تدوین معادلات حساسیت هیدرولیکی مدول‌های تیغه‌ای و بررسی اثر تغییرات کمّی شاخص حساسیت در شرایط بهره‌برداری

علی اصغرمنتظر، صلاح کوچک زاده، عبدالمجید لیاقت و محمدحسین امید[۱]

چکیده

بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری، نتیجه یک فرایند تصمیم‌گیری است که در آن سه عنصر وضعیت فیزیکی موجود سازه‌ها، ظرفیت کنترل و رفتار هیدرولیکی سیستم نقش کلیدی ایفا می‌نمایند. این سه عنصر به نوعی در مفهوم حساسیت هیدرولیکی سازه‌ها مستتر بوده و از این روست که حساسیت هیدرولیکی سازه‌ها مهم‌ترین عامل مربوط به خصوصیات هیدرولیکی سیستم عنوان می‌شود. شیوه آنالیز حساسیت سازه‌های آبیاری از جمله روش‌های تحلیل جریان بوده که در سال‌های اخیر به منظور رفتارسنجی جریان در شبکه‌های آبیاری، توسعه یافته و در رفتارسنجی جریان چند شبکه آبیاری جهان مورد استفاده قرار گرفته است. مدول‌های تیغه‌ای از جمله مناسب‌ترین ابزار توزیع جریان بوده که امروزه در سطوح مختلف بهسازی شبکه‌های آبیاری مطرح و توصیه می‌شوند. در این مقاله معادلات حساسیت هیدرولیکی مدول‌های تیغه‌ای ارائه گردیده و به ارزیابی تغییرات کمّی این شاخص در شرایط بهره‌برداری و تأثیر آن در عملکرد سازه پرداخته شده است.

نتایج محاسبه‌های انجام گرفته روی داده‌های موجود واسنجی جریان چند مدول از شبکه آبیاری دشت قزوین، بیانگر تغییرهای مقدار حساسیت هیدرولیکی این آبگیرها در شرایط بهره‌برداری است. در بعضی موارد این تغییرها به بیش از ۱۰۰ درصد می‌رسد. تغییر در مقدار کمّی حساسیت سازه، تغییر در بازه عملکرد سازه را پیامد شده و مشکلاتی را در فرآیند توزیع جریان در سطح شبکه به‌وجود می‌آورد. بازه تغییرات دبی بعضی از دریچه‌های مدول‌های مورد بررسی نسبت به مقدار مجاز که ۲۰ درصد می‌باشد، بیش از دو برابر افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: *آبگیر، آنالیزحساسیت، بهره‌برداری، سازه آبیاری، مدول تیغه‌ای*

مقدمه

بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری، نتیجه یک فرآیند تصمیم‌گیری است که در آن سه عنصر وضعیت فیزیکی موجود سازه‌ها، ظرفیت کنترل و رفتار هیدرولیکی سیستم بهره‌برداری نقش کلیدی ایفا می‌نمایند. شرایط مناسب تنظیم و توزیع جریان در بهره برداری، متأثر از سه فاکتور درجه، دقت و حساسیت کنترل سازه‌ها نسبت به تغییرات و اختلالات ورودی است. از بین این سه فاکتور حساسیت کنترل مهم‌ترین عامل مربوط به

۱. به‌ترتیب دانشجوی دکتری، دانشیار و استادیار و استادیار مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-11]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1383.8.3.10.0]

خصوصیات هیدرولیکی سازه‌ها عنوان می‌شود (۱۲).

رفتار سنجی جریان در شبکه‌های آبیاری با استفاده از روابط جریان‌های ماندگار و غیرماندگار صورت می‌پذیرد. بر این اساس مدل‌های هیدرودینامیک بسیاری توسعه یافته که امکان بررسی جریان و ارزیابی عملکرد هیدرولیکی شبکه‌های آبیاری را فراهم می‌نمایند. از جمله مهم‌ترین این مدل‌ها می‌توان به مدل‌های Canvar، Regvar، Sobek، Modis، Mike-۱۱، Canalman، Canalcad، Carima، Procan، Icss و Crue اشاره نمود(۸).

وجود مدل‌های شبیه ساز علی‌رغم توانایی‌های قابل توجه در پیش بینی وضعیت جریان، به‌دلیل پیچیدگی کاربری تا به حال نظر مهندسان و متولیان بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری را به خود جلب نکرده است. از این رو هنوز نیاز به توسعه متدولوژی‌های ساده به منظور تحلیل جریان در سطح شبکه‌های آبیاری احساس می‌شود(۵). روش آنالیز حساسیت (Sensitivity Analysis Approach) هیدرولیکی سازه‌های آبیاری در همین راستا طرح و توسعه یافته است. این روش یک شیوهٔ بینابینی است، ما بین شبیه‌سازی ساده و محدود براساس معادلات جریان دایمی و شبیه‌سازی پیچیده وکاراً براساس معادلات جریان غیردایمی. در این روش که اساساً یک آنالیز ساده (What–If) است، رفتار سیستم نسبت به تغییرهای پارامترهای ورودی سنجیده می‌شود. شاخص حساسیت هیدرولیکی یک سازه آبیاری به عنوان نسبت تغییرهای نسبی و یا مطلق پارامترهای هیدرولیکی خروجی به تغییرات نسبی و یا مطلق پارامترهای هیدرولیکی ورودی تعریف می‌شود(۱۱، ۱۲). طبق تعریف خواهیم داشت:

[۱] تغییرات پارامترهای هیدرولیکی ورودی.تغییرات پارامترهای هیدرولیکی خروجی = حساسیت هیدرولیکی سازه

در این شیوه، پتانسیل فیزیکی سیستم نسبت به کنترل نوسانات و اختلالات ورودی، ارزیابی می‌گردد. دانش آنالیز حساسیت سازه‌های آبیاری، سعی بر پاسخ‌گویی پنج سؤال اساسی دارد(۱۲). الف) تمایل طبیعی سیستم نسبت به تأثیرپذیری از نوسانات و اختلالات چگونه است؟ ب) تمایل طبیعی سیستم به تولید و انتشار نوسانات و اختلالات چگونه است؟ ج) عملکرد سیستم چگونه از حساسیت سازه‌ها تأثیر می‌پذیرد؟ د) موقعیت و نقاط حساس سیستم از نقطه نظر کاهش عملکرد کدام‌اند؟ ه) فرایند بهره‌برداری کارآمد و ساده سیستم کدام است؟

بررسی‌های اولیه در رابطه با حساسیت آبگیرها (Offtakes) بر می‌گردد به سال ۱۹۵۱ که توسط محبوب و گوالاتی انجام گرفت(۱۰). ایشان از این مفهوم در حساسیت سنجی مجاری تخلیه جریان در چند شبکه آبیاری کشور هند استفاده نمودند. هورست با تعریف شاخص انعطاف پذیری (Flexibility Index) به عنوان نسبت تغییرات نسبی دبی تحویلی توسط آبگیر به تغییرات نسبی دبی ورودی به کانال اصلی، روند انتشار نوسانات دبی را در طول کانال مطالعه کرد(۹). آلبینسون بررسی‌هایی روی حساسیت سازه‌های آبگیر و تنظیم کننده (Cross Regulators) انجام داده و بر اساس آن تحلیلی در زمینه ترکیب آثار حساسیت سازه‌های مجاورسازه تنظیم کننده ارائه نمود(۳). رینالت و هماکومارا اصول آنالیز حساسیت دریچه‌ها را تحت شرایط گسترده‌ای از نوسانات و اختلالات عمق جریان و تنظیم سازه‌ها توسعه داده و در بررسی شبکه‌های ماهاویل و کیریندویای سری لانکا و شبکه فوردوای (Fordova) پاکستان استفاده کردند (۱۱). ایشان هم‌چنین شاخص‌های مختلفی از حساسیت سازه‌ها را تعریف نموده که از آن جمله می‌توان حساسیت دبی تحویلی آبگیر به تغییرات عمق آب در بالادست آبگیر، حساسیت تغییرهای دبی به سطح مقطع نسبی جریان، حساسیت انتقال و حساسیت دبی به میزان تنظیم سازه را نام برد.

تا به‌حال شیوه آنالیزحساسیت برای آبگیرهای کشویی، فلوم‌های باز، روزنه‌ای و سرریزها استفاده شده است (۱۱). روش آنالیزحساسیت از اواخر دهه ۱۹۹۰، با تعریف شاخص حساسیت بازه کانال (فاصله بین دو سازه تنظیم کننده در طول

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-11]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1383.8.3.10.0]

کانـال) و استخراج چند رابطه تحلیلی در این مقوله وارد مرحله جدیدتـری گـردیده اسـت(۱۳). هم اکنون مبانی تئوریک آن در حـال توسـعه بـوده و مـدل بهره برداری کانال‌ها براساس اصول حساسیت سنجی سازه‌ها در حال تدوین می‌باشد.

یکـی از علائـم مدرن بودن شبکه‌های آبیاری، وجود شرایط کنترلـی مناسـب در تنظیم و توزیع میزان جریان تحویلی به بهره بـرداران اسـت. مـدول‌های تیغه‌ای (Baffle Modules) از جمله مناسـب‌تریـن ابـزارتوزیع جـریان بـوده کـه امـروزه در سطوح مخـتلف بهسـازی و مدرنیزاسـیون شـبکه‌هـا مطـرح و توصـیه مـی‌شـوند. ایـن توزیع کننده‌ها از پذیرش بالایی در بین متولیان امور شبکه‌ها و بهره برداران محلی برخوردار می‌باشند.

مـدول‌هـای تیغه‌ای شامل یک اسکلت فلزی استاندارد بوده کـه بـه تعـدادی خروجی موازی با پروفیل طولی یکسان تقسیم مـی‌شـوند. بـر روی هـر یک از مقاطع خروجی، یک یا دو تیغه فلـزی نصـب شـده کـه هر خروجی را به صورت یک روزنهٔ با سـطح مقطع خروجی قابل تنظیم تبدیل می کند. در این مقاله به هر یک از این خروجی‌ها یک دریچه اطلاق می‌گردد. شکل‌های ۱ و ۲ بـه‌ترتیـب شـمای یک مدول تیغه‌ای نوع و پروفیل طولی جـریان در یـک دریچـه فرضـی از همیـن نوع مدول را نمایش می‌دهند(۷).

