

# تدوین شاخصهای حساسیت هیدرولیکی بازه‌ها و ارائه الگوریتم تحلیل جریان در کانال‌های آبیاری با استفاده از آنها

علی اصغر منتظر<sup>1\*</sup>، عبدالحسین هورفر<sup>2</sup>

1- استادیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران

2- استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

\* پاکدشت، پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی

almontaz@ut.ac.ir

**چکیده** - تحلیل حساسیت، شیوه نوینی است که از اواخر دهه 90 میلادی به منظور مطالعه جریان در شبکه‌های آبیاری مطرح شده و در حال حاضر مراحل توسعه خود را طی می‌کند. در این مقاله ضمن تعریف و تدوین سه شاخص حساسیت هیدرولیکی برای بازه‌های کانال، الگوریتم تحلیل فرایند تنظیم و توزیع جریان در کانالهای آبیاری با استفاده از این شاخصها ارائه می‌شود. بررسی و ارزیابی کارایی شاخصهای حساسیت و ارائه الگوریتم، در قالب مطالعه یک کانال واقعی انجام شده است. بدین منظور، کانال با استفاده از مدل هیدرودینامیک سوبک (Sobek) شبیه‌سازی شد و با استفاده از نتایج شبیه‌سازی دو گزینه بهره‌برداری از کانال مطالعه و مقادیر کمی شاخصهای حساسیت محاسبه و بر اساس آن، جریان تجزیه و تحلیل شد. نتایج نشان داد که شاخصهای حساسیت، کارایی مناسبی برای تحلیل و پیش‌بینی وضعیت جریان در کانالهای آبیاری دارند. با محاسبه مقادیر کمی شاخصهای حساسیت، امکان ارزیابی پتانسیل پاسخگویی سیستم به اختلالات هیدرولیکی فراهم شده که بدین ترتیب، زمینه دستیابی به بهره‌برداری مطلوب و کارآمد از شبکه‌های آبیاری نیز فراهم می‌شود. از این رو به‌کارگیری شاخصها و الگوریتم پیشنهادی - علاوه بر طراحی شبکه‌های آبیاری - در مطالعه جریانهای غیردائمی ناشی از تغییر نیاز در دوره بهره‌برداری این سیستمها نیز امکان‌پذیر است.

**کلید واژگان:** آبگیر، اختلال هیدرولیکی، سازه‌های آبیاری، شاخص حساسیت، کانال، مدل هیدرودینامیک.

## 1- مقدمه

عواملی هست که عملکرد این سیستمها را تحت الشعاع قرار می‌دهند. این موضوع در شرایطی حادث می‌شود که شبکه‌های آبیاری، به شیوه دستی بهره‌برداری شوند. امکان بهبود در عملکرد هیدرولیکی این سیستمها با به‌کارگیری مدل‌های هیدرودینامیک، طراحی و اجرای سیستمهای کنترل و شیوه‌های بهینه‌سازی میسر می‌شود

رفتارسنجی جریان در شبکه‌های آبیاری علی‌رغم سادگی نسبی در ساختار فیزیکی، از پیچیدگی خاصی برخوردار است. نبود اطلاعات صحیح، دقت ناکافی در اجرای تنظیمهای سازه‌ای، تأثیر هیدرولیکی متقابل سازه‌ها و اختلاف مقادیر بالقوه و بالفعل متغیرهای مدیریتی، از جمله

تحلیل حساسیت شیوه نوینی برای تحلیل جریان شبکه‌های آبیاری است که از اواخر دهه 90 میلادی نظر تعدادی از متخصصان آبیاری را به خود معطوف ساخته است. حساسیت به عنوان قابلیت پاسخگویی نسبت به تأثیرها و فشارهای بیرونی تعریف می‌شود (Renault and Hemakumara, 1999). در تحلیل حساسیت، رفتار سیستم نسبت به تغییرات پارامترهای ورودی سنجیده می‌شود. شاخص حساسیت هیدرولیکی سازه آبیاری، به عنوان نسبت تغییرات نسبی یا مطلق پارامترهای هیدرولیکی خروجی از سازه به تغییرات نسبی یا مطلق پارامترهای هیدرولیکی ورودی، به صورت زیر تعریف می‌شود (Renault, 2000):

$$(1) \quad \text{حساسیت هیدرولیکی سازه آبیاری} = \frac{\text{تغییرات پارامترهای / تغییرات پارامترهای هیدرولیکی خروجی}}{\text{هیدرولیکی ورودی}}$$

مطالعات اولیه در رابطه با حساسیت آبیاریها به پنج دهه قبل برمی‌گردد؛ زمانی که (Mahbub and Gulati 1951) تعریفی را از حساسیت مجاری تخلیه کننده ارائه داده و از آن برای بررسی مجاری تخلیه جریان در چند کانال آبیاری از شبکه های آبیاری هند استفاده کردند. ایشان نسبت تغییرات نسبی دبی مجرای تخلیه کننده به تغییرات عمق جریان را به عمق نرمال جریان کانال تغذیه به عنوان حساسیت تخلیه کننده‌ها معرفی کردند. شانان (Shanan, 1992) در رابطه ارائه شده از سوی محققان بالا، به جای عمق نرمال، عمق واقعی جریان در بالادست آبیگر را جایگزین و آن را به عنوان شاخص حساسیت آبیگرها پیشنهاد کرد. رینالت و هماکومارا (Renault and Hemakumara, 1999) تعریف دیگری را برای حساسیت ارائه کردند که در آن به جای تغییرات نسبی عمق جریان از

(Burt and Styles, 1998). مدل‌های هیدرودینامیک، امکان مطالعه گزینه‌های مختلف بهره‌برداری و تحقق تصمیم‌گیریه‌های مناسب و دستیابی به عملکرد بهینه شبکه‌های آبیاری را فراهم می‌سازند، اما کاربری آنها اغلب ساده نیست و حتی در شرایط امکان دسترسی، به‌ندرت توسط متخصصان و مدیران بهره‌برداری مورد استفاده قرار می‌گیرند. این موضوع، پس از بررسی‌های جهانی جدید در زمینه نوسازی شبکه‌های آبیاری مطرح شده است (Burt and Styles, 1998; ITIS5, 1998). بدین ترتیب هنوز نیاز مبرم به توسعه شیوه‌های ساده و کارآمد در عرصه رفتارسنجی جریان و مطالعه فرایند تنظیم و توزیع شبکه های آبیاری وجود دارد.

مطالعه جریان در شبکه‌های آبیاری با استفاده از روابط جریانهای دائمی و غیر دائمی انجام می‌شود که اغلب در طراحی سیستمهای آبیاری کاربرد داشته و به‌خوبی توسط متخصصان طراح و حتی متولیان بهره‌برداری درک می‌شود. نقص این روابط، محدودیت کاربری در فرایند بهره‌برداری است، زیرا در حال حاضر امکان مطالعه روند انتشار و توسعه اختلالات<sup>1</sup> در سیستمهای آبیاری با استفاده از آنها وجود ندارد. از طرفی دانش انتشار و تحلیل اختلالات در طول کانال آبیاری، مقوله‌ای مهم در امر پایش<sup>2</sup> و بهره‌برداری کارآمد از سیستم است (Renault and Makin, 1999). روابط جریان غیر دائمی، توانمندی کافی را در تحلیل جریان دارند، اما پیچیدگی خاصی دارند که فراگیری کاربری آنها را محدود می‌سازد. رهیافت تحلیل حساسیت می‌تواند به عنوان نوعی شیوه بینابین این دو روش مطالعه جریان مطرح باشد. در این روش با استفاده از روابط جریان دائمی و وضعیت ساختار فیزیکی شبکه، ارزیابی واکنش سیستم نسبت به تغییرات و اختلالات ورودی و تحلیل جریان انجام می‌شود.

