توسعه تعدادی از شاخص‌های حساسیت هیدرولیکی سازه‌ای و کاربرد آنها در تحلیل فرایند بهره‌برداری کانال‌های آبیاری

علی‌اصغر منتظر[۱]، صلاح کوچک‌زاده[۲] و محمدحسین امید[۲]

چکیده

شیوه آنالیز حساسیت از جمله شیوه‌های نوین مطالعه جریان بوده که از اواخر دهه نود میلادی مطرح گردیده و در حال حاضر مراحل توسعه خود را طی می‌نماید. در این روش با استفاده از روابط جریان دایمی و اطلاعات وضعیت ساختار فیزیکی شبکه‌های آبیاری، واکنش سیستم نسبت به تغییرات و اختلالات هیدرولیکی و سازه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته و امکان مطالعه جریان فراهم می‌گردد. در این تحقیق ضمن تدوین تعدادی از شاخص‌های حساسیت هیدرولیکی سازه‌ای، از این شاخص‌ها در رفتارسنجی جریان یک کانال آبیاری استفاده شد. بدین منظور، با استفاده از نتایج شبیه‌سازی‌های یک کانال واقعی با مدل Sobek، شاخص‌های حساسیت در دو گزینه بهره‌برداری محاسبه و بر اساس آنها، به مطالعه روند تنظیم و توزیع جریان درسطح کانال پرداخته شد. نتایج نشان داد، شاخص‌های حساسیت از کارایی قابل توجهی در ارزیابی پتانسیل سازه‌ها و بازه‌های کانال به عملیات بهره‌برداری برخوردار می‌باشند. یافته‌های تحقیق بیانگر آن است که با محاسبه مقادیر کمّی این شاخص‌ها در سطح کانال‌های آبیاری، سیستم اطلاعاتی جامعی تهیه گردیده که ضمن فراهم آمدن امکان ارزیابی پتانسیل پاسخگویی سیستم نسبت به اختلالات سازه‌ای، امکان برآورد دقت عملیات بهره‌برداری سازه‌ها و هم‌چنین شیوه و فرکانس مناسب بهره‌برداری آنها متبلور می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: آبگیر، اختلال، بهره‌برداری، سازه آبیاری، شاخص حساسیت، کانال

مقدمه

مطالعه جریان در شبکه‌های آبیاری با استفاده از روابط جریان‌های دایمی و غیردایمی صورت می‌پذیرد. روابط جریان‌های دایمی غالباً در طراحی سیستم‌های آبیاری کاربرد داشته و به خوبی توسط متخصصان طراح و حتی متولیان بهره‌برداری فهمیده می‌شود. مشکل این روابط در محدودیت کاربری در فرایند بهره‌برداری است چرا که در حال حاضر امکان مطالعه روند انتشار و توسعه اختلالات (Perturbations) در شبکه‌های آبیاری با استفاده از آنها میسر نمی‌باشد. از طرفی دانش انتشار و یا تحلیل اختلالات در طول کانال آبیاری یک

۱. استادیار مهندسی آبیاری و زه‌کشی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۲. به ترتیب دانشیار و استادیار مهندسی آبیاری و آبادانی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-03-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.3.3.2]

مهم در امر پایش (Monitoring) و نیل به بهره‌برداری کارایی سیستم می‌باشد(۱۰). روابط جریان غیر دایمی توانمندی کافی در تحلیل جریان را دارا بوده اما از پیچیدگی خاصی برخوردار می‌باشند که فراگیری کاربری آنها را محدود می‌نماید (۴). شیوه آنالیز حساسیت (Sensitivity analysis approach) به‌عنوان یک شیوه نوین بینابینی، بین این دو روش مطالعه جریان مطرح بوده که از اواخر دهه نود میلادی نظر تعدادی از متخصصان آبیاری را به خود معطوف ساخته است. در این روش با استفاده از روابط جریان دایمی و وضعیت ساختار فیزیکی شبکه به ارزیابی واکنش سیستم نسبت به تغییرات و اختلالات ورودی و تحلیل جریان پرداخته می‌شود.

حساسیت به عنوان قابلیت پاسخگویی به اثرات و فشارهای بیرونی تعریف می‌شود (۹). در این روش، رفتار سیستم نسبت به تغییرات و اختلالات پارامترهای ورودی سنجیده می‌گردد. شاخص حساسیت هیدرولیکی یک سازه آبیاری به‌عنوان نسبت تغییرات نسبی و یا مطلق پارامترهای هیدرولیکی خروجی از سازه به تغییرات نسبی و یا مطلق پارامترهای هیدرولیکی ورودی به سازه تعریف می‌شود (۱۱). طبق تعریف خواهیم داشت:

[۱] = حساسیت هیدرولیکی سازه آبیاری

تغییرات پارامترهای هیدرولیکی ورودی/ تغییرات پارامترهای هیدرولیکی خروجی

دانش آنالیز حساسیت سعی در دست‌یابی به یک سیستم اطلاعاتی به منظور پاسخ دادن به سئوالات زیر دارد (۷).

۱) تمایل طبیعی سیستم نسبت به تأثیرپذیری از تغییرات و اختلالات چگونه است؟ ۲) تمایل طبیعی سیستم به تولید و انتشار نوسانات و اختلالات چگونه است ؟ ۳) عملکرد سیستم چگونه از حساسیت سازه‌ها تأثیر می‌پذیرد ؟ ۴) موقعیت و نقاط حساس سیستم از نقطه نظر کاهش عملکرد کدام‌اند ؟ ۵) فرایند بهره‌برداری کارآمد و ساده سیستم کدام است؟

مطالعات اولیه در رابطه با حساسیت آبگیرها (Offtakes) به سال ۱۹۵۱ بر می‌گردد که محبوب و گوالاتی تعریفی از حساسیت مجاری تخلیه کننده ارائه داده و از آن برای بررسی مجاری تخلیه جریان در چند کانال آبیاری از شبکه‌های آبیاری هند استفاده نمودند (۶). در تعریفی که ایشان ارائه کردند، نسبت تغییرات نسبی بده تخلیه کننده به تغییرات نسبی عمق جریان به عمق نرمال کانال تغذیه، به عنوان حساسیت تخلیه کننده‌ها معرفی شد. هورست در سال ۱۹۸۳ با مطالعه حساسیت سازه‌های آبیاری، این مفهوم را به سطح کانال ارتباط داده و شاخص انعطاف پذیری (Flexibility index) را به منظور مطالعه وضعیت انتشار تغییرات اعمالی در بده ورودی کانال تعریف کرد (۳). شاخص انعطاف پذیری هورست عبارت است از نسبت تغییرات نسبی بده آبگیری به تغییرات نسبی بده جاری در کانال تغذیه. او در این تئوری که آن را تئوری پاسخگویی سیستم نامید، وضعیت پاسخگویی مقاطع آبگیری را با این شاخص مورد مطالعه قرار داد. هورست تغییرات شاخص انعطاف پذیری را تابعی از نوع سازه‌ها در نظر گرفته که بسته به نوع سازه‌های تنظیم و توزیع و وضعیت جریان مقادیر مختلف صفر، واحد، بزرگ‌تر و کوچک‌تر از واحد خواهد داشت. آلبینسون در ۱۹۸۶ مطالعاتی بر روی حساسیت سازه‌های آبگیر و تنظیم کننده (Cross regulator) انجام داده و تحلیلی در زمینه ترکیب اثرات حساسیت سازه‌های مجاور تنظیم کننده ارائه نمود(۲). شانان در سال ۱۹۹۲، در رابطه ارائه شده محبوب و گوالاتی به‌جای عمق نرمال، عمق واقعی جریان در بالادست آبگیر را جایگزین نموده و آن را به‌عنوان شاخص حساسیت آبگیرها پیشنهاد نمود (۱۱). رینالت و هماکومارا در ۱۹۹۹ تعریف دیگری از حساسیت ارائه نمودند که در آن به جای تغییرات نسبی عمق جریان از تغییرات مطلق عمق جریان استفاده شد. آنها اصول آنالیز حساسیت دریچه‌ها را برای نوسانات و اختلالات عمق جریان و تنظیم سازه‌ها توسعه داده و در مطالعه کانال‌هایی از شبکه‌های ماهاویل و کیرینددویای سری لانکا و شبکه فوردوای (Fordova) پاکستان به کار بردند (۹). رینالت در سال ۲۰۰۰ چند رابطه تحلیلی برای بازه‌های کانال ارائه

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-03-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.3.3.2]

نموده و عملکرد توزیع سیستم را به حساسیت بازه‌ها ارتباط داد (۸).