بسـته بـه مقـدار عمـق جریان بالادست مدول، سه وضعیت هیدرولیکـی مـتفاوت بـرای جریان عبوری از این سازه به وقوع می‌پیوندد(٤و ٦).

- در عمق‌های کم، سرریز لبه پهن جریان راکنترل می‌کند.
- بـا افـزایش عمـق جـریان، تیغه مدول وارد عمل شده و رژیم جـریان را از حالـت سـرریز آزاد (Weir) بـه جـریان از روزنـه (Orifice) تغییر می‌دهد. در این بررسی محدوده تغییر جریان از حالت سرریز آزاد به روزنه، منطقه انتقالی جریان نامیده گردید.
- بـا افزایش عمق آب، افت انرژی در روزنه افزایش می‌یابد. در این محدوده شدت افزایش دبی با افزایش ارتفاع کاهش پیدا می‌کند.

مدول‌ها، در پنج سری با دبی‌های ویژه۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ lit.s.dm طراحـی شـده‌انـد. این پنج سری بسته به تعداد تیغه‌ها (یـک و یـا دو تـیغه) با نام‌های X_i، XX_i، L_i ، C_i و CC_i شناخته می‌شوند که i تعداد تیغه‌های مدول می‌باشد[۷]. مدول‌های سری CC_i معمـولاً در شـبکه‌های آبیاری کمتر کاربرد داشته و معمولاً در آبگـیری‌های با شدت جریان بالا (سدها) استفاده می‌شوند و بـه همین علت در این پژوهش نیز مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. مـدول‌هـای تـیغه‌ای در ایـران با نام مدول‌های روزنه‌ای نیرپیک (Neyrpic) شناخته می‌شوند.

ایـن پـژوهش بـا هـدف تدویـن و ارائه معادلات حساسیت هیدرولیکـی مـدول‌هـای تـیغه‌ای و بررسـی تأثیر تغییرات کمّی حساسیت این سازه در شرایط بهره‌برداری صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

ارائه روابط محاسبه حساسیت هیدرولیکی مدول‌های تیغه‌ای

رفـتار هیدرولیکی جریان از سازه‌های آبگیر و تنظیم کننده، متأثر از دو مـرحله عـبور جـریان ازسـازه (مرحله یک) و ورود آن به کانال پایین دست سازه (مرحله دو) می‌باشد(شکل ۳). معادلات عمومی دبی به وضعیت این دو مرحله ارتباط یافته و می‌تواند به صورت زیر نمایش داده شود(۱۱).

$$q = aA_{(w)}(H_{US} - H_{DS})^{\alpha} \qquad [۲]$$

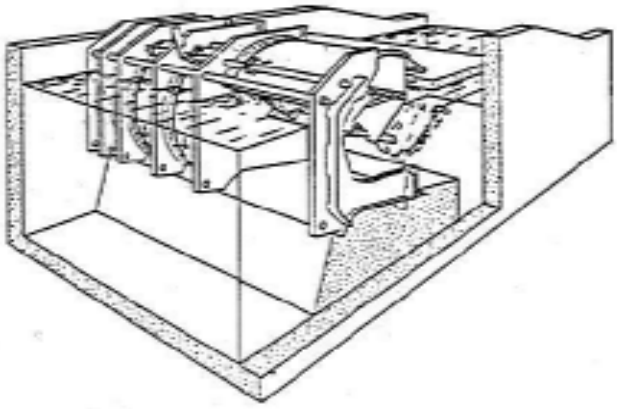
$$q = b(H_{US} - H_{REF})^{\beta} \qquad [۳]$$

در روابـط فـوق q دبی عبوری از سازه، $A_{(W)}$ سطح مقطع جریان کـه به‌عنوان تابعی از میزان تنظیم یا بازشدگی(W) بیان می‌شود، a و b ضرایب رابطه دبی، H_{US} عمق آب در کانال اصلی بالادست سـازه، H_{DS} عمـق آب در کانـال فرعی پایین دست سازه، H_{REF} ارتفـاع سـطح مـرجع ثابـت کـه مـی‌توانـد کـف کانـال و یـا رقوم تاج سرریز باشد و α و β ضرایب توانی رابطه دبی می‌باشند.

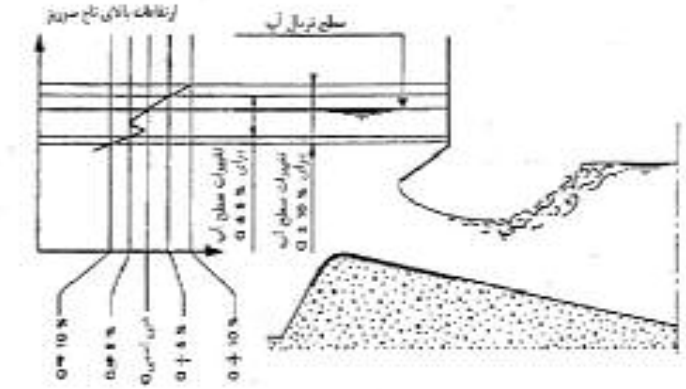
در شـرایط جـریان آزاد از سازه، رابطه ۲ حذف شده و تنها معادلهٔ (۲) بر وضعیت جریان حاکم می‌باشد. H_{DS} در جریان از روی سـازه (Overshot Flow) به‌عنوان عمق آب روی تاج و در جریان از زیر سازه (Undershot Flow) به‌عنوان عمق جریان در

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-11]

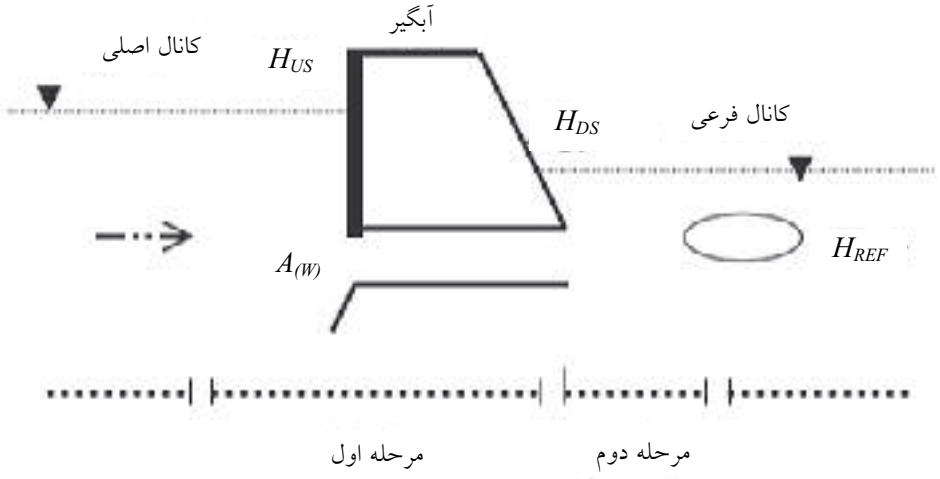
[DOR: 20.1001.1.22518517.1383.8.3.10.0]



شکل۱. شمایی از یک مدول تیغه‌ای نوع L_1



شکل۲. پروفیل طولی جریان در یک دریچه از مدول نوع یک تیغه‌ای



شکل۳. وضعیت جریان در سازه آبگیر

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-11]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1383.8.3.10.0]

محـور مرکزی روزنه یا دریچه در نظر گرفته می‌شود. جریان در مـدول‌هـا بـه‌صـورت ترکیبـی از جـریان از رو و از زیـر سازه صورت می‌گیرد.

بـا جمـع روابـط ۲ و ۳ و مشتق‌گیری نسبت به متغیرH_{US} و فرض ثابت بودنH_{REF}، رابطه ۴ به دست می‌آید.

$$dH_{US} = [\frac{1}{\alpha}(H_{US} - H_{DS}) + \frac{1}{\beta}(H_{DS} - H_{REF})]\frac{dq}{q} \quad [٤]$$

بـا تعـریفH_E به صورت رابطه ۵ و جای‌گذاری در رابطه فوق، رابطه ۶ به دست می‌آید.

$$H_E = (H_{US} - H_{DS}) + \frac{\alpha}{\beta}(H_{DS} - H_{REF}) \quad [٥]$$

$$dH_{US} = \frac{H_E}{\alpha}.\frac{dq}{q} \quad [٦]$$

H_E مقـدار افت بار معادل می‌باشد. افت بار معادل از یک آبگیر ویـژه، برابر با افت بار همان نوع آبگیر با همان مقدار حساسیت اما تحت شرایط جریان آزاد در نظر گرفته می‌شود. مقدارH_E در شـرایط جـریان آزاد معـادلH_{US}-H_{DS} خواهـد بـود. با توجه به روابـط ۱ و ٦، حساسـیت جـریان تحویلـی بـه تغییرهای مطلق عمـق جـریان در بالادسـت سـازه آبگیر (حساسیت هیدرولیکی سازه) از رابطهٔ زیر قابل محاسبه می باشد.

$$S = \frac{\frac{dq}{q}}{dH_{US}} = \frac{\alpha}{H_E} \quad [٧]$$

بـه مـنظور تحلـیل حساسیت مدول‌های تیغه‌ای و ارائه شاخص مناسـب ارزیابـی حساسـیت ایـن نوع خاص از آبگیرها، وجود روابـط هیدرولیکـی دبی- عمق آب مدول‌ها ضروری است. در ایـن پـژوهش بـرای محاسـبه روابط مذکور در حالت تئوری از گـراف‌های ارائه شده توسط کارخانه طراح مدول‌ها (گراف‌های تیـپ) اسـتفاده گـردید. گـراف‌هـای مذکـور بـرای هر سری از مـدول‌هـای یـک تـیغه‌ای (C_1, L_1, XX_1, X_1) و دو تـیغه‌ای (C_2, L_2, XX_2, X_2) به‌صورت جداگانه ارائه گردیده است (۶).

