

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

علی اصغر منتظر، صلاح کوچک زاده، عبدالمجید لیاقت و محمدحسین امید<sup>۱</sup>

### 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 کمی 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 کمی حساسیت سازه، تغییر در بازه عملکرد سازه را پیامد شده و مشکلاتی را در فرآیند توزیع جریان در سطح شبکه به وجود 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، آنالیز حساسیت، بهره‌برداری، سازه آبیاری، مدول تیغه‌ای

### مقدمه

کلیدی ایفا می‌نمایند. شرایط مناسب تنظیم و توزیع جریان در بهره‌برداری، 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

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

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

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 Mike-11, Modis, Sobek, Regvar, Canvar, Canalman, Icss, Procan, Carima, Canalcad و Crue اشاره نمود (۸).

وجود مدل‌های شبیه ساز علی‌رغم توانایی‌های قابل توجه در پیش بینی وضعیت جریان، به دلیل 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 شیوه بینابینی است، ما بین شبیه‌سازی ساده و محدود براساس معادلات جریان دایمی و شبیه‌سازی پیچیده و کارآ 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 آبیگرها (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 آبیگر به تغییرات نسبی دبی ورودی به کانال اصلی، روند انتشار نوسانات دبی را در طول کانال مطالعه کرد (۹). آلبینسون بررسی‌هایی روی حساسیت سازه‌های آبیگر 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 ماهاولیل 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 آبیگر به تغییرات عمق آب در بالادست آبیگر، حساسیت تغییرهای دبی به سطح مقطع نسبی جریان، حساسیت انتقال و حساسیت دبی به میزان تنظیم سازه را نام برد.

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

(یک و یا دو تیغه) با نام‌های  $X_i, XX_i, L_i, C_i$  و  $CC_i$  شناخته می‌شوند که  $i$  تعداد تیغه‌های مدول می‌باشد [۷]. مدول‌های سری  $CC_i$  معمولاً در شبکه‌های آبیاری کمتر کاربرد داشته و معمولاً در آبدگیری‌های با شدت جریان بالا (سدها) استفاده می‌شوند و به همین علت در این پژوهش نیز مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. مدول‌های تیغه‌ای در ایران با نام مدول‌های روزنه‌ای نیرویک (Neyrpic) شناخته می‌شوند.

این پژوهش با هدف تدوین و ارائه معادلات حساسیت هیدرولیکی مدول‌های تیغه‌ای و بررسی تأثیر تغییرات کمی حساسیت این سازه در شرایط بهره‌برداری صورت گرفت.

### مواد و روش‌ها

ارائه روابط محاسبه حساسیت هیدرولیکی مدول‌های تیغه‌ای رفتار هیدرولیکی جریان از سازه‌های آبدگیر و تنظیم کننده، متأثر از دو مرحله عبور جریان از سازه (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).

$$q = aA_{(w)}(H_{US} - H_{DS})^\alpha \quad [2]$$

$$q = b(H_{US} - H_{REF})^\beta \quad [3]$$

در روابط فوق  $q$  دبی عبوری از سازه،  $A_{(w)}$  سطح مقطع جریان که به عنوان تابعی از میزان تنظیم یا بازشدگی ( $W$ ) بیان می‌شود،  $a$  و  $b$  ضرایب رابطه دبی،  $H_{US}$  عمق آب در کانال اصلی بالادست سازه،  $H_{DS}$  عمق آب در کانال فرعی پایین دست سازه،  $H_{REF}$  ارتفاع سطح مرجع ثابت که می‌تواند کف کانال و یا رقوم تاج سرریز باشد و  $\alpha$  و  $\beta$  ضرایب توانی رابطه دبی می‌باشند.

در شرایط جریان آزاد از سازه، رابطه ۲ حذف شده و تنها معادله (۲) بر وضعیت جریان حاکم می‌باشد.  $H_{DS}$  در جریان از روی سازه (Overshot Flow) به عنوان عمق آب روی تاج و در جریان از زیر سازه (Undershot Flow) به عنوان عمق جریان در

کانال) و استخراج چند رابطه تحلیلی در این مقوله وارد مرحله جدیدتری گردیده است (۱۳). هم اکنون مبانی تئوریک آن در حال توسعه بوده و مدل بهره برداری کانال‌ها براساس اصول حساسیت سنجی سازه‌ها در حال تدوین می‌باشد.

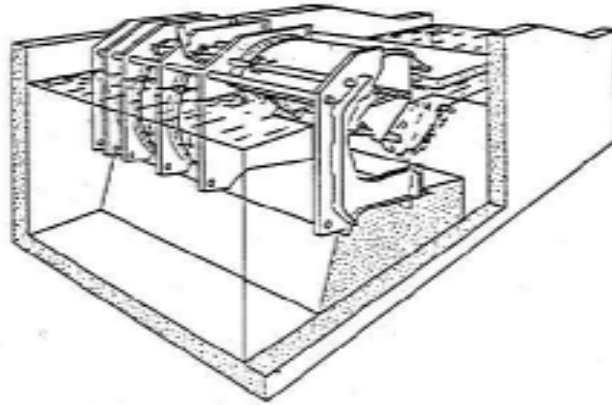
یکی از علائم مدرن بودن شبکه‌های آبیاری، وجود شرایط کنترلی مناسب در تنظیم و توزیع میزان جریان تحویلی به بهره برداران است. مدول‌های تیغه‌ای (Baffle Modules) از جمله مناسب‌ترین ابزارتوزیع جریان بوده که امروزه در سطوح مختلف بهسازی و مدرنیزاسیون شبکه‌ها مطرح و توصیه می‌شوند. این توزیع کننده‌ها از پذیرش بالایی در بین متولیان امور شبکه‌ها و بهره برداران محلی برخوردار می‌باشند.

مدول‌های تیغه‌ای شامل یک اسکلت فلزی استاندارد بوده که به تعدادی خروجی موازی با پروفیل طولی یکسان تقسیم می‌شوند. بر روی هر یک از مقاطع خروجی، یک یا دو تیغه فلزی نصب شده که هر خروجی را به صورت یک روزنه با سطح مقطع خروجی قابل تنظیم تبدیل می‌کند. در این مقاله به هر یک از این خروجی‌ها یک دریچه اطلاق می‌گردد. شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب شمای یک مدول تیغه‌ای نوع و پروفیل طولی جریان در یک دریچه فرضی از همین نوع مدول را نمایش می‌دهند (۷).

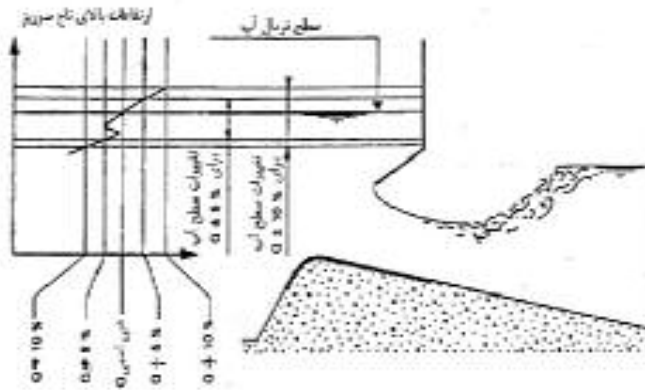
بسته به مقدار عمق جریان بالادست مدول، سه وضعیت هیدرولیکی متفاوت برای جریان عبوری از این سازه به وقوع می‌پیوندد (۴ و ۶).