1. Perturbations  
2. Monitoring

تا بی نهایت متغیر باشد. منتظر (1383) بر اساس حساسیت‌سنجی هیدرولیکی سازه‌های آبیاری، به توسعه مدل بهره‌برداری کانالها پرداخت. منتظر و همکاران (1383) روابط حساسیت مدوله‌های تیغه ای را توسعه داده و از آن در مطالعه چند مدول از شبکه آبیاری دشت قزوین استفاده کردند. شاهرخ نیا و جوان (1382) مقادیر حساسیت سازه های تحویل آب قسمتی از شبکه آبیاری درودزن را با استفاده از مدل HEC-RAS تعیین کردند. این تحقیق با هدف تدوین و معرفی سه شاخص حساسیت هیدرولیکی برای بازه‌های کانال و ارائه الگوریتم تحلیل فرایند تنظیم و توزیع جریان کانالهای آبیاری با استفاده از این شاخصها، تعریف و انجام شد. به منظور بررسی و ارزیابی کارایی شاخصها و همچنین ارائه الگوریتم تحلیل جریان با استفاده از شاخصهای تعریف شده، کانال Vadodara در کشور هند توسط مدل هیدرودینامیک Sobek شبیه‌سازی شده و با استفاده از نتایج شبیه‌سازی دو گزینه بهره‌برداری حداقل و حداکثر دبی بهره‌برداری کانال، مقادیر کمی شاخصهای حساسیت محاسبه و بر اساس آن، رفتارسنجی جریان در این کانال انجام شد.

## 2- مواد و روشها

-توسعه شاخصهای حساسیت هیدرولیکی بازه‌های کانال شاخص حساسیت هیدرولیکی دبی سازه آبیگر به عمق جریان ( $S_{hq}$ ) به صورت رابطه زیر قابل بیان است (منتظر و همکاران، 1383):

(2)

در رابطه فوق  $dq/q$  تغییرات نسبی دبی آبیگری،  $dH_{US}$  تغییرات مطلق عمق جریان بالادست سازه،  $\alpha$  ضریب توانی رابطه دبی (حاکم بر مرحله یک) و  $H'_E$  افت بار

تغییرات مطلق عمق جریان استفاده می‌شود. ایشان تغییرات نسبی دبی را به ازای  $0/1$  فوت تغییرات عمق جریان بالادست سازه به عنوان حساسیت سازه معرفی می‌کنند. دو محقق یاد شده اصول تحلیل حساسیت دریچه‌ها را برای نوسانات واختلالات عمق جریان و تنظیم سازه‌ها توسعه داده و در مطالعه کانالهایی از شبکه‌های Mahavil and Kirinedoya در سری لانکا و شبکه Fordova در پاکستان به کار بردند (Renault, 2000; Renault and Hemakumara, 1999). رینالت (2000) همچنین چند رابطه تحلیلی را برای بازه‌های کانال ارائه کرد. آلبینسون (Albinson, 1986) مطالعاتی را در زمینه حساسیت سازه‌های آبیگر و تنظیم‌کننده انجام داده و تحلیلی را در زمینه ترکیب اثرهای حساسیت سازه‌های مجاور تنظیم کننده ارائه می‌کند. هورست (Horst, 1983) با مطالعه حساسیت سازه‌های آبیاری، این مفهوم را به سطح کانال ارتباط داده و شاخص انعطاف پذیری<sup>1</sup> را به منظور مطالعه وضعیت انتشار تغییرات اعمالی در دبی ورودی کانال تعریف کرد. شاخص انعطاف پذیری هورست عبارت است از نسبت تغییرات نسبی دبی آبیگری به تغییرات نسبی دبی جاری در کانال تغذیه. او در این تئوری که آن را تئوری پاسخگویی سیستم نامید، وضعیت پاسخگویی مقاطع آبیگری را با این شاخص مطالعه کرد. آنکوم (Ankum, 2002) معتقد است که عنوان انعطاف‌پذیری برای شاخص فوق مناسب نیست، زیرا انعطاف‌پذیری به درجه آزادی بهره‌برداری شبکه و به نوعی به سیستم کنترل آن ارتباط می‌یابد؛ حال آنکه این حساسیت سازه است که به نسبت تغییرات دبی آبیگری به تغییرات دبی در کانال تغذیه مربوط می‌شود. ایشان شاخص انعطاف پذیری هورست را به عنوان شاخص حساسیت سازه معرفی می‌کند که می‌تواند بین صفر

1. Flexibility Index

در سطح بازه‌ها، اگر اعمال یک تغییر جزئی در دبی ورودی به بازه را به عنوان اختلال هیدرولیکی در نظر بگیریم، معادله بیلان دبی ناشی از اختلالات هیدرولیکی با رابطه (5) قابل بیان است:

$$\Delta Q_{in} = \Delta Q_d + \Delta Q_{out} \quad (5)$$

در این رابطه  $\Delta Q_{in}$  اختلال در دبی ورودی بازه،  $\Delta Q_d$  مجموع اختلال در دبی تحویلی آبیگرهای بازه و  $\Delta Q_{out}$  اختلال در دبی خروجی سازه تنظیم کننده انتهای بازه است (شکل 2). این رابطه بیانگر آن است که تأثیر اعمال اختلال هیدرولیکی در بازه، در دبی آبیگرهای بازه و دبی خروجی سازه تنظیم بازه خودنمایی می‌کند. معمولاً آبیگرهای بازه در محدوده اثر منحنی برگشت آب<sup>1</sup> واقع شده و تغییرات دبی آنها نیز تابعی از همین منحنی است.

در استخراج شاخصهای حساسیت بازه‌های کانال، تعیین رابطه تغییرات عمق در طول بازه کانال و تغییرات عمق در بالادست سازه تنظیم بازه اهمیت ویژه ای دارد. در این زمینه Strelkoff et al. (1998), Renault (2000) و منتظر (1383)، بر وجود رابطه‌ای خطی بین این دو متغیر تأکید دارند. بر این اساس رابطه تغییرات عمق در بالادست مقاطع آبیگری و تغییرات عمق در بالادست مقطع کنترل، به صورت زیر استفاده شد (منتظر، 1383):

$$L_i \cdot dH_{US(i)} = dH_{US(R)} \quad (6)$$

در این رابطه  $dH_{US(i)}$  تغییرات عمق جریان در مقطع آبیگری در طول منحنی برگشت آب،  $L_i$  ضریب زاویه (شیب) خط یا منحنی برگشت آب و  $dH_{US(R)}$  تغییرات عمق جریان در بالادست سازه تنظیم بازه است. مقدار  $L_i$  با فاصله گرفتن آبیگرها از سازه تنظیم کاهش یافته و برای آبیگرهایی که فاصله زیادی با سازه تنظیم داشته یا خارج از محدوده اثر منحنی برگشت آب باشند، برابر صفر و برای آبیگرهای مجاور سازه تنظیم برابر یک است.

جریان خروجی از سازه است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

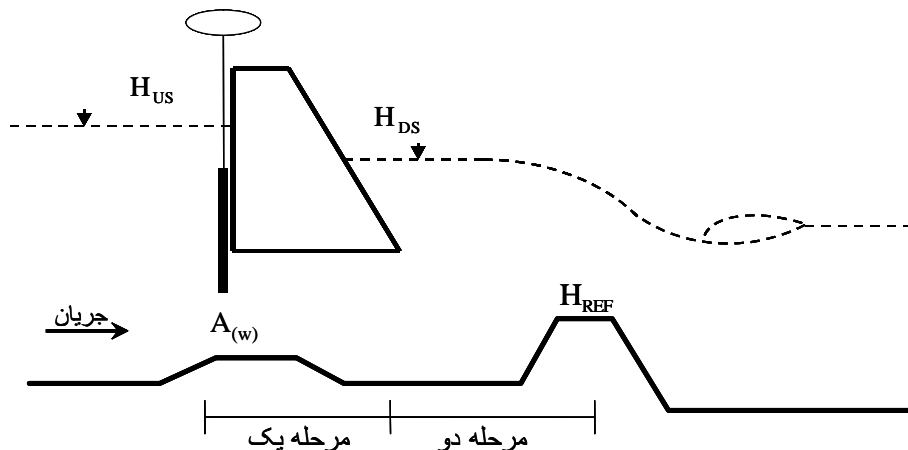
$$H'_E = (H_{US} - H_{DS}) + \frac{\alpha}{\beta} (H_{DS} - H_{REF}) \quad (3)$$

در این رابطه  $H_{US}$  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 یا رقوم تاج سرریز باشد) و  $\alpha$  و  $\beta$  ضرایب توانی رابطه دبی است. لازم است ذکر شود که رفتار هیدرولیکی جریان از سازه های آبیاری (سازه‌های توزیع و تنظیم)، متأثر از دو مرحله عبور جریان از سازه (مرحله یک) و ورود جریان به کانال پایین دست سازه (مرحله دو) است که بر هر یک از این مراحل، یک رابطه دبی - عمق حاکم است (شکل 1). مقادیر  $\alpha$  و  $\beta$  به ترتیب به الگوی جریان عبوری سازه و وضعیت جریان پایین دست سازه بستگی داشته و ضرایب توانی رابطه دبی - عمق در هر یک از مراحل فوق هستند (Renault & Hemakumara, 1999).