جـریان عبوری از مدول‌های یک و دو تیغه‌ای در بازهٔ مجاز تغییـرات دبـی مـدول‌هـا، بـه ترتیـب در سـه و پـنج محـدوده هیدرولیکـی مخـتلف (نواحـی ارتفاعی) قابل بررسی است. بازه مجـاز تغییرات دبی مدول‌ها معادل ۲۰ درصد دبی اسمی مدول در نظـر گرفته شد. نواحی ارتفاعی در مدول‌های یک تیغه‌ای با نـام‌های I، II، III و در مدول‌های دو تیغه‌ای با نام‌های I، II، III، IV و V نام‌گذاری گردیدند. شکل۴ تفکیک این نواحی را روی منحنـی‌هـای دبـی ـ عمـق جـریان نمایش می‌دهد. مناسب‌ترین روابـط بـرازش شـده بر گراف‌های تیپ در هر ناحیه ارتفاعی و بـرای هـرنوع از مدول‌ها با دقت بسیار تعیین شده و در جدولی در بخش نتایج ارائه گردید.

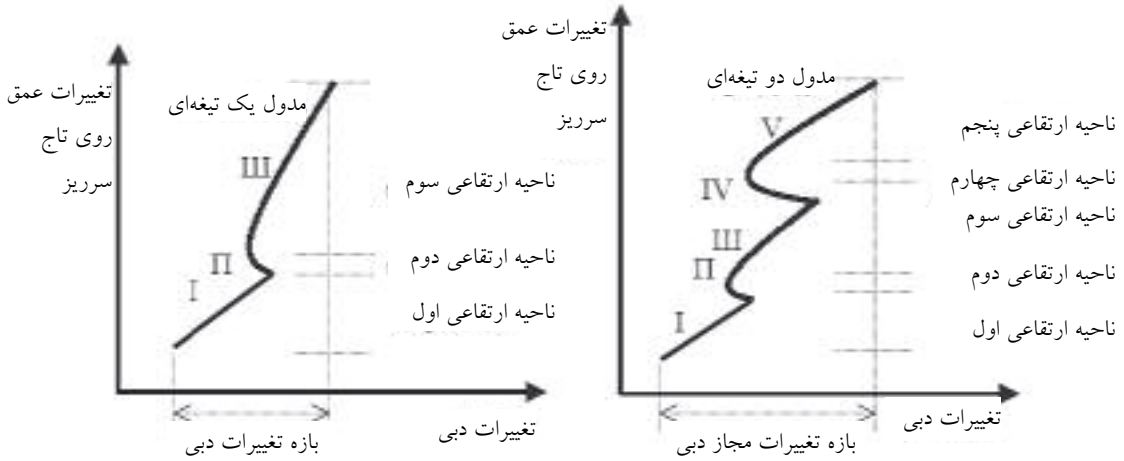
مقـدار کمّـی حساسـیت (شـرایط تئوری) هر یک از نواحی ارتفاعـی مـدول‌هـای مخـتلف بـا اسـتفاده از روابط دبی- عمق جـدول مذکـور و رابطه (۷) قابل محاسبه هستند. حساسیت در هـر یـک از نواحـی ارتفاعـی به صورت S_j نمایش داده شد که اندیس j بیانگر ناحیه ارتفاعی مربوطه می‌باشد.

در ایـن پـژوهش مقـدار حساسـیت دریچـه‌های مدول‌های تـیغه‌ای، به‌صورت ترکیبی از حساسیت نواحی ارتفاعی مختلف آن در نظـر گرفـته شـد. بـر ایـن اسـاس و بـه مـنظور محاسبه حساسیت هیدرولیکی مدول‌ها، معادلات بسیاری تعریف ومورد آزمـون قـرار گرفتـند. تعـدادی از ایـن معـادلات کـه از دقـت مناسـب‌تری در برآورد مقدار حساسیت برخوردار می‌باشند، در جدول۱ ارائه شده‌اند.

در روابط فوقS_1 ، S_3 ، S_5 به‌ترتیب مقدار حساسیت نواحی ارتفاعـی اول، سـوم و پـنجم، $\Delta H_{US(j)}$ اختلاف عمق جریان بالادسـت دریچه بین حداقل و حداکثر مقدار عمق در ناحیه jام (محـدوده تغیـرات عمـق ناحـیه jام)، S_j مقـدار حساسـیت ناحیه jام، A_j سطح زیر منحنی دبی- عمق در ناحیه ارتفاعی jام، $\Delta q'$ و $\Delta H'_{US}$ بـه‌ترتیـب تغیـرات دبـی و تغییرات عمق بالادسـت دریچـه مـدول بیـن حداقـل عمـق ناحـیه ارتفاعـی اول و حداکـثر عمـق ناحـیه ارتفاعـی سـوم (پـنجم) q_1 دبـی بـه ازای حداقل عمق جریان در ناحیه ارتفاعی اول و $\overline{S_o}$ مقدار حساسیت هیدرولیکی دریچه مورد نظر در مدول می‌باشد.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-11]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1383.8.3.10.0]



شکل۴. تفکیک نواحی ارتفاعی مختلف در مدول‌های یک و دو تیغه‌ای

جدول۱. روابط مورد آزمون برای محاسبه حساسیت هیدرولیکی مدول‌های تیغه‌ای

عنوان رابطه	مدول‌های یک تیغه‌ای	مدول‌های دوتیغه‌ای
A	$\overline{S}_o = S_3$	$\overline{S}_o = S_5$
B	$\overline{S}_o = \frac{S_1 + S_3}{2}$	$\overline{S}_o = \frac{S_1 + S_5}{2}$
C	$\overline{S}_o = \frac{\sum_{j=1}^{3} S_j}{3}$	$\overline{S}_o = \frac{\sum_{j=1}^{5} S_j}{5}$
D	$\overline{S}_o = \frac{\sum_{j=1}^{3} \Delta H_{US(j)}.S_j}{\sum_{j=1}^{3} \Delta H_{US(j)}}$	$\overline{S}_o = \frac{\sum_{j=1}^{5} \Delta H_{US(j)}.S_j}{\sum_{j=1}^{5} \Delta H_{US(j)}}$
E	$\overline{S}_o = \frac{\Delta q' / q_1}{\Delta H'_{US}}$	$\overline{S}_o = \frac{\Delta q' / q_1}{\Delta H'_{US}}$
F	$\overline{S}_o = \frac{\sum_{j=1}^{3} S_j.A_j}{\sum_{j=1}^{3} A_j}$	$\overline{S}_o = \frac{\sum_{j=1}^{5} S_j.A_j}{\sum_{j=1}^{5} A_j}$

داده‌های موجود واسنجی جریان چند مدول تیغه‌ای

به منظور بررسی تغییرهای حساسیت هیدرولیکی مدول‌های تیغه‌ای در شرایط بهره برداری، از نتایج داده‌های موجود واسنجی جریان چند مدول در شبکه آبیاری دشت قزوین استفاده گردید(۱). شبکه آبیاری دشت قزوین دارای ۱۵۵ نقطه تحویل آب به کانال‌های درجه سه بوده که کلیه آبگیرهای موجود در این مقاطع از نوع مدول‌های تیغه‌ای می‌باشند. آب مورد نیاز این شبکه از رودخانه طالقان تأمین گردیده و توسط

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-11]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1383.8.3.10.0]

کانال اصلی به ظرفیت طراحی ۳۰ متر مکعب بر ثانیه (ظرفیت بخش ابتدایی کانال) به داخل شبکه انتقال می‌یابد. مجموعه‌ای از کانال‌های درجه دو، سه و چهار وظیفه توزیع آب را در سطح شبکه بر عهده دارند (۱). در این پژوهش از داده‌های اندازه‌گیری شده روی پنج مدول مختلف با ظرفیت و موقعیت مشخص شده در جدول۲ استفاده شد. در این پنج سری آزمایش، دبی دریچه‌های مختلف مدول‌های انتخابی با استفاده از پارشال فلوم‌های نصب شده در پایین دست آبگیرها اندازه‌گیری گردیده است. مقاطع نصب پارشال فلوم به گونه‌ای انتخاب شده بود که از طرفی جریان در خروجی پارشال فلوم‌ها به‌صورت کاملاً آزاد صورت پذیرفته و از طرفی این سازه در منطقه تأثیر آبگیرها واقع نشود. در انتخاب مدول‌ها نیز دقت کافی برای عدم وجود تلاطم و اغتشاش در سطح آب بالادست آبگیرها و هم‌چنین تا حد امکان حداقل بودن میزان فرسودگی و درز و شکاف بدنه و آب بندی آنها، مدنظر بوده است.

در جدول۲ منظور از دریچه $C_{۱lef(۱۰۰۰)}$، دریچه با دبی اسمی ۱۰۰۰ لیتر بر ثانیه واقع شده در بخش کناری مدول مورد نظر است. $C_{۱mid(۱۰۰۰)}$ نیز همین نوع دریچه واقع شده در بخش میانی مدول است. هر دو دریچه مربوط به مدول تیپ $G_۱$ می‌باشند.

نتایج و بحث

در این پژوهش ضمن ارائه معادلات حساسیت هیدرولیکی مدول‌های تیغه‌ای، تغییرات این شاخص در شرایط تئوری و بهره برداری ارزیابی شد. بدین منظور نخستین مرحله، تعیین روابط دبی ـ عمق در هر یک از این شرایط است. در شرایط تئوری این روابط از برازش مناسب‌ترین روابط بر گراف‌های تیپ و در شرایط بهره‌برداری از برازش بهترین روابط بر داده‌های واسنجی جریان پنج مدول از شبکه آبیاری دشت قزوین استخراج گردیدند. روابط شرایط تئوری وبهره برداری به‌ترتیب در جداول۳ و ۴ ارائه شده است. این روابط حداکثر ضرایب هم‌بستگی را بین کلیه روابط قابل انطباق در هر ناحیه ارتفاعی دارا هستند. در جدول۳ ضریب ظرفیت اسمی کوچک‌ترین دریچه در هر مدول می‌باشد. روابط ارائه شده برای شرایط تئوری، قابلیت تعیین شدت جریان مدول‌ها را با دقت بسیار بالا دارا بوده و می‌توانند جایگزین گراف‌های تیپ شوند.