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

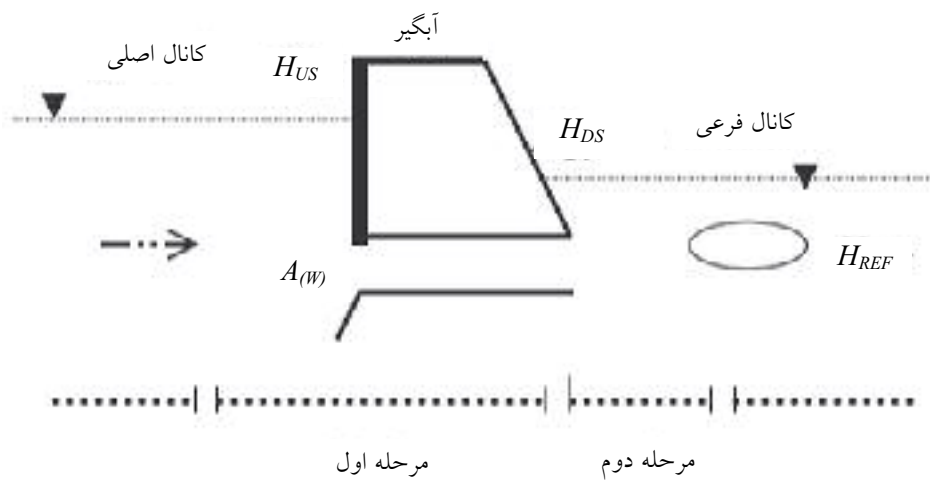
مدول‌ها، در پنج سری با دبی‌های ویژه ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ lit.s.dm طراحی شده‌اند. این پنج سری بسته به تعداد تیغه‌ها



شکل ۱. شمایی از یک مدول تیغه‌ای نوع  $L_1$



شکل ۲. پروفیل طولی جریان در یک دریچه از مدول نوع یک تیغه‌ای



شکل ۳. وضعیت جریان در سازه آبگیر

تغییرات دبی مدول‌ها، به ترتیب در سه و پنج محدوده هیدرولیکی مختلف (نواحی ارتفاعی) قابل بررسی است. بازه مجاز تغییرات دبی مدول‌ها معادل ۲۰ درصد دبی اسمی مدول در نظر گرفته شد. نواحی ارتفاعی در مدول‌های یک تیغه‌ای با نام‌های I, II, III و در مدول‌های دو تیغه‌ای با نام‌های I, II, III, IV و V نام‌گذاری گردیدند. شکل ۴ تفکیک این نواحی را روی منحنی‌های دبی - عمق جریان نمایش می‌دهد. مناسب‌ترین روابط برآزش شده بر گراف‌های تیپ در هر ناحیه ارتفاعی و برای هر نوع از مدول‌ها با دقت بسیار تعیین شده و در جدولی در بخش نتایج ارائه گردید.

مقدار کمی حساسیت (شرایط تئوری) هر یک از نواحی ارتفاعی مدول‌های مختلف با استفاده از روابط دبی - عمق جدول مذکور و رابطه (۷) قابل محاسبه هستند. حساسیت در هر یک از نواحی ارتفاعی به صورت  $S_j$  نمایش داده شد که اندیس  $j$  بیانگر ناحیه ارتفاعی مربوطه می‌باشد.

در این پژوهش مقدار حساسیت در پیچه‌های مدول‌های تیغه‌ای، به صورت ترکیبی از حساسیت نواحی ارتفاعی مختلف آن در نظر گرفته شد. بر این اساس و به منظور محاسبه حساسیت هیدرولیکی مدول‌ها، معادلات بسیاری تعریف و مورد آزمون قرار گرفتند. تعدادی از این معادلات که از دقت مناسب‌تری در برآورد مقدار حساسیت برخوردار می‌باشند، در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

در روابط فوق  $S_1$ ،  $S_2$ ،  $S_3$ ،  $S_4$  به ترتیب مقدار حساسیت نواحی ارتفاعی اول، سوم و پنجم،  $\Delta H_{US(j)}$  اختلاف عمق جریان بالادست در پیچه بین حداقل و حداکثر مقدار عمق در ناحیه زام (محدوده تغییرات عمق ناحیه زام)،  $S_j$  مقدار حساسیت ناحیه زام،  $A_j$  سطح زیر منحنی دبی - عمق در ناحیه ارتفاعی زام،  $\Delta q'$  و  $\Delta H'_{US}$  به ترتیب تغییرات دبی و تغییرات عمق بالادست در پیچه مدول بین حداقل عمق ناحیه ارتفاعی اول و حداکثر عمق ناحیه ارتفاعی سوم (پنجم)  $q_1$  دبی به ازای حداقل عمق جریان در ناحیه ارتفاعی اول و  $\bar{S}_0$  مقدار حساسیت هیدرولیکی در پیچه مورد نظر در مدول می‌باشد.

محور مرکزی روزنه یا دریچه در نظر گرفته می‌شود. جریان در مدول‌ها به صورت ترکیبی از جریان از رو و از زیر سازه صورت می‌گیرد.

با جمع روابط ۲ و ۳ و مشتق‌گیری نسبت به متغیر  $H_{US}$  و فرض ثابت بودن  $H_{REF}$ ، رابطه ۴ به دست می‌آید.

$$dH_{US} = \left[ \frac{\gamma}{\alpha} (H_{US} - H_{DS}) + \frac{\gamma}{\beta} (H_{DS} - H_{REF}) \right] \frac{dq}{q} \quad [4]$$

با تعریف  $H_E$  به صورت رابطه ۵ و جای‌گذاری در رابطه فوق، رابطه ۶ به دست می‌آید.

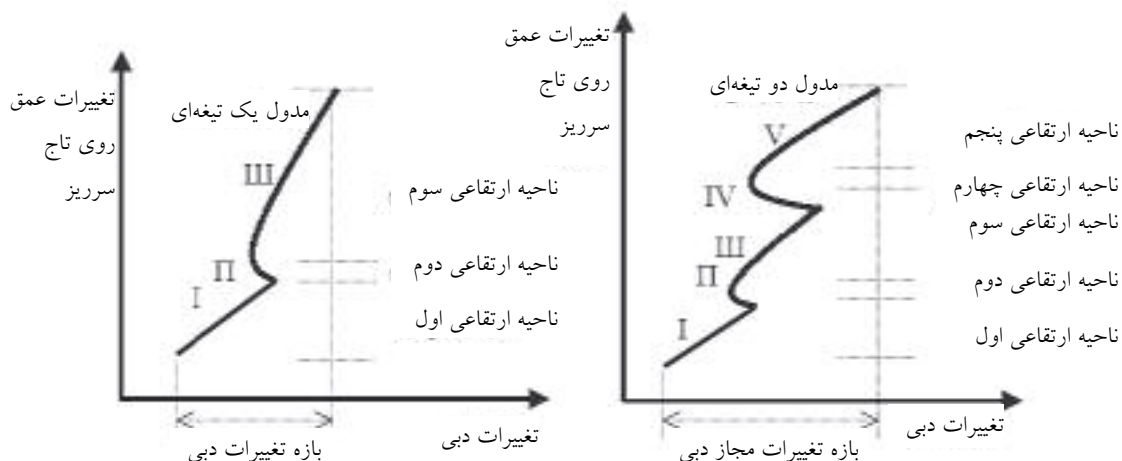
$$H_E = (H_{US} - H_{DS}) + \frac{\alpha}{\beta} (H_{DS} - H_{REF}) \quad [5]$$

$$dH_{US} = \frac{H_E}{\alpha} \cdot \frac{dq}{q} \quad [6]$$

$H_E$  مقدار افت بار معادل می‌باشد. افت بار معادل از یک آبگیر ویژه، برابر با افت بار همان نوع آبگیر با همان مقدار حساسیت اما تحت شرایط جریان آزاد در نظر گرفته می‌شود. مقدار  $H_E$  در شرایط جریان آزاد معادل  $H_{US} - H_{DS}$  خواهد بود. با توجه به روابط ۱ و ۶، حساسیت جریان تحویلی به تغییرهای مطلق عمق جریان در بالادست سازه آبگیر (حساسیت هیدرولیکی سازه) از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد.