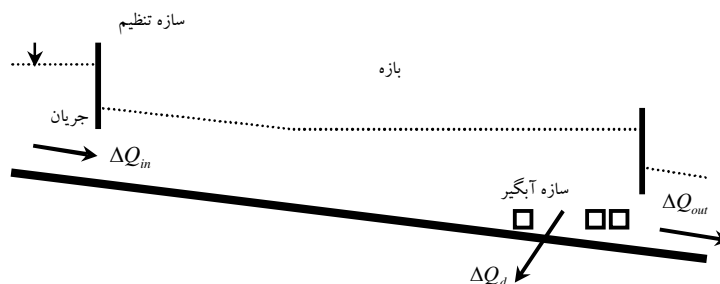
در سازه‌های تنظیم کننده - به خلاف آبیگرها - متغیر اثرگذار در روند اختلالات، دبی عبوری و متغیر اثرپذیر، عمق جریان بالادست سازه است. بدین ترتیب در تنظیم کننده‌ها شاخص حساسیت هیدرولیکی عمق جریان به تغییرات نسبی دبی ( $S_{qh}$ ) قابل تعریف و کاربرد است که به صورت زیر قابل بیان است (منتظر، 1383):

$$(4)$$

به منظور مطالعه فرایند توزیع و تنظیم جریان در کانال، مطالعه جریان در بازه‌های آن ضروری است. بازه، کوچکترین واحد شبکه آبیاری است که شرایط هیدرولیکی آن نقش اصلی را در عملکرد شبکه ایفا می‌کند. به فاصله‌ای از کانال که بین دو سازه تنظیم کننده واقع می‌شود، بازه گفته می‌شود. ذیلاً روابط و شاخصهای حساسیت بازه‌های کانالهای آبیاری استخراج می‌شود.



شکل 1 وضعیت جریان عبوری از یک سازه آبگیر



شکل 2 طرح شماتیک جریان در یک بازه از کانال

کننده انتهای بازه بر اثر اعمال اختلال هیدرولیکی در جریان ورودی بازه را از رابطه (8) محاسبه کرد.

$$\Delta Q_{out} = \frac{Q_{out} \cdot \Delta H_{US(R)}}{S_{qh(R)}} \quad (8)$$

با جایگذاری از رابطه (7) و (8) در رابطه (5) داریم:

$$\Delta Q_{in} = \Delta H_{US(R)} \left[ \sum_{i=1}^n L_i \cdot S_{hq(o)i} \cdot q_{(o)i} + Q_{out} (S_{qh(R)})^{-1} \right] \quad (9)$$

رابطه فوق، امکان محاسبه میزان تغییرات عمق جریان در بالادست سازه تنظیم  $(\Delta H_{US(R)})$  را به ازای اختلال دبی  $(\Delta Q_{in})$  فراهم می‌سازد. بر این اساس به منظور ارزیابی وضعیت پاسخگویی بازه‌ها به اختلالات هیدرولیکی، در این

بر طبق رابطه حساسیت هیدرولیکی سازه‌های آبگیر (رابطه 2)، مقدار اختلال در هر یک از آبگیرها (i شماره سازه آبگیر در یک بازه و سایر متغیرها مربوط به همین سازه است) در سطح بازه از رابطه (7) محاسبه می‌شود.

مجموع اختلالات آبگیرهای موجود در سطح بازه (با فرض وجود n آبگیر متاثر از منحنی برگشت آب) ناشی از اعمال یک اختلال هیدرولیکی، با تلفیق روابط (2) و (6) استخراج شده و به صورت رابطه (7) قابل بیان است.

$$\Delta Q_d = \Delta H_{US(R)} \sum_{i=1}^n L_i \cdot S_{hq(o)i} \cdot q_{(o)i} \quad (7)$$

از طرفی با توجه به رابطه حساسیت هیدرولیکی سازه تنظیم کننده (رابطه 4) می‌توان میزان اختلال در دبی سازه تنظیم

طول بازه،  $g$  شتاب ثقل و  $y_0$  و  $v_0$  به ترتیب عمق و سرعت جریان بازه در شرایط اولیه جریان است. این رابطه، بیشتر نیز توسط سایر محققان استفاده شده است (Ankum, 2004). بدیهی است که در صورت در دست داشتن برآوردی دقیق‌تر از سرعت و زمان انتقال موج، مقادیر زمان پاسخگویی بازه‌ها نیز دقت بالاتری خواهد داشت.

### - شبیه سازی کانال Vadodara

کانال Vadodara یکی از کانالهای نیمه اصلی در شبکه آبیاری نارمادا واقع در شمال غربی کشور هند است. شبکه آبیاری نارمادا یکی از بزرگترین شبکه های آبیاری جهان است که سطح ناخالص اراضی تحت پوشش آن پس از تکمیل کلیه واحدها به حدود دو میلیون هکتار می رسد. کانال Vadodara در فاصله 81 کیلومتری از ابتدای کانال اصلی نارمادا منشعب می شود. این کانال با طول 102 کیلومتر، 35 سازه تنظیم کننده و 32 سازه آبگیر دارد که کلیه آبگیرها از نوع روزنه دریچه دار مجهز شده به سرریز پایین دست بوده و تنظیم کننده‌ها نیز غالباً از نوع دریچه های شعاعی زیرگذر است. ظرفیت طراحی کانال در بخش ابتدایی معادل 76 متر مکعب بر ثانیه است.

تحقیق سه شاخص حساسیت هیدرولیکی تغییرات دبی خروجی بازه به دبی ورودی بازه (حساسیت انتقال بازه،  $S_{R(C)}$ )، شاخص حساسیت تغییرات دبی تحویلی به آبگیرهای بازه به تغییرات دبی ورودی بازه (حساسیت تحویل بازه،  $S_{R(D)}$ ) و حساسیت تغییرات زمانی عمق جریان بالادست سازه تنظیم در زمان پاسخگویی بازه به تغییرات نسبی دبی ورودی بازه ( $S_{R(H(t))}$ ) معرفی می شوند (روابط 10 الی 12). در این روابط،  $Q_{in}$  و  $Q_{out}$  به ترتیب دبی ورودی و خروجی بازه (سازه تنظیم کننده انتهای بازه) قبل از اعمال اختلال هیدولیکی است. منظور از زمان پاسخگویی بازه ( $T_{RH(res)}$ ) مدت زمانی است که طول می کشد تا بازه از حالت ماندگار قبل از اعمال اختلال به حالت ماندگار جدید (پس از اعمال اختلال) تغییر وضعیت دهد. در مدت زمان پاسخگویی بازه، 90 درصد از تغییرات ناشی از اثر اختلال از بین می رود (Ankum, 2004). در این تحقیق برای محاسبه زمان پاسخگویی بازه‌ها از رابطه (13) استفاده شد (منتظر، 1383):

در رابطه فوق،  $\Delta V_{dyn}$  تغییرات حجم منشور ذخیره بازه ناشی از اختلال دبی ورودی و  $T_w$  زمان انتقال موج در بازه است که در این تحقیق با فرض موج ثقلی از رابطه  $(L/(\sqrt{gy_0} + v_0))$  محاسبه می شود. در این رابطه،  $L$

$$S_{R(C)} = \frac{\Delta Q_{out}}{\Delta Q_{in}} = \frac{Q_{out}}{S_{qh(R)} \left[ \sum_{i=1}^n L_i \cdot S_{hq(o)i} \cdot q_{(o)i} + Q_{out} (S_{qh(R)})^{-1} \right]} \quad (10)$$

$$S_{R(D)} = \frac{\Delta Q_d}{\Delta Q_{in}} = 1 - S_{R(C)} \quad (11)$$

$$S_{R(H(t))} = \frac{\Delta H_{US(R)} / T_{RH(res)}}{\Delta Q_{in} / Q_{in}} = \frac{Q_{in} / T_{RH(res)}}{\left[ \sum_{i=1}^n L_i \cdot S_{hq(o)i} \cdot q_{(o)i} + Q_{out} \cdot (S_{qh(R)})^{-1} \right]} \quad (12)$$

$$T_{R(res)} = \frac{3}{2} \left[ \frac{2\Delta V_{dyn}}{\Delta Q_{in}} - T_w \right] \quad (13)$$

فوق بحرانی را با دقت بالایی برای این مدل فراهم ساخته است. امکان شبیه‌سازی انواع مختلف سازه‌های آبگیر روزنه‌ای، سرریزها، پمپها، آبریزهای عمودی و مایل، سیفون معکوس، کالورت، آکدوک، مخازن کنترل، دریچه‌های چند دهانه و کانالهای با سطح مقطع مرکب وجود دارد. امکان شبیه‌سازی بهره‌برداریهای دستی و اتوماتیک و اعمال انواع مختلف کنترل‌گرهای هیدرولیکی، زمانی و PID<sup>3</sup> در مدل پیش‌بینی شده است.

