های استخراج‌شده با مقادیر مرجع است.

بایاس جهت خطای میانگین را نیز مشخص می‌کند. در این شاخص، علامت خطا حفظ می‌شود؛ ازاین‌رو، مقادیر مثبت نشان‌دهنده بزرگ‌تر بودن مساحت استخراج‌شده نسبت به مساحت مرجع و مقادیر منفی نشان‌دهنده کوچک‌تر بودن آن است. مقدار بایس نزدیک به صفر بیانگر کوچک بودن خطای نسبی میانگین است؛ بااین‌حال، به‌تنهایی تضمین‌کننده کوچک بودن خطای هر تصویر نیست، زیرا خطاهای مثبت و منفی ممکن است یکدیگر را خنثی کنند. این شاخص‌ها از روابط زیر محاسبه شدند:

رابطه ۱۵)
$$MAPE = \frac{100}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|\frac{A_i - A_{ref,i}}{A_i}\right|$$

رابطه ۱۶)
$$Bias = \frac{100}{N}\sum_{i=1}^{N}\frac{A_i - A_{ref,i}}{A_i}$$

که در آن، N تعداد تصاویر ارزیابی‌شده، A_i مساحت ناحیه آب استخراج‌شده از طریق پردازش تصویر برای تصویر i و $A_{ref,i}$ مساحت مرجع متناظر با همان تصویر است.

از شاخص کفایت (بیانگر میزان کمبود آب در تحویل به آبگیر)، P_a، و شاخص راندمان (بیانگر میزان مازاد آب در تحویل به آبگیر)، P_f، برای ارزیابی دقت تحویل آب استفاده گردید (روابط ۱۷ و ۱۸). هر چه این مقادیر به یک نزدیک‌تر باشند بهتر است و کفایت و راندمان تحویل آب با دقت بالاتری انجام شده است.

ویرایشی نشده

$$P_f = \begin{cases} 1 & \text{if } P_i/O_i > 1 \\ P_i/O_i & \text{otherwise} \end{cases}$$ رابطه ۱۷)

$$P_a = \begin{cases} 1 & \text{if } O_i/P_i > 1 \\ O_i/P_i & \text{otherwise} \end{cases}$$ رابطه ۱۸)

که در آن O_i دبی تحویل شده و P_i دبی مرجع است. توجه داشته باشید که شاخص‌های P_e و P_f نحوه برآورده‌سازی نیاز آبی گیاه توسط مدل پیشنهادی دبی دریچه را بدون کمبود یا مازاد قابل توجه ارزیابی می‌کنند. به‌طور مشخص، P_e توانایی سیستم در تأمین نیاز آبی مورد نیاز را کمی می‌سازد؛ مقادیر کمتر از ۱ نشان‌دهنده کمبود آب (تحویل کمتر از نیاز) است، به این معنا که هرچه P_e کوچک‌تر باشد، کمبود شدیدتر است. در مقابل، P_f توانایی سیستم در توزیع آب بدون تلفات بیش از حد را ارزیابی می‌کند؛ مقادیر کمتر از ۱ نشان‌دهنده تحویل بیش از حد (مازاد آب) است، به این معنا که هرچه P_f کوچک‌تر باشد، آب بیشتری به هدر می‌رود (Molden and Gates, 1990).

نتایج و بحث

به‌منظور ارزیابی تأثیر تعداد خوشه‌ها بر عملکرد الگوریتم K-means، چهار سناریوی متفاوت شامل سه سناریوی با تعداد خوشه‌های ثابت شامل k=۲، k=۳ و k=۴، و یک سناریوی با انتخاب تصادفی مقدار k از میان مجموعه اعداد ۴،۳،۲ در طول فرایند الگوریتم طراحی، اجرا و نتایج آنها با استفاده از شاخص‌های آماری ضریب تعیین، ریشه میانگین مربعات خطا، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده و ضریب کارایی نش-ساتکلیف ارزیابی گردید و مورد مقایسه قرار گرفت (جدول ۱).

جدول ۱. نتایج شاخص‌های ارزیابی برای مقادیر مختلف K.