$$S = \frac{\frac{dq}{q}}{dH_{US}} = \frac{\alpha}{H_E} \quad [7]$$

به منظور تحلیل حساسیت مدول‌های تیغه‌ای و ارائه شاخص مناسب ارزیابی حساسیت این نوع خاص از آبگیرها، وجود روابط هیدرولیکی دبی - عمق آب مدول‌ها ضروری است. در این پژوهش برای محاسبه روابط مذکور در حالت تئوری از گراف‌های ارائه شده توسط کارخانه طراح مدول‌ها (گراف‌های تیپ) استفاده گردید. گراف‌های مذکور برای هر سری از مدول‌های یک تیغه‌ای  $(C_1, L_1, XX_1, X_1)$  و دو تیغه‌ای  $(C_2, L_2, XX_2, X_2)$  به صورت جداگانه ارائه گردیده است (۶). جریان عبوری از مدول‌های یک و دو تیغه‌ای در بازه مجاز



شکل ۴. تفکیک نواحی ارتفاعی مختلف در مدول‌های یک و دو تیغه‌ای

جدول ۱. روابط مورد آزمون برای محاسبه حساسیت هیدرولیکی مدول‌های تیغه‌ای

مدول‌های دو تیغه‌ای	مدول‌های یک تیغه‌ای	عنوان رابطه
$\bar{S}_0 = S_5$	$\bar{S}_0 = S_3$	A
$\bar{S}_0 = \frac{S_1 + S_5}{2}$	$\bar{S}_0 = \frac{S_1 + S_3}{2}$	B
$\bar{S}_0 = \frac{\sum_{j=1}^5 S_j}{5}$	$\bar{S}_0 = \frac{\sum_{j=1}^3 S_j}{3}$	C
$\bar{S}_0 = \frac{\sum_{j=1}^5 \Delta H_{US(j)} \cdot S_j}{\sum_{j=1}^5 \Delta H_{US(j)}}$	$\bar{S}_0 = \frac{\sum_{j=1}^3 \Delta H_{US(j)} \cdot S_j}{\sum_{j=1}^3 \Delta H_{US(j)}}$	D
$\bar{S}_0 = \frac{\Delta q' / q_1}{\Delta H'_{US}}$	$\bar{S}_0 = \frac{\Delta q' / q_1}{\Delta H'_{US}}$	E
$\bar{S}_0 = \frac{\sum_{j=1}^5 S_j \cdot A_j}{\sum_{j=1}^5 A_j}$	$\bar{S}_0 = \frac{\sum_{j=1}^3 S_j \cdot A_j}{\sum_{j=1}^3 A_j}$	F

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

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

ارتفاعی دارا هستند. در جدول ۳ 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 کمی 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 حاصل ضرب مقدار کمی حساسیت (محاسبه شده از معادلات A تا F) در مقدار عددی تغییرات عمق جریان بالادست مدول (از جدول 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 می‌باشد نسبت به منحنی مجاز که مقدار آن برای کلیه مدول‌ها ثابت و معادل ۲۰ درصد است، محاسبه شد. مقدار این شاخص برای معادلات A تا F به ترتیب ۰۶،۶۱، ۰۲،۶۸، ۰۱،۱۸، ۰۳،۴، ۰۸،۸ و ۰۷،۱۱ می‌باشد. حداقل مقدار جذر میانگین مربعات، مربوط به داده‌های معادله D بوده که بیانگر مناسب‌ترین 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

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 جدول ۲ 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 به صورت 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.

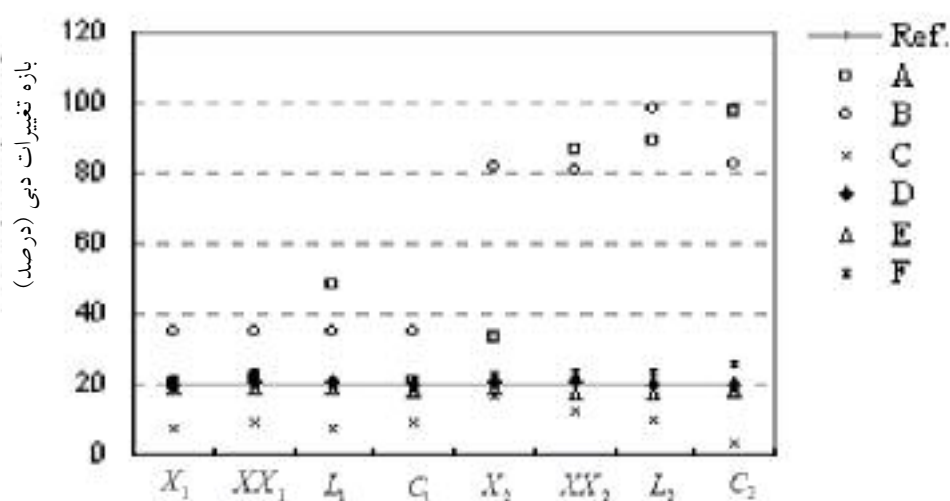
در جدول ۲ منظور از دریچه  $C_{1left}(\dots)$ ، دریچه با دبی اسمی ۱۰۰۰ لیتر بر ثانیه واقع شده در بخش کناری مدول مورد نظر است.  $C_{mid}(\dots)$  نیز همین نوع دریچه واقع شده در بخش میانی مدول است. هر دو دریچه مربوط به مدول تیپ  $G_1$  می‌باشند.

## 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 - عمق در هر یک از این شرایط است. در شرایط تئوری این روابط از برآزش مناسب‌ترین روابط بر گراف‌های تیپ و در شرایط بهره‌برداری از برآزش بهترین روابط بر داده‌های واسنجی جریان پنج مدول از شبکه آبیاری دشت قزوین استخراج گردیدند. روابط شرایط تئوری و بهره برداری به ترتیب در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است. این روابط حداکثر ضرایب هم‌بستگی را بین کلیه روابط قابل انطباق در هر ناحیه

جدول ۲. مشخصات و موقعیت مدول‌ها و دریاچه‌های واسنجی شده (۱)

سری آزمایش	نوع مدول	ظرفیت اسمی (لیتر بر ثانیه)	موقعیت مدول	دریاچه‌های واسنجی شده
اول	$C_1$	۱۹۰۰	محل آبیگری کانال $L_5$ از کانال اصلی	$C_{1lef(1000)}$ , $C_{1mid(1000)}$ , $C_{1(600)}$ , $C_{1(400)}$ , $C_{1(200)}$ , $C_{1(100)}$
دوم	$C_1$	۳۷۰۰	محل آبیگری کانال $L_6$ از کانال اصلی	$C_{1(200)}$ , $C_{1(100)}$
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 $L_{۷۳}$ از انشعاب کانال $L_۷$	$L_{1(40)}$ , $L_{1(20)}$ , $L_{1(10)}$ , $L_{1(50)}$ , $XX_{1lef(90)}$
پنجم	$XX_۲$	۴۵۰	محل آبیگری $M 101A$ از کانال اصلی	$XX_{۲mid(90)}$ , $XX_{۲(30)}$ , $XX_{۲(20)}$



شکل ۵. مقایسه بازه تغییرات دبی مدول‌های مختلف بر اساس حساسیت محاسبه شده از روابط مورد آزمون

در این معادله حساسیت هیدرولیکی یک دریاچه 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.