به منظور تعیین متغیرهای مورد نیاز در محاسبه حساسیت هیدرولیکی سازه های کانال Vadodara، ابتدا کانال همراه با کلیه سازه‌های آن در Sobek، مدل‌سازی شد. به منظور واسنجی و کالیبره کردن مدل، از نتایج سیستم کنترل خودکار کانال که براساس اندازه‌گیریهای صحرائی کالیبره شده است (Loke, 1994)، استفاده گردید. با اعمال ضرایب دبی و زبری واسنجی شده در مدل کانال، مدل اعتبار کافی را برای سایر شبیه‌سازیها به دست آورد. سپس شبیه‌سازی جریان به ازای گزینه‌های بهره‌برداری دبی حداکثر و حداقل کانال انجام شد. مقدار حداکثر و حداقل دبی بهره‌برداری کانال به ترتیب برابر 90 و 25 درصد دبی طراحی کانال در نظر گرفته شد. در شبیه‌سازیهای انجام شده، عمق جریان در بالادست کلیه سازه‌های تنظیم‌کننده هر بازه، برابر با عمق هدف - که برابر عمق نرمال در دبی طراحی بازه‌ها در نظر گرفته شد - ثابت نگاه داشته شد. تثبیت عمق در حد عمق هدف، با تنظیم کردن بازشدگی سازه‌های تنظیم‌کننده انتهای بازه‌ها انجام شد. در هر یک از دبی‌های بهره‌برداری بالا برای هر سازه، ضرایب و متغیرهای هیدرولیکی مورد نیاز افت جریان عبوری و شاخصهای حساسیت تعیین شد. عملیات برای هر سازه به صورت موضعی و جداگانه انجام و از سازه‌های پایین دست بازه انتهای کانال شروع شد و در

شیب کف کانال در طول، بین 1/6 متر در ده هزار تا 5 متر در ده هزار متغیر است. عرض کف کانال برای بازه ابتدایی 6/3 متر و برای بازه انتهایی 2/7 متر و برای سایر بازه‌ها بین این دو مقدار متغیر است. مطالعات انجام شده در زمینه وضعیت اقلیم، منابع آب و خاک و الگوی کشت منطقه، بیانگر آن است که روش توزیع چرخشی آب مناسب‌ترین روش توزیع آب در شبکه است. بر این اساس دبی ثابت 1/157 لیتر در ثانیه در هکتار ( $L \cdot S^{-1} \cdot ha^{-1}$ ) بین کشاورزان به صورت چرخشی توزیع می‌شود. هر کشاورز در هر هفته در زمان ثابت و برای مدت مشخصی این آب را تحویل می‌گیرد. تغییرات دبی توزیع در کانال در فصول مختلف آبیاری به طور متوسط بین 20 تا 100 درصد ظرفیت طراحی متغیر است (Loke, 1994).

شبیه‌سازیها با مدل هیدرودینامیک Sobek انجام شد که یک بسته نرم‌افزاری با قابلیت کاربری در حوزه‌های مختلف مدیریت رودخانه‌ها، مناطق شهری و روستایی برای مجاری روباز است. این مدل در سال 2000 توسط WL/Delft Hydraulic (2000) در قالب یک مدل تجاری ارائه شد. در این مدل هفت مدول مختلف وجود داشته که با توجه به اهداف شبیه‌سازی از ترکیب این مدولها نیز می‌توان استفاده کرد. مدول Water Flow به منظور شبیه‌سازی جریانهای دائمی و غیر دائمی مجاری روباز به کار گرفته می‌شود. در این مدل برای حل معادلات سنت و نانت از طرح محاسباتی جدیدی موسوم به طرح دلفت<sup>1</sup> استفاده می‌شود که یک شیوه حل ضمنی<sup>2</sup> در قالب یک شبکه متناوب است. به‌کارگیری طرح دلفت در حل معادلات، قابلیت شبیه‌سازی شبکه‌های گسترده درختی، شاخه‌ای، حلقوی و پدیده‌های مختلفی نظیر امواج حاصل از برگشت آب، جریانهای بسیار کم در حد خشکی کانال و جریانهای

1. Delft Hydraulic Scheme  
2. Implicit

3. Proportional-Integral-Derivative

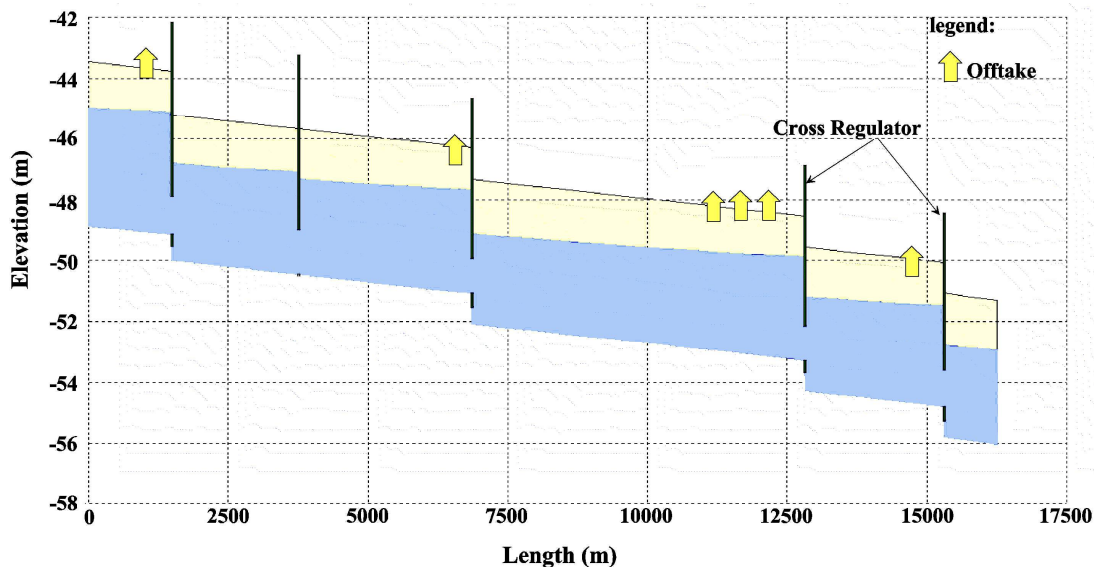
کانال با استفاده از نتایج شبیه‌سازیهای گزینه‌های بهره‌برداری مورد مطالعه و رابطه (3) محاسبه شد. افت بار جریان خروجی از سازه، نقش کلیدی در محاسبه شاخصهای حساسیت سازه ایفا می‌کند. شکل (3) پروفیل طولی را در بخشی از کانال شبیه‌سازی شده نمایش می‌دهد. در این شکل وضعیت جریان و مقادیر بازشدگی سازه‌های تنظیم به ازای دبی بهره‌برداری حداکثر نشان داده شده است. مقادیر کمی شاخصهای حساسیت هیدرولیکی دبی به عمق سازه‌های آبیگیر ( $S_{hq}$ ) و حساسیت عمق به دبی سازه‌های تنظیم ( $S_{qh}$ ) کانال Vadodara به ترتیب با استفاده از روابط (2) و (4) در دبیهای بهره‌برداری حداقل و حداکثر کانال تعیین شد. مقادیر شاخصهای فوق برای کلیه سازه‌های تنظیم و توزیع در هر یک از گزینه‌های بهره‌برداری در جدول 1 گزارش شده است. بررسی مقادیر شاخص حساسیت آبیگیرها در جدول 1، بیانگر تغییر حساسیت با تغییر دبی بهره‌برداری کانال است؛ آبیگیرهایی که فاصله بیشتری با سازه‌های تنظیم کننده دارند، تغییرات بیشتری نشان می‌دهند.

