تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی/جلد ۱۹/ شماره ۷۲/ پاییز ۱۳۹۷/ص ۱۳۲-۱۱۵

تدوین شاخص‌های حساسیت هیدرولیکی شبکهٔ آبیاری بیله‌وار در شرایط مختلف بهره‌برداری

محمدسعید بهرامی[۱]، محمدمهدی حیدری[۲*] و آرش احمدی[۳]

۱ و ۲- به‌ترتیب: دانش‌آموخته کارشناسی ارشد؛ و استادیار سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۳- دانشجوی دکترای عمران دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۹۶/۷/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۱/۱۲

چکیده

روش تحلیل حساسیت، روشی جدید برای رفتارسنجی جریان در شبکه‌های آبیاری است که در دهه‌های اخیر مطرح شده است. با استفاده از شاخص‌های حساسیت می‌توان روش‌های بهره‌برداری را بررسی کرد. در این تحقیق، روش‌های بهره‌برداری از کانال BLMC بررسی شده است که نواحی عمرانی B_3 و B_4 شبکهٔ آبیاری بیله‌وار در استان کرمانشاه را آبیاری می‌کند. حداقل و حداکثر دبی بهره‌برداری از این کانال ۱/۱۸ و ۲/۱۱ متر مکعب بر ثانیه است. در این پژوهش، برای بهره‌برداری از شبکهٔ آبیاری بیله‌وار دو سناریو در نظر گرفته شده است. در سناریوی اول، دبی ورودی به مزارع با مدول‌های نیرپیک و در سناریوی دوم با شیر نصب شده روی پمپ‌ها کنترل می‌شود. در سناریوی اول برای شرایط حداکثر دبی بهره‌برداری در ابتدای شبکهٔ آبیاری بیله‌وار اکثر شاخص حساسیت آبگیرها منفی و در انتهای شبکه اکثر شاخص‌های حساسیت مثبت است. بنابراین، هرگاه دبی ورودی به کانال BLMC افزایش یابد، با توجه به منفی بودن شاخص حساسیت، دبی ورودی به آبگیرهای ابتدای شبکه کاهش می‌یابد. در سناریوی دوم، شاخص حساسیت دبی نسبت به تغییرات فشار برای ایستگاه‌های پمپاژ محاسبه و با در نظر گرفتن تغییرات مجاز دبی برای هر ایستگاه، مقدار تغییرات مجاز فشار محاسبه شد. در این تحقیق با درنظر گرفتن ۲۰ درصد تغییرات دبی واحد B_4 به‌عنوان اختلالات هیدرولیکی، شاخص حساسیت انتقال مجموعه بازه‌ها محاسبه و با نتایج مدل هیدرولیکی HEC-RAS مقایسه شد. متوسط میزان خطای روش تحلیل حساسیت در محاسبهٔ میزان انتقال اختلالات هیدرولیکی بازه‌ها ۳/۴۲ درصد است.

واژه‌های کلیدی

اختلالات هیدرولیکی، روش تحلیل حساسیت، شبکهٔ آبیاری بیله‌وار، مدل HEC-RAS

مقدمه

راندمان پایین کانال‌های آبیاری و تأثیر آن در کاهش عملکرد هیدرولیکی شبکه، ضرورت توجه به بازنگری و اصلاح روش‌های مرسوم را در بهره‌برداری شبکه‌های آبیاری ایجاب می‌کند. یکی از روش‌های ساده و کارا برای رفتارسنجی جریان در مجاری روباز، شیوهٔ تحلیل حساسیت است. در این روش، با استفاده از روابط جریان دائمی و داده‌های مرتبط با ساختار فیزیکی کانال، به بررسی واکنش شبکه نسبت به تغییرات دبی و تحلیل جریان پرداخته می‌شود (Renault, 2000a). تعیین حساسیت سازه‌های مختلف آبیاری به مدیران شبکه کمک می‌کند تا سازه‌های حساس‌تر را شناسایی کنند و کنترل بیشتری بر آنها داشته باشند. محبوب و گولاتی (Mahbub & Gulati, 1951) برای نخستین بار حساسیت

* نگارنده مسئول: mm.heidari@razi.ac.ir

http://doi: 10.22092/idser.2018.115631.1258

سازه‌های شبکهٔ آبیاری را با بررسی حساسیت مجاری تخلیهٔ جریان مطالعه کردند. این محققان حساسیت مجاری تخلیه‌کننده را به‌صورت تغییرات نسبی دبی سازهٔ تخلیه‌کننده به تغییرات عمق جریان بالادست سازه نسبت به عمق نرمال کانال تعریف کردند. کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی (Anon, 1967) حساسیت سازهٔ آبگیر را به‌عنوان تغییرات نسبی دبی آبگیر به تغییرات نسبی عمق آب بالادست آن معرفی کردند. هورست (Horst, 1983) شاخص حساسیت هیدرولیکی را در سطح بازه گسترش داد و شاخص انعطاف‌پذیری را به‌منظور مطالعهٔ وضعیت انتشار تغییرات اعمالی در دبی ورودی کانال تعریف کرد. نسبت تغییرات نسبی دبی آبگیری به تغییرات نسبی دبی کانال اصلی، شاخص انعطاف‌پذیری است.