با استفاده از روابط جدول ۳، رابطه ۷ و هر یک از معادلات جدول ۱، مقادیر کمّی حساسیت هیدرولیکی انواع مختلف مدول‌ها در شرایط تئوری محاسبه شدند. به منظور ارزیابی دقت هر یک از معادلات A تا F، بازه تغییرهای دبی براساس مقادیر حساسیت محاسبه شده از این معادلات تعیین شد. منظور از بازه تغییرهای دبی، میزان تغییرات دبی مدول‌ها به ازای تغییرات عمق جریان بالادست مدول (مطابق با ستون نواحی ارتفاعی جدول ۳) می‌باشد. مقدار این بازه بر حسب درصد بوده و معادل با حاصل‌ضرب مقدار کمّی حساسیت (محاسبه شده از معادلاتA تا F) در مقدار عددی تغییرات عمق جریان بالادست مدول (ازجدول ۳) است. در شکل ۵ نتایج این محاسبات برای انواع مختلف مدول‌ها آمده است. محور افقی نوع مدول و محور قائم بازه تغییرهای دبی را نشان می‌دهد. در این شکل بازه تغییرات دبی محاسبه شده از معادلات مذکور با مقدار مجاز آن که ۲۰ درصد می‌باشد و به‌عنوان منحنی مرجع معرفی شده است، مورد مقایسه گرفت. مقادیر جذر میانگین مربعات(RMS) هر سری از داده‌ها که مربوط به یکی از معادلات مذکور می باشد نسبت به منحنی مجاز که مقدار آن برای کلیه مدول‌ها ثابت و معادل ۲۰ درصد است، محاسبه شد. مقدار این شاخص برای معادلاتA تا F به‌ترتیب ۶,۶۱، ۸۲,۶۸، ۵۱,۱۸، ۳۳,۴، ۰۸,۸ و ۰۷,۱۱ می‌باشد. حداقل مقدار جذر میانگین مربعات، مربوط به داده‌های معادلهD بوده که بیانگر مناسبت بیشتر این معادله به منظور محاسبه حساسیت هیدرولیکی مدول‌ها می‌باشد. معادلات دیگری نیز مورد آزمون قرار گرفتند که از دقت کمی برخوردار بوده و در مقاله ارائه نشدند.

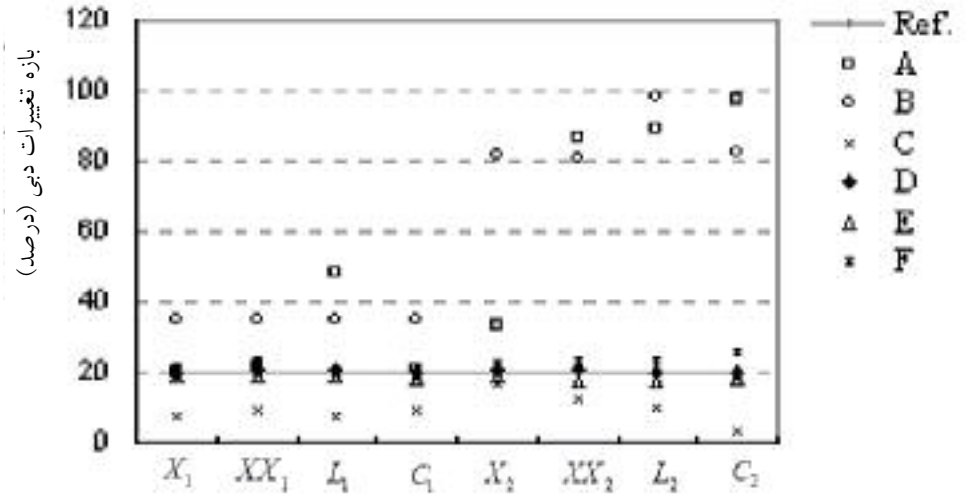
معادله D را می‌توان به صورت زیر نمایش داد. در این

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-11]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1383.8.3.10.0]

جدول۲. مشخصات و موقعیت مدول‌ها و دریچه‌های واسنجی شده(۱)

سری آزمایش	نوع مدول	ظرفیت اسمی (لیتر بر ثانیه)	موقعیت مدول	دریچه‌های واسنجی شده
اول	C_1	۱۹۰۰	محل آبگیری کانال L_5 از کانال اصلی	$C_{1lef(100)}$, $C_{1mid(100)}$, $C_{1(60)}$, $C_{1(40)}$, $C_{1(20)}$, $C_{1(10)}$
دوم	C_1	۳۷۰۰	محل آبگیری کانال L_6 از کانال اصلی	$C_{1(20)}$, $C_{1(10)}$
سوم	XX_1	۱۷۰	ابتدای کانال درجه ۴ منشعب از کانال تغذیه L_5	$XX_{1(60)}$, $XX_{1(20)}$, $XX_{1(10)}$
چهارم	L_1	۴۵۰	محل کانال L_{43} از انشعاب کانال L_7	$L_{1(40)}$, $L_{1(20)}$ $L_{1(10)}$, $L_{1(50)}$
پنجم	XX_2	۴۵۰	محل آبگیری M ۱۰۱A از کانال اصلی	$XX_{2lef(90)}$, $XX_{2mid(90)}$ $XX_{2(30)}$, $XX_{2(20)}$



شکل۵. مقایسه بازه تغییرات دبی مدول‌های مختلف بر اساس حساسیت محاسبه شده از روابط مورد آزمون

در این معادله حساسیت هیدرولیکی یک دریچه از مدول به مقدار حساسیت و هیدرولیک جریان نواحی ارتفاعی مختلف مدول ارتباط یافته است. S_j مشخصه حساسیت و $\Delta H_{US(j)}$ مشخصه هیدرولیک جریان می باشد.

$$\overline{S_o} = \frac{\sum_{j=1}^{n} \Delta H_{US(j)} . S_j}{\sum_{j=1}^{n} \Delta H_{US(j)}} \qquad [8]$$

در رابطه فوق تعداد نواحی ارتفاعی مدول (۳ یا ۵ ناحیه) می‌باشد.

مقادیر حساسیت هیدرولیکی مدول‌های مختلف در شرایط تئوری با استفاده از رابطه فوق محاسبه گردیده ونتایج در شکل۶ ارائه شدند. در نمودارهای این شکل محور افقی نوع مدول و محور عمودی مقدار کمّی شاخص حساسیت هیدرولیکی را نشان می‌دهد. در نمودار مربوط به مدول‌های یک تیغه‌ای، برای هر نوع مدول چهار مقدار حساسیت مشخص شده است. مقادیر S_1 تا S_4 به ترتیب حساسیت نواحی ارتفاعی اول تا

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-11]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1383.8.3.10.0]

سوم این مدل‌ها بوده که با استفاده از معادلات جدول۳ و رابطه ۷ محاسبه گردیده و مقدار $\overline{S}_o$ حساسیت هیدرولیکی مدول بوده که با استفاده از رابطه ۸ محاسبه شده است. مقدار $\overline{S}_O$ هر مدول بر روی منحنی مربوطه در نمودار مشخص شده است. در نمودار مربوط به مدول‌های دو تیغه‌ای نیز برای هر نوع مدول شش مقدار حساسیت مشخص گردیده که $\overline{S}_o$ حساسیت هیدرولیکی مدول و پنج مقدار دیگر مربوط به حساسیت هیدرولیکی نواحی ارتفاعی پنج‌گانه می‌باشند.

بررسی نتایج محاسبات و نمودارهای شکل۶ نشان می‌دهد مدول نوع $X_۱$ با مقدار کمّی حساسیت هیدرولیکی ۲۸۵,۰، حساس‌ترین مدول تیغه‌ای نسبت به تغییرات عمق جریان است. حساسیت ۲۸۵,۰ به مفهوم اعمال ۵,۲۸ درصد تغییرها در دبی تحویلی این مدول به ازای ۱۰ سانتی‌متر تغییرات عمق جریان می‌باشد. مقدار حساسیت مدول‌های یک تیغه‌ای، از مدول نوع $X_۱$ با افزایش ظرفیت اسمی مدول، روند کاهشی داشته به‌طوری که حساسیت مدول $C_۱$، ۷,۴ برابر از مقدار حساسیت مدول $X_۱$ کمتر است. این روند با همان نسبت ۷,۴، بین مدول $C_۲$ و $X_۲$ برقرار است. حساسیت هیدرولیکی هر نوع از مدول‌های یک تیغه‌ای، ۵,۲ برابر حساسیت هیدرولیکی مدول دو تیغه‌ای هم نوع (مثلاً $X_۱$ نسبت به $X_۲$) می‌باشد. براین اساس مدول نوع $C_۲$ دارای حساسیت هیدرولیکی ۸,۱۱ برابر کمتر از مدول نوع $X_۱$ است. در حالت تئوری کلیه دریچه‌های مدول، دارای مقدار حساسیت هیدرولیکی یکسانی بوده و می‌توان حساسیت مدول را معادل حساسیت هر دریچه ازآن مدول فرض نمود.

مقادیر حساسیت دریچه‌های هر یک از مدول‌های مورد بررسی در شرایط بهره‌برداری با استفاده از معادلات جدول۴ و روابط (۷) و (۸) محاسبه گردیده ونتایج در شکل۷ ترسیم شدند. هر یک از نمودارهای این شکل مربوط به دریچه‌های مختلف یکی از مدول‌های معرفی شده در جدول ۲ می‌باشد. در نمودارهای این شکل محور افقی مربوط به نوع دریچه‌های مدول‌های مورد مطالعه و محور عمودی مقدار کمّی شاخص حساسیت را نشان می‌دهد. شاخص‌های حساسیت مشخص شده نیز همانند نمودارهای شکل۶ بیانگر حساسیت‌های نواحی ارتفاعی و حساسیت هیدرولیکی محاسبه شده برای دریچه‌های مدول‌ها می‌باشند.