این تحقیق با هدف توسعه شاخص‌های حساسیت هیدرولیکی اختلالات سازه‌ای و ارائه مدل تحلیل جریان کانال‌های آبیاری با استفاده از این شاخص‌ها انجام پذیرفت. بدین منظور با استفاده از نتایج شبیه سازی دو گزینه بده حداقل و حداکثر بهره‌برداری کانال وادودارا (Vadodara) و روابط توسعه یافته، مقادیر کمّی شاخص‌های حساسیت اختلالات سازه‌ای محاسبه و بر اساس آنها روند تنظیم و توزیع جریان کانال مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

تدوین شاخص‌های حساسیت

با فرض تأثیرپذیری رفتار هیدرولیکی جریان سازه‌های آبیاری (سازه‌های توزیع و تنظیم) از شرایط هیدرولیکی مراحل مختلف عبور جریان از سازه (مرحله یک) و ورود جریان به کانال پایین دست سازه (مرحله دو)، بر هر یک از این مراحل، یک رابطه دبی ـ عمق مترتب خواهد بود (۸). بدین‌ترتیب می توان شاخص حساسیت هیدرولیکی بده سازه آبگیر به عمق جریان (S_{hq}) را از رابطه زیر محاسبه نمود (۱).

$$S_{hq} = \frac{dq/q}{dH_{US}} = \frac{\alpha}{H'_E} \qquad [۲]$$

که در آن:

dq/q = تغییرات نسبی بده آبگیری

dH_{US} = تغییرات مطلق عمق جریان بالادست سازه

α = ضریب توانی رابطه بده حاکم بر مرحله یک

H'_E = افت بار (Head Loss) جریان خروجی از سازه

می‌باشد. مقدار افت بار جریان خروجی از سازه از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود (۱).

$$H'_E = (H_{US} - H_{DS}) + \alpha/\beta (H_{DS} - H_{REF}) \qquad [۳]$$

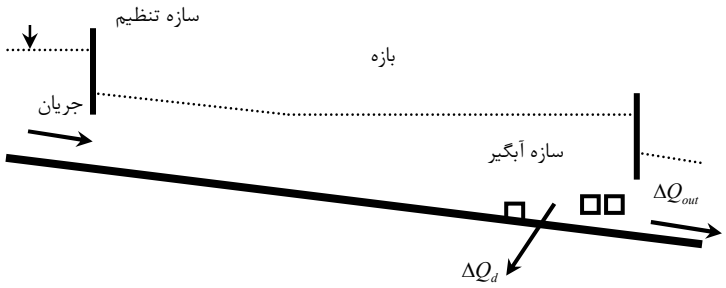
در رابطه ۳، H_{US} برابر عمق مطلق جریان بالادست سازه، H_{DS} برابر عمق جریان پایین دست سازه، H_{REF} برابر ارتفاع سطح مبنا بوده که کف کانال و یا رقوم تاج سرریز پایین دست سازه در نظر گرفته می شود و β برابر ضریب توانی رابطه بده حاکم بر مرحله دو می‌باشد. مقادیر α و β به ترتیب به دو پارامتر الگوی جریان عبوری از سازه، به تعبیری روگذر بودن یا زیرگذر بودن جریان عبوری از سازه، و وضعیت جریان پایین دست سازه، مستغرق و یا آزاد بودن جریان، بستگی دارند.

در این مقاله شاخص‌های حساسیت هیدرولیکی به صورت S_{ij} نمایش داده می‌شوند که اندیس i بیانگر متغیر یا پارامتری است که حساسیت نسبت به آن ارزیابی می‌شود و اندیس j بیانگر متغیر یا پارامتری است که حساسیت تغییرات آن در جریان سازه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به تعبیر دیگر i مربوط به متغیر اثرگذار در روند یک اختلال و j مربوط به متغیر یا پارامتر اثرپذیر در این روند است. در سازه‌های تنظیم کننده بر عکس آبگیرها متغیر اثرگذار در روند اختلالات، تغییرات نسبی بده عبوری و متغیر اثر پذیر مقدار مطلق تغییرات عمق جریان بالادست سازه می‌باشد. بدین‌ترتیب در تنظیم کننده‌ها شاخص حساسیت هیدرولیکی عمق جریان به تغییرات نسبی بده (S_{qh}) قابل تعریف بوده که رابطه محاسباتی آن عکس معادله ۳ می‌باشد.

به منظور مطالعه فرایند توزیع و تنظیم جریان در یک کانال باید به مطالعه جریان در بازه‌های آن پرداخت.بازه‌ها کوچک‌ترین واحد یک شبکه آبیاری بوده که شرایط هیدرولیکی آنها نقش اصلی را در عملکرد شبکه ایفا می‌نماید. به فاصله‌ای از کانال که بین دو سازه تنظیم کننده واقع می‌شود، بازه اطلاق می‌گردد. مطالعه جریان در بازه‌ها نیز با مطالعه اختلالات در بازه‌ها امکان پذیر می‌باشد. اختلالات ورودی در سطح بازه را می‌توان به دو نوع هیدرولیکی و سازه‌ای تقسیم‌بندی کرد. منظور از اختلال هیدرولیکی، اعمال یک تغییر جزئی در بده ورودی بازه بوده و اختلال سازه‌ای به مفهوم اعمال تغییرات جزئی در میزان تنظیم سازه‌های موجود در سطح یک بازه می‌باشد. شکل ۱ نمای شماتیک یک بازه در یک کانال را نمایش می‌دهد.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-03-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.3.3.2]



شکل ۱. نمای شماتیک یک بازه از کانال

به منظور مطالعه اختلالات سازه‌ای در سطح یک بازه، می‌توان از معادله بیلان بده استفاده نمود. این معادله در سطح یک بازه که در میزان تنظیم سازه و یا سازه‌هایی از آن تغییراتی اعمال گردیده است، به صورت ذیل قابل بیان می‌باشد. در واقع یک اختلال سازه‌ای در سطح یک بازه، باعث وجود تغییراتی در دبی سازه تنظیم کننده انتهای بازه، دبی سازه‌های آبگیری موجود در آن بازه و مقدار حجم منشور ذخیره (Storage wedge) موجود در بازه می‌شود که اجزای معادله بیلان دبی را تشکیل می‌دهند. نظر به این‌که تغییرات حجم منشوره ذخیره نسبت به دو جزه دیگر کمتر می‌باشد، در این مطالعه به منظور سهولت کار در استخراج روابط از مقدار آن در معادله بیلان بده صرف نظر شده است (۳).

$$\Delta Q_d + \Delta Q_{out} = ۰ \qquad [۵]$$

در این رابطه ΔQ_d معادل مقدار اختلال در بده تحویلی آبگیرهای بازه و ΔQ_{out} میزان اختلال در بده خروجی سازه تنظیم کننده انتهای بازه می‌باشد، این رابطه بیانگر آن است که تأثیرات اعمال یک اختلال سازه‌ای در یک بازه، در بده آبگیرهای بازه و بده خروجی سازه تنظیم انتهای بازه خودنمایی می‌نماید. معمولاً آبگیرهای یک بازه در محدوده اثر منحنی برگشت آب (Backwater curve) واقع شده و تغییرات بده آنها نیز تابعی از همین منحنی است. امکان وجود آبگیرهایی در خارج از این محدوده برای بعضی بازه‌ها نیز دور از انتظار نیست بنابراین با توجه به این‌که این آبگیرها در محدوده اثر جریان یک‌نواخت بازه قرار خواهند داشت و در اختلال هیدرولیکی تغییرات جزئی بده مدنظر می‌باشد، تغییرات بده آنها ناچیز و قابل صرف نظر کردن است. بدین ترتیب تعیین رابطه تغییرات عمق در طول بازه کانال و تغییرات عمق در بالادست سازه تنظیم بازه، در مطالعه اختلالات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. در این زمینه استرلکف با مطالعه فرم بدون بعد منحنی‌های برگشت جریان بر وجود یک رابطه خطی بین تغییرات عمق بالادست سازه تنظیم و عمق جریان در طول بازه کانال تأکید می‌کند (۱۲). رینالت نیز در مطالعات خود بر روی شبکه‌هایی از کشورهای سری‌لانکا و پاکستان به این نکته اشاره نموده و از این فرض در ارائه روابط تحلیلی مربوطه استفاده می‌کند (۸). در این تحقیق نیز مطالعات جامعی روی منحنی‌های برگشت آب در طول بازه‌های مختلفی از کانال‌ها با شرایط فیزیکی – هیدرولیکی متفاوت انجام گرفت که وجود رابطه خطی در این مورد تأیید گردید. باتوجه به این‌که هدف مقاله بررسی این ارتباط نمی‌باشد، صرفاً ضمن تأیید این رابطه خطی از آن در توسعه روابط استفاده گردیده است. در توسعه روابط از انتشار اختلالات از بازه‌های پایین دست با بازه‌های بالادست صرف نظر گردید. بر این اساس رابطه تغییرات عمق در بالادست مقاطع آبگیری و تغییرات عمق در بالادست مقطع کنترل می‌تواند به صورت زیر نشان داده شود.