سناریو	K	ضریب تعیین	ریشه میانگین مربعات خطا (مترمربع)	ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده	ضریب کارایی نش-ساتکلیف
۱	۲	۰/۹۹۸۶۷۴	۰/۰۰۵۳۸۰	۰/۰۱۲۴۸	۰/۹۹۷۳۲۱
۲	۳	۰/۹۹۸۰۳۳	۰/۰۰۸۰۵۵	۰/۰۱۸۶۸	۰/۹۹۳۹۹۶
۳	۴	۰/۹۹۸۰۶۴	۰/۰۰۸۸۸۲	۰/۰۲۰۶	۰/۹۹۲۷۰۱۰
۴	۲،۳،۴	۰/۹۹۸۲۵۲	۰/۰۰۶۳۱۶	۰/۰۱۴۶۵	۰/۹۹۶۳۰۹

در میان سناریوهای مختلف، سناریوی اول با دارا بودن بیشترین مقدار ضریب تعیین و ضریب نش-ساتکلیف و کمترین مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده به‌عنوان برترین سناریو شناسایی شد و در سناریوهای ۲ و ۳ مقادیر ضریب تعیین و ضریب نش-ساتکلیف کمتر و مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده بیشتر است. این یافته نشان می‌دهد که در مجموعه‌داده‌های مورد بررسی، افزایش تعداد خوشه‌ها لزوماً به بهبود عملکرد خوشه‌بندی نمی‌شود و در عمل، افزایش تفکیک‌پذیری فضای ویژگی می‌تواند با افزایش خطای برآورد همراه باشد. سناریوی چهارم نیز که در آن انتخاب تصادفی kاز میان مقادیر ۲، ۳ و ۴ انجام می‌شود، عملکردی قابل‌قبولی از خود نشان داده است به‌گونه‌ای که از نظر مقادیر شاخص‌ها، همگی در جایگاه دوم پس از سناریوی اول قرار گرفته‌اند. ضریب تعیین ۰/۹۹۸۲۵۲، ریشه میانگین مربعات خطا برابر با ۰/۰۰۶۳۱۶، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده برابر با ۰/۰۱۴۶۵و ضریب کارایی نش-ساتکلیف برابر با ۰/۹۹۶۳۰۹ به‌دست آمد که نشان‌دهنده عملکرد نزدیک به سناریوی اول است. به‌طور کلی، مقایسه هم‌زمان چهار شاخص ارزیابی، برتری سناریوی با دو خوشه، k=۲، را نسبت به سایر حالات تأیید می‌کند و مقدار k=2 به‌عنوان تعداد بهینه خوشه‌ها انتخاب شد و در ادامه تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

در این پژوهش، انتخاب k و مسئله قطعه‌بندی با هدف تفکیک دو ناحیه مستقل آب، غیرآب انجام شده است و مسئله به‌صورت قطعه‌بندی دودویی «آب» و «غیرآب» تعریف شده است. در این چارچوب، ناحیه آب در یک خوشه و سایر نواحی تصویر، شامل بدنه

ویراستاری نشده

دریچه و زمینه، در خوشه دیگر یا در مجموعه نواحی غیرآب قرار می‌گیرند. هدف اصلی این تفکیک، استخراج ناحیه سطح آب و محاسبه مساحت آن برای تعیین بازشدگی معادل هندسی بوده است.