مالاتر و بوم (Malaterre & Baume, 1997) نتایج به دست آمده از روابط تحلیلی روش آنالیز حساسیت و مدل هیدرولیکی SIC[1] را برای دو شبکهٔ آبیاری ماهاویل و کیریندویا در سری‌لانکا و شبکهٔ فوردوا در پنجاب پاکستان مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که روش تحلیل حساسیت روشی ساده و مناسب برای ارزیابی و شناخت رفتار جریان در شبکه‌های آبیاری است. شاهرخ‌نیا و همکاران (Shahrokhnia *et al.*, 2002) با بررسی دقت مدل Mike11 و HEC-RAS در شبیه‌سازی جریان در شبکهٔ آبیاری درودزن نشان دادند دقت مدل HEC-RAS در شبیه‌سازی جریان در شبکهٔ آبیاری بهتر از دقت مدل Mike11 است. شاهرخ نیا و جوان (Shahrokhnia & Javan, 2002) با استفاده از مدل هیدرولیکی HEC-RAS حساسیت برخی از سازه‌های شبکهٔ آبیاری درودزن فارس را بررسی و با استفاده از آن سازه‌هایی را شناسایی کردند که حساسیت بالایی نسبت به دبی کانال اصلی و عمق آب دارند. کوچک‌زاده و منتظر (Kouchakzadeh & Montazar, 2005) با تدوین شاخص‌های مختلف حساسیت در سطوح سازه و بازه به رفتارسنجی جریان در شبکهٔ آبیاری وادودارا (کشور هند) در شرایط حداقل و حداکثر دبی بهره‌برداری پرداختند و نتایج حاصل از تحلیل حساسیت را با مدل هیدرولیکی SOBEK بررسی کردند. نتایج مطالعات آنها نشان می‌دهد شاخص‌های حساسیت معرفی شده، در تجزیه و تحلیل وضعیت جریان و مطالعهٔ گزینه‌های مختلف بهره‌برداری کارایی مناسبی دارند.

شاهرخ‌نیا و جوان (Shahrokhnia & Javan, 2007) به بررسی تأثیر تغییرات ضریب مانینگ بر دبی آبگیرها پرداختند و شاخص حساسیت تغییرات دبی آبگیر به زبری کانال را ارائه دادند و برای شبکهٔ درودزن به‌کار بردند. نتایج پژوهش‌های آنها نشان می‌دهد که تغییرات ضریب زبری مانینگ در شبکهٔ آبیاری درودزن بر پروفیل سطح آب در کانال و بر دبی تعدادی از آبگیرها تأثیر دارد. وطن‌خواه و همکاران (Vatankhah *et al.*, 2008) با استفاده از شاخص حساسیت هیدرولیکی معادل، به مطالعهٔ شرایط جریان در توزیع‌کننده‌های تیغه‌ای پرداختند و روابطی تحلیلی برای حساسیت هیدرولیکی پروفیل سطح آب نسبت به تغییرات دبی در کانال‌های آبیاری ارائه دادند. شاهرخ‌نیا و همکاران (Shahrokhnia *et al.*, 2009) با ارائهٔ شاخص حساسیت تغییرات دبی آبگیر و کانال اصلی به عمق آب در کانال فرعی، آن را برای شبکهٔ آبیاری درودزن به‌کار گرفتند. تحقیقات این پژوهشگران نشان می‌دهد که عمق آب در کانال فرعی شبکهٔ درودزن بر دبی تعدادی از آبگیرها بیشتر تأثیر دارد؛ با شناسایی این آبگیرها می‌توان کنترل بیشتری بر تراز سطح آب در کانال‌های فرعی پایین‌دست داشت. سیدجواد و همکاران (Seyedjavad *et al.*, 2013) با استفاده از اندازه‌گیری‌های صحرایی و نتایج مدل هیدرودینامیکی SOBEK، به بررسی حساسیت مدول‌های نیرپیک شبکه آبیاری ورامین پرداختند و نشان دادند شاخص‌های حساسیت آبگیرها محاسبه شده با داده‌های واقعی و نتایج مدل هیدرودینامیکی تطابق خوبی دارند. با توجه به توزیع نامناسب آب، به‌خصوص در