$$\Delta H_{US(i)} = L_i \times \Delta H_{US(R)} \qquad [۶]$$

در این رابطه $\Delta H_{US(i)}$ تغییرات عمق جریان در مقطع آبگیری شماره i در طول منحنی برگشت آب، L_i ضریب زاویه یا

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-03-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.3.3.2]

شیب خط مورد نظر و $\Delta H_{US(R)}$ تغییرات عمق جریان در بالادست سازه تنظیم بازه می‌باشد. مادامی که بده بهره‌برداری بازه ثابت و یا تغییرات آن جزئی است، مقدار ضریب L_i ثابت و صرفاً تابعی است از موقعیت مقطعی که تغییرات عمق جریان در آن مد نظر می‌باشد (مقطع آبگیری شماره i). با تغییر بده بهره‌برداری بازه مقدار این ضریب نیز تغییر می‌کند. این تغییر به‌دلیل تغییر منحنی برگشت جریان با تغییر بده رخ می‌دهد. مقدار عددی L_i با فاصله گرفتن آبگیرها از سازه تنظیم کاهش یافته و برای آبگیرهایی که فاصله زیادی با سازه تنظیم داشته و یا خارج از محدوده اثر منحنی برگشت آب می‌باشند، معادل صفر است. مقدار آن برای آبگیرهای مجاور سازه تنظیم معادل یک می‌باشد. با اعمال مقادیر زیاد تغییرات بده بهره‌برداری بازه، رابطه فوق برقرار بوده بنابراین مقدار L_i تغییر می‌کند.

به منظور توسعه روابط این نوع اختلال، از روابط لگاریتمی معادلات عمومی بده (۸)، در سازه‌ای که میزان تنظیم دریچه آن تغییر می‌کند، مشتق گرفته که نتایج به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\frac{\Delta q_{(m)}}{q_{(m)}} = \frac{\Delta A(w_m)}{A(w_m)} + \alpha_m \times \frac{\left(\Delta H_{US(m)} - \Delta H_{DS(m)}\right)}{\left(H_{US(m)} - H_{DS(m)}\right)} \qquad [۷]$$

$$\frac{\Delta q_{(m)}}{q_{(m)}} = \beta_m \times \frac{\Delta H_{DS(m)}}{H_{DS(m)} - H_{REF(m)}} \qquad [۸]$$

سازه mام، سازه‌ای از بازه است که در تنظیم آن تغییر جزئی اعمال می‌شود. کلیه متغیرهای با اندیس m، همان متغیرهای تعریف شده روابط قبل بوده که مربوط به سازه mام که در آن یک اختلال سازه‌ای شده، می‌باشد. با استفاده از رابطه ۷ می‌توان $\Delta H_{DS(m)}$ را بر حسب سایر پارامترها به صورت زیر نشان داد:

$$\Delta H_{DS(m)} = \frac{\Delta q_{(m)}}{q_{(m)}} \times \frac{1}{\beta_m}\left(H_{DS(m)} - H_{REF(m)}\right) \qquad [۹]$$

با جایگذاری در رابطه ۶ و استفاده از رابطه تغییرات عمق جریان در بالادست سازه‌های آبگیر با تغییرات عمق جریان در بالادست سازه تنظیم (رابطه ۵) و خلاصه نمودن رابطه حاصل، خواهیم داشت:

$$\Delta q_{(m)} = \frac{q_{(m)}}{H'_{E(m)}}\left[\frac{\Delta A(w_m)}{A(w_m)}\left(H_{US(m)} - H_{DS(m)}\right) + \alpha_m \times L_m \times \Delta H_{US(R)}\right] \qquad [۱۰]$$

در رابطه ۵، ΔQ_d مرکب از دو جزء است. تغییرات بده در آبگیر mام که از رابطه فوق قابل جایگذاری است و مجموع تغییرات بده در سایر آبگیرها که با استفاده از رابطه ۵ به صورت جمله اول رابطه ۱۱ قابل خلاصه می‌باشد. در رابطه (۵) به جای ΔQ_{out} می‌توان از رابطه ۴ جایگذاری نمود. بدین ترتیب رابطه ۵ به صورت زیر در خواهد آمد:

$$\Delta H_{US(R)} \times \sum_{i=1}^{n} L_i \times S_{hq(o)i} \times q_{(o)i} + Q_{out} \times \Delta H_{US(R)} \times (S_{qh(R)})^{-1} + \frac{q_{(m)}}{H'_{E(m)}} \times \left[\frac{\Delta A(w_m)}{A(w_m)}\left(H_{US(m)} - H_{DS(m)}\right) + \alpha_m \times L_m \times \Delta H_{US(R)}\right] = ۰ \qquad [۱۱]$$

با جایگذاری $S_{hq(m)}$ $H'_{E(m)}$ به جای α_m در رابطه فوق و خلاصه نمودن آن، $\Delta H_{US(R)}$ از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$\Delta H_{US(R)} = -\frac{\frac{q_{(m)}}{H'_{E(m)}} \times \left[\frac{\Delta A(w_m)}{A(w_m)}\left(H_{US(m)} - H_{DS(m)}\right)\right]}{\sum_{i=1}^{n-1} L_i \times S_{hq(o)i} \times q_{(o)i} + Q_{out} \times (S_{qh(R)})^{-1}} \qquad [۱۲]$$

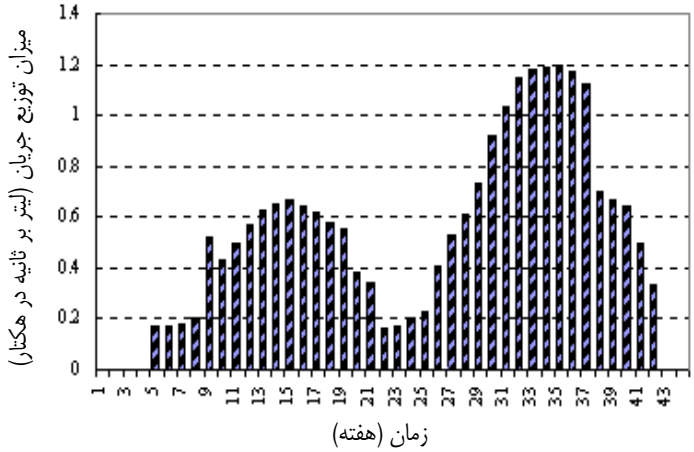
از رابطه فوق، محاسبه مقدار تغییرات عمق در بالادست سازه تنظیم کننده انتهای بازه در نتیجه عملیات بهره‌برداری سازه mام، امکان پذیر می‌باشد.

با استفاده از تعریف شاخص حساسیت تغییرات نسبی بده به مقدار تنظیم سازه ($S_{wq} = \frac{dq/q}{dw}$)، و ترکیب دو رابطه ۱۲ و افت بار سازه mام، رابطه محاسباتی مقدار کمّی شاخص S_{wq} به صورت زیر در خواهد آمد:

$$S_{wq(m)} = \left(\frac{\Delta A(w_m)}{A(w_m) \times \Delta w_m}\right)\left(\frac{H_{US(m)} - H_{DS(m)}}{H'_{E(m)}}\right)\left[۱ + \frac{L_m \times S_{hq(m)} \times q_m}{\sum_{i=۱}^{n} L_m \times S_{hq(m)} \times q_m + Q_{out} \times (S_{qh(R)})^{-۱}}\right] \qquad [۱۳]$$

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-03-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.3.3.2]



شکل ۲. تغییرات هفتگی شدت توزیع آب در واحدهای مختلف شبکه (فصل آبیاری)

در اختلالات سازه‌ای، شاخص حساسیت عمق به میزان تنظیم سازه نیز قابل تعریف بوده که می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$S_{wh} = \frac{dH_{US}}{dw} \qquad [۱۴]$$

با ترکیب رابطه فوق با تعاریف دو شاخص حساسیت عمق با بده و حساسیت بده به میزان تنظیم سازه، مقدار کمّی شاخص فوق از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$S_{wh} = S_{qh} \times S_{wq} \qquad [۱۵]$$