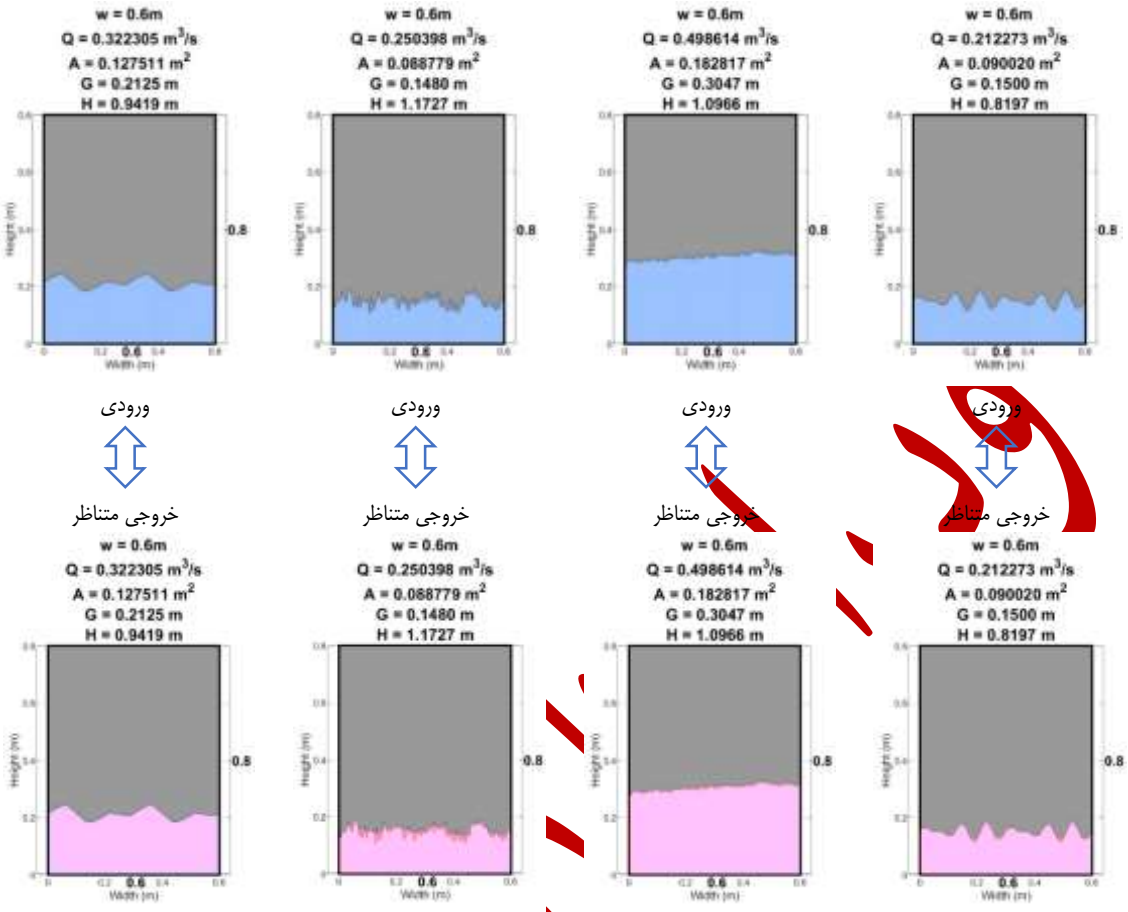
به‌منظور بررسی مستقیم کیفیت بخش‌بندی ناحیه آب، عملکرد الگوریتم K-means با استفاده از شاخص‌های *IoU*، *Dice* و خطای نسبی مساحت روی ۲۰۰ تصویر تولید شده با عرض مرجع ۰/۶ متر ارزیابی شد. نتایج نشان داد که میانگین *IoU* برابر با ۰/۹۸۲۵ و میانگین Dice برابر با ۰/۹۹۱۱ است. همچنین، کمترین مقادیر مشاهده‌شده برای این دو شاخص در میان ۲۰۰ تصویر به‌ترتیب بالاتر از ۰/۸۵ و ۰/۹۲ است؛ بنابراین بر اساس سطح‌بندی ارائه‌شده در بخش شاخص‌های ارزیابی، هر دو شاخص در سطح «عالی» تطابق و هم‌پوشانی قرار می‌گیرند. همچنین، میانگین خطای نسبی مساحت برابر با ۱/۱۹۲۸ درصد به دست آمد که نشان می‌دهد اختلاف مساحت استخراج‌شده با مساحت متناظر مرجع در این مجموعه محدود بوده است. در مجموع، نتایج حاصل از این سه شاخص، عملکرد مناسب الگوریتم را در استخراج ناحیه آب از تصاویر تولیدشده نشان می‌دهند. برای ارزیابی دقت روش پردازش تصویر در تصاویر واقعی، مساحت‌های به‌دست‌آمده از استخراج پیکسلی ناحیه آب با مقادیر مرجع هندسی مقایسه شد. در تصویر شماره ۱، مساحت مرجع ۰/۰۴۰۱ مترمربع و مساحت حاصل از پردازش تصویر ۰/۰۴۰۹۸ مترمربع بود. در تصویر شماره ۲، این مقادیر به‌ترتیب ۰/۰۲۶۷ و ۰/۰۲۸۹ مترمربع و در تصویر شماره ۳ به‌ترتیب ۰/۰۵۲۵ و ۰/۰۵۲۶۶ مترمربع به دست آمد. بر این اساس، خطای نسبی مساحت در تصاویر شماره ۱، ۲ و ۳ به‌ترتیب حدود ۲/۲، ۸/۲۴ و ۱/۵۷ درصد محاسبه شد. همچنین، دبی مرجع برای سه تصویر ۱–۳ به‌ترتیب برابر با ۰/۰۵۱۱، ۰/۰۲۲۵ و ۰/۰۷۵۱ و دبی حاصل از شبیه‌سازی به‌ترتیب برابر با ۰/۰۵، ۰/۰۲ و ۰/۰۷ مترمکعب بر ثانیه بود. خطای نسبی دبی برای این سه تصویر به‌ترتیب ۲/۱۵، ۱۱/۱ و ۶/۷۹ درصد بدست آمد.

نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای عملیات مورفولوژیکی نشان داد که در میان ترکیب‌های بررسی‌شده، ترکیب شعاع‌های ۵، ۳ و ۵ پیکسل، به‌ترتیب برای بستن اولیه، بازکردن و بستن نهایی، بهترین عملکرد را داشت. در این ترکیب، میانگین قدرمطلق خطای نسبی مساحت برابر با ۰/۵۱۸۳ درصد و بایاس برابر با ۰/۱۶۵۹ درصد به دست آمد.