بررسی این نمودارها نشان می‌دهد در شرایط بهره‌برداری دریچه‌های مختلف یک مدول دارای مقدار حساسیت متفاوتی هستند. بنابراین نمی‌توان به سادگی در مورد مقدار کمّی حساسیت مدول اظهار نظر نمود. حساسیت یک مدول به حساسیت دریچه‌های مختلف آن بستگی تام دارد. بنابراین منطقی است که حساسیت در قالب یک رابطه وزنی برحسب حساسیت دریچه‌های آن بیان شود. تنها مشخصه کمّی که دریچه‌های موجود در یک مدول را از یکدیگر متمایز می‌سازد، ظرفیت اسمی (Nominal Capacity) دریچه‌هاست. ظرفیت اسمی واژه‌ای است که کارخانه طراح این سازه برای میزان دبی طراحی دریچه‌ها به کار برده است. در این مقاله نیز با همین مفهوم به کار رفته و با q_n مشخص شده است. ظرفیت مدول که برگرفته از ظرفیت دریچه‌های آن است در تأثیرپذیری از تغییرات مقدار حساسیت نقش عمده‌ای را بازی می‌کند. بدین ترتیب رابطه مطلوب برای محاسبه حساسیت مدول در شرایط بهره‌برداری، یک رابطه وزنی برحسب مقادیرحساسیت دریچه‌های مدول بوده که ضرایب وزنی آن ظرفیت اسمی دریچه‌ها می‌باشند. این رابطه به‌صورت زیر قابل بیان است.

$$\overline{S}'_M = \frac{\sum_{k=۱}^{m} \overline{S}_{o(k)} \times q_{n(k)}}{\sum_{k=۱}^{m} q_{n(k)}} \qquad [۹]$$

در معادله فوق m تعداد دریچه مدول (مقدار m معادل تعداد دریچه‌های مورد استفاده در شرایط بهره‌برداری بوده و بنابراین ممکن است در دو شیوه بهره‌برداری متفاوت، متغیر باشد)، $\overline{S}_{o(k)}$ حساسیت دریچه kام، $q_{n(k)}$ ظرفیت اسمی دریچه kام و $\overline{S}'_M$ مقدار حساسیت هیدرولیکی مدول می‌باشد. مقادیر حساسیت هریک از مدول‌های مورد بررسی

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-11]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1383.8.3.10.0]

جدول۳. ضرایب معادلات دبی تئوری انواع مدول‌ها در نواحی ارتفاعی مختلف

$$q = \left(\frac{q_n}{A}\right)(BH_{us}^{C} + DH_{us} + E)$$

نوع مدول	محدوده تغییرات عمق جریان (نواحی ارتفاعی) $\leq H_{us} <$ cm		ضرایب A	B	C	D	E
X_1	۱۲/۸	۱۴/۱۵	۵	۰/۴۳۶۷	۰/۹۱۳۷	۰	۰
	۱۴/۱۵	۱۴/۸	۵	۰/۵۳۷۲	۲	-۱۵/۸۲۲	۱۲۱/۲۶
	۱۴/۸	۱۹/۹	۵	۰/۰۱۲۷	۲	-۰/۲۹۲۲	۶/۲۸۳۴
XX_1	۲۰/۲	۲۲/۱	۱۰	۰/۵۴۶۲	۰/ ۹۳۳۹	۰	۰
	۲۲/۱	۲۳/۱	۱۰	۰/۳۲۸۰	۲	-۱۵/۱۹۴	۱۸۵/۴۶
	۲۳/۱	۳۱/۲	۱۰	۰/۰۱۱۲	۲	-۰/۴۲۱۵	۱۳/۲۲۹
L_1	۳۷	۴۰/۸	۵۰	۱/۷۱۲۳	۰/۹۰۵۵	۰	۰
	۴۰/۸	۴۲/۵	۵۰	۰/۵۸۲	۲	-۴۹/۵۰۳	۱۱۰۰/۲
	۴۲/۵	۵۸	۵۰	۰/۰۱۵۶	۲	-۱/۰۸۳۹	۶۵/۲۱۱
C_1	۵۹	۶۴/۸	۱۰۰	۱/۸۸۷۸	۰/۹۴۸	۰	۰
	۶۴/۸	۶۷/۸۵	۱۰۰	۰/۴۴۷۵	۲	-۶۰/۵۰۱	۲۱۳۹/۷
	۶۷/۸۵	۹۲	۱۰۰	۰/۰۱۲۲	۲	-۱/۳۱۷۴	۱۲۸/۲۷
X_2	۱۲/۸	۱۴/۱۸	۵	۰/۳۷۱۷	۰/۹۷۸۲	۰	۰
	۱۴/۱۸	۱۴/۹	۵	۰/۷۱۰۲	۲	-۲۰/۹۶۲	۱۵۹/۴۱
	۱۴/۹	۱۹/۳۵	۵	۰/۰۱۵۲	۲	-۰/۴۰۳۴	۷/۳۷۵۲
	۱۹/۳۵	۲۲/۸	۵	۰/۰۱۲۱	۲	-۰/۶۷۰۵	۱۳/۷۱
	۲۲/۸	۳۰/۸	۵	۰/۰۹۸۵	۱	۰	۲/۴۶۰۱
XX_2	۲۰/۲	۲۲/۲۵	۱۰	۰/۴۸۹۸	۰/۹۶۹۱	۰	۰
	۲۲/۲۵	۲۳/۵	۱۰	۰/۳۷۱۳	۲	-۱۷/۳۵۹	۲۱۲/۳۷
	۲۳/۵	۳۰/۵	۱۰	۰/۰۱۲۷	۲	-۰/۵۳۶۵	۱۵/۰۷۷
	۳۰/۵	۳۵/۸	۱۰	۰/۰۱۴۹	۲	-۱/۱۹۳	۳۳/۰۹۹
	۳۵/۸	۴۸/۴	۱۰	۰/۱۲۵	۱	۰	۴/۹۳۸۳
L_2	۳۷/۴	۴۱/۱	۵۰	۱/۰۰۵۲	۱/۰۵۰۵	۰	۰
	۴۱/۱	۴۳/۲	۵۰	۰/۷۹۵۸	۲	-۶۸/۱۶۸	۱۵۰۷/ ۳
	۴۳/۲	۵۶	۵۰	۰/۰۲۰۳	۲	-۱/۶۱۲۳	۷۹/۱۶۳
	۵۶	۶۶	۵۰	۰/۰۱۶۷	۲	-۲/۵۹۷۴	۱۴۵/ ۷
	۶۶	۸۹/۲	۵۰	۰/۳۳۷۶	۱	۰	۲۴/۸۱۲
C_2	۵۹	۶۵/۱	۱۰۰	۱/۷۱۰۴	۰/۹۷۲۵	۰	۰
	۶۵/۱	۶۸/۳	۱۰۰	۰/۶۵۵۷	۲	-۸۸/۸۷۳	۳۱۰۶/۳
	۶۸/۳	۸۹/۴	۱۰۰	۰/۰۱۵۱	۲	-۱/۸۸۵۹	۱۵۳/۲۳
	۸۹/۴	۱۰۵/۴	۱۰۰	۰/۰۱۸۲	۲	-۴/۲۳	۳۳۸/۴۳
	۱۰۵/۴	۱۴۲	۱۰۰	۰/۴۲۵۳	۱	۰	۴۹/۴۰۹

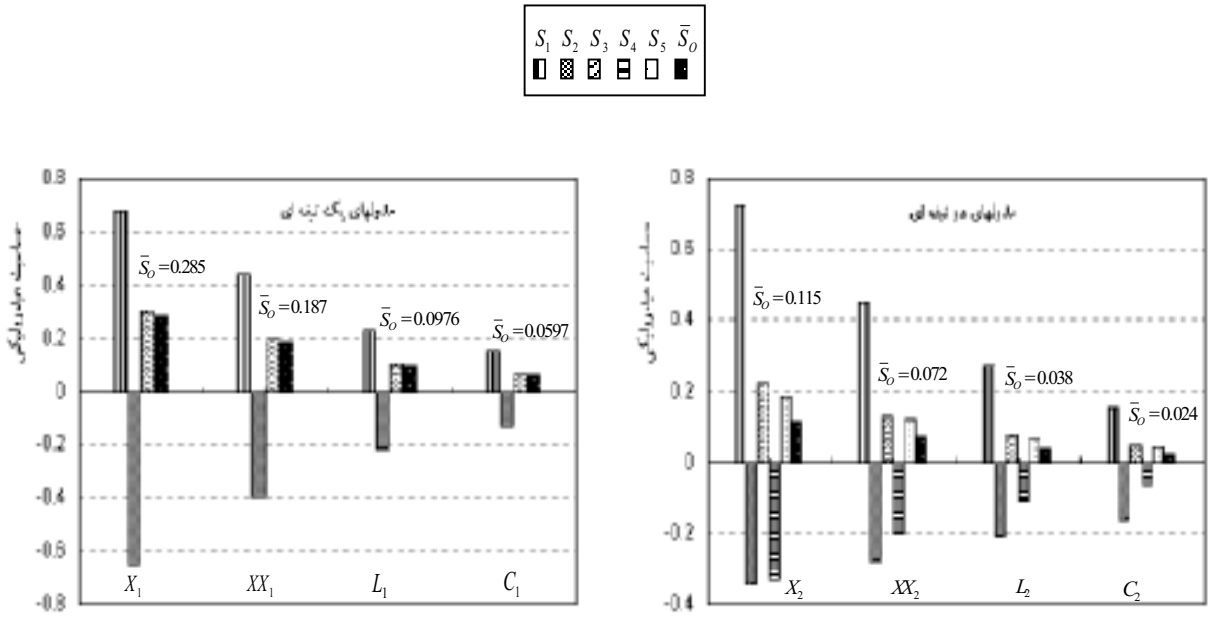
متغیرهای H_{us} و q_n به ترتیب عمق آب در بالا دست مدول و دبی اسمی دریچه می‌باشد. واحد دبی لیتر بر ثانیه است.

در شرایط بهره‌برداری با استفاده از رابطه فوق محاسبه گردیده و روی نمودارهای مربوطه در شکل ۷ مشخص شده است.