معرفی کانال مورد مطالعه

کانال وادودارا یکی از کانال‌های درجه دو شبکه آبیاری نارمادا (Narmada) واقع در شمال غربی کشور هند می‌باشد. شبکه آبیاری نارمادا یکی از بزرگ‌ترین شبکه‌های آبیاری جهان بوده که سطح ناخالص اراضی تحت پوشش آن پس از تکمیل کلیه واحدها به حدود دو میلیون هکتار می‌رسد.کانال وادودارا در فاصله ۸۱ کیلومتری از ابتدای کانال اصلی نارمادا منشعب می‌شود. این کانال با طول ۱۰۲ کیلومتر دارای ۳۵ سازه تنظیم کننده و ۳۲ سازه آبگیر بوده که کلیه آبگیرها از نوع روزنه دریچه‌دار مجهز به سرریز پایین دست و تنظیم کننده‌ها نیز غالباً از نوع دریچه‌های شعاعی زیرگذر می‌باشند. ظرفیت طراحی کانال در بخش ابتدایی معادل ۷۶ متر مکعب بر ثانیه است. شیب کف کانال در طول بین ۱/۶ متر در ده هزار تا ۵ متر در ده هزار متغیر است. عرض کف کانال برای بازه ابتدایی۶/۳ متر و برای بازه انتهایی ۲/۷ متر و برای سایر بازه‌ها بین این دو مقدار متغیر می‌باشد. مطالعات انجام شده بر روی وضعیت اقلیم، منابع آب و خاک و الگوی کشت منطقه بیانگر آن است که روش توزیع چرخشی آب، مناسب‌ترین روش توزیع آب در شبکه می‌باشد. بر این اساس بده ثابت ۱/۱۵۷ لیتر برثانیه به ازای هر هکتار بین کشاورزان به صورت چرخشی توزیع می‌شود. هر کشاورز در هر هفته برای یک زمان ثابت و مدت مشخص این آب را تحویل می‌گیرد. تغییرات بده توزیع در سطح کانال در فصول مختلف آبیاری به‌طور متوسط بین ۲۰ تا ۱۰۰ درصد ظرفیت طراحی کانال متغیر بوده که روند توزیع آن در طول هفته‌های مختلف از شروع فصل آبیاری در شکل ۲ ارائه شده است(۵).

به کارگیری مدل Sobek

شبیه سازی‌های انجام شده با مدل هیدرودینامیک Sobek انجام گرفت. مدل Sobek یک بسته نرم افزاری است که قابلیت کاربری در حوزه‌های مختلف مدیریت رودخانه‌ها، مناطق شهری و روستایی را برای مجاری روباز و تحت فشار دارا می‌باشد. این مدل در سال ۲۰۰۰ توسط WL/Delft Hydraulic در قالب یک مدل تجاری ارائه شد. در این مدل هفت مدول مختلف وجود داشته که با توجه به اهداف شبیه سازی از حالت ترکیبی این مدول‌ها نیز می‌توان استفاده نمود. مدول

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-03-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.3.3.2]

Water Flow به منظور شبیه سازی جریان‌های دایمی و غیر دایمی مجاری روباز به کار گرفته می‌شود. در این مطالعه، از این مدول از مدل Sobek استفاده شد. در مدل Sobek برای حل معادلات سنت ونانت از شمای محاسباتی جدیدی موسوم به شمای دلفت (Delft Hydraulic Scheme) که یک شیوه حل ضمنی (Implicit) در قالب یک شبکه متناوب است، استفاده می‌گردد. به کارگیری شمای دلفت در حل معادلات، قابلیت شبیه سازی شبکه‌های گسترده درختی، شاخه‌ای، حلقوی و پدیده‌های مختلفی مانند امواج حاصل از برگشت آب، جریان‌های بسیار کم در حد خشکی کانال و جریان‌های فوق بحرانی را با دقت بالایی برای این مدل فراهم ساخته است. امکان شبیه سازی انواع مختلف سازه‌های موجود در شبکه‌های انتقال و توزیع جریان توسط مدل وجود دارد. هم‌چنین امکان شبیه سازی بهره‌برداری‌های دستی، اتوماتیک و اعمال انواع مختلف کنترل گرهای هیدرولیکی، زمانی و PID(Proportional-integral-Derivative) در مدل پیش‌بینی شده است (۱۳).

شبیه‌سازی‌های انجام شده

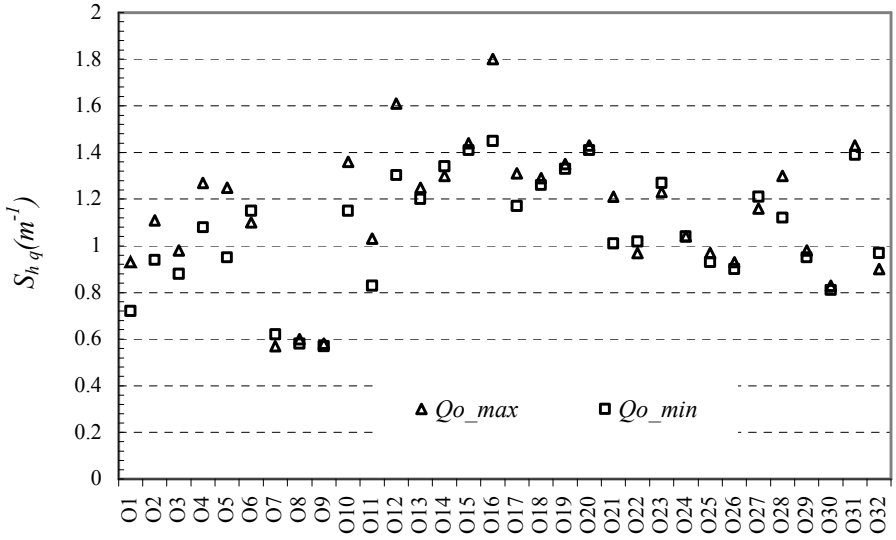
به منظور محاسبه حساسیت هیدرولیکی سازه‌های کانال وادودارا، ابتدا کانال به انضمام کلیه سازه‌های موجود آن در مدل Sobek شبیه سازی گردید. شبیه سازی جریان به ازای گزینه‌های بهره‌برداری بده حداکثر و حداقل کانال انجام گرفت. مقدار حداکثر و حداقل بده بهره‌برداری کانال به ترتیب معادل ۲۵ و ۹۰ درصد بده طراحی کانال در نظر گرفته شد. در شبیه‌سازی‌های انجام شده عمق جریان در بالادست کلیه سازه‌های تنظیم کننده هر بازه معادل عمق هدف که برابر عمق نرمال در بده طراحی بازه در نظر گرفته شد، ثابت گردید. تثبیت عمق در حد عمق هدف با تنظیم نمودن میزان بازشدگی سازه‌های تنظیم کننده انتهای بازه‌ها انجام گرفت. در هر یک از بده‌های بهره‌برداری فوق برای هر سازه ضرایب مورد نیاز محاسبه افت جریان عبوری تعیین شد. عملیات برای هر سازه به صورت موضعی و جداگانه و از سازه‌های پایین دست بازه انتهای کانال شروع و در جهت بازه ابتدای کانال ادامه یافت. با توجه به این‌که جریان در کلیه سازه‌های آبگیر و تنظیم کننده کانال از نوع زیرگذر می‌باشد، مقدار α برای کلیه سازه‌ها معادل ۰/۵ در نظر گرفته شد. به منظور محاسبه β از نتایج شبیه سازی جریان درهر یک از گزینه‌های بهره‌برداری مورد مطالعه استفاده گردید.