برای بررسی عملکرد روش پردازش تصویر در استخراج ناحیه سطح آب، تصاویر تولیدشده به‌عنوان ورودی به الگوریتم پردازش تصویر داده شدند و پس از اجرای الگوریتم، ناحیه سطح آب متناظر با هر تصویر استخراج شد. مجموعه تصاویر شامل ۸۰۰ تصویر بود که در چهار گروه ۲۰۰تایی و متناظر با عرض‌های ۰/۶، ۰/۸، ۱ و ۱/۲ متر تولید شده بودند. به‌منظور بررسی قابلیت روش پردازش تصویر در برآورد بازشدگی معادل و پاسخ هیدرولیکی، از میان ۸۰۰ تصویر تولید شده، از هر گروه چهار تصویر به‌صورت تصادفی انتخاب گردید؛ بنابراین، در مجموع ۱۶ تصویر در ارزیابی هیدرولیکی مورد استفاده قرار گرفت. ارزیابی در دو سطح هندسی و هیدرولیکی انجام شد. شکل ۱ چهار نمونه از تصاویر مربوط به عرض ۰/۶ متر و خروجی متناظر الگوریتم را نشان می‌دهد. پس از استخراج ناحیه آب، مساحت ناحیه آب بر اساس تعداد پیکسل‌های متناظر با آب و مقیاس مکانی تصویر محاسبه شد. با توجه به مستطیلی بودن ناحیه جریان آب در مقطع موردنظر و ثابت بودن عرض کانال، ارتفاع بازشدگی معادل از تقسیم مساحت ناحیه جریان بر عرض دریچه به‌دست می‌آید. بازشدگی معادل و تراز سطح آب استخراج‌شده از تصویر در مدل HEC-RAS مورد استفاده قرار گرفت و شبیه‌سازی انجام شد و نتایج حاصل با نتایج برداشت‌های میدانی مقایسه شد و سپس برای شاخص‌های ریشه میانگین مربع خطاها، راندمان و کفایت برای تصاویر منتخب محاسبه گردید (جداول ۲–۵).

عکس شماره ۱ عکس شماره ۲ عکس شماره ۳ عکس شماره ۴

ویرایش نشده



شکل ۱.تصاویر ورودی و خروجی روش پردازش تصویر برای چهار نمونه با عرض ۰/۶ متر

جدول ۲. شاخص‌های آماری حاصل از ارزیابی هیدرولیکی برای عرض ۰/۶.

شماره عکس	ریشه میانگین مربعات خطا (m^3/s)	راندمان	کفایت
۱	۰/۰۵۰۳۶	۰/۹۲۱۵۶۱	۱
۲	۰/۰۵۲۳	۰/۹۳۴۰۲۱	۱
۳	۰/۰۸۱۲۳	۰/۹۲۶۶۶	۰/۹۹۹۹۳۳
۴	۰/۰۱۰۷۴۱	۰/۹۸۳۶۳۳	۱

جدول ۳. شاخص‌های آماری حاصل از ارزیابی هیدرولیکی برای عرض ۰/۸.

شماره عکس	ریشه میانگین مربعات خطا (m^3/s)	راندمان	کفایت
۱	۰/۰۶۶۰۹۱	۰/۹۳۵۵۰۶	۰/۹۹۶۹۱۲
۲	۰/۰۱۱۴۳۳	۰/۹۸۳۵۷۸	۰/۹۹۸۲۴
۳	۰/۰۸۱۷۳	۰/۹۳۷۸۳۴	۰/۹۹۷۳۷۸
۴	۰/۰۳۶۵۵۳	۰/۹۴۷۸۹۵	۱

جدول ۴. شاخص‌های آماری حاصل از ارزیابی هیدرولیکی برای عرض ۱.

شماره عکس	ریشه میانگین مربعات خطا (m^3/s)	راندمان	کفایت
۱	۰/۰۷۱۱۴۲	۰/۹۳۸۸۴۴	۰/۹۹۹۳۵
۲	۰/۰۴۹۱۲۹	۰/۹۲۵۱۱۴	۱
۳	۰/۱۰۹۴۰۶	۰/۹۳۶۳۲۲	۰/۹۹۸۴۶۹
۴	۰/۰۵۴۹۳۷	۰/۹۳۰۵۸۱	۰/۹۹۹۹۲۵

جدول ۵. شاخص‌های آماری حاصل از ارزیابی هیدرولیکی برای عرض ۱/۲.