در رابطه فوق تعداد نواحی ارتفاعی مدول (۳ یا ۵ ناحیه) می باشد. مقادیر حساسیت هیدرولیکی مدول‌های مختلف در شرایط تئوری با استفاده از رابطه فوق محاسبه گردیده و نتایج در شکل ۶ ارائه شدند. در نمودارهای این شکل محور افقی نوع مدول و محور عمودی مقدار کمی 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  $S_۴$  به ترتیب حساسیت نواحی ارتفاعی اول تا

$$\bar{S}_0 = \frac{\sum_{j=1}^n \Delta H_{US(j)} \cdot S_j}{\sum_{j=1}^n \Delta H_{US(j)}} \quad [۸]$$

شده نیز همانند نمودارهای شکل ۶ بیانگر حساسیت‌های نواحی ارتفاعی و حساسیت هیدرولیکی محاسبه شده برای درجه‌های مدول‌ها می‌باشند.

بررسی این نمودارها نشان می‌دهد در شرایط بهره‌برداری درجه‌های مختلف یک مدول دارای مقدار حساسیت متفاوتی هستند. بنابراین نمی‌توان به سادگی در مورد مقدار کمی حساسیت مدول اظهار نظر نمود. حساسیت یک مدول به حساسیت درجه‌های مختلف آن بستگی تام دارد. بنابراین منطقی است که حساسیت در قالب یک رابطه وزنی برحسب حساسیت درجه‌های آن بیان شود. تنها مشخصه کمی که درجه‌های موجود در یک مدول را از یکدیگر متمایز می‌سازد، ظرفیت اسمی (Nominal Capacity) درجه‌هاست. ظرفیت اسمی واژه‌ای است که کارخانه طراح این سازه برای میزان دبی طراحی درجه‌ها 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 درجه‌های 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 مقادیر حساسیت درجه‌های مدول بوده که ضرایب وزنی آن ظرفیت اسمی درجه‌ها می‌باشند. این رابطه به صورت زیر قابل بیان است.

$$\bar{S}'_M = \frac{\sum_{k=1}^m \bar{S}_{o(k)} \times q_{n(k)}}{\sum_{k=1}^m q_{n(k)}} \quad [9]$$

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

سوم این مدول‌ها بوده که با استفاده از معادلات جدول ۳ و رابطه ۷ محاسبه گردیده و مقدار  $\bar{S}_0$  حساسیت هیدرولیکی مدول بوده که با استفاده از رابطه ۸ محاسبه شده است. مقدار  $\bar{S}_0$  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  $\bar{S}_0$  حساسیت هیدرولیکی مدول و پنج مقدار دیگر مربوط به حساسیت هیدرولیکی نواحی ارتفاعی پنج‌گانه می‌باشند.

بررسی نتایج محاسبات و نمودارهای شکل ۶ نشان می‌دهد مدول نوع  $X_1$  با مقدار کمی حساسیت هیدرولیکی  $285,0$ ، حساس‌ترین مدول تیغه‌ای نسبت به تغییرات عمق جریان است. حساسیت  $285,0$  به مفهوم اعمال  $5,28$  درصد تغییرها در دبی تحویلی این مدول به ازای  $10$  سانتی‌متر تغییرات عمق جریان می‌باشد. مقدار حساسیت مدول‌های یک تیغه‌ای، از مدول نوع  $X_1$  با افزایش ظرفیت اسمی مدول، روند کاهشی داشته به طوری که حساسیت مدول  $C_1$ ،  $7,4$  برابر از مقدار حساسیت مدول  $X_1$  کمتر است. این روند با همان نسبت  $7,4$ ، بین مدول  $C_7$  و  $X_7$  برقرار است. حساسیت هیدرولیکی هر نوع از مدول‌های یک تیغه‌ای،  $5,2$  برابر حساسیت هیدرولیکی مدول دو تیغه‌ای هم نوع (مثلاً  $X_1$  نسبت به  $X_7$ ) می‌باشد. براین اساس مدول نوع  $C_7$  دارای حساسیت هیدرولیکی  $8,11$  برابر کمتر از مدول نوع  $X_1$  است. در حالت تئوری کلیه درجه‌های مدول، دارای مقدار حساسیت هیدرولیکی یکسانی بوده و می‌توان حساسیت مدول را معادل حساسیت هر درجه از آن مدول فرض نمود.

مقادیر حساسیت درجه‌های هر یک از مدول‌های مورد بررسی در شرایط بهره‌برداری با استفاده از معادلات جدول ۴ و روابط (۷) و (۸) محاسبه گردیده و نتایج در شکل ۷ ترسیم شدند. هر یک از نمودارهای این شکل مربوط به درجه‌های مختلف یکی از مدول‌های معرفی شده در جدول ۲ می‌باشد. در نمودارهای این شکل محور افقی مربوط به نوع درجه‌های مدول‌های مورد مطالعه و محور عمودی مقدار کمی شاخص حساسیت را نشان می‌دهد. شاخص‌های حساسیت مشخص

جدول ۳. ضرایب معادلات دبی تئوری انواع مدول‌ها در نواحی ارتفاعی مختلف

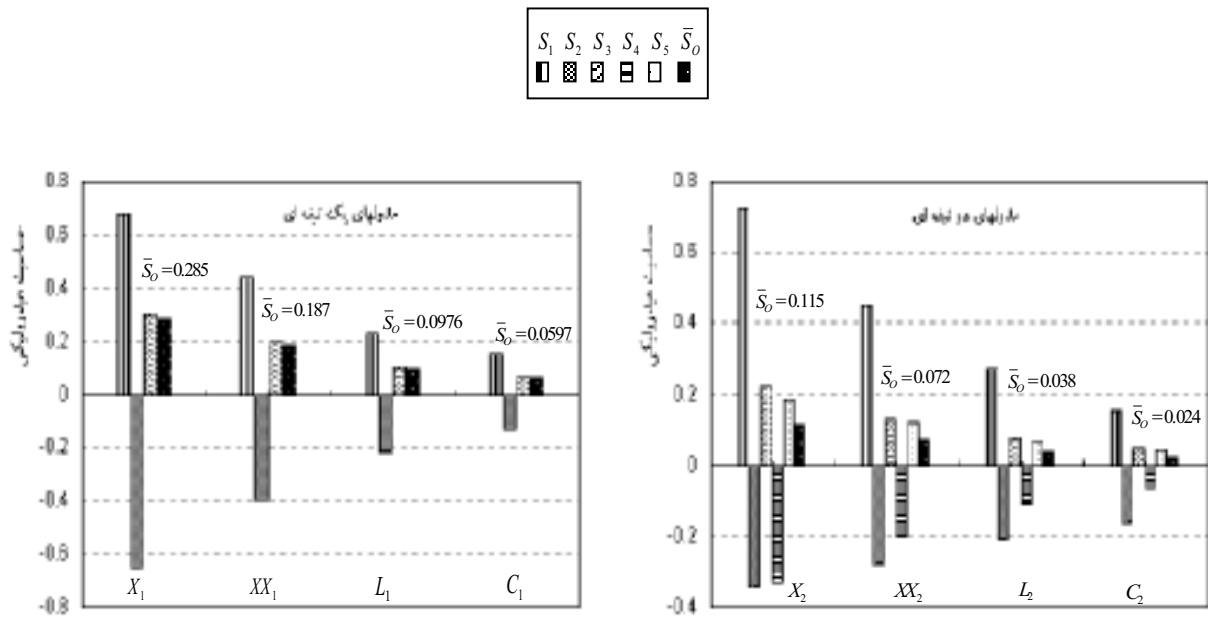
$$q = \left( \frac{q_n}{A} \right) (BH_{US}^C + DH_{US} + E)$$