جهت بازه ابتدای کانال ادامه یافت. با توجه به اینکه جریان در کلیه سازه‌های آبیگیر و تنظیم‌کننده کانال از نوع زیرگذر است، مقدار  $\alpha$  برای کلیه سازه‌ها برابر 0/5 در نظر گرفته شد. به منظور محاسبه  $\beta$  از نتایج شبیه‌سازی جریان در هر یک از گزینه‌های بهره‌برداری مورد مطالعه استفاده شد.

### 3- نتایج و بحث

در این تحقیق، تعریف و توسعه روابط برای سه شاخص حساسیت هیدرولیکی برای بازه‌های کانالهای آبیاری انجام شده. به منظور ارائه یک الگوریتم کاربردی برای مطالعه جریان کانالهای آبیاری با استفاده از شاخصهای حساسیت تدوین شده و همچنین ارزیابی توانایی شاخصها و الگوریتم پیشنهادی، مقادیر کمی این شاخصها برای کانال Vadodara محاسبه و با استفاده از آنها فرایند تنظیم و توزیع جریان این کانال مطالعه شده است.

به منظور تعیین شاخصهای حساسیت هیدرولیکی سازه‌های آبیگیر و تنظیم‌کننده کانال Vadodara، نخست مقادیر افت بار جریان خروجی هر یک از سازه‌های تنظیم و توزیع



شکل 3 پروفیل طولی بخشی از کانال Vadodara (حداکثر دبی بهره‌برداری)



## جدول 1 مقادیر شاخصهای حساسیت هیدرولیکی سازه‌های تنظیم و توزیع کانال

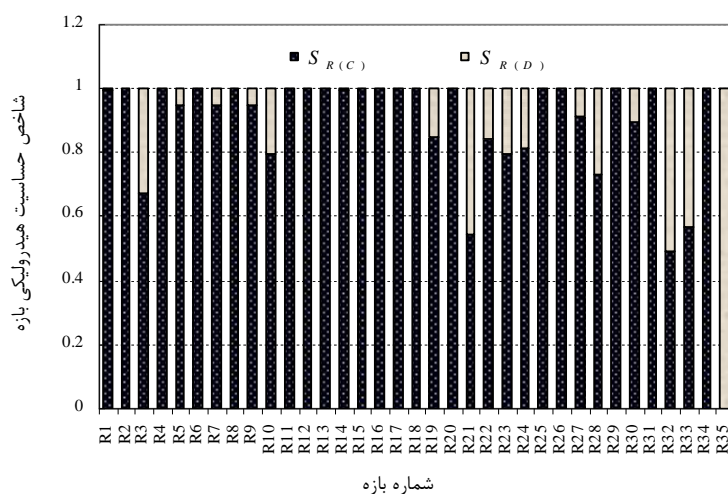
وادودارا در هر یک از گزینه‌های بهره‌برداری مورد مطالعه

شماره سازه آبیگر	$S_{hq} (m^{-1})$		شماره سازه تنظیم	$S_{qh} (m)$	
	دبی بهره‌برداری حداقل	دبی بهره‌برداری حداکثر		دبی بهره‌برداری حداقل	دبی بهره‌برداری حداکثر
O1	0/72	0/93	R1	3/22	2/ 49
O2	0/94	1/11	R2	2/38	1/95
O3	0/88	0/98	R3	5/15	4/71
O4	0/99	1/27	R4	2/08	0/9
O5	0/95	1/25	R5	3/85	3/37
O6	0/94	1/3	R6	2/25	1/35
O7	0/59	0/61	R7	4/87	4/32
O8	0/58	0/6	R8	1/83	1/61
O9	0/57	0/58	R9	2/34	1/83
O10	1/15	1/36	R10	4/63	4/13
O11	0/83	1/03	R11	4/8	4/23
O12	1/3	1/61	R12	4/67	4/18
O13	1/2	1/25	R13	4/87	4/39
O14	1/3	1/32	R14	1/23	0/9
O15	1/41	1/44	R15	0/97	0/74
O16	1/45	1/8	R16	1/6	0/98
O17	1/17	1/31	R17	1/36	1/05
O18	1/26	1/29	R18	1/23	0/94
O19	1/33	1/35	R19	1/76	1/23
O20	1/41	1/43	R20	1/8	1/31
O21	1/01	1/21	R21	2/37	1/92
O22	0/97	1/05	R22	1/65	0/93
O23	1/18	1/19	R23	2/84	2/3
O24	1/04	1/04	R24	2/23	1/83
O25	0/93	0/97	R25	1/87	1/43
O26	0/9	0/93	R26	1/44	0/9
O27	1/17	1/23	R27	1/63	1/21
O28	1/12	1/23	R28	1/21	0/83
O29	0/95	0/98	R29	1/12	0/87
O30	0/81	0/83	R30	1/2	0/72
O31	1/39	1/43	R31	1/09	0/85
O32	0/9	0/97	R32	1/72	1/25
-----	-----	-----	R33	1/2	0/71
-----	-----	-----	R34	0/83	0/67
-----	-----	-----	R35	1/45	1/37

5/15 و 0/83 متر است. این مقادیر بیانگر آن است که به ازای یک درصد تغییر در دبی خروجی این سازه‌ها، عمق جریان در بالادست سازه به ترتیب 5/15 و 0/83 سانتیمتر افزایش می‌یابد. بیشینه مقادیر حساسیت سازه‌های تنظیم مربوط به حداقل دبی بهره برداری بوده و کمینه مقادیر در دبی حداکثر روی می‌دهد.

به منظور مطالعه پاسخ بازه‌ها به اختلالات هیدرولیکی، با اعمال اختلال ثابتی در دبی ورودی ( $\Delta Q_{in}$ ) هر یک از بازه‌ها، متغیر  $\Delta H_{US(R)}$  در هر حالت از رابطه (9) محاسبه شد. محاسبات برای هر یک از شرایط حداقل و حداکثر دبی بهره برداری انجام شد. شاخصهای حساسیت دبی انتقالی بازه‌ها نسبت به دبی ورودی ( $S_{R(C)}$ ) و حساسیت دبی تحویلی بازه‌ها نسبت به دبی ورودی ( $S_{R(D)}$ ) به ترتیب از روابط (10) و (11) محاسبه شد. شکل 4 این دو شاخص را برای هر یک از بازه‌های کانال Vadodara نمایش می‌دهد. در این شکل محور افقی شماره بازه‌های کانال و محور عمودی مقدار شاخصهای فوق را برای هر بازه نشان می‌دهد.

حساسیت هیدرولیکی آبگیر شماره 16 که طبق محاسبات، حساسترین آبگیر کانال Vadodara است، در دو دبی بهره‌برداری، به ترتیب برابر  $1/8$  و  $1/45$  است. این آبگیر در بازه شماره 10 و در فاصله 2340 متری بالادست سازه تنظیم‌کننده این بازه قرار دارد. حساسیت  $1/8$  به معنای  $1/8$  درصد تغییر در دبی آبگیری به ازای هر سانتیمتر تغییر در عمق جریان بالادست آبگیر است. آبگیر شماره 9 (بازه شماره 5) نیز با مقادیر حساسیت هیدرولیکی بیشینه و کمینه  $0/58$  و  $0/57$  دارای کمترین حساسیت نسبت به تغییرات است. بررسی نتایج بیانگر آن است که بیشینه و کمینه حساسیت به ترتیب مربوط به گزینه‌های حداکثر و حداقل دبی بهره برداری کانال است. در این شرایط به ترتیب کمترین و بیشترین مقادیر افت جریان عبوری از سازه‌های آبگیر به وقوع می‌پیوندد. بررسی مقادیر کمی حساسیت هیدرولیکی سازه‌های تنظیم‌کننده کانال نشان می‌دهد که تنظیم‌کننده‌های بازه‌های شماره 3 و 34 به ترتیب بیشترین و کمترین حساسیت را دارند. مقادیر کمی این شاخص در گزینه بهره برداری حداقل، برای دو سازه فوق به ترتیب برابر



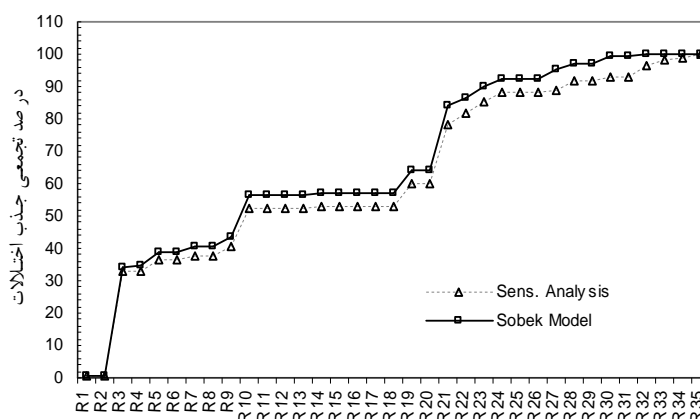
شکل 4 مقادیر شاخصهای حساسیت انتقال و تحویل بازه‌های کانال Vadodara

که 20 درصد کل طول کانال را به خود اختصاص می دهند می تواند 52/5 درصد از اختلالات هیدرولیکی اعمالی در ورودی کانال را جذب کنند. 47/5 درصد باقی مانده از اثر اختلالات، در 80 درصد طول انتهایی کانال جذب خواهد شد.