نتایج و بحث

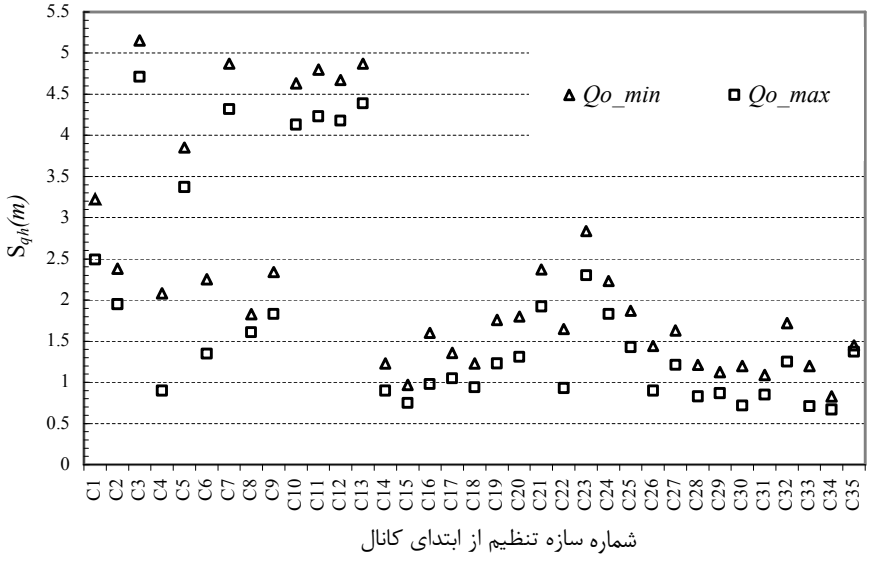
در این تحقیق ضمن تعریف شاخص‌های حساسیت هیدرولیکی بده به عمق بالادست سازه آبگیر، حساسیت هیدرولیکی عمق بالادست به بده سازه تنظیم کننده، حساسیت بده به مقدار تنظیم سازه‌های آبیاری و حساسیت عمق به میزان تنظیم سازه‌های آبیاری و استخراج روابط آنها، مقادیر کمّی شاخص‌های حساسیت برای یک کانال واقعی محاسبه و با استفاده از این مقادیر به تحلیل جریان کانال پرداخته شد. به منظور محاسبه مقادیر افت بار هر سازه از نتایج شبیه سازی‌ها و رابطه ۳ استفاده گردید. مقدار H_{REF} معادل صفر در نظر گرفته شد. مقادیر کمّی شاخص‌های حساسیت هیدرولیکی بده به عمق آبگیرها (S_{hq}) و عمق به بده تنظیم کننده‌ها (S_{qh}) به ترتیب از روابط ۲ و ۴ محاسبه گردید. در شکل ۳ مقادیر کمّی شاخص S_{hq} آبگیرهای مختلف کانال به ازای بده‌های بهره‌برداری حداقل و حداکثر مورد مقایسه قرار گرفتند. در این شکل محور افقی، شماره آبگیر و محور قائم مقدار شاخص حساسیت را نشان می‌دهد. بررسی مقادیر شاخص حساسیت آبگیرها بیانگر تغییر مقدار کمّی حساسیت با تغییر بده بهره‌برداری کانال می‌باشد. در این رابطه آبگیرهایی که فاصله بیشتری با سازه‌های تنظیم کننده دارند، تغییرات بیشتری نشان می‌دهند. حساسیت آبگیرهایی که در مجاورت سازه‌های تنظیم کننده قرار گرفته‌اند نسبت به تغییرات بده بهره‌برداری، تغییر چندانی نشان نداده و می‌توان حساسیت آنها را در تغییرات بده بهره‌برداری کانال ثابت فرض نمود. مقدار حساسیت هیدرولیکی آبگیر شماره ۱۶ که طبق محاسبات حساس‌ترین آبگیر کانال وادودارا است، در دو

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-03-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.3.3.2]



شکل ۳. مقادیر کمّی حساسیت هیدرولیکی بده به عمق سازه‌های آبگیرکانال وادودارا



شکل ۴. مقادیر کمّی شاخص‌های حساسیت عمق به بده سازه‌های تنظیم کانال وادودارا

بـده بهـره‌بـرداری مـورد مطالعـه بـه ترتیـب معـادل ۱/۸ و ۱/۴۵می‌باشد. مقدار حساسیت ۱/۸ به مفهوم ۱/۸ درصـد تغییـر در بده آبگیری به ازای هـر سـانتی‌متـر تغییـر در عمـق جریـان بالادست آبگیر می‌باشد. آبگیر شماره ۹ نیز با مقـادیر حـساسیت هیـدرولیکی مـاکزیمم و مینـیمم ۰/۵۸ و ۰/۵۷ دارای کمتـرین مقدار حساسیت به تغییرات می‌باشد. این نتایج نـشان مـی‌دهـد مـدیریت بهـره‌بـرداری کانـال بایـستی دقـت بیـشتری در امـور بهره‌برداری آبگیر شماره ۱۶ نسبت به آبگیر شـماره ۹ معطـوف نماید. به منظور اعمال یک سطح کنترل در توزیع جریان در این دو سازه، دقت عملیات بهره‌برداری مورد نیاز آبگیر شـماره ۱۶، ۳/۱ برابر آبگیر شماره ۹ خواهد بود. بـه تعبیـر دیگـر تغییـرات مجاز عمق جریان در آبگیر شماره ۱۶، ۳/۱ برابر کمتر از آبگیـر شماره ۹ می‌باشد.

در شکل ۴ مقادیر شاخص S_{qh} سازه‌های تنظـیم کانـال بـه

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-03-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.3.3.2]

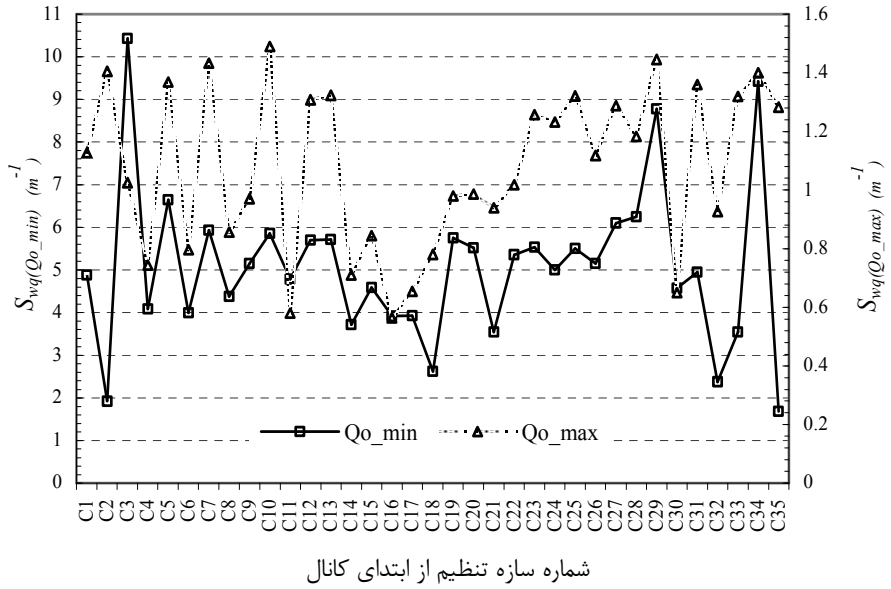
ازای بده‌های بهره‌برداری مورد مطالعه مشخص شده‌اند. تنظیم کننده شماره سوم با مقدار شاخص حساسیت ۵/۱۵ دارای ماکزیمم مقدارحساسیت عمق به بده کانال می‌باشد. مقدار شاخص فوق بیانگر آن است که در این تنظیم کننده به ازای یک درصد تغییر در بده خروجی، ۵/۱۵ سانتی‌متر عمق جریان در بالادست آن تغییر می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد حساسیت هیدرولیکی سازه‌های تنظیم در بده بهره‌برداری حداقل، ماکزیمم مقدار خود را دارند. بالا بودن مقدار شاخص حساسیت عمق به دبی سازه‌های تنظیم کننده ۱۰ الی ۱۳ به‌دلیل زیاد بودن مقدار افت جریان خروجی از این سازه‌هاست. لازم به ذکر است که شاخص حساسیت عمق به دبی با افت جریان خروجی از سازه‌های تنظیم کننده رابطه مستقیم دارد. زیاد بودن مقدار افت جریان خروجی سازه‌های مزبور نیز به علت آن است که در محدوده این ۳ بازه، شیب کانال بیشترین مقدار خود را دارد.

به منظور محاسبه شاخص‌های حساسیت تغییرات نسبی بده به میزان تنظیم (S_{wq}) سازه‌های آبگیر و تنظیم کننده کانال از رابطه ۱۳ استفاده گردید. در شکل‌های ۵ و ۶ مقادیر کمّی این شاخص‌ها برای سازه‌های تنظیم و آبگیر به ازای بده‌های بهره‌برداری مورد مطالعه ارائه گردیده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد تنظیم کننده‌های شماره‌های ۲۹ و ۳۵ به ترتیب حداکثر و حداقل مقدار این شاخص را بین سازه‌های تنظیم کننده کانال دارا می‌باشند. مقادیر این شاخص برای شرایط حداقل بهره‌برداری برای دو شاخص فوق به ترتیب عبارت‌اند از۸/۷۸ و ۱/۶۸۵ بودند. به بیان دیگر به ازای یک سانتی‌متر تغییر در میزان بازشدگی سازه تنظیم شماره ۲۹، ۸/۷۸ درصد در بده خروجی سازه تغییر ایجاد خواهد شد. این مقدار برای سازه تنظیم شماره ۳۵، ۱/۶۸۵ می‌باشد. حداقل و حداکثر مقادیر این شاخص S_{wq} به ترتیب در شرایط بده بهره‌برداری حداکثر و بده بهره‌برداری حداقل به‌وقوع می‌پیوندد. در رابطه با آبگیرهای کانال، آبگیرهای شماره ۱۶ و ۱ به‌ترتیب حداکثر و حداقل مقدار این شاخص را دارا می‌باشند.