ردیف	ریشه میانگین مربعات خطا (m^3/s)	راندمان	کفایت
۱	۰/۰۹۷۴۴۲	۰/۹۴۵۵۷۸	۰/۹۷۱۶۱۹
۲	۰/۰۶۳۶۶۳	۰/۹۳۴۶۳۱	۰/۹۹۹۸۴۲
۳	۰/۱۴۶۸۹۶	۰/۹۲۵۸۷۹	۰/۹۹۹۹۵۶
۴	۰/۰۶۶۳۸۶	۰/۹۳۷۸۸	۰/۹۹۲۰۰۶

بررسی مقادیر جداول ۵-۲ نشان می‌دهد که در هر چهار تصویر، عملکرد بسیار مطلوبی در استخراج ناحیه آب و برآورد پارامترهای هیدرولیکی حاصل شده است. برای عرض دریچه ۰/۶، شاخص کفایت برای تمامی تصاویر مقادیری بسیار نزدیک به یک (بین ۰/۹۹۹۹۳۳تا ۱) دارد که بیانگر تامین کافی آب تحت شرایط هیدرولیکی مربوطه است. برای تصاویر شماره ۱، ۲ و ۴، مقدار این شاخص برابر با ۱ است که نشان‌دهنده تطابق کامل بین مقادیر استخراج‌شده و مقادیر مرجع شاخص کفایت است. شاخص راندمان نیز در تصاویر مختلف بین ۰/۹۲۱۵۶۱ تا ۰/۹۸۳۶۳۳ متغییر بوده است. بهترین عملکرد از این نظر مربوط به تصویر شماره ۴ با مقدار ۰/۹۸۳۶۳۳ و پس از آن تصاویر شماره ۳، ۱ و ۲ قرار دارند. برای عرض‌های دیگر دریچه شامل ۰/۸، ۱ و ۱/۲ نیز، همانطور که در جداول ۳، ۴ و ۵ قابل مشاهده است، نتایج و بحث مشابهی وجود دارد.

مقدار ریشه میانگین مربعات خطاها برای چهار تصاویر مربوط به عرض ۰/۶ بین ۰/۰۱۰۷۴۱ تا ۰/۰۸۱۲۳ متغیر بوده است. کمترین مقدار خطا مربوط به تصویر شماره ۴ با مقدار ۰/۰۱۰۷۴۱ است که نشان‌دهنده بیشترین دقت روش در این تصویر می‌باشد. در مقابل، تصویر شماره ۳ با ریشه میانگین مربعات خطاها برابر با ۰/۰۸۱۲۳ دارای بیشترین خطا بوده است. این تفاوت در مقادیر خطا را می‌توان به عوامل مختلفی نظیر شرایط نوری، وجود سایه، کیفیت تصویر، یا پیچیدگی هندسه دریچه در هر تصویر نسبت داد.

مشاهده می‌شود که افزایش دبی و به‌تبع آن افزایش تراز آب و بازشدگی دریچه، لزوماً با کاهش دقت همراه نبوده است. به‌عنوان مثال، تصویر شماره ۴ با دومین دبی بالا (۰/۳۲۲۳۰۵ متر مکعب بر ثانیه) بهترین عملکرد را از نظر تمامی شاخص‌ها داشته است. این موضوع نشان‌دهنده استحکام روش در شرایط مختلف هیدرولیکی است و حاکی از آن است که عوامل مؤثر بر خطا بیشتر به کیفیت تصویر و شرایط محیطی (نور، سایه، زاویه دید) مرتبط هستند تا خود شرایط هیدرولیکی و بر اساس نتایج این تحقیق، نسبت مستقیمی بین افزایش دبی و دقت نتایج وجود ندارد. در تصویر شماره ۳ با بیشترین دبی و بازشدگی دریچه، بیشترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطاها حاصل شده است که می‌تواند ناشی از پیچیدگی بیشتر مرزهای سطح آب در بازشدگی‌های بزرگ باشد. در چنین شرایطی، احتمال تداخل ناحیه آب با بدنه دریچه یا زمینه افزایش یافته و قطعه‌بندی را با چالش مواجه می‌سازد. در مجموع، نتایج این بخش تأیید می‌کند که روش پیشنهادی با تکیه بر پردازش تصویر کلاسیک و الگوریتمK-means ، بدون نیاز به داده‌های آموزشی انبوه و منابع محاسباتی سنگین، قادر به استخراج دقیق پارامترهای هیدرولیکی از تصاویر دریچه‌های کانال است.