با استفاده از مقدار محاسبه شده  $\Delta H_{US(R)}$  ناشی از اعمال اختلال ایجاد شده در دبی هر بازه، تغییرات حجم منشور ذخیره هر بازه مشخص و بر اساس آن زمان پاسخگویی بازه‌ها با استفاده از رابطه (13) محاسبه شد. این محاسبات برای هر یک از شرایط بهره برداری دبی حداکثر و حداقلی انجام شد (شکل 6). بررسی مقادیر زمان پاسخگویی بازه‌ها در شکل 6، نشانگر وابستگی زمان پاسخگویی بازه‌ها به دبی بهره برداری کانال است. با کاهش دبی بهره برداری کانال، زمان پاسخگویی بازه‌ها به اختلالات افزایش می یابد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که حداقل و حداکثر زمان پاسخگویی بازه‌ها به ترتیب مربوط به شرایط بهره برداری دبی حداکثر و حداقلی کانال باشد. در این روند مقدار تغییرات حجم منشور ذخیره بر اثر اعمال اختلالات، نقش عمده‌ای را دارد.

مقادیر واحد و نزدیک به واحد برای شاخص  $S_{R(C)}$  در هر بازه، به ترتیب بیانگر عدم وجود سازه آبرگیری در بازه، پایین بودن مقدار دبی یا حساسیت دبی نسبت به عمق جریان برای سازه‌های آبرگیری بازه است. بعکس بالا بودن مقدار شاخص  $S_{R(D)}$  بازه، نشان دهنده بالا بودن دبی آبرگیری و یا حساسیت دبی نسبت به عمق جریان در سطح بازه است.

بر اساس مقادیر این دو شاخص برای هر یک از بازه‌ها، میزان توانایی بازه‌ها در جذب اختلالات هیدرولیکی بررسی شد. بدین منظور با استفاده از شاخص حساسیت دبی تحویلی هر یک از بازه‌ها، سهم هر یک در جذب اختلالات هیدرولیکی محاسبه شد. سپس با استفاده از آن، میزان تجمعی درصد جذب اختلالات دبی ورودی در طول بازه‌های کانال تعیین و در شکل 5 ارائه شد. این درصد با استفاده از نتایج مدل سوبک نیز محاسبه و به منظور مقایسه با نتایج شیوه تحلیل حساسیت، در شکل فوق ارائه شد. مقایسه نتایج بیانگر برخورداری دقت مناسب شیوه آنالیز حساسیت در این ارزیابی است. بررسی مقادیر شاخصها نشان می دهد که بازه‌های 3، 10 و 21 بیشترین پتانسیل جذب اختلالات را در طول کانال دارند. فقط 10 بازه ابتدایی کانال

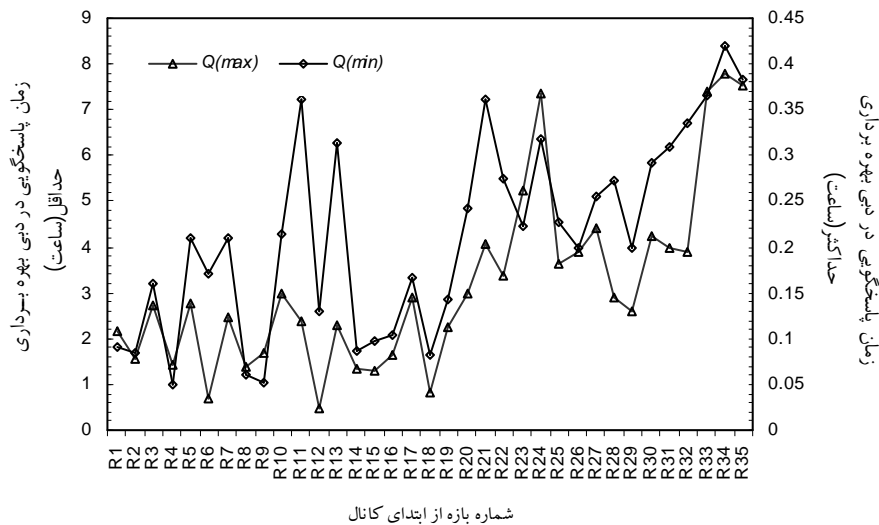


شماره بازه از ابتدای کانال

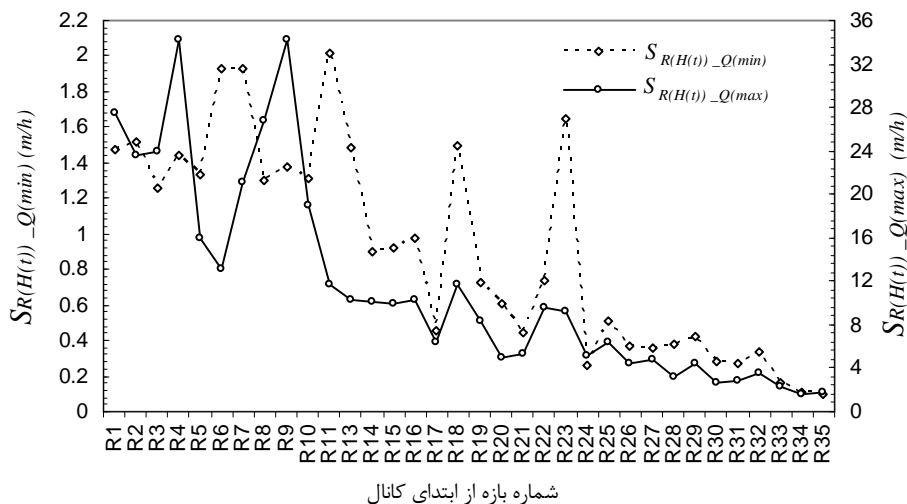
شکل 5 درصد تجمعی جذب اختلالات در طول بازه‌های کانال Vadodara

با استفاده از مقادیر زمان پاسخگویی بازه‌ها به ازای اختلال هیدرولیکی مذکور و مقدار تغییرات عمق جریان بالادست تنظیم کننده‌های هر بازه، با استفاده از رابطه (12) مقادیر شاخص حساسیت زمانی عمق جریان بالادست سازه‌های تنظیم به دبی ورودی بازه‌ها محاسبه و نتایج در شکل 7 ارائه شده است.

در دبی‌های بهره‌برداری بالای بازه‌ها، اختلال اثر چندانی را در تغییر این حجم ایفا نمی‌کنند، زیرا در این گزینه بهره‌برداری، طول منحنی برگشت آب کوتاه و مقدار عددی این حجم جریان در بازه‌ها کم است. حساسیت هیدرولیکی بالای سازه‌ها به اختلالات نیز در این شرایط به طور غیر مستقیم به کاهش تغییرات حجم منشور ذخیره کمک می‌کند. حساسیت هیدرولیکی بازه‌ها با زمان پاسخگویی رابطه معکوس دارد.