در حالت بهره‌برداری تغییر میزان حساسیت نواحی ارتفاعی مختلف از طرفی و تغییر محدوده وضعیت‌های هیدرولیکی جریان از طرف دیگر، در افزایش میزان حساسیت واقعی این سازه تأثیر گذار است. در شرایط بهره‌برداری اثر تیغه‌های مدول در ارتفایی بالاتر از آنچه در تئوری پیش بینی شده، عمل می‌نماید. پس از عمل نمودن تیغه‌هاست که وضعیت هیدولیکی جریان تغییر می‌کند (جریان روگذر از سرریز به جریان زیرگذر از روزنه تبدیل می‌شود). بنابراین چون در شرایط بهره‌برداری محدوده ارتفاعی اول که دارای حساسیت بیشتری نیز می‌باشد، افزایش می‌یابد، طبیعی است که در افزایش مقدار حساسیت دریچه‌های مدول و به تبع آن حساسیت مدول مؤثر باشد. به‌عنوان مثال در دریچه $C_{1(200)}$ آزمایش سری اول، مقدار حساسیت ناحیه ارتفاعی اول (S_1) معادل ۰/۱۹۶ بوده که نسبت به حالت تئوری ۰/۰۴۶ افزایش نشان می‌دهد. تیغه مدول در این دریچه پس از ۹سانتی‌متر افزایش عمق جریان نسبت به حالت تئوری، عمل می‌نماید. محدوده ارتفاعی ناحیه سوم نیز

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-11]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1383.8.3.10.0]



شکل۶. مقایسه مقادیر کمّی حساسیت هیدرولیکی مدول‌های تیغه‌ای در شرایط تئوری

کاهش یافته و S_2 که مقدار کمّی آن منفی است، سه برابر کاهش می‌یابد. کلیه این تغییرها در جهت افزایش مقدار حساسیت هیدرولیکی این دریچه عمل نموده و مقدار آن را ۳,۸۴ درصد افزایش می‌دهد. به تعبیر دیگر در شرایط بهره‌برداری، افزایش محدوده ارتفاعی و حساسیت ناحیه اول، کاهش حساسیت‌های نواحی دو در مدول‌های یک تیغه‌ای و دو و چهار در مدول‌های دو تیغه‌ای که دارای مقدار کمّی منفی است و کاهش ارتفاعی ناحیهٔ سوم در تغییر مقدار حساسیت هیدرولیکی مدول نسبت به حالت تئوری نقش عمده‌ای ایفا می‌کند. مقادیر حساسیت نواحی ارتفاعی خود تابعی از ساختار فیزیکی دریچه‌های مدول می‌باشد و از این رو می‌توان حساسیت دریچه‌ها و به تبع آن مدول‌ها را تابعی از وضعیت ساختار فیزیکی و هیدرولیک جریان دریچه‌ها دانست.

موقعیت دریچه روی مدول نیز در مقدار کمّی حساسیت آن تأثیرگذار است. برای مثال دو دریچه با ظرفیت اسمی یکسان روی یک مدول، دارای میزان حساسیت متفاوت هستند. دریچه‌ای که در وسط مدول واقع شده نسبت به دریچه‌ای که در کنار مدول واقع شده دارای مقدار حساسیت بیشتری است. به‌عنوان مثال مقدار حساسیت دریچه $C_{1mid(1...)}$ واقع شده در بخش میانی مدول در آزمایش‌های سری اول معادل ۰۹۱۳,۰ بوده و حساسیت دریچه $C_{1lef(1...)}$ واقع شده در بخش کناری همین مدول معادل ۰.۰۷۸ است. بخشی از این اختلاف می‌تواند به وضعیت هیدرولیکی جریان ناشی از وجود جریان‌های گردابی به سمت دریچه میانی مدول ارتباط یابد.

بررسی نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، مقدار حساسیت مدول‌های تیغه‌ای در شرایط بهره‌برداری نسبت به شرایط تئوری تغییرات قابل ملاحظه ای می‌نماید. این تغییرها پیامدهایی را در عملکرد سازه سبب می‌گردد. اختلاف بازه تغییرات دبی به ازای نوسانات مجاز عمق آب نسبت به حالت تئوری، نشان دهنده وضعیت عملکرد مدول در روند توزیع جریان می‌باشد. این پارامتر با توجه به مقادیر حساسیت مدول‌ها در دو شرایط تئوری و بهره‌برداری از فرمول زیر قابل محاسبه است.

$$\Delta q_{R(Ty,T)} = \bar{S}_{o(Ty)} - \bar{S}_{o(T)}).\Delta H_{US(R)}.q_n \qquad [10]$$

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-11]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1383.8.3.10.0]

جدول۴. ضرایب معادلات دبی دریچه‌های مدول‌های واسنجی شده در شرایط بهره برداری $q = (BH_{us}^{c} + DH_{us} + E)$

سری آزمایش	نوع مدول	ظرفیت اسمی دریچه (لیتر بر ثانیه)	محدوده تغییرات عمق جریان (نواحی ارتفاعی) $\leq H_{us} <$ cm	ضرایب B	C	D	E
۱	C_1	۱۰۰۰ (left)	۵۹	۱۹/۹۴۷	۰/۹۳۵۳	۰	۰
			۶۷/۸	۳/۱۰۳۶	۲	-۴۴۳/۳۷	۱۶۸۱۲
			۷۲/۲	۰/۲۶۰۲	۲	-۳۴/۹۳۷	۲۱۴۲
		۱۰۰۰ (middle)	۵۹	۲/۳۲۰۹	۱/۴۴۷۶	۰	۰
			۷۲	۱/۰۵۳۶	۲	-۱۶۳/ ۸	۴۷۶۳/۶
			۷۶/۳	۰/۰۶۵	۲	-۸/۲۸۲۷	۱۳۷۶/۶
		۶۰۰	۵۹	۴/۱۶۶	۱/۱۸۷۹	۰	۰
			۷۴/۱	-۰/۱۴۲۹	۲	-۱۸/۶۲۹	۷۵ /۷۱
			۷۶/۸	۰/۰۷۴۴	۲	-۸/۸۱۲۹	۹۰۹/۰۳
		۴۰۰	۵۹	۱/۹۳۸۵	۱/۲۷۸۳	۰	۰
			۷۳/۸	۰/۳۲۶۸	۲	-۵۱ /۶۰۵	۲۴۸۸/۷
			۷۶	-۰/۰۸۷۶	۲	۱۷/۰۲۱	-۳۴۶/۷
		۲۰۰	۵۹	۱/۵۴۲۶	۱/۱۸۷۶	۰	۰
			۷۴/۳	۰/۴۸۳۶	۲	-۸۵ /۷۰۹	۳۹۴۹/۳
			۷۵ /۴	-۰/۰۰۵۵	۲	-۲/۱۸۲	۱۲۱/۹
		۱۰۰	۵۹	۰/۵۵۴۹	۱/۲۸۶۷	۰	۰
			۷۲/۳	۰/۶۵۵۶	۲	-۹۷/۷۸۸	۳۷۸۰/۵
			۷۴/۱	-۰/۰۰۸۴	۲	-۱/۶۸۶	۵۵ /۹۹۱
۲	C_1	۲۰۰	۵۹	۲/۱۹۱۹	۱/ ۰۸۶	۰	۰
			۷۱/۸	۰/۱۷۵	۲	-۲۸/۱۲۵	۱۳۴۸/۵
			۷۵	-۰/۰۰۲۵	۲	-۱/۴	۱۲۹/۸۹
		۱۰۰	۵۹	۰/۶۴۵۶	۱/ ۲۱۶۸	۰	۰
			۷۳	۰/۹۲۵	۲	-۱۳۸/۸۲	۵۳۲۰/۴
			۷۵/ ۸	-/۰۰۳۵	۲	-۱/۰۳۳۴	۵۴۷۳
۳	XX_1	۶۰	۲۰/۲	۱/۴۸۱	۱/۱۷۰۴	۰	۰
			۲۳/ ۵	۰/۱۵	۲	-۷/۷۷	۱۵۸/۱۳
			۲۵/ ۴	۰/۰۵	۲	-۲/ ۱۱۶	۷۸/۵۶۱
		۲۰	۲۰/۲	۰/۲۴۷۷	۱/۳۷۹۴	۰	۰
			۲۳/ ۴	-۰/۳۷۵	۲	۱۷/۳۹۵	-۱۸۲/۳۱
			۲۴	-۰/۰۲۲	۲	۱/۶۱۳۵	-۷/۳۶۲
		۱۰	۲۰/۲	۰/۱۳۵۷	۱/۳۴۱۷	۰	۰
			۲۳/ ۴	۰/۰۳۷۵	۲	-۲/۱۸۲۵	۴۰/۸۶۴
			۲۵ /۰۵	-۰/۰۳۲۱	۲	۲/۲۱۵	-۲۷/۹۶
۴	L_1	۴۰۰	۳۷	۲/۰۸۷۵	۱/۳۶۶۸	۰	۰
			۴۳/ ۸	۰/۷	۲	-۶۴/۰۹	۱۸۲۳/۴
			۴۵	۰/۰۲۷۲	۲	۰/۲۹۵	۲۹۰/۱۸
		۲۰۰	۳۷	۱/۷۷۲۲	۱/۲۳۰۱	۰	۰
			۵۰/۲	۰/۴۵	۲	-۴۸/۱۳	۱۵۰۰/۳
			۵۳/ ۹	۰/۰۳۸۱	۲	-۲/۹۱۳۳	۲۶۰/۷۳
		۱۰۰	۳۷	۰/۳۳۵۵	۱/۴۸۷	۰	۰
			۴۸/ ۱	۰/۵۴۲۹	۲	-۵۵ /۹۴	۱۵۴۱/۶
			۵۲/ ۶	۰/۰۵۱۵	۲	-۵ /۳۳۵۸	۲۳۹/۲۵
		۵۰	۳۷	۰/۱۱۷۳	۱/۵۹۰۴	۰	۰
			۴۸	۰/۰۱۷۹	۲	-۲/۲۱۷۹	۱۱۸/۵۵
			۵۲	۰/۰۴۱۷	۲	۵/۰۶۵	۱۰۰/۲۴