ضرایب					محدوده تغییرات عمق جریان (نواحی ارتفاعی) $\leq H_{US} <$ cm		نوع مدول
E	D	C	B	A			
.	.	۰/۹۱۳۷	۰/۳۳۷	۵	۱۴/۱۵	۱۲/۸	X <sub>۱</sub>
۱۲۱/۲۶	-۱۵/۸۲۲	۲	۰/۵۳۷۲	۵	۱۴/۸	۱۴/۱۵	
۷۲۸۳۴	-۰/۲۹۲۲	۲	۰/۰۱۲۷	۵	۱۹/۹	۱۴/۸	
.	.	۰/۹۳۳۹	۰/۵۴۲۲	۱۰	۲۲/۱	۲۰/۲	XX <sub>۱</sub>
۱۸۵/۴۶	-۱۵/۱۹۴	۲	۰/۳۲۸۰	۱۰	۲۳/۱	۲۲/۱	
۱۳/۲۲۹	-۰/۴۲۱۵	۲	۰/۰۱۱۲	۱۰	۳۱/۲	۲۳/۱	
.	.	۰/۹۰۵۵	۱/۷۱۲۳	۵۰	۴۰/۸	۳۷	L <sub>۱</sub>
۱۱۰۰/۲	-۴۹/۵۰۳	۲	۰/۵۸۲	۵۰	۴۲/۵	۴۰/۸	
۶۵/۱۱۱	-۱/۰۸۳۹	۲	۰/۰۱۵۶	۵۰	۵۸	۴۲/۵	
.	.	۰/۹۴۸	۱/۸۸۷۸	۱۰۰	۶۴/۸	۵۹	C <sub>۱</sub>
۲۱۳۹/۷	-۶۰/۵۰۱	۲	۰/۴۳۷۵	۱۰۰	۶۷/۸۵	۶۴/۸	
۱۲۸۲۷	-۱/۳۱۷۴	۲	۰/۰۱۲۲	۱۰۰	۹۲	۶۷/۸۵	
.	.	۰/۹۷۸۲	۰/۳۷۱۷	۵	۱۴/۱۸	۱۲/۸	X <sub>۲</sub>
۱۵۹/۴۱	-۲۰/۹۶۲	۲	۰/۷۱۰۲	۵	۱۴/۹	۱۴/۱۸	
۷۳۷۵۲	-۰/۴۰۳۴	۲	۰/۰۱۵۲	۵	۱۹/۳۵	۱۴/۹	
۱۳/۷۱	-۰/۷۷۰۵	۲	۰/۰۱۲۱	۵	۲۲/۸	۱۹/۳۵	
۲/۴۶۰۱	.	۱	۰/۰۹۸۵	۵	۳۰/۸	۲۲/۸	
.	.	۰/۹۶۹۱	۰/۴۸۹۸	۱۰	۲۲/۲۵	۲۰/۲	XX <sub>۲</sub>
۲۱۲/۳۷	-۱۷/۳۵۹	۲	۰/۳۷۱۳	۱۰	۲۳/۵	۲۲/۲۵	
۱۵۰/۷۷	-۰/۵۳۶۵	۲	۰/۰۱۲۷	۱۰	۳۰/۵	۲۳/۵	
۳۳/۰۹۹	-۱/۱۹۳	۲	۰/۰۱۲۹	۱۰	۳۵/۸	۳۰/۵	
۲/۹۳۸۳	.	۱	۰/۱۲۵	۱۰	۴۸/۴	۳۵/۸	
.	.	۱/۰۵۰۵	۱/۰۰۵۲	۵۰	۴۱/۱	۳۷/۴	L <sub>۲</sub>
۱۵۰۷/۳	-۶۸/۱۶۸	۲	۰/۷۹۵۸	۵۰	۴۳/۲	۴۱/۱	
۷۹/۱۶۳	-۱/۶۱۲۳	۲	۰/۰۲۰۳	۵۰	۵۶	۴۳/۲	
۱۴۵/۷	-۲/۵۹۷۴	۲	۰/۰۱۶۷	۵۰	۶۶	۵۶	
۲۴/۸۱۲	.	۱	۰/۳۳۷۶	۵۰	۸۹/۲	۶۶	
.	.	۰/۹۷۲۵	۱/۷۱۰۴	۱۰۰	۶۵/۱	۵۹	C <sub>۲</sub>
۳۱۰۶۳	-۸۸/۸۷۳	۲	۰/۶۵۵۷	۱۰۰	۶۸/۳	۶۵/۱	
۱۵۳/۲۳	-۱/۸۸۵۹	۲	۰/۰۱۵۱	۱۰۰	۸۹/۴	۶۸/۳	
۳۳۸/۴۳	-۴/۲۳	۲	۰/۰۱۸۲	۱۰۰	۱۰۵/۴	۸۹/۴	
۴۹/۴۰۹	.	۱	۰/۴۲۵۳	۱۰۰	۱۴۲	۱۰۵/۴	

متغیرهای H<sub>US</sub> و q<sub>n</sub> به ترتیب عمق آب در بالا دست مدول و دبی اسمی دریچه می‌باشد. واحد دبی لیتر بر ثانیه است.

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<sub>۱(۲۰۰)</sub> آزمایش سری اول، مقدار حساسیت ناحیه ارتفاعی اول (S<sub>۱</sub>) معادل ۰/۱۹۶ بوده که نسبت به حالت تئوری ۰/۴۶ افزایش نشان می‌دهد. تیغه مدول در این دریچه پس از ۹ سانتی‌متر افزایش عمق جریان نسبت به حالت تئوری، عمل می‌نماید. محدوده ارتفاعی ناحیه سوم نیز

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 ارتفاعی بالاتر از آنچه در تئوری پیش بینی شده، عمل می‌نماید. پس از عمل نمودن تیغه‌هاست که وضعیت هیدرولیکی جریان تغییر می‌کند (جریان روگذر از سرریز به جریان زیرگذر



شکل ۶. مقایسه مقادیر کمی حساسیت هیدرولیکی مدول‌های تیغه‌ای در شرایط تئوری

در کنار مدول واقع شده دارای مقدار حساسیت بیشتری است. به‌عنوان مثال مقدار حساسیت دریچه  $C_{1mid}(\dots)$  واقع شده در بخش میانی مدول در آزمایش‌های سری اول معادل  $0.913$  بوده و حساسیت دریچه  $C_{1lef}(\dots)$  واقع شده در بخش کناری همین مدول معادل  $0.078$  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 ملاحظه‌ای می‌نماید. این تغییرات 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.

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

کاهش یافته و  $S_2$  که مقدار کمی آن منفی است، سه برابر کاهش می‌یابد. کلبه این تغییرها در جهت افزایش مقدار حساسیت هیدرولیکی این دریچه عمل نموده و مقدار آن را  $3.84$  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 کمی منفی است و کاهش ارتفاعی ناحیه 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 کمی 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

جدول ۴. ضرایب معادلات دبی دریاچه‌های مدول‌های واسنجی شده در شرایط بهره برداری  $q = (BH_{us}^c + DH_{us} + E)$

ضرایب				محدوده تغییرات عمق جریان (نواحی ارتفاعی) $\leq H_{us} < cm$		ظرفیت اسمی دریاچه (لیتر بر ثانیه)	نوع مدول	سری آزمایش
E	D	C	B					
•	•	۰/۹۳۵۳	۱۹/۹۴۷	۶۷/۸	۵۹			
۱۶۸۱۲	-۴۴۳/۳۷	۲	۳/۱۰۳۶	۷۲/۲	۶۷/۸	۱۰۰۰ (left)		
۲۱۴۲	-۳۴/۹۳۷	۲	۰/۲۶۰۲	۹۲	۷۲/۲			
•	•	۱/۴۴۷۶	۲/۳۲۰۹	۷۲	۵۹			
۳۷۶۳/۶	-۱۶۳/۸	۲	۱/۰۵۳۶	۷۶/۳	۷۲	۱۰۰۰ (middle)		
۱۳۷۶/۶	-۸/۲۸۲۷	۲	۰/۰۶۵	۹۲	۷۶/۳			
•	•	۱/۱۸۷۹	۴/۱۶۶	۷۴/۱	۵۹			
۷۵/۸۱	-۱۸/۶۲۹	۲	-۰/۱۴۲۹	۷۶/۸	۷۴/۱	۶۰۰		
۹۰۹/۰۳	-۸/۸۱۲۹	۲	۰/۰۷۴۴	۹۲	۷۶/۸		C <sub>1</sub>	۱
•	•	۱/۲۷۸۳	۱/۹۳۸۵	۷۳/۸	۵۹			
۲۴۸۸۷	-۵۱/۶۰۵	۲	۰/۳۲۶۸	۷۶	۷۳/۸	۴۰۰		
-۳۴۶/۷	۱۷/۰۲۱	۲	-۰/۰۸۷۶	۹۲	۷۶			
•	•	۱/۱۸۷۶	۱/۵۴۲۶	۷۴/۳	۵۹			
۳۹۴۹/۳	-۸۵/۷۰۹	۲	۰/۴۸۳۶	۷۵/۴	۷۴/۳	۲۰۰		
۱۲۱/۹	-۲/۱۸۲	۲	-۰/۰۰۵۵	۹۲	۷۵/۴			
•	•	۱/۲۸۶۷	۰/۵۵۴۹	۷۲/۳	۵۹			
۳۷۸۰/۵	-۹۷/۷۸۸	۲	۰/۶۵۵۶	۷۴/۱	۷۲/۳	۱۰۰		
۵۵/۹۹۱	-۱/۶۸۶	۲	-۰/۰۰۸۴	۹۲	۷۴/۱			
•	•	۱/۰۸۶	۲/۱۹۱۹	۷۱/۸	۵۹			
۱۳۴۸/۵	-۲۸/۱۲۵	۲	۰/۱۷۵	۷۵	۷۱/۸	۲۰۰		
۱۲۹/۸۹	-۱/۴	۲	-۰/۰۰۲۵	۹۲	۷۵		C <sub>1</sub>	۲
•	•	۱/۲۱۶۸	۰/۶۴۵۶	۷۳	۵۹			
۵۳۲۰/۴	-۱۳۸/۸۲	۲	۰/۹۲۵	۷۵/۸	۷۳	۱۰۰		
۵۴۷۳	-۱/۰۳۳۴	۲	-۰/۰۰۳۵	۹۲	۷۵/۸			
•	•	۱/۱۷۰۴	۱/۴۸۱	۲۳/۵	۲۰/۲			
۱۵۷/۱۳	-۷/۷۷	۲	۰/۱۵	۲۵/۴	۲۳/۵	۶۰		
۷۸/۵۶۱	-۲/۱۱۶	۲	۰/۰۵	۳۱/۲	۲۵/۴			
•	•	۱/۳۷۹۴	۰/۲۳۷۷	۲۳/۴	۲۰/۲			
-۱۸۲/۳۱	۱۷/۳۹۵	۲	-۰/۳۷۵	۲۴	۲۳/۴	۲۰		
-۷/۳۶۲	۱/۶۱۳۵	۲	-۰/۰۲۲	۳۱/۲	۲۴		XX <sub>1</sub>	۳
•	•	۱/۳۴۱۷	۰/۱۳۵۷	۲۳/۴	۲۰/۲			
۴۰/۸۶۴	-۲/۱۸۲۵	۲	۰/۰۳۷۵	۲۵/۰۵	۲۳/۴	۱۰		
-۲۷/۹۶	۲/۲۱۵	۲	-۰/۰۳۲۱	۳۱/۲	۲۵/۵			
•	•	۱/۳۶۶۸	۲/۰۸۷۵	۴۳/۸	۳۷			
۱۸۲۳/۴	-۶۴/۰۹	۲	۰/۷	۴۵	۴۳/۸	۴۰۰		
۲۹۰/۱۸	۰/۲۹۵	۲	۰/۰۲۷۲	۵۸	۴۵			
•	•	۱/۲۳۰۱	۱/۷۷۲۲	۵۰/۲	۳۷			
۱۵۰۰/۳	-۴۸/۱۳	۲	۰/۴۵	۵۳/۹	۵۰/۲	۲۰۰		
۲۶۰/۷۳	-۲/۹۱۳۳	۲	۰/۰۳۸۱	۵۸	۵۳/۹			
•	•	۱/۴۸۷	۰/۳۳۵۵	۴۸/۱	۳۷			
۱۵۴۱/۶	-۵۵/۹۴	۲	۰/۵۴۲۹	۵۲/۶	۴۸/۱	۱۰۰		
۲۳۹/۲۵	-۵/۳۳۵۸	۲	۰/۰۵۱۵	۵۸	۵۲/۶			
•	•	۱/۵۹۰۴	۰/۱۱۷۳	۴۸	۳۷			
۱۱۸/۵۵	-۲/۲۱۷۹	۲	۰/۰۱۷۹	۵۲	۴۸	۵۰		
۱۰۰/۲۴	۵/۰۶۵	۲	۰/۰۴۱۷	۵۸	۵۲		L <sub>1</sub>	۴

جدول ۴. ادامه

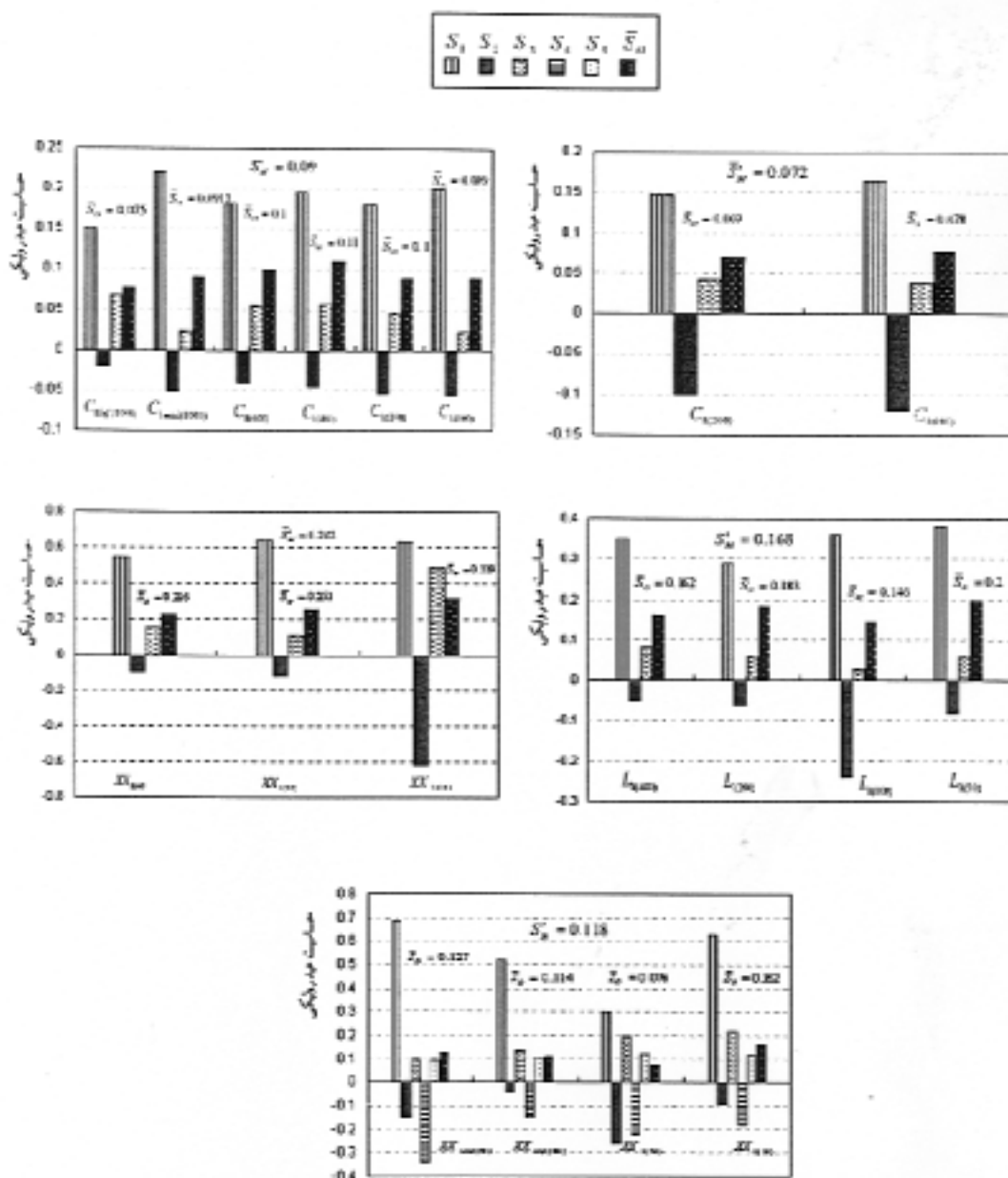
۰	۰	۱/۵۰۴	۰/۷۴۶۶	۲۴	۲۰/۲	۹۰ (left)	XX <sub>r</sub>	۵
۳۷۳/۹۶	-۲۱/۹۲۷	۲	۰/۴۱۷۵	۲۵/۳	۲۴			
۵۵۳	-۱/۵۵۹	۲	-۰/۰۱۰۹	۳۴/۴	۲۵/۳			
۹۵۴/۷۶	-۴۶/۳۲۹	۲	۰/۶۱۷۹	۳۶/۹	۳۴/۴			
۵۵/۷۸۶	۰	۱	۰/۸۴۶۴	۴۸/۴	۳۶/۹			
۰	۰	۱/۱۶۸۸	۲/۱۴۷۹	۲۳/۵	۲۰/۲	۹۰ (middle)		
-۱۷/۷۶۶	۹/۰۲۵	۲	-۰/۱۹۵۹	۲۴	۲۳/۵			
۷۵/۸۳۳	-۰/۲۰۳۶	۲	۰/۰۲۵	۳۱/۱	۲۴			
۲۳۵/۹	-۷/۳۲۵	۲	۰/۰۸۹۳	۳۶/۳	۳۱/۱			
۵۰/۲۱۵	۰	۱	۱/۰۳۵	۴۸/۴	۳۶/۳			
۰	۰	۰/۶۶۸۶	۳/۳۹۶	۲۵	۲۰/۲	۳۰		
-۱۳۴/۴۴	۱۳/۵۰۶	۲	-۰/۲۷۷	۲۶/۷	۲۵			
۴۴/۳۲۶	-۱/۵۹۳۶	۲	۰/۰۳۹۳	۳۰/۵	۲۶/۷			
۷۵/۳۵۴	-۱/۹۸۷۵	۲	۰/۰۱۹۶	۳۵/۹	۳۰/۵			
۱۴/۴۴	۰	۱	۰/۳۹۰۵	۴۸/۴	۳۵/۹			
۰	۰	۱/۴۲۱	۰/۲۱۳۵	۲۵	۲۰/۲	۲۰		
-۶۷/۵۱	-۳/۳۸۷۳	۲	۰/۰۶۱۷	۲۷/۱	۲۵			
-۳۲/۲	-۱/۰۴۲۳	۲	۰/۰۲۲	۳۱	۲۷/۱			
۸۰/۷۳۶	-۳/۲۹۴	۲	۰/۰۴۴	۳۵	۳۱			
۱۰/۰۰۷	۰	۱	-۰/۲۴۴۸	۴۸/۴	۳۵			

نسبت اختلاف مقدار حساسیت شرایط بهره برداری و تئوری به مقدار حساسیت تئوری است که برای هر یک از درجه‌های مورد بررسی محاسبه و روی نمودارهای شکل (۸) مشخص شده است. به‌عنوان مثال بازه تغییرات دبی ناشی از افزایش مقدار کمی حساسیت درجه C<sub>۱(۶۰۰)</sub> 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 ۶۷۵ درصد افزایش یافته که بسیار کمتر دقت پایین درجه مذکور در کنترل جریان خروجی است.

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

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 درجه مدول،  $\bar{S}_{0(TT)}$  حساسیت در شرایط بهره برداری،  $\bar{S}_{0(T)}$  حساسیت در حالت تئوری،  $\Delta H_{US(R)}$  مقدار تغییرات عمق جریان و  $q_n$  ظرفیت اسمی درجه مدول می‌باشد.

با استفاده از رابطه ۱۰ اختلاف بازه تغییرات دبی مدول‌های واسنجی شده با شرایط تئوری محاسبه گردیده و در شکل ۸ گزارش شده است. نمودارهای ارائه شده در این شکل، محور افقی درجه‌های مختلف مدول‌های مورد بررسی و محور عمودی بازه تغییرات دبی را نشان می‌دهد. در هر نمودار که مربوط به درجه‌های 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  $\Delta \bar{S}/S_T$ ،

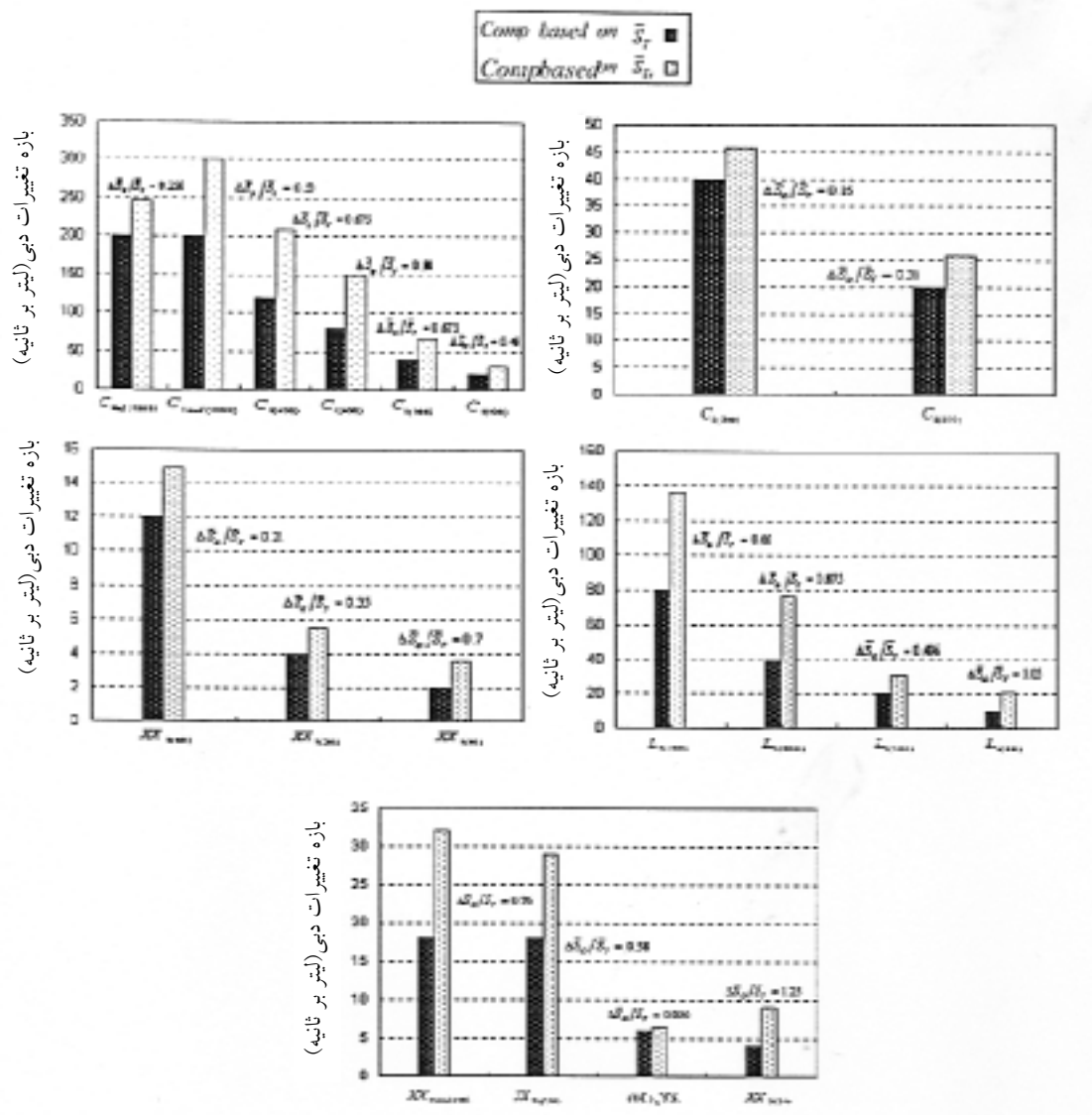


شکل ۷. مقایسه مقادیر کمی حساسیت هیدرولیکی در پیچه‌ها و مدول‌های مورد مطالعه در شرایط بهره‌برداری

اظهار رضایت داشته که دلیل آن کاملاً روشن است. این موضوع در بازدیدهای میدانی از شبکه‌های آبیاری ورامین، سفیدرود و قزوین که از این مدول‌ها در توزیع آب استفاده می‌کنند بارها از طرف بهره‌برداران عنوان می‌شد.

تغییر حساسیت مدول‌ها در شرایط بهره‌برداری، تغییر در عملکرد آنها و اختلال در فرآیند توزیع جریان در شبکه را به دنبال خواهد داشت. به بیان دیگر اختلال در فرآیند توزیع

که با افزایش دبی تحویلی همراه است، می‌گردد. این مدول‌ها دبی بیشتری را نسبت به آنچه در شرایط تئوری برایشان پیش بینی شده تحویل کشاورزان می‌دهند. بدین ترتیب کشاورزان نواحی بالادست شبکه به دلیل عملکرد نامناسب مدول‌ها میزان آب بیشتری نسبت به آب خریداری شده که بر اساس وضعیت تئوری مدول‌ها محاسبه و خریداری می‌شود، دریافت می‌نمایند. این تعداد از کشاورزان از روند توزیع جریان در سطح شبکه



شکل ۸. مقایسه بازه تغییرات دبی شرایط تئوری و بهره‌برداری مدول‌های مورد بررسی

### نتیجه‌گیری

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

۱. مقدار کمی حساسیت هیدرولیکی مدول‌های تیغه‌ای به دو پارامتر محدوده تغییرات عمق در نواحی ارتفاعی چندگانه و حساسیت هر یک از این نواحی بستگی دارد. به بیان دیگر حساسیت مدول تابعی است از ساختار فیزیکی سازه و هیدرولیک جریان و بدین ترتیب کلیه عواملی که بر هر یک از دو عامل فوق تأثیر گذار باشند، بر حساسیت مدول نیز موثر

جریان نتیجه ترکیب آثار ناشی از تغییر حساسیت مدول‌ها و میزان جریان تحویلی در طول شبکه است. این تغییرات، عملکرد توزیع را در طول فصل آبیاری متأثر می‌نماید، مشکلات جدی در اواخر فصل آبیاری خود نمایی می‌کند. افزایش نیاز آبی و کمبود میزان ذخیره آبی شبکه در اواخر فصل آبیاری از طرفی و وجود اختلال در فرآیند توزیع جریان که موجب عدم عدالت در توزیع می‌گردد از طرف دیگر، در مواقعی باعث نرسیدن آب به انتهای شبکه شده و کشاورزان این نواحی را با مشکلات زیادی مواجه می‌سازد.

خواهند بود.

دارای عملکرد یکسانی نبوده و از این رو لزوم واسنجی جریان و محاسبه حساسیت واقعی آنها ضروری است. محاسبه مقدار کمی حساسیت این سازه با استفاده از روابط ارائه شده در این پژوهش امکان پذیر خواهد بود.

۴. 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 از گراف‌های 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.

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 بازه 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 آبیگرها ضروری می‌نماید. مدول‌های تیغه‌ای علی‌رغم حساسیت پایین نسبت به تغییرات و نوسانات عمق جریان (در مقایسه با سایر انواع آبیگرها)، در شرایط بهره برداری و تئوری

## منابع مورد استفاده

۱. رضوی نبوی، س. م. ۱۳۷۳. ضرایب تجربی در دریچه‌های نریپیک، 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 Practices 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.