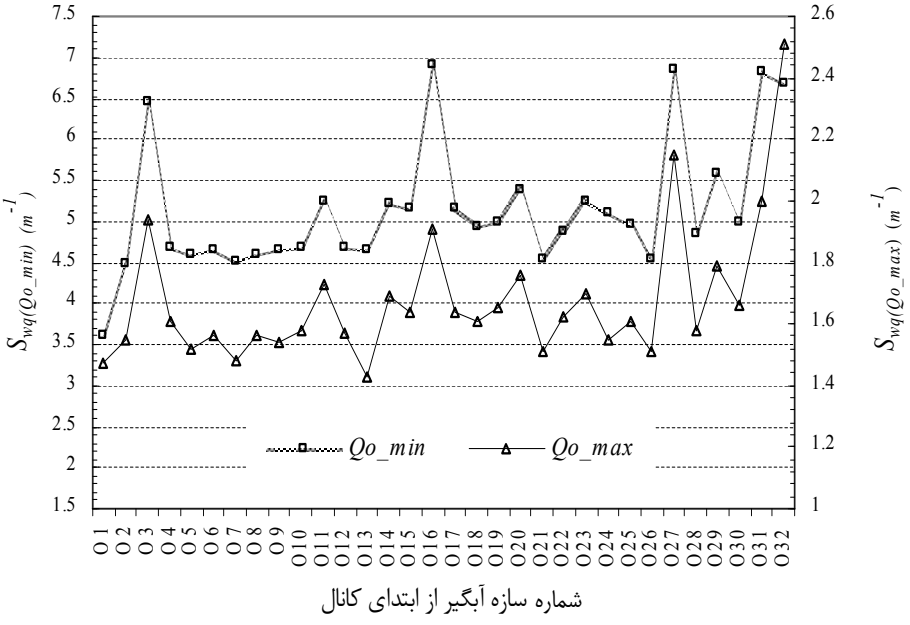
به منظور ارزیابی دقت رابطه ارائه شده، آنالیز حساسیت برای محاسبه شاخص حساسیت بده به میزان تنظیم سازه در اختلالات سازه‌ای (رابطه ۱۳)، مقادیر محاسبه شده این شاخص برای سازه‌های تنظیم کانال با استفاده از رابطه مذکور با مقادیر محاسبه شده (مستقیم) این شاخص با استفاده از نتایج مدلSobek مورد مقایسه قرار گرفتند. شکل ۷ این مقایسه را برای گزینه بهره‌برداری بده حداقل نشان می‌دهد. مقایسه نتایج، بیانگر دقت مناسب رابطه پیشنهادی شاخص حساسیت بده به میزان تنظیم سازه می‌باشد. محاسبات نشان می‌دهد خطای استاندارد (Standard error) مقادیر کمّی شاخص S_{wq}، برای دو روش کمتر از ۱۰ و معادل ۹/۸۷ می‌باشد. این شاخص آماری در حالت دبی بهره‌برداری، حداکثر معادل ۸/۳۱ می باشد. در جدول ۱ خلاصه‌ای از اطلاعات آماری مربوط به شاخص‌های حساسیت هیدرولیکی سازه‌های کانال در بده‌های بهره‌برداری مورد مطالعه، ارائه گردیده است. در این جدول میانگین، ماکزیمم، مینیمم و ضریب تغییرات هر یک از شاخص‌های حساسیت هیدرولیکی بده به عمق سازه‌های آبگیر، عمق با بده سازه‌های تنظیم و بده به میزان تنظیم سازه‌های آبگیر و تنظیم کانال در هر یک از بده‌های بهره‌برداری مورد مطالعه آمده است. داده‌های این جدول نشان می‌دهد مقدار کمّی شاخص حساسیت عمق به دبی سازه‌های تنظیم کننده کانال نسبت به شاخص حساسیت دبی به عمق سازه‌های آبگیر بیشتر می‌باشد. لازم به ذکر است که تفاوت در مقدار هر یک از شاخص‌ها به‌دلیل تعریف متفاوت شاخص‌ها و نشان دادن حساسیت‌های پارامترهای مختلف نسبت به‌یکدیگر در هر یک از آنها می‌باشد. بررسی مقادیر شاخص‌های حساسیت بده به میزان بازشدگی سازه‌های تنظیم و آبگیر بیانگر آن است که مقدار این شاخص در سازه‌های آبگیر کانال به طور متوسط ۱/۶ برابر آن در سازه‌های تنظیم می‌باشد و از این‌رو تنظیم بازشدگی سازه‌های آبگیر کانال مورد مطالعه دقت بیشتری را نسبت به سازه‌های تنظیم کننده طلب می‌نماید.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-03-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.3.3.2]



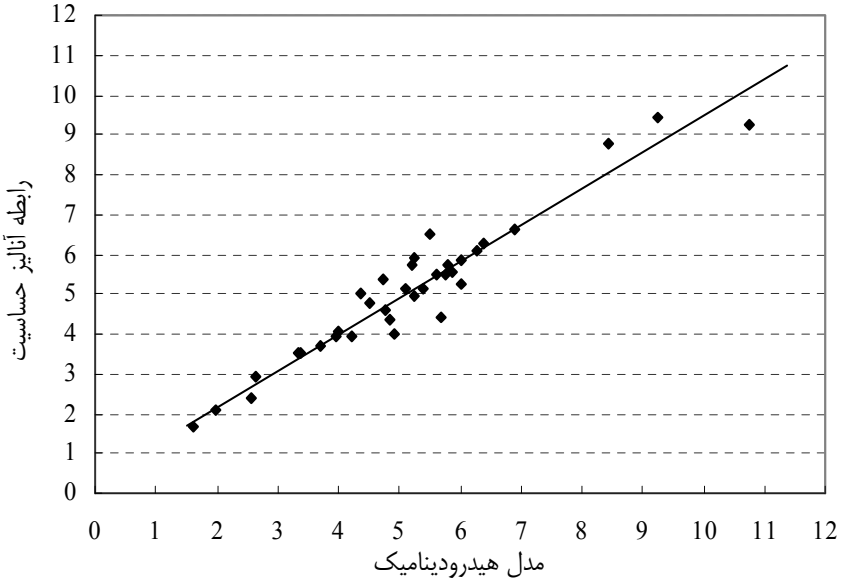
شکل ۵. مقادیر شاخص‌های حساسیت تغییرات نسبی بده به میزان بازشدگی سازه‌های تنظیم وادودارا در بده‌های بهره‌برداری مورد مطالعه



شکل ۶. مقادیر شاخص‌های حساسیت تغییرات نسبی بده به میزان بازشدگی سازه‌های آبگیر کانال وادودارا در بده‌های بهره‌برداری مورد مطالعه

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-03-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.3.3.2]



شکل ۷. مقایسه مقادیر شاخص S_{wq} سازه‌های تنظیم با استفاده از دو روش آنالیز حساسیت و مدل

جدول ۱. خلاصه اطلاعات آماری شاخص‌های حساسیت هیدرولیکی سازه‌های کانال در حداکثر و حداقل دبی بهره برداری

شاخص حساسیت		پارامتر	حداکثر بده بهره‌برداری کانال	حداقل بده بهره‌برداری کانال
حساسیت هیدرولیکی بده به عمق سازه آبگیر (S_{hq})		میانگین	۱/۱۴	۱/۰۶
		ماکزیمم	۱/۸	۱/۴۵
		مینیمم	۰/۵۸	۰/۵۷
		ضریب تغییرات	۰/۳۱	۰/۲۴
حساسیت هیدرولیکی عمق به بده کننده (S_{qh})		میانگین	**۱/۸۴**	۲/۳۱
		ماکزیمم	**۴/۷۱**	۵/۱۵
		مینیمم	**۰/۶۷**	۰/۸۳
		ضریب تغییرات	**۰/۴۲**	۰/۳۳
حساسیت هیدرولیکی بده به میزان بازشدگی سازه (S_{wq})	سازه آبگیر	میانگین	۱/۶۶	۵/۱۳
		ماکزیمم	۲/۵۱	۶/۹
		مینیمم	۱/۴۳	۳/۶۲
		ضریب تغییرات	۰/۲۲	۰/۷۹
	سازه تنظیم کننده	میانگین	۱/۰۸	۵/۱۴
		ماکزیمم	۱/۴۹	۱۰/۴۲
		مینیمم	۰/۵۶	۱/۶۸
		ضریب تغییرات	۰/۲۸	۰/۶۸

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-03-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.3.3.2]