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-11]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1383.8.3.10.0]

جدول۴. ادامه

۵	XX_r	۹۰ (left)	۲۰/۲	۲۴	۰/۷۴۶۶	۱/۵۰۴	۰	۰
			۲۴	۲۵/۳	۰/۴۱۷۵	۲	-۲۱/۹۲۷	۳۷۳/۹۶
			۲۵/۳	۳۴/۴	-۰/۰۱۰۹	۲	-۱/۵۵۹	۵۵/۳
			۳۴/۴	۳۶/۹	۰/۶۱۷۹	۲	-۴۶/۳۲۹	۹۵۴/۷۶
			۳۶/۹	۴۸/۴	۰/۸۴۶۴	۱	۰	۵۵/۷۸۶
		۹۰ (middle)	۲۰/۲	۲۳/۵	۲/۱۴۷۹	۱/۱۶۸۸	۰	۰
			۲۳/۵	۲۴	-۰/۱۹۵۹	۲	۹/۰۲۵	-۱۷/۷۶۶
			۲۴	۳۱/۱	۰/۰۲۵	۲	-۰/۲۰۳۶	۷۵/۸۴۳
			۳۱/۱	۳۶/۳	۰/۰۸۹۳	۲	-۷/۳۲۵	۲۳۵/۹
			۳۶/۳	۴۸/۴	۱/۰۳۵	۱		۵۰/۲۱۵
		۳۰	۲۰/۲	۲۵	۳/۳۹۶	۰/۶۶۸۶	۰	۰
			۲۵	۲۶/۷	-۰/۲۷۷	۲	۱۳/۵۰۶	-۱۳۴/۴۴
			۲۶/۷	۳۰/۵	۰/۰۳۹۳	۲	-۱/۵۹۳۶	۴۴/۳۲۶
			۳۰/۵	۳۵/۹	۰/۰۱۹۶	۲	-۱/۹۸۷۵	۷۵/۳۵۴
			۳۵/۹	۴۸/۴	۰/۳۹۰۵	۱	۰	۱۴/۴۴
		۲۰	۲۰/۲	۲۵	۰/۲۱۳۵	۱/۴۲۱	۰	۰
			۲۵	۲۷/۱	۰/۰۶۱۷	۲	-۳/۳۸۷۳	-۶۶/۵۱
			۲۷/۱	۳۱	۰/۰۲۲	۲	-۱/۰۴۲۳	-۳۲/۲
			۳۱	۳۵	۰/۰۴۴	۲	-۳/۲۹۴	۸۰/۷۳۶
			۳۵	۴۸/۴	۰/۲۴۴۸	۱	۰	۱۰/۰۰۷

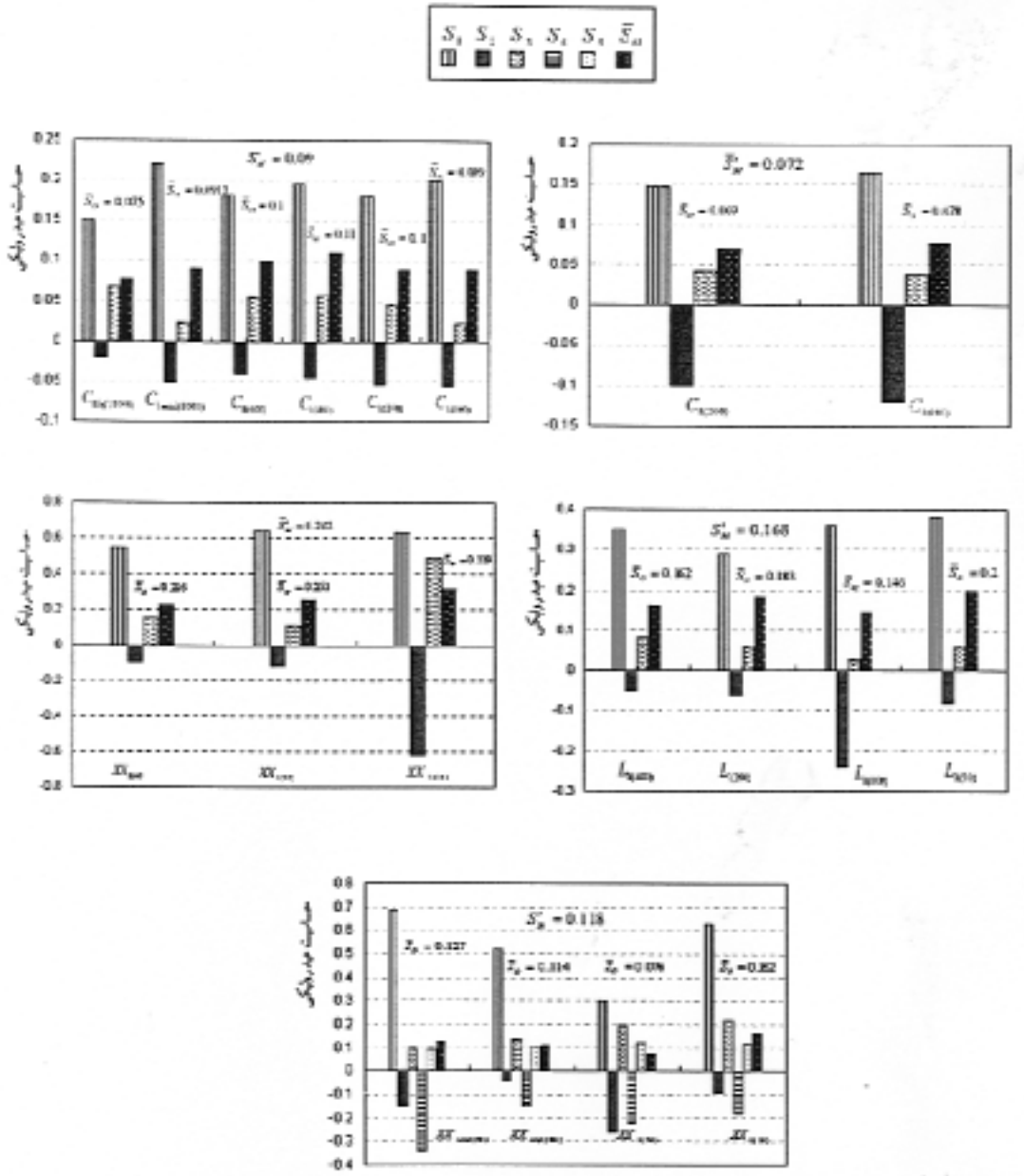
در رابطه فوق، $\Delta q_{R(Ty,T)}$ اختلاف بازه تغییرات دبی (مابین شرایط بهره برداری و پیش بینی شده تئوری) به ازای نوسانات مجاز عمق جریان بالادست دریچه مدول، $\overline{S}_{o(Tr)}$ حساسیت در شرایط بهره برداری، $\overline{S}_{o(T)}$ حساسیت در حالت تئوری، $\Delta H_{US(R)}$ مقدار تغییرات عمق جریان و q_n ظرفیت اسمی دریچه مدول می‌باشد.

با استفاده از رابطه۱۰ اختلاف بازه تغییرات دبی مدول‌های واسنجی شده با شرایط تئوری محاسبه گردیده و در شکل۸ گزارش شده است. نمودارهای ارائه شده در این شکل، محور افقی دریچه‌های مختلف مدول‌های مورد بررسی و محور عمودی بازه تغییرات دبی را نشان می‌دهد. در هر نمودار که مربوط به دریچه‌های یکی از مدول‌های معرفی شده در جدول ۲ است، مقدار محاسبه شده تئوری و بهره برداری این بازه مورد مقایسه گرفته است. منظور از پارامتر $\Delta\overline{S}/S_T$، نسبت اختلاف مقدارحساسیت شرایط بهره برداری و تئوری به مقدارحساسیت تئوری است که برای هر یک از دریچه‌های مورد بررسی محاسبه و روی نمودارهای شکل (۸) مشخص شده است. به‌عنوان مثال بازه تغییرات دبی ناشی از افزایش مقدار کمّی حساسیت دریچه $C_{۱(۶۰۰)}$ در آزمایش‌های سری اول ۷۹/۸ لیتر بر ثانیه افزایش نشان می‌دهد. به تعبیر دیگر بازه تغییرات دبی به ازای میزان تغییرات مجاز عمق جریان ۶۶/۵ درصد افزایش یافته که بیانگر دقت پایین دریچه مذکور در کنترل جریان خروجی است.

در شرایط بهره‌برداری، عملکرد مدول‌های نوع C و L که ظرفیت بالاتری درانتقال جریان دارند و به‌عنوان مدول‌های بزرگ‌تر شناخته می‌شوند نسبت به تغییرمقدار کمّی حساسیت هیدرولیکی بیشتر متأثر می‌شوند. افزایش حساسیت آنها در شرایط بهره‌برداری باعث تغییرات بیشتر بازه تغییرات دبی آنها

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-11]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1383.8.3.10.0]