1- Simulation of Irrigation Canals

پایین‌دست این شبکه، آبگیرهای حساس شناسایی شدند و با استفاده از روش تحلیل حساسیت، یک روش بهره‌برداری مناسب برای این شبکه پیشنهاد شده است. حیدری و کوچک‌زاده (Heidari & Kouchakzadeh, 2015) با در نظر گرفتن ضریب دبی متغیر برای دریچه‌های کشوی، روابطی تحلیلی برای شاخص‌های حساسیت آبگیرها و تنظیم‌کننده ارائه دادند و نتایج به‌دست آمده را با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کردند. نتایج مقایسه نشان می‌دهد اگر ضریب دبی دریچه متغیر در نظر گرفته شود، خطای محاسبهٔ شاخص‌های حساسیت کمتر می‌شود. این محققان همچنین با در نظر گرفتن ضریب دبی متغیر شاخص‌های حساسیت انتقال و تحویل بازه را ارائه دادند.

در زمینهٔ شبیه‌سازی جریان، نرم‌افزارهایی متنوع وجود دارد؛ اکثر این مدل‌های شبیه‌سازی تجاری هستند و برای استفاده از آنها باید بهایی بالا پرداخت. در شبکهٔ مورد مطالعه چند سیفون بزرگ در مسیر جریان قرار دارد که جریان در آنها تحت فشار است. به‌عبارت دیگر، جریان در برخی قسمت‌های شبکه ترکیبی از تحت فشار و آزاد است که مدل هیدرودینامیکی باید بتواند آنها را شبیه‌سازی کند. برخی از مدل‌ها، برای حل شرایط ماندگار از معادلات جریان غیرماندگار و با ثابت در نظر گرفتن شرایط مرزی بالادست و پایین‌دست استفاده می‌کنند. بنابراین، با شبیه‌سازی جریان در حالت ماندگار، مدت زمان اجرای برنامه زیادتر از هنگامی خواهد شد که نرم‌افزارها با استفاده از روش گام به گام استاندارد جریان ماندگار را شبیه‌سازی می‌کنند. بر این اساس در این پژوهش، مدل HEC-RAS به چند دلیل انتخاب و استفاده شده است: در دسترس بودن، ساده بودن کاربرد آن، داشتن دقت مناسب، و داشتن توان شبیه‌سازی جریان تحت فشار و آزاد.

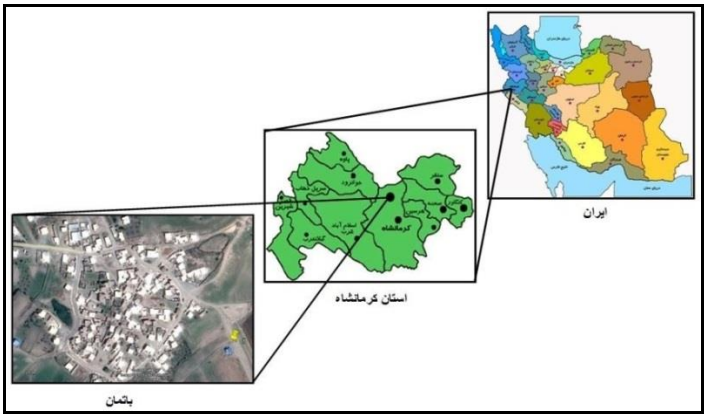
با استفاده از مدل‌های هیدرودینامیکی می‌توان نحوهٔ انتقال و پخش اختلالات هیدرولیکی در شبکهٔ آبیاری را بررسی کرد، اما محدودیت دسترسی، پیچیده بودن کاربرد، و نیاز به تخصص بالا در کاربرد آن مدل‌ها ایجاب می‌کند شیوه‌هایی ساده‌تر ابداع شوند. این تحقیق با هدف توسعهٔ شاخص‌های حساسیت هیدرولیکی ناشی از اختلالات دبی و ارائهٔ مدل تحلیل جریان کانال‌های آبیاری با استفاده از این شاخص‌ها اجرا شده است. بدین منظور، با استفاده از نتایج شبیه‌سازی دو سناریوی بهره‌برداری در شرایط حداقل و حداکثر دبی بهره‌برداری، شاخص‌های مختلف حساسیت برای شبکهٔ بیله‌وار توسعه داده شد و با مقایسهٔ شاخص‌های حساسیت هر دو روش توزیع آب، به بررسی نحوهٔ انتقال و پخش اختلالات هیدرولیکی در شبکه پرداخته شده است. برای بررسی نحوهٔ پخش این اختلالات در شبکه و صحت‌سنجی شاخص‌های تحلیلی حساسیت هیدرولیکی در سطوح مختلف، از مدل HEC-RAS استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