همانطور که اشاره شد، انواع مختلف تخریب و فرسودگی ممکن است در سازه‌ها ایجاد شود که در این تحقیق به چهار مورد از آنها اشاره شد. از این رو، نتایج مربوط به شاخص‌ها برای انواع وضعیت ظاهری بررسی و مقایسه گردید. در عکس شماره ۱ که در آن مقادیر ریشه میانگین مربعات خطاها، راندمان و کفایت به ترتیب برابر با ۰/۰۵۰۳۶، ۰/۹۲۱۵۶۱ و ۱ حاصل شده است، خوردگی‌های نسبتاً

ویراستاری نشده

گسترده وجود دارد، با این حال، مرز آب از وضوح قابل‌قبولی برخوردار بوده و الگوریتم توانسته است با دقت مناسبی ناحیه آب را از بدنه فرسوده تفکیک کند بدین معنی که الگوریتم K-means با تکیه بر تفاوت‌های رنگی در فضای CIELAB، توانسته است این عوارض را به‌خوبی تفکیک کند. در عکس شماره ۲ که در آن مقادیر ریشه میانگین مربعات خطاها، راندمان و کفایت به ترتیب برابر با ۰/۰۵۲۳، ۰/۹۳۴۰۲۱، ۱ برای عرض ۰/۶ متر ارائه شده است، خرابی‌های محدودتر (تعییرات ناهموار کوچک در لبه دریچه) و عمدتاً به‌صورت زنگ‌زدگی سطحی و لکه‌های ریز در بخش‌های میانی بدنه قابل مشاهده است. کیفیت کلی تصویر نسبتاً مطلوب بوده و مرز آب به‌وضوح قابل تشخیص است. نتایج شاخص‌ها در عرض‌های مختلف برای این دریچه نشان می‌دهد که این نوع خرابی‌های سطحی و پراکنده، تأثیر ناچیزی بر عملکرد قطعه‌بندی دارد. در واقع، هنگامی که خرابی‌ها به‌صورت موضعی و با شدت کم باشند، الگوریتم به‌راحتی می‌تواند آن‌ها را به‌عنوان بخشی از زمینه تلقی کرده و از آن‌ها عبور کند و در عین حال نیز دقت الگوریتم قابل بود باشد. در عکس شماره ۳ که در آن مقادیر ریشه میانگین مربعات خطاها، راندمان و کفایت به ترتیب برابر با ۰/۰۸۱۲۳، ۰/۹۲۶۶۶، ۰/۹۹۹۹۳۳ برای عرض ۰/۶ متر ارائه شده است، همچنین در تصویر شماره ۴، مقادیر ریشه میانگین مربعات خطاها، راندمان و کفایت به‌ترتیب برابر با ۰/۰۱۰۷۴۱، ۰/۹۸۳۶۳۳ و ۱ به دست آمد. در این تصویر، کمترین مقدار خطا و بیشترین مقدار راندمان مشاهده شد؛ بنابراین، الگوریتم در میان چهار تصویر مورد بررسی، بهترین عملکرد را داشته است. این نتیجه نشان‌دهنده عملکرد مناسب روش در شرایط تصویری این نمونه است، همچنین ترکیب دو سطح خرابی و فرسودگی دو تصویر قبلی مشاهده می‌شود که می‌تواند در اثر خرابی‌هایی از قبیل ساییدگی شدید بدنه، تغییر رنگ گسترده، وجود سایه‌های عمیق و احتمالاً پوسته‌شدگی سطحی در بخش‌های مختلف بوجود بیاید. با توجه به مقادیر شاخص‌ها در عرض‌های مختلف به‌نظر می‌رسد که این نوع خرابی شدید (تعییرات ناهموار بزرگ در لبه دریچه)، الگوریتم را با چالش جدی مواجه می‌سازد؛ زیرا در این حالت، شباهت رنگی بین نواحی خراب بدنه و سطح آب افزایش یافته و تشخیص مرز دقیق بین آن‌ها دشوارتر می‌شود. در عکس شماره ۱ شکل ۱ که در آن مقادیر ریشه میانگین مربعات خطاها، راندمان و کفایت به ترتیب برابر با ۰/۰۱۰۷۴۱، ۰/۹۸۳۶۳۳، ۱ برای عرض ۰/۶ متر ارائه شده است، کمترین میزان خرابی و فرسودگی وجود دارد و بیشتر به شکستگی‌های موضعی بزرگ شباهت دارد. بدنه دریچه نسبتاً سالم و عاری از لکه است. در نتیجه، الگوریتم بهترین عملکرد را داشته است. این تصویر به‌عنوان بهترین حالت ممکن، نشان‌دهنده‌ی پتانسیل بالای روش در شرایط ایده‌آل است.