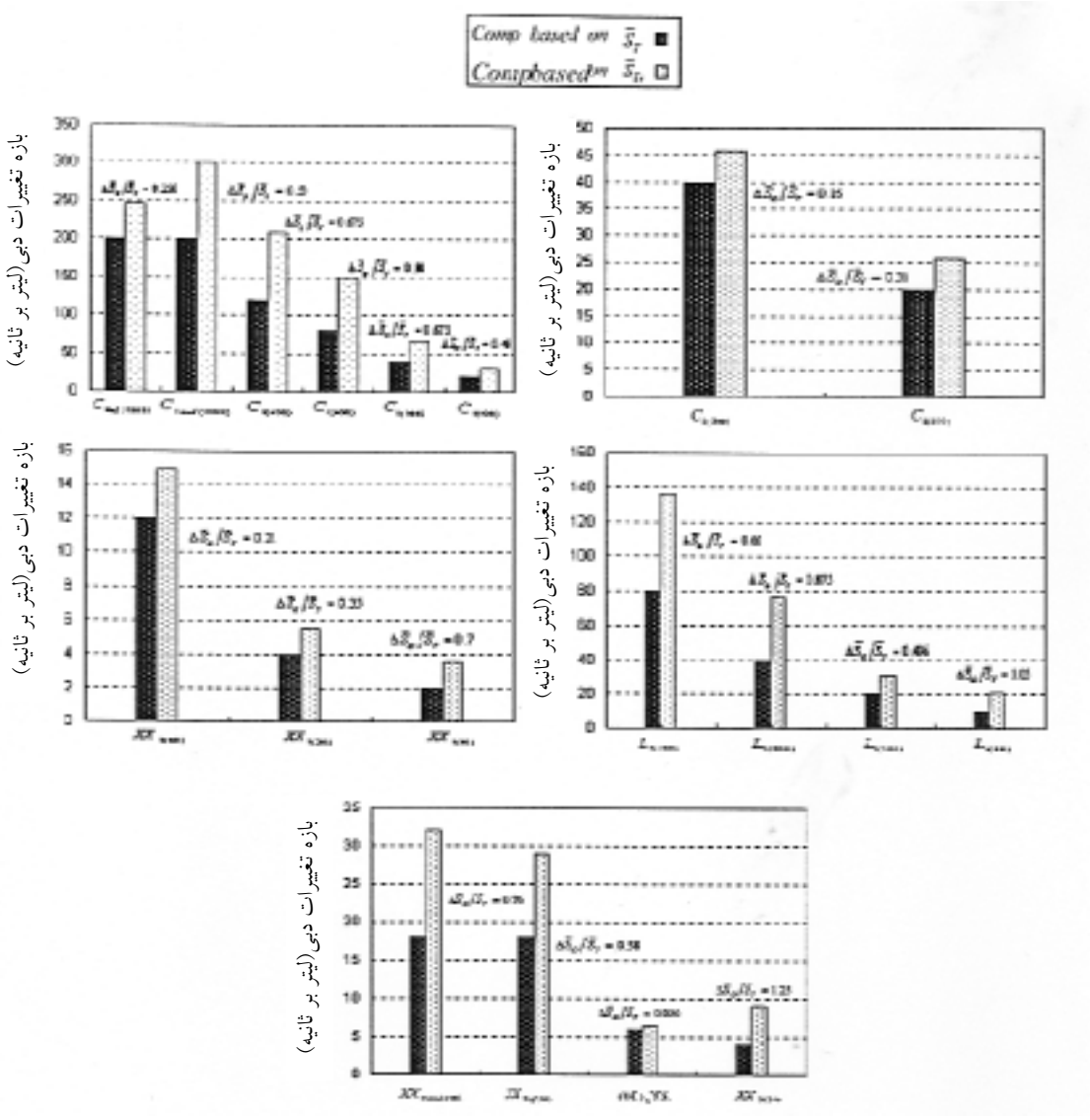
شکل۷. مقایسه مقادیر کمّی حساسیت هیدرولیکی دریچه‌ها و مدول‌های مورد مطالعه در شرایط بهره‌برداری

کـه بـا افزایش دبی تحویلی همراه است، می‌گردد. این مدول‌ها دبـی بیشـتری را نسبت به آنچه در شرایط تئوری برایشان پیش بینـی شـده تحویـل کشاورزان می‌دهند. بدین ترتیب کشاورزان نواحـی بالادست شبکه به دلیل عملکرد نامناسب مدول‌ها میزان آب بیشـتری نسبت به آب خریداری شده که بر اساس وضعیت تئوری مدول‌ها محاسبه و خریداری می‌شود، دریافت می‌نمایند. ایـن تعـداد از کشـاورزان از روند توزیع جریان در سطح شبکه اظهار رضایت داشته که دلیل آن کاملا روشن است. این موضوع در بازدیدهـای میدانـی از شبکه‌های آبیاری ورامین، سفیدرود و قزوین که از این مدول‌ها در توزیع آب استفاده می‌کنند بارها از طرف بهره‌برداران عنوان می‌شد.

تغیـیر حساسـیت مـدول‌ها در شرایط بهره برداری، تغییر در عملکـرد آنهـا و اخـتلال در فرآیند توزیع جریان در شبکه را به دنبـال خواهـد داشـت. به بیان دیگـر اختلال در فـرایند توزیع

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-11]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1383.8.3.10.0]



شکل۸. مقایسه بازه تغییرات دبی شرایط تئوری و بهره‌برداری مدول‌های مورد بررسی

جـریان نتـیجه ترکیـب آثار ناشی از تغییر حساسیت مدول‌ها و مـیزان جـریان تحویلـی در طـول شـبکه اسـت. ایـن تغییرات، عملکـرد توزیـع را در طـول فصـل آبـیاری مـتأثر مـی‌نمـاید، مشـکلات جـدی در اواخـر فصـل آبـیاری خود نمایی می‌کند. افزایش نیاز آبی و کمبود میزان ذخیره آبی شبکه در اواخر فصل آبـیاری از طرفـی و وجـود اخـتلال در فرآیند توزیع جریان که موجـب عـدم عدالـت در توزیـع مـی‌گـردد از طرف دیگر، در مواقعی باعث نرسیدن آب به انتهای شبکه شده و کشاورزان این نواحی را با مشکلات زیادی مواجه می‌سازد.

نتیجه‌گیری

بـه طـور کلی نتایج به دست آمده از این پژوهش را می‌توان در بندهای زیر خلاصه نمود:

۱. مقـدار کمّـی حساسـیت هیدرولیکی مدول‌های تیغه‌ای به دو پارامـتر محـدوده تغیـیرات عمـق در نواحی ارتفاعی چندگانه و حساسـیت هـر یـک از ایـن نواحـی بسـتگی دارد. به بیان دیگر حساسـیت مـدول تابعـی اسـت از سـاختار فیزیکـی سـازه و هیدرولـیک جـریان و بدین ترتیب کلیه عواملی که بر هر یک از دو عـامل فـوق تأثـیر گـذار باشند، بر حساسیت مدول نیز موثر

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-11]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1383.8.3.10.0]

خواهند بود.

۲. حساسیت هیدرولیکی مدول‌های تیغه‌ای در شرایط بهره‌برداری نسبت به مقادیر محاسبه شده تئوری، تغییرات قابل توجهی می‌نماید. این شاخص در بعضی موارد بیش از ۱۰۰ درصد افزایش نشان می‌دهد. تغییر حساسیت هیدرولیکی مدول‌ها، نشان دهنده تفاوت بازهٔ تغییرات دبی نسبت به مقدار گزارش شده کارخانه طراح مدول‌ها و به تعبیری پایین بودن دقت دبی برآوردی از گراف‌های تیپ است. اختلاف این بازه در تعدادی از دریچه‌های مدول‌های مورد بررسی نسبت به شرایط تئوری، بیش از دو برابر اختلاف نشان می‌دهد.

۳. به منظور بهره‌گیری از مدل حساسیت هیدرولیکی سازه‌های آبیاری در رفتارسنجی جریان، باید حساسیت واقعی سازه و سیستم در حالت بهره‌برداری محاسبه گردد. در این رابطه واسنجی آبگیرها ضروری می‌نماید. مدول‌های تیغه‌ای علی‌رغم حساسیت پایین نسبت به تغییرات و نوسانات عمق جریان (در مقایسه با سایر انواع آبگیرها)، درشرایط بهره برداری و تئوری دارای عملکرد یکسانی نبوده و از این رو لزوم واسنجی جریان و محاسبه حساسیت واقعی آنها ضروری است. محاسبه مقدار کمّی حساسیت این سازه با استفاده از روابط ارائه شده در این پژوهش امکان پذیر خواهد بود.

٤. با توجه به عدم وجود اطلاعات فنی کافی جهت طراحی، ساخت و حتی اجرای مدول‌های تیغه‌ای و تولید این سازه توسط چند کارگاه نه چندان تخصصی داخلی و مضاف بر آن وضعیت بهره برداری نه چندان مطلوب شبکه‌های آبیاری کشور، تردید در دقت مورد انتظار برآورد دبی این سازه با استفاده ازگراف‌های تیپ ارائه شده کارخانه طراح دور از انتظار نیست. این موضوع نیز لزوم انجام کالیبراسیون و محاسبه حساسیت واقعی این سازه‌ها را به منظور بهینه نمودن وضعیت بهره‌برداری و نیل به توزیع و تحویل عادلانه، طی هر چند سال بهره برداری ضروری می‌نماید.

منابع مورد استفاده

۱. رضوی نبوی، س. م. ۱۳۷۳. ضرایب تجربی در دریچه‌های نیرپیک، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

۲. وزارت برنامه و بودجه. ۱۳۶۷. ضوابط و معیارهای فنی شبکه‌های آبیاری و زهکشی. (نشریه ۱۰۶).

3. 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.
4. Alsthom. F. 1971. Technical Brochures: Distributors, Amil & Avio & Avis Gates. France.
5. Burt,C. M., S. Styles. 1998. Modern Water Control and Management Practies in Irrigation: Impact on Performance, Proceedings of the Fifth International ITIS Network Meeting on Modernization of Irrigation System Operations, India, 28-30 October.
6. Delft Hydraulic Lab. 1989. Water Control Systems and Irrigation Structures.
7. Goussard, J. 1993. Automation of Canal Irrigation Systems. ICID Pub., New Delhi.
8. Goussard, J. 2000., Canal Operation Simulation Models. ICID Pub, New Delhi.
9. Horst, L. 1983. Irrigation Systems, Internal Report, Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
10. Mahbub, S. I., N. D. Gulati. 1951. Irrigation Outlets. Atma Ram, Delhi, India.
11. Renault,D., H. M. Hemakumara. 1999. Irrigation Offtakes Sensitivity. J. Irrig. and Drain. 125(3): 132-136.
12. Renault, D. 2000. Re-Engineering Irrigation Management and System Operation, Agric. Water Mgmt. 47: 24-226.
13. Renault,D. 2000. Aggregated Sensitivity Indicators of Irrigation Systems Hydraulic Behaviour. Agric. Water Mgmt. 43 (2): 151-171.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-11]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1383.8.3.10.0]