معرفی شبکهٔ آبیاری بیله‌وار

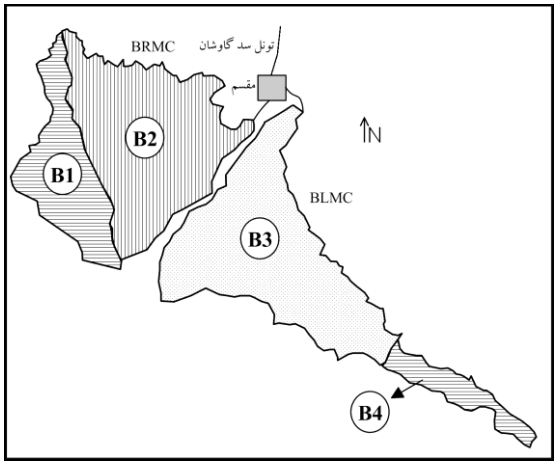
شبکهٔ آبیاری بیله‌وار مدرن‌ترین شبکه استان کرمانشاه است که از تونل سد گاوشان تغذیه می‌شود و برنامه‌های آبیاری آن را شرکت بهره‌بردار تعیین می‌کند. شبکهٔ آبیاری بیله‌وار در قالب چهار واحد عمرانی B1، B2، B3، و B4 حدود ۷۶۳۸ هکتار زمین را در شمال استان کرمانشاه تحت پوشش قرار می‌دهد. انتقال آب به واحدهای عمرانی B1 و B2 را کانال BRMC و واحدهای B3، و B4 را کانال BLMC تأمین می‌کند. کانال BLMC به طول ۱۲۷۳۴ متر، از آب پخش تونل سد گاوشان آبگیری می‌کند و حدود ۲۱۹۳ هکتار از واحد عمرانی B3 و ۱۰۵۰ هکتار از واحد عمرانی B4 را با استفاده از سیستم بارانی آبیاری می‌کند. کانال BLMC دارای ۲۲ سازهٔ تنظیم‌کننده از نوع سرریزهای نوک اردکی و ۲۷ آبگیر است. انتقال آب از کانال اصلی به مزارع در واحد عمرانی B3 با ۲۶ دهانهٔ آبگیر از نوع مدول نیرپیک XX_2 و L_2

صورت می‌گیرد، ۲۳ دهانهٔ آبگیر به حوضچه‌ای متصل می‌شوند؛ فشار مورد نیاز آبیاری بارانی را پمپ تأمین می‌کند. سه دهانهٔ آبگیر دیگر این واحد عمرانی (B3P1,B3P2, B3P4) مجهز به مدول‌های نیرپیک دو لبه هستند و به‌دلیل اختلاف ارتفاع سطح آب تا مزارع، فشار مورد نیاز آبیاری بارانی ثقلی تامین می‌شود. واحد عمرانی B4 دارای یک ایستگاه پمپاژ متمرکز در فاصله ۸۶۶۶ متری از ابتدای کانال است که متغیرهای بهره‌برداری مانند فشار، دبی و حجم آب تحویلی را شرکت بهره‌بردار پیوسته اندازه‌گیری و کنترل می‌کند. واحد عمرانی B3 شامل ۴۵ مزرعه است که فشار مورد نیاز ۲۹ مزرعه از طریق ایستگاه پمپاژ و ۱۶ مزرعه از طریق ثقل تأمین می‌شود. شکل ۱ موقعیت محدودهٔ طرح و شکل ۲ موقعیت واحدهای عمرانی مختلف شبکه آبیاری بیله‌وار را نشان می‌دهد.

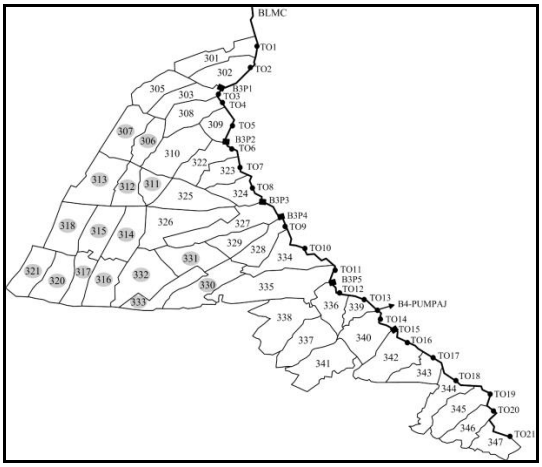


شکل ۱- موقعیت محدودهٔ شبکهٔ آبیاری بیله‌وار

شکل ۳، کانال اصلی BLMC شبکهٔ آبیاری بیله‌وار، آبگیرهای کانال BLMC و موقعیت مزارع آن را نشان می‌دهد. مزارع شبکه از ۳۰۱ تا ۳۴۷ شماره‌گذاری اما مزارع ۳۰۴ و ۳۱۹ از طرح حذف شده‌اند. در شکل ۳، فشار آب آبیاری بارانی مزارعی که شمارهٔ آنها در دایرهٔ خاکستری است با ثقل تامین می‌شود. مشخصات آبگیرها و مزارع تحت پوشش آنها در شبکهٔ آبیاری بیله‌وار در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۲- موقعیت واحد عمرانی B1، B2، B3، و B4 شبکهٔ آبیاری بیله‌وار



شکل ۳- کانال اصلی BLMC شبکهٔ آبیاری بیله‌وار و موقعیت مزارع آن

جدول ۱- مشخصات آبگیرها و مزارع تحت پوشش آنها در شبکهٔ آبیاری بیله‌وار

ردیف	نام آبگیر	شماره مزرعه	نوع دریچه	ردیف	نام آبگیر	شماره مزرعه	نوع دریچه
۱	TO1	F301	XX2-120	۱۴	TO10	F334	XX2-120
۲	TO2	F302	XX2-90	۱۵	TO11	F335	XX2-120
۳	TO3	F303	XX2-60	۱۶	TO12	F336	XX2-60
۴	B3P1	F305- F307	XX2-300	۱۷	B3P5	F337- F338	XX2-240
۵	TO4	F308	XX2-90	۱۸	TO13	F339	XX2-60
۶	TO5	F309	XX2-60	۱۹	TO14	F340	XX2-120
۷	B3P2	F310- F321	L2-600	۲۰	TO15	F341	XX2-150
۸	TO6	F322	XX2-90	۲۱	TO16	F342	XX2-150
۹	TO7	F323	XX2-90	۲۲	TO17	F343	XX2-90
۱۰	TO8	F324	XX2-90	۲۳	TO18	F344	XX2-120
۱۱	B3P3	F325- F327	XX2-300	۲۴	TO19	F345	XX2-90
۱۲	TO9	F328	XX2-90	۲۵	TO20	F346	XX2-150
۱۳	B3P4	F329- F333	XX2-360	۲۶	TO21	F347	XX2-120

شاخص‌های حساسیت هیدرولیکی شبکهٔ آبیاری بیله‌وار

در این پژوهش، برای بهره‌برداری از شبکهٔ آبیاری بیله‌وار دو سناریو در نظر گرفته شده است. در سناریوی اول، کنترل دبی توسط دریچه‌های نیرپیک صورت می‌گیرد و میراب دبی ورودی به مزارع را با باز و بسته کردن کشوهای دریچه تنظیم می‌کند؛ این سناریو در زمان طراحی مد نظر بوده است. در سناریوی دوم، کنترل دبی را پمپ‌ها به‌عهده دارند و میراب با باز و بسته کردن شیر فلکهٔ نصب شده روی لولهٔ رانش پمپ و مشاهدهٔ فشار خروجی پمپ، دبی ورودی به مزارع را تنظیم می‌کند. هر یک از سناریوها با مشکلاتی همراه است. برای مثال، بر اساس گزارش‌های شرکت بهره‌بردار، مقدار دبی مورد نیاز یکی از نواحی عمرانی (واحد عمرانی B4) شبکه به‌دلیل تنوع کشت در هر دور آبیاری تغییر می‌کند و لازم است در بعضی از روزهای آبیاری، این تغییر دبی در ابتدای شبکه اعمال شود. در صورتی‌که از سناریوی اول برای بهره‌برداری استفاده شود، به‌دلیل حساسیت دبی آبگیرهای بالادست شبکه، تغییر دبی ایجاد شده در ابتدای شبکه و تغییر دبی مورد نیاز واحد عمرانی B4 با هم برابر نیست و این واحد همواره با کمبود یا با افزایش آب مواجه خواهد شد. شرکت بهره‌برداری اگر از سناریوی دوم برای بهره‌برداری استفاده کند با چنین مشکلی مواجه نمی‌شود. در سناریوی دوم نیز بر اساس دستورالعمل شرکت بهره‌بردار، در صورتی‌که فشار اندازه‌گیری شده با فشارسنج در ابتدای لولهٔ رانش پمپ، ۰/۲ بار کمتر از فشار درنظر گرفته شده برای هر ایستگاه پمپاژ شود، متصدی بهره‌برداری باید شیر تنظیم دبی را مقداری ببندد تا دبی عبوری از پمپ کاهش و فشار به مقدار مورد نظر افزایش یابد. با توجه به اینکه شاخص حساسیت دبی نسبت به تغییرات فشار هر ایستگاه پمپاژ متفاوت است، کاهش ۰/۲ بار فشار برای هر ایستگاه پمپاژ تغییرات دبی متفاوتی ایجاد می‌کند. با استفاده از روش تحلیل حساسیت می‌توان به بررسی مشکلات هر یک از سناریوهای بهره‌برداری پرداخت و برنامهٔ مناسب توزیع و تحویل آب را ارائه داد. شاخص‌های مختلف حساسیت هیدرولیکی در سطوح سازه و بازه را برخی محققان ارائه داده‌اند. در این تحقیق، شاخص‌های حساسیت هیدرولیکی در سطح سازه شامل حساسیت دبی آبگیر نسبت به عمق

آب و حساسیت عمق آب بالادست تنظیم‌کننده نسبت به دبی برای سناریوی اول و حساسیت دبی پمپاژ به تغییرات فشار برای سناریوی دوم ارائه و شاخص حساسیت انتقال بازه بررسی می‌شود که شاخصی در سطح بازه است.

شاخص حساسیت دبی آبگیر نسبت به عمق آب

دبی عبوری از دریچه‌های آبگیری در شرایط جریان آزاد، تابع عمق آب بالادست و میزان بازشدگی است، به‌طوری‌که اگر مقدار بازشدگی دریچه ثابت باشد و عمق آب بالادست آبگیر به‌دلیل اختلال در دبی ورودی به کانال اصلی تغییر کند، میزان دبی عبوری از آبگیر نیز تغییر می‌کند. با استفاده از رابطهٔ ۱، میزان تأثیر تغییرات عمق آب بالادست دریچه بر دبی آبگیر بررسی می‌شود (Renault & Hemakumara, 1999):

$$S_{hq} = \frac{dq / dh}{q} \qquad (۱)$$

که در آن،

S_{hq} = حساسیت دبی آبگیر نسبت به تغییرات عمق آب بر حسب متر$^{-۱}$؛ dh = تغییرات عمق آب در بالادست آبگیر بر حسب متر؛ q = دبی آبگیر؛ و dq = تغییرات دبی آبگیر بر حسب لیتر بر ثانیه.

شاخص حساسیت دبی آبگیر نسبت به تغییرات عمق آب را می‌توان با استفاده از داده‌های صحرایی، مدل‌های عددی، و روش تحلیل به‌دست آورد. برای محاسبهٔ شاخص حساسیت S_{hq} با استفاده از مدل‌های عددی، ابتدا مشخصات هندسی کانال و سازه‌های آن (شامل آبگیر، تنظیم‌کننده، و سایر بناها به‌همراه منحنی دبی-اشل) وارد مدل می‌شود. با استفاده از برنامهٔ آبیاری ارائه شده در سال‌های قبل، دبی ورودی در شرایط مختلف (حداکثر و حداقل دبی بهره‌برداری) تعیین می‌شود. با استفاده از مدل عددی، برای دبی مربوط در شرایط ماندگار شبیه‌سازی می‌شود و از خروجی مدل، مقدار دبی ورودی به آبگیرها و عمق بالادست آنها استخراج و به‌عنوان دبی و عمق قبل از اختلالات در نظر گرفته خواهد شد. گاهی ممکن است در یک دور آبیاری، دبی ورودی به شبکه به‌دلیل الگوی کشت متنوع مقداری تغییر کند، در این حالت نیز مجددا مدل هیدرودینامیکی در شرایط ماندگار اجرا می‌شود. با توجه به تغییر دبی ورودی، پروفیل سطح آب و دبی ورودی به آبگیرها تغییر پیدا می‌کند و از خروجی نرم‌افزار قابل استخراج است. با توجه به رابطهٔ ۲ می‌توان شاخص حساسیت آبگیرها را با استفاده از مدل‌های هیدرودینامیکی محاسبه کرد:

$$S_{hq} = \frac{\left[(q_2 - q_1)/(h_2 - h_1)\right]}{q_1} \qquad (۲)$$

که در آن،

q_1 و h_1= به‌ترتیب دبی و عمق قبل از اختلالات؛ و q_2 و h_2= به‌ترتیب دبی و عمق بعد از اختلالات.

آبگیرهای طراحی شده برای شبکهٔ آبیاری بیله‌وار از نوع مدول‌های نیرپیک XX_2 و L_2 هستند و دبی عبوری از آنها در محدوده‌ای خاص از تغییرات سطح آب کانال تغذیه‌کننده، نزدیک به دبی طراحی است. دبی عبوری از دریچه‌های نیرپیک در حالت کلی از رابطهٔ ۳ محاسبه می‌شود:

$$q = q_d\left(1 + \frac{q^*}{100}\right) \qquad (۳)$$

که در آن،

q_d = دبی طراحی دریچه بر حسب لیتر بر ثانیه؛ و q^* = درصد تغییرات دبی آبگیر.

به‌دلیل نوسانات عمق آب کانال تغذیه‌کننده است که از رابطهٔ ۴ محاسبه می‌شود:

$$q^* = Ah^2 + Bh + C \qquad (۴)$$

که در آن،

h =عمق آب روی تاج سرریز آبگیر (بر حسب سانتی‌متر)؛ و ضریب‌های A، B، و C = مقادیری ثابت که بستگی به نوع دریچهٔ نیرپیک و عمق آب روی تاج سرریز دریچه‌ها دارد و منعم و مساح (Monem & Massah, 2002) آنها را ارائه داده‌اند.

با استفاده از رابطه‌های ۱، ۳، و ۴، شاخص حساسیت دبی مدول‌های نیرپیک نسبت به عمق آب مطابق رابطهٔ ۵ محاسبه می‌شود:

$$S_{hq} = \frac{100(2Ah + B)}{100 + (Ah^2 + Bh + C)} \qquad (۵)$$

شاخص حساسیت عمق آب بالادست تنظیم‌کننده نسبت به دبی

اختلالات هیدرولیکی بازه‌های بالادست و یا اجرای برنامه‌های آبیاری باعث تغییر عمق آب در بالادست تنظیم‌کننده می‌شود. برای تعیین تأثیر تغییرات دبی بر عمق آب بالادست تنظیم‌کننده، از شاخص حساسیت عمق آب بالادست تنظیم‌کننده به تغییرات دبی بر حسب متر، S_{qh} ، مطابق رابطهٔ ۶ استفاده می‌شود (Renault, 2000a):

$$S_{qh} = \frac{dh_R / dq_R}{q_R} \qquad (۶)$$

که در آن،

dh_R =تغییرات عمق آب بالادست تنظیم‌کننده بر حسب متر؛ q_R و dq_R = به‌ترتیب دبی و تغییرات دبی عبوری از تنظیم‌کننده بر حسب لیتر بر ثانیه.

پیشتر گفته شد که تنظیم‌کننده‌های شبکه از نوع سرریزهای نوک اردکی هستند، از این رو رابطهٔ دبی- اشل حاکم بر این سازه‌ها به‌صورت رابطهٔ ۷ است:

$$q_R = C_d L h_R^{1.5} \qquad (۷)$$

که در آن،

Cd = ضریب سرریز؛ L = طول سرریز؛ و hR = عمق آب روی سرریز.

با توجه به رابطهٔ حاکم بر دبی عبوری از سرریز و دیفرانسیل‌گیری از آن، شاخص حساسیت S_{qh} مطابق رابطهٔ ۸ ارائه می‌شود:

$$S_{qh} = \frac{h_R}{1.5} \qquad (۸)$$

شاخص حساسیت دبی پمپاژ نسبت به تغییرات فشار

در شبکهٔ آبیاری بیله‌وار، کشاورزان تمایل دارند با قرار دادن رایزرهایی بیش از تعدادی که شرکت بهره‌بردار برنامه‌ریزی کرده است، مدت زمان آبیاری مزارع خود را کاهش دهند. افزایش تعداد رایزرهای مزارع باعث افزایش دبی پمپاژ و افت طولی لوله و در نتیجه کاهش فشار پمپاژ می‌شود. با توجه به آنکه متصدی بهره‌بردار دبی را بر اساس تغییر فشار پمپ تنظیم می‌کند، بنابراین بررسی تاثیر تغییرات فشار خروجی پمپ بر دبی می‌تواند در تهیهٔ برنامهٔ بهره‌برداری استفاده شود. شاخص حساسیت دبی پمپاژ نسبت به تغییرات فشار بر حسب بار، Spq، مطابق رابطهٔ ۹ استفاده می‌شود:

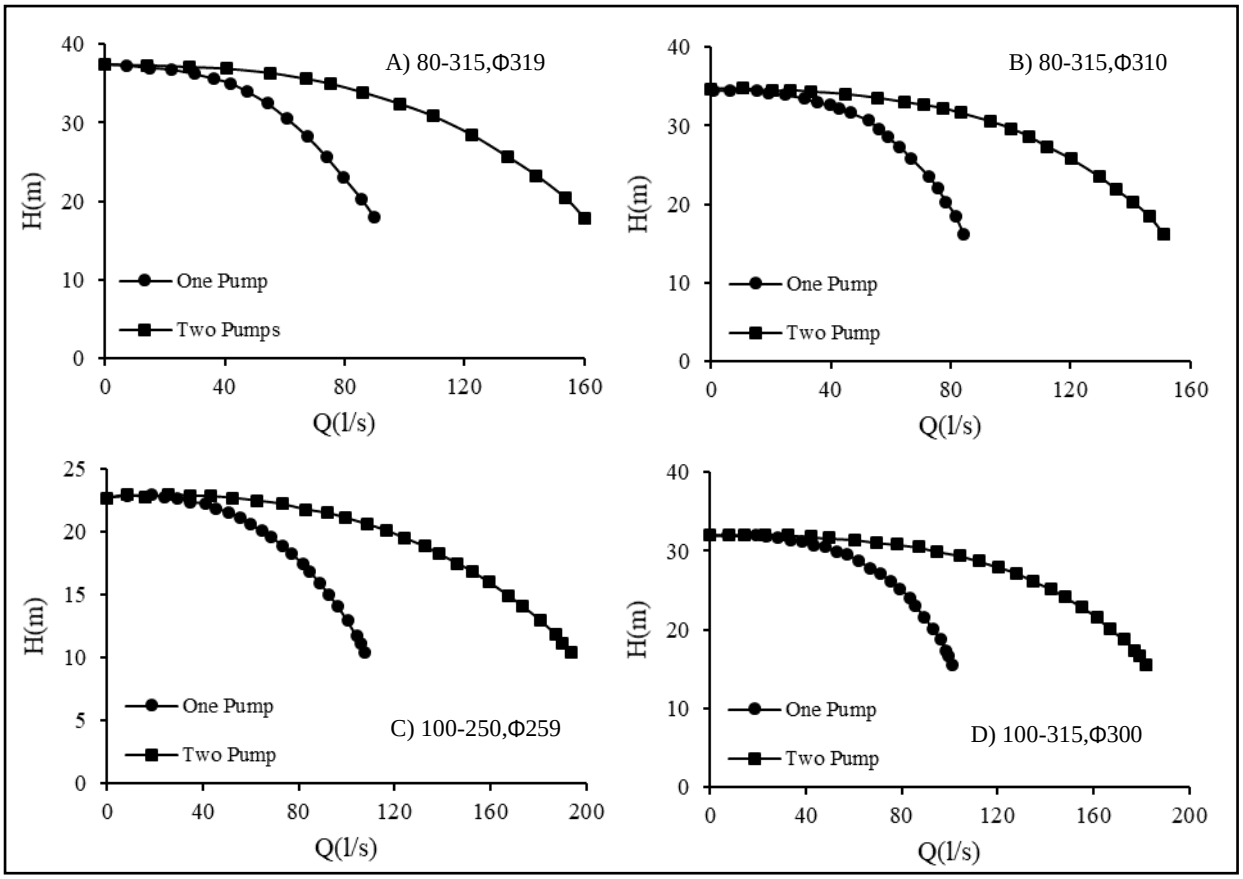
$$S_{pq} = \frac{dq / dp}{q} \qquad (۹)$$

که در آن،

dp = تغییرات فشار ایستگاه پمپاژ بر حسب بار؛ q و dq = به‌ترتیب دبی و تغییرات دبی عبوری از ایستگاه پمپاژ بر حسب لیتر بر ثانیه.

در شبکهٔ آبیاری بیلوار، ۹ مزرعه دارای پمپ سانتریفیوژ افقی از نوع ۳۱۵-۸۰، ۲۵۰-۱۰۰، ۳۱۵-۱۰۰، و ۴۰۰-۱۰۰ و ۲۰ مزرعه دارای پمپ فشار قوی از نوع WKL-100 دو و سه طبقه با قطر پروانه ۲۶۰، ۲۶۰، ۲۵۵، و ۲۵۰ میلی‌متر هستند. در هر ایستگاه پمپاژ سه پمپ

(که یکی از آنها کمکی است) وجود دارد که به‌صورت موازی به هم متصل‌اند. در دبی‌های کم، یک پمپ و در دبی‌های زیاد دو پمپ روشن می‌شود. منحنی‌های مشخصهٔ ارائه شده از طرف کارخانهٔ سازنده، در برگیرندهٔ مشخصات هیدرولیکی پمپ در یک دور و قطر پروانه مشخص است. وقتی فقط یک پمپ روشن باشد، می‌توان از منحنی مشخصه‌ای استفاده کرد که کارخانه ارائه می‌دهد. در پمپ‌های موازی، با توجه به آنکه فشار خروجی ثابت می‌ماند و بده تغییر می‌کند، برای رسم منحنی‌های مشخصه پمپ‌های موازی ابتدا با انتخاب مقادیر مشخصی ارتفاع فشار (H) و مقادیر دبی (Q_1 و Q_2) از روی منحنی‌های مشخصهٔ هر پمپ به‌طور جداگانه تعیین و با هم جمع می‌شود. با رسم مقادیر مختلف دبی به‌دست آمده از این روش در مقابل فشارهای انتخاب شده منحنی‌های مشخصه دبی- فشار