دقت بهره‌برداری یک سازه تنظیم کننده را می‌توان تابعی از دو پارامتر تغییرات مجاز بده و حساسیت هیدرولیکی عمق به میزان بازشدگی سازه تنظیم کننده دانست که تغییرات مجاز بده سازه خود بستگی به عملکرد مورد انتظار سیستم توزیع دارد، شکل (۸). از این‌رو با محاسبه مقدار کمّی حساسیت هیدرولیکی سازه‌های آبگیر (S_{hq}) و استفاده از رابطه حساسیت تغییرات عمق به میزان بازشدگی سازه‌های تنظیم کننده ($S_{wh}=\frac{dH_{US}}{dw}$)، امکان تعیین دقت مورد نیاز در انجام عملیات بهره‌برداری سازه‌های تنظیم کننده هر بازه میسر می‌گردد. بدین منظور مقدار حساسیت حساس‌ترین آبگیر در بده بهره‌برداری حداقل به عنوان مقدار حساسیت ماکزیمم بازه انتخاب می‌شود. با فرض مقداری به‌عنوان محدوده تغییرات مجاز و مطلوب بده آبگیرها که یک متغیر مدیریتی است، می‌توان مقدار تغییرات مجاز عمق جریان در بالادست آبگیر (ΔH_{US}) را به منظور عدول نکردن میزان بده آبگیرهای بازه مورد نظر از حد مجاز تعیین شده، از رابطه ۱۶ محاسبه نمود . در این رابطه، تغییرات مجاز بده آبگیرها معادل ۵± درصد بده آبگیر در نظر گرفته شده است.

$$\Delta H_{US}=\frac{\cdot/\cdot ۵}{S_{hq(max)}} \qquad [۱۶]$$

بدین ترتیب میزان دقت بهره‌برداری سازه تنظیم (Δw) با استفاده از رابطه ۱۴ قابل محاسبه خواهد بود. مقدار دقت مورد نیاز در بهره‌برداری هر یک از سازه‌های تنظیم بدین روش و به ازای تغییرات مجاز بده معادل ۵± ، ۱۰± و ۱۵± درصد بده‌های آبگیری محاسبه گردید. نتایج برای تغییرات مجاز ۱۵± درصد، در جدول ۲ ارائه شده است. به منظورتوزیع جریان در سازه‌های آبگیردر محدوده این تغییرات مجاز بده(۱۵± درصد)، سازه‌هایی که دقت بهره‌برداری آنها کمتر از ۱ ± سانتی‌متر است عملاً با دشواری بهره‌برداری و تنظیم مواجه می‌باشند. در این کانال شاخص دقت بهره‌برداری (Δw) برای تعدادی از سازه‌ها نیز بیشتر از دو سانتی‌متر بوده ولی مقدار عددی آنها کمتر از ۵ سانتی‌متر است که این نیز بیانگر لزوم دقت بالا در بهره‌برداری و تنظیم این سازه‌هاست. در چهار بازه انتهایی کانال نیز، این شاخص حدود ۷ سانتی‌متر می‌باشد. لازم به ذکر است، در صورتی که دقت توزیع جریان آبگیرها مقدار بیشتری در نظر گرفته شود (تغییرات مجاز معادل ۵± و یا ۱۰± بده آبگیرها)، مقدار دقت بیشتری در عملیات بهره‌برداری سازه‌های تنظیم نیز مورد نیاز می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که دقت بهره‌برداری سازه‌های تنظیم کانال وادودارا با مشکلاتی همراه بوده که خود می‌تواند به‌عنوان عاملی برای کاهش عملکرد توزیع در این کانال مطرح باشد. یکی از راه حل‌های این مشکل، مجهز نمودن تنظیم کننده‌های کانال به سیستم کنترل خودکار بوده که در آن عملاً مشکل تنظیمات در بهره‌برداری تسهیل خواهد گردید. در حال حاضر متولیان بهره‌برداری شبکه نارمادا در صدد طراحی و اجرای سیستم کنترل خودکار برای کانال اصلی و برخی از کانال‌های درجه دو شبکه می‌باشند. کانال وادودارا یکی از این کانال‌هاست. راه حل دوم آن است که حتی الامکان تغییرات در بهره‌برداری این سازه‌ها به توالی زمانی طولانی انجام گرفته تا اولاً در این محدوده زمانی امکان برقراری جریان دایمی فراهم گردد و ثانیاً آثار حاصل از تنظیمات سازه‌ای که همراه با ایجاد اختلال در سیستم توزیع می‌باشد، به حداقل برسد. نظر به این‌که شیوه و فرکانس مناسب بهره‌برداری سازه‌های تنظیم کننده را می‌توان تابعی از دو پارامتر دامنه و احتمال وقوع اختلالات و پتانسیل مدیریت اختلالات در سیستم (شکل ۹) دانست، دست‌یابی به این مهم با مشخص شدن این دو پارامتر که با استفاده از شاخص‌های حساسیت میسر است، امکان پذیر خواهد بود.

نتیجه‌گیری

به طور کلی یافته‌های این تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- موقعیت آبگیرها نسبت به سازه‌های تنظیم انتهای بازه‌ها و میزان بده بهره‌برداری کانال‌ها، دو عامل مؤثر بر مقدار کمّی شاخص‌های مختلف حساسیت هیدرولیکی سازه‌ها می‌باشند.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-03-19]

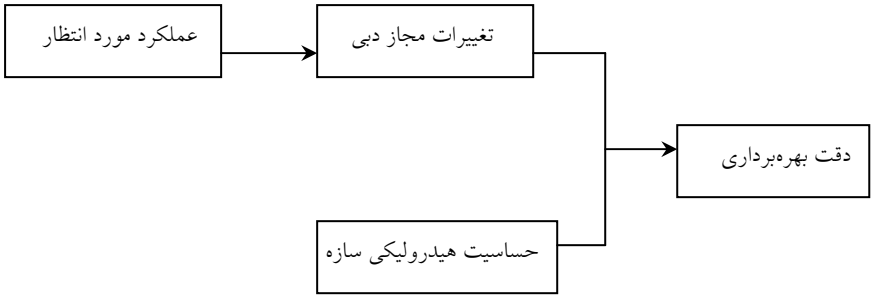
[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.3.3.2]

جدول ۲. دقت بهره‌برداری سازه‌های تنظیم کننده کانال وادودارا به ازای تغییرات مجاز بده آبگیرها