شکل 6 مقادیر زمان پاسخگویی بازه‌های کانال Vadodara در دبی‌های بهره‌برداری مورد مطالعه

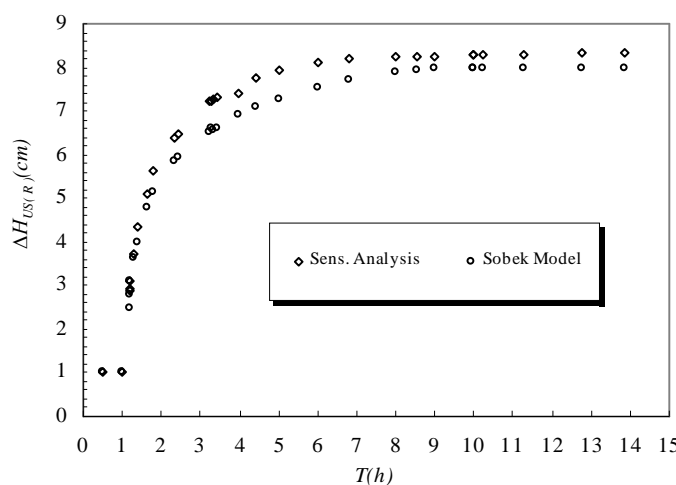


شکل 7 مقادیر کمی شاخص حساسیت زمانی تغییرات عمق بالادست سازه‌های تنظیم به تغییرات نسبی دبی ورودی بازه‌های کانال Vadodara

اولاً می توان زمان لازم برای تحلیل رفتن 100 درصد تغییرات عمق ناشی از اعمال اختلال هیدرولیکی را محاسبه کرد، ثانیاً در هر زمان از این محدوده زمانی، درصد تحلیل رفتن تغییرات عمق را در این اختلال تعیین و بر اساس آن منحنی تغییرات عمق (نسبت به عمق هدف) به زمان را می توان مشخص کرد. در شکل 8 نتایج محاسبات برای بازه 27 ارائه شده است. به منظور مقایسه نتایج روش تحلیل حساسیت، تغییرات زمانی این دو بازه به ازای اختلال مورد نظر با استفاده از نتایج مدل Sobek نیز محاسبه و بر روی شکل مشخص شده است. در این شکل محور افقی زمان از ابتدای اعمال اختلال و محور عمودی تغییرات عمق جریان در بالادست سازه تنظیم بازه را نسبت به عمق هدف نشان می دهد. مقایسه نتایج دو روش بیانگر دقت مناسب و کارایی مدل حساسیت در پیش بینی روند تغییرات زمانی عمق یا شرایط جریان است. اگرچه زمان لازم برای ماندگار شدن جریان حدود 14 ساعت است، این منحنی نشان می دهد که 90% اختلال تقریباً در 30% زمان لازم برای رسیدن به تعادل نهایی، جذب می شود.

بررسی این شاخص نشان می دهد که مقادیر حداکثر این شاخص در شرایط بهره برداری دبی حداکثر کانال به وقوع می پیوندد. در این شرایط زمان پاسخگویی بازه ها در حداقل مقدار خود است. با استفاده از مقادیر این شاخص می توان سرعت تغییرات بازه ها را نسبت به اختلالات مطالعه کرد. به عنوان مثال مقدار این شاخص برای بازه شماره 23 برابر 5/23 متر بر ساعت است. این بدان مفهوم است که در این بازه به ازای یک درصد تغییر در دبی ورودی، تغییر عمق بالادست تنظیم کننده انتهای بازه با سرعت 5/23 سانتیمتر بر ساعت انجام می شود. برای بازه هایی که در آنها مقدار این شاخص بیشتر باشد، به ازای تغییر نسبی مشخص در دبی ورودی، تغییرات عمق جریان بالادست سازه های تنظیم، با سرعت بیشتری شکل گرفته و سریعتر به حالت ماندگاری جدید تغییر وضعیت می دهند.

به منظور تعیین منحنی تغییرات عمق جریان بالادست سازه های تنظیم در زمان، می توان از مقادیر زمان پاسخگویی بازه ها و منحنی تغییرات تپ (بی بعد) عمق در زمان ناشی از اعمال اختلال هیدرولیکی استفاده کرد (Brouwer, 2001). با استفاده از زمان پاسخگویی بازه و منحنی مذکور،



شکل 8 تغییرات زمانی عمق جریان در بالادست سازه تنظیم بازه شماره 27 کانال Vadodara

سازه‌ای، امکان دستیابی به فرایند بهره‌برداری مطلوب و کارآمد شبکه‌های آبیاری فراهم می‌شود.

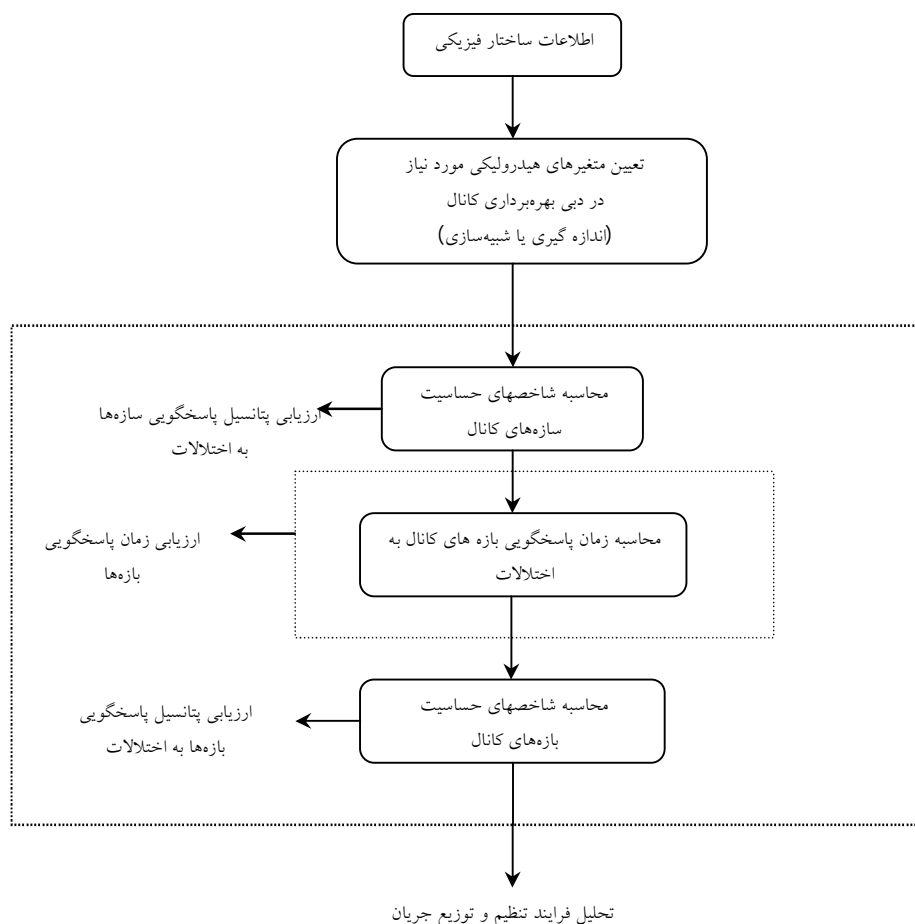
#### 4- نتیجه‌گیری

مهمترین یافته‌های این تحقیق به قرار ذیل است:

- ✓ مقدار شاخصهای حساسیت هیدرولیکی سازه‌های آبیاری تابعی از مقدار دبی بهره‌برداری کانال است.
- ✓ حساسیت هیدرولیکی عمق جریان بالادست سازه‌های تنظیم انتهایی بازه (زمانی) نسبت به دبی ورودی بازه‌ها با زمان پاسخگویی بازه به اختلالات، رابطه معکوس دارد. این شاخص در شرایط دبی بهره‌برداری حداکثر، بیشینه مقدار خود را دارد؛ از این رو بهره‌برداری از شبکه در شرایط ظرفیت طراحی، باعث کاهش زمان رسیدن به شرایط ماندگاری و مستهلک شدن نوسانات ناشی از اختلالات در سطح شبکه شده و امکان دستیابی به شرایط مناسبتر توزیع و کنترل آب را فراهم می‌سازد. این شاخص، امکان مطالعه تغییرات زمانی پروفیل سطح آب و به تبع آن فرایند توزیع جریان را فراهم می‌سازد.
- ✓ با استفاده از شاخصها و الگوریتم پیشنهادی در این تحقیق، امکان تحلیل جریانهای غیردایمی در کانالهای آبیاری به سهولت و با دقت قابل ملاحظه ای محقق می‌شود.
- ✓ کاربرد شاخصها و الگوریتم پیشنهادی تحلیل حساسیت، علاوه بر استفاده در مرحله طراحی شبکه‌های آبیاری، در دوره بهره‌برداری نیز ضمن فراهم ساختن امکان ارزیابی وضعیت پاسخگویی سیستم به اختلالات هیدرولیکی، امکان دستیابی به فرایند بهره‌برداری مطلوب و کارآمد شبکه‌های آبیاری را میسر می‌سازد.