نتایج تحلیل حساسیت به خطای دبی در اندازه‌گیری دبی بر دو شاخص عملکردی مهم یعنی کفایت و راندمان نشان داد که ۱۰ درصد خطا در دبی (۱۰ درصد تغییر در دبی نسبت به دبی مبنا)، به‌ترتیب موجب ۶/۹ درصد خطا در کفایت و ۴/۶ درصد خطا در راندمان می‌شود. همچنین، ۲۰ درصد خطا در دبی، این مقادیر را به ۱۳/۶ درصد برای کفایت و ۸/۹ درصد برای راندمان می‌رساند. این ارقام نشان می‌دهند که حساسیت کفایت به خطای دبی بیشتر از راندمان است؛ به‌طوری که با دو برابر شدن خطای دبی (از ۱۰ درصد به ۲۰ درصد)، خطای کفایت حدود دو برابر (از ۶/۹ درصد به ۱۳/۶ درصد) افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، چارچوبی کارآمد و کم‌هزینه از داده‌های آموزشی برای استخراج هم‌زمان تراز سطح آب، بازشدگی دریچه و دبی در سازه‌های کنترل شبکه‌های آبیاری ارائه شد. روش پیشنهادی با تکیه بر پردازش تصویر کلاسیک و الگوریتم خوشه‌بندی K-means، همراه با انتخاب بهینه تعداد خوشه‌ها (k=2) و پالایش مورفولوژیکی، توانست ناحیه آب را با دقت مناسب از بدنه دریچه و زمینه تفکیک کند. به‌کارگیری سامانه OCR برای تعیین ضریب مقیاس—با استخراج عرض دریچه از محل از پیش تعریف‌شده در تصویر و محاسبه نسبت عرض واقعی به عرض پیکسلی—انعطاف‌پذیری روش را در شرایط تصویربرداری متفاوت افزایش داده و وابستگی به کالیبراسیون ثابت را برطرف می‌کند.

ارزیابی کمی با استفاده از شاخص‌های ضریب تعیین، ریشه میانگین مربعات خطا، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده و ضریب کارایی نش—ساتکلیف، برتری سناریوی دو خوشه‌ای را نسبت به سایر تعداد خوشه‌ها و انتخاب تصادفی تأیید کرد. کیفیت قطعه‌بندی

ویرایش نشده

ناحیه آب بر روی ۲۰۰ تصویر تولیدشده به میانگین شاخص هم‌پوشانی IoU برابر با ۰/۹۸۲۵میانگین ضریب Dice برابر با ۰/۹۹۱۱ و میانگین خطای نسبی مساحت برابر با ۱/۱۹۲۸ درصد دست یافت. همچنین، تحلیل حساسیت پارامترهای عملیات مورفولوژیکی نشان داد که ترکیب شعاع‌های ۵، ۳ و ۵ پیکسل به‌ترتیب برای بستن اولیه، بازکردن و بستن نهایی، بهترین عملکرد را با میانگین قدرمطلق خطای نسبی ۰/۵۱۸۳ درصد و بایاس ۰/۱۶۵۹ درصد دارد. ارزیابی عملکرد روش با شاخص‌های ریشه میانگین مربعات خطا، شاخص کارایی و شاخص کفایت، دقت بالایی را در شرایط ایده‌آل نشان داد. با وجود اینکه خرابی‌های شدید می‌توانند مقدار RMSE را تا ۰/۰۸۱۲۳ افزایش دهند، بالا بودن پیوسته شاخص کفایت (بیش از ۰/۹۹۹۹) قابلیت اطمینان عملی روش را تأیید می‌کند. تحلیل حساسیت به خطای دبی نشان داد که شاخص کفایت نسبت به شاخص کارایی حساسیت بیشتری به خطای اندازه‌گیری دبی دارد؛ به‌گونه‌ای که ۱۰ درصد خطا در دبی به‌ترتیب موجب ۶/۹ درصد و ۴/۶ درصد خطا در کفایت و کارایی می‌شود و با دو برابر شدن خطای دبی (۲۰ درصد)، این مقادیر به ۱۳/۶ درصد و ۸/۹ درصد افزایش می‌یابد. این رابطه تقریباً خطی و نامتقارن نشان می‌دهد که سامانه‌های تحویل حجمی آب، که کفایت (تحویل حجم موردنیاز) را در اولویت قرار می‌دهند، باید کنترل دقیق‌تری بر اندازه‌گیری دبی اعمال کنند تا از افت معنادار عملکرد جلوگیری شود.

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که روش پیشنهادی، بدون نیاز به داده‌های آموزشی انبوه و منابع محاسباتی سنگین، توانایی بالایی در استخراج دقیق پارامترهای هیدرولیکی از تصاویر دریچه‌های کانال دارد و می‌تواند گامی مؤثر در جهت پایش پیوسته و کم‌هزینه منابع آب در شبکه‌های آبیاری باشد. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده به بررسی عملکرد روش در شرایط نوری متغیر و تصاویر اخذشده از دوربین‌های نظارتی واقعی، و همچنین توسعه آن به‌صورت بلادرنگ برای کاربردهای مدیریتی بپردازند.

مراجع

Ahmad, M. T., Haie, N., Gonçalves, J. M., Pinho, J., Yen, H., Yakubu, M. L., Mohammed, M. U. & Suleimana, A. (2024). Performance assessment and indicators for agricultural water management—A review. *Water and Environment Journal*, 38(2), 192–211. **https://doi.org/10.1111/wej.12913**.

Chaitanya, T. R., Sangeetha, S. V. T., Deepa, K. & Neelima, N. (2024). Modernizing Flood Control with Intelligent Dam Gate Prediction–A Survey. *International Conference on Knowledge Engineering and Communication Systems (ICKECS)*, IEEE, 1–7. **https://doi.org/10.1109/ICKECS61492.2024.10616533**.

Fatemeh, O., Hesam, G. & Shahverdi, K. (2020). Comparing Fuzzy SARSA Learning (FSL) and Ant Colony Optimization (ACO) Algorithms in Water Delivery Scheduling under Water Shortage Conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 146(9), 04020028. **https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001496**.

Han, F. & Gu, C. (2025). Surface damage detection in hydraulic structures from UAV images using lightweight neural networks. *Remote Sensing*, 17(15), 2668. https://doi.org/10.3390/rs17152668.

Iqbal, U., Riaz, M. Z. B., Barthelemy, J., Perez, P. & Idrees, M. B. (2023). The last two decades of computer vision technologies in water resource management: A bibliometric analysis. *Water and Environment Journal*, 37(3), 373–389. **https://doi.org/10.1111/wej.12845**.

Kuswidiyanto, L., Nugroho, A., Jati, A., Wismoyo, G., Murtiningrum & Arif, S. (2021). Automatic water level monitoring system based on computer vision technology for supporting the irrigation modernization. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 686(1), 012055. **https://doi.org/10.1088/1755-1315/686/1/012055**.

Liu, W.-C. & Huang, W.-C. (2024). Evaluation of deep learning computer vision for water level measurements in rivers. *Heliyon*, 10(4), e25989. **https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25989**.

Molden, D. J. & Gates, T. K. (1990). Performance measures for evaluation of irrigation-water-delivery systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 116(6), 804–823. **https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1990)116:6(804)**.

Rajaratnam, N. & Subramanya, K. (1967). Flow equation for the sluice gate. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 93(3), 167–186. **https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0000503**.

Shahverdi, K. & Maestre, J. (2022). Gray Wolf Optimization for Scheduling Irrigation Water. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 148(7), 04022020. **https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001688.**

Tungatarova, A., Borankulova, G., Murzakhmetov, A., Yeraliyeva, B., Dulatbayeva, S., Bekbolatov, S. & Turarova, B. (2026). Hybrid IoT-VIoT System for Real-Time Water-Level Monitoring Using Computer Vision. *Computers*, 15(6), 373. **https://doi.org/10.3390/computers15060373**.

Yang, L., Zhu, D. & Liu, X. (2024). An efficient method for identifying surface damage in hydraulic concrete buildings. *Scientific Reports*, 14(1), 31277. **https://doi.org/10.1038/s41598-024-82612-3**.

Yousefi, P., Jalab, H. A., Ibrahim, R. W., Noor, N. F. M., Ayub, M. N. & Gani, A. (2018). Water-body segmentation in satellite imagery applying modified kernel k-means. *Malaysian Journal of Computer Science*, 31(2), 143–154. **https://doi.org/10.22452/mjcs.vol31no2.4**.

Zhang, D. & Qiu, J. (2025). Cascade method for water level measurement based on computer vision. *Environmental Modelling & Software*, 184, 106285. **https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106285**.

Zhang, D. & Tong, J. (2023). Robust water level measurement method based on computer vision. *Journal of Hydrology*, 620, 129456. **https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129456**.

Zhou, K., Fan, Y., Gao, Z., Chen, H. & Kang, Y. (2025a). Research progress on operation control and optimal scheduling of irrigation canal systems. *Irrigation and Drainage*, 74(2), 861–879. **https://doi.org/10.1002/ird.3028**.

Zhou, K., Fan, Y., Gao, Z., Chen, H., Zheng, X., Yang, Y. & Liu, J. (2025b). The coupled model of water delivery and distribution regulation for single-canal pool systems. *Agricultural Water Management*, 313, 109475. **https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109475.**

ویراستاری نشده