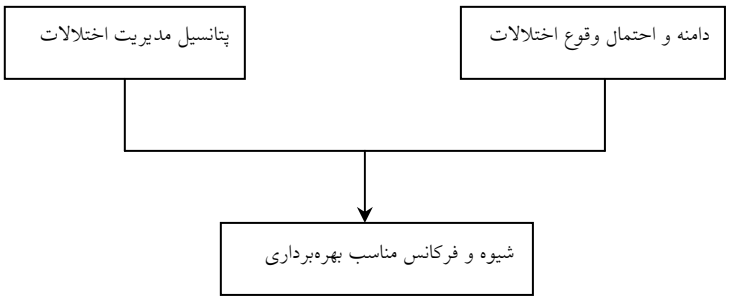
شماره بازه	ماکزیمم حساسیت هیدرولیکی آبگیری در بازه ($S_{hq(max)}$)	مقدار تغییر عمق جریان به ازای درصد تغییرات مجاز بده (متر)	حساسیت هیدرولیکی تنظیم کننده بازه S_{wh}	دقت بهره‌برداری (Δw) بر حسب سانتی‌متر	امکان پذیری تنظیم سازه
۱	۰/۹۷	۰/۱۵	۸/۶۹۷	۱/۸	بهره‌برداری بسیار مشکل است
۲	بدون آبگیر	بدون آبگیر	۲/۳۹۹	----	عدم وجود مشکل در بهره‌برداری
۳	۱/۱	۰/۱۳	۵/۸۴۲	۲/۳۲	بهره‌برداری بسیار مشکل است
۴	بدون آبگیر	بدون آبگیر	۴/۶۶۴	----	عدم وجود مشکل در بهره‌برداری
۵	۱/۱۸	۰/۱۲	۱۳/۶۷	۰/۹۳	بهره‌برداری بسیار مشکل است
۶	بدون آبگیر	بدون آبگیر	۵/۰۴۵	----	عدم وجود مشکل در بهره‌برداری
۷	۱/۳	۰/۱۲	۱۵/۶۱۵	۰/۷۴	بهره‌برداری بسیار مشکل است
۸	بدون آبگیر	بدون آبگیر	۴/۴۵۲	----	عدم وجود مشکل در بهره‌برداری
۹	۰/۶۱	۰/۲۴	۶/۵۲۷	۳/۷۶	لزوم دقت بالا در بهره‌برداری
۱۰	۱/۴۷	۰/۱	۱۳/۳۶۵	۰/۷۶	بهره‌برداری بسیار مشکل است
۱۱	بدون آبگیر	بدون آبگیر	۱۲/۷۶۶	----	عدم وجود مشکل در بهره‌برداری
۱۲	بدون آبگیر	بدون آبگیر	۱۴/۷۷۸	----	عدم وجود مشکل در بهره‌برداری
۱۳	بدون آبگیر	بدون آبگیر	۱۵/۴۶۰	----	عدم وجود مشکل در بهره‌برداری
۱۴	۱/۷۵	۰/۰۸	۲/۵۳	۳/۳۸	لزوم دقت بالا در بهره‌برداری
۱۵	بدون آبگیر	بدون آبگیر	۲/۴۷۴	----	عدم وجود مشکل در بهره‌برداری
۱۶	بدون آبگیر	بدون آبگیر	۳/۴۸۵	----	عدم وجود مشکل در بهره‌برداری
۱۷	بدون آبگیر	بدون آبگیر	۲/۹۶۱	----	عدم وجود مشکل در بهره‌برداری
۱۸	بدون آبگیر	بدون آبگیر	۲/۹۱۵	----	عدم وجود مشکل در بهره‌برداری
۱۹	۱/۲۵	۰/۱۲	۴/۷۱۶	۲/۵۴	بهره‌برداری بسیار مشکل است
۲۰	بدون آبگیر	بدون آبگیر	۵/۵۲۱	----	عدم وجود مشکل در بهره‌برداری
۲۱	۱/۴۴	۰/۱	۲/۹۳۸	۳/۵۴	لزوم دقت بالا در بهره‌برداری
۲۲	۱/۸	۰/۰۸	۴/۴۶۴	۱/۸۷	بهره‌برداری بسیار مشکل است
۲۳	۰/۹۹	۰/۱۵	۷/۷۳۳	۱/۹۶	بهره‌برداری بسیار مشکل است
۲۴	۱/۱	۰/۱۴	۵/۵۱۳	۲/۴۷	بهره‌برداری بسیار مشکل است
۲۵	بدون آبگیر	بدون آبگیر	۵/۷۱۸	----	عدم وجود مشکل در بهره‌برداری
۲۶	بدون آبگیر	بدون آبگیر	۴/۱۲۶	----	عدم وجود مشکل در بهره‌برداری
۲۷	۱/۰	۰/۱۵	۵/۲۷۴	۲/۸۴	بهره‌برداری بسیار مشکل است
۲۸	۰/۹۹	۰/۱۵	۳/۶۵۴	۴/۱۴	لزوم دقت بالا در بهره‌برداری
۲۹	بدون آبگیر	بدون آبگیر	۵/۴۷۸	----	عدم وجود مشکل در بهره‌برداری
۳۰	۰/۷۵	۰/۲	۲/۸۷۱	۶/۹۷	عدم وجود مشکل در بهره‌برداری
۳۱	بدون آبگیر	بدون آبگیر	۲/۹۹۴	----	عدم وجود مشکل در بهره‌برداری
۳۲	۱/۳۱	۰/۱۱	۱/۴۴۱	۷/۹۵	عدم وجود مشکل در بهره‌برداری
۳۳	۱/۱۷	۰/۱۳	۱/۷۰۷	۷/۵۱	عدم وجود مشکل در بهره‌برداری
۳۴	بدون آبگیر	بدون آبگیر	۴/۳۴۶	----	عدم وجود مشکل در بهره‌برداری
۳۵	۱/۴۵	۰/۱	۱/۴۳	۷/۲۳	عدم وجود مشکل در بهره‌برداری

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-03-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.3.3.2]



شکل ۸ . رابطه دقت بهره‌برداری با حساسیت و عملکرد مورد انتظار سازه



شکل ۹. رابطه شیوه و فرکانس مناسب بهره‌برداری با دامنه و احتمال وقوع و پتانسیل مدیریت اختلالات در سیستم

به عنوان مثال حداقل و حداکثر مقادیر کمّی شاخص حساسیت بده به میزان تنظیم سازه‌ها، به ترتیب در شرایط بده حداکثر و حداقل بهره‌برداری به وقوع می‌پیوندد. به تعبیر دیگر در شرایط بهره‌برداری کانال با دبی خیلی کمتر از میزان ظرفیت طراحی، به دلیل حساسیت زیاد سازه‌ها به اختلالات می‌بایست در عملیات بهره‌برداری سازه‌ها دقت بیشتری صورت گیرد.

- سازه‌های تنظیم کننده در بده حداقل بهره‌برداری کانال، ماکزیمم مقدار حساسیت هیدرولیکی عمق به بده را دارند. این نتیجه نیز دلیلی بر نیاز به اعمال دقت بیشتر در عملیات بهره‌برداری سازه‌های تنظیم شبکه‌های آبیاری در فصول کم آبی که بده کانال‌ها تفاوت زیادی با مقدار ظرفیت طراحی دارد، می‌باشد.
- با محاسبه مقادیر کمّی شاخص‌های توسعه داده شده، سیستم اطلاعاتی جامعی تهیه گردیده که ضمن فراهم آمدن امکان ارزیابی پتانسیل، پاسخگویی بازه‌های مختلف کانال نسبت به اختلالات سازه‌ای، امکان برآورد دقت عملیات بهره‌برداری سازه‌ها و هم‌چنین شیوه و فرکانس مناسب بهره‌برداری متبلور می‌گردد. از این‌رو استفاده از شاخص‌های حساسیت و الگوریتم پیشنهادی به کار گرفته شده در تحلیل جریان در این مقاله، قابل توصیه و کاربرد در عرصه رفتارسنجی شرایط بهره‌برداری کانال‌ها در سطح شبکه‌های آبیاری می‌باشد.

سپاسگزاری

شبیه سازی‌های انجام شده با استفاده از مدل Sobek، در طول یک فرصت تحقیقاتی که نویسنده اول در دانشگاه تیودلفت (TUDelft University) هلند داشته، انجام گرفته است. بدین وسیله ازگروه علمی مدیریت آب و زمین دانشگاه تیودلفت که تمهیدات لازم در زمینه استفاده از مدل و سایر منابع علمی مورد نیاز انجام تحقیق را در اختیار قرار دادند و هم‌چنین از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری که فرصت مطالعاتی مذکور را در اختیار گذاشته و بخشی از هزینه‌های آن را تأمین نموده است، تشکر و قدردانی می‌گردد.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-03-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.3.3.2]

منابع مورد استفاده

۱. منتظر، ع. ا.، ص. کوچک‌زاده، ع.م. لیاقت و م. ح. امید. ۱۳۸۳. تدوین معادلات حساسیت هیدرولیکی مدول‌های تیغه‌ای و بررسی اثر تغییرات کمّی شاخص حساسیت در شرایط بهره‌برداری. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۸ (۳): ۱۲۱-۱۳۷.

2. Albinson, B.1986. Network Planning Criteria: Hydraulic Aspects, Guidline 5, Annex 1, *In*: Design and Operation Guidelines for Structured Irrigation networks. Fourth Draft, South East Asia Division, World Bank, WA, DC, USA.
3. Brouwer, R. 2001. Operational Water Management. TUDelft University, The Netherlands.
4. Horst, L. 1983. Irrigation Systems. Internal Report, Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
5. ITIS5. 1998. Modernization of Irrigation System Operation. Proc. of 5th Int. Meeting of the ITIS Network, D. Renault (Ed.), IWMI, Colombo, Sri Lanka.
6. Loke, E. 1994. A control system for the narmada main conveyance canal. M.Sc. Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands.
7. Mahbub, S.I. and N. D.Gulati. 1951. Irrigation Outlets. Atma Ram, Delhi, India.
8. Renault, D. 2000. Re-Engineering irrigation management and system operation. Agric. Water Mgnag. 42: 211-226.
9. Renault, D.1999. Offtake Sensitivity, Operation effectiveness and performance of irrigation sstem. J. Irrig. & Drain. Eng., ASCE 125(3):137-149.
10. Renault, D. and H. M. Hemakumara. 1999. Irrigation offtakes sensitivity. J. Irrig. and Drain., ASCE 125(3):131-136.
11. Renault, D. and I. W. Makin. 1999. Modernization irrigation operations. IWMI, Research Rep. No.33, Colombo, Sri Lanka.
12. Shanan, L. 1992. Planning and management of Irrigation system in developing Countries. Agric. Water Manag. 22(1+2): IX.
13. Strelkoff, T. S., J. L. Deltour, C. M. Burt, A. J. Clemmens and J. P. Baume. 1998. Influence of Canal Geometry and dynamic of controlability. J. Irrig. & Drain. Eng., ASCE 124(1):16-22.
14. WL/Delft Hydraulic. 2000. Sobek Manual and Technical Reference . Delft Pub., The Netherlands.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-03-19]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1385.10.3.3.2]