مشخص بودن  $S_{R(H(t))}$  و منحنی تغییرات عمق نسبت به زمان برای اختلالات هیدرولیکی، امکان برنامه ریزی مناسبتر برای بهره‌برداری و دستیابی به فرایند تنظیم و توزیع مطلوب تر کانال و به تبع آن شبکه آبیاری را فراهم می‌سازد. اختلالات سازه‌ای (تغییرات جزئی در میزان تنظیم سازه‌های آبیگر یا تنظیم کننده‌های موجود در سطح بازه) نوع دوم اختلالات مهم در سطح بازه‌های کانال محسوب می‌شوند؛ لکن اختلال سازه‌ای صرفاً در سطح بازه‌ای که اعمال می‌شود اثر سازه‌ای داشته و برای بازه‌های پایین دست، اختلال هیدرولیکی به حساب می‌آید. به بیان دیگر اختلال سازه‌ای در یک سازه خاص از بازه، باعث تغییر دبی ورودی بازه پایین دست می‌شود که خود یک اختلال هیدرولیکی است. بنابراین با مطالعه اختلالات هیدرولیکی، به نوعی مطالعه آثار اختلالات سازه‌ای نیز امکان‌پذیر می‌شود.

بنابراین الگوریتم پیشنهادی در این تحقیق، کارایی لازم را به منظور رفتارسنجی جریان در شبکه‌های آبیاری داشته و ضمن برخورداری از سهولت کاربری، استفاده از آن با وجود داده‌های ساختار فیزیکی شبکه و روابط ساده جریان دائمی میسر است. محاسبه مقادیر شاخصهای حساسیت سازه‌ها می‌تواند به عنوان بخشی از عملیات پایش شبکه و در قالب اندازه‌گیریهای صحرائی انجام شده (با توجه به دشواری اجرا و هزینه‌های سنگین اندازه‌گیریهای صحرائی، در بسیاری از موارد شیوه اندازه‌گیری قابل توصیه نیست) یا با مدلسازی کانال توسط یک مدل شبیه‌ساز جریان دائمی انجام شود. مراحل تحلیل فرایند تنظیم و توزیع جریان کانالهای آبیاری با استفاده از شاخصهای حساسیت، در الگوریتم پیشنهادی شکل 9 ارائه شده است. در این روش با محاسبه مقادیر شاخصهای حساسیت هیدرولیکی، سیستم اطلاعاتی جامعی تهیه شده که ضمن فراهم آمدن امکان ارزیابی پتانسیل پاسخگویی کانال به اختلالات هیدرولیکی و



شکل 9 الگوریتم تحلیل فرایند تنظیم و توزیع جریان در کانالهای آبیاری با استفاده از شاخصهای حساسیت هیدرولیکی

### 5- فهرست علائم

$Q_{out}$	دبی خروجی بازه قبل از اعمال اختلال هیدرولیکی		
$S_{hq}$	شاخص حساسیت هیدرولیکی دبی سازه آبیگر به عمق جریان	$\beta$ و $\alpha$	ضرایب توانی رابطه دبی سازه
$S_{qh}$	شاخص حساسیت هیدرولیکی عمق جریان به تغییرات نسبی دبی	$dH_{US}$	تغییرات مطلق عمق جریان بالادست سازه
$S_{R(C)}$	شاخص حساسیت هیدرولیکی تغییرات دبی خروجی بازه به دبی ورودی بازه	$g$	شتاب ثقل
$S_{R(D)}$	شاخص حساسیت تغییرات دبی تحویلی به آبیگرهای بازه به تغییرات دبی ورودی بازه	$H'_E$	افت بار جریان خروجی از سازه
$S_{R(H(t))}$	شاخص حساسیت تغییرات زمانی عمق جریان بالادست سازه	$H_{DS}$	عمق آب در کانال فرعی پایین دست سازه
		$H_{US}$	عمق آب در کانال اصلی بالادست سازه
		$i$	شماره سازه آبیگر در یک بازه
		$L$	طول بازه
		$L_i$	ضریب زاویه خط یا منحنی برگشت آب
		$n$	تعداد آبیگر موجود در یک بازه
		$Q_{in}$	دبی ورودی بازه قبل از اعمال اختلال هیدرولیکی

[2] منتظر، ع.ا. (1383). توسعه یک مدل بهره برداری کانالها مبتنی بر حساسیت سنجی هیدرولیکی سازه های آبیاری. رساله دکتری در رشته مهندسی آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران.

[3] منتظر، ع.ا.، ص. کوچک زاده، ع.ا. لیاقت و م. ح. امید (1383). "تدوین معادلات حساسیت هیدرولیکی مدولهای تیغه ای و بررسی اثر تغییرات کمی شاخص حساسیت در شرایط بهره برداری". مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی؛ جلد هشتم، شماره سوم.

[4] 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.

[5] Ankum, P. (2004), "Flow Control in Irrigation Systems", UNESCO – IHE, Delft, The Netherlands.

[6] Ankum, P. (2002), "Design of Open – Channels and Hydraulic Structures", TUDelft University, The Netherlands.

[7] Brouwer, R. (2001), "Operational Water Management", TUDelft University, The Netherlands.

[8] 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.

[9] Horst, L. (1983), Irrigation Systems, Internal Report, Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.

[10] ITIS5 (1998), "Modernization of Irrigation System Operation", Proc. 5<sup>th</sup> Int. Meeting of the ITIS Network, D. Renault, ed. , IWMI, Colombo, Sri Lanka.

$T_w$	تنظیم در زمان پاسخگویی بازه به تغییرات نسبی دبی ورودی بازه زمان انتقال موج در بازه
$T_{RH(res)}$	زمان پاسخگویی بازه
$Q_{in}$	میزان اختلال در دبی ورودی بازه
$Q_d$	مجموع اختلال در دبی تحویلی آبگیرهای بازه
$H_{REF}$	ارتفاع سطح مرجع
$Q_{out}$	میزان اختلال در دبی خروجی سازه تنظیم کننده انتهای بازه
$V_{dyn}$	تغییرات حجم منشور ذخیره بازه ناشی از اختلال دبی ورودی
$V_0$	سرعت متوسط جریان در بازه قبل از اعمال اختلال هیدولیکی
$y_0$	عمق متوسط جریان در بازه قبل از اعمال اختلال هیدولیکی

## 6- سپاسگزاری

شبهه‌سازیهایی انجام شده با استفاده از مدل سوپک، در زمان فرصت تحقیقاتی در دانشگاه تیودلفت<sup>1</sup> هلند، توسط نویسنده اول مقاله انجام شد. بدین وسیله از همکاریهای آقایان پروفیسور بروور<sup>2</sup> و مهندس ون اورلوپ<sup>3</sup> و گروه علمی مدیریت آب و زمین دانشگاه تیودلفت که تمهیدات لازم را در زمینه استفاده از مدل و سایر منابع علمی مورد نیاز انجام تحقیق در اختیار قرار دادند، تشکر و قدردانی می‌شود.

## 7- منابع

[1] شاهرخ نیا، م.ع. و م. جوان (1382). "تعیین حساسیت سازه های تحویل آب در شبکه آبیاری درودزن با استفاده از مدل ریاضی". مجموعه مقالات یازدهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، تهران.

1. TUDelft University  
2. Brouwer  
3. Van overloop



Irrigation and Drainage, ASCE, Vol. 125, No. 3, May-June.

[16] Renault, D., I. W. Makin (1999), "Modernization Irrigation Operations", IWMI, Research Rep. No. 33, Colombo, Sri Lanka.

[17] Shanan, L. (1992), "Planning and Management of Irrigation System in Developing Countries", Agriculture Water Management, 22(1+2), Elsevier, The Netherlands.

[18] Strelkoff, T. S. , J. L. Deltour, C. M. Burt, A. J. Clemmens & J. P. Baume (1998), "Influence of Canal Geometry and Dynamic of Control Ability", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 125(1).

[19] WL/Delft Hydraulic (2000), Sobek Manual and Technical Reference, The Netherlands.

[11] Loke, E. (1994), "A Control System for The Narmada Main Conveyance Canal", M. Sc. Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands.

[12] Mahbub, S. I., N. D. Gulati (1951), Irrigation Outlets, Atma Ram, Delhi, India.

[13] Renault, D. (2000), "Aggregated Sensitivity Indicators for Irrigation System Behavior ", Agriculture Water Management , 43(2), 151-171.

[14] Renault, D. (2000), "Re-engineering Irrigation Management and System Operation", Agriculture Water Management, Vol. 47, 211-226.

[15] Renault, D., H. M. Hemakumara (1999), "Irrigation Offtakes Sensitivity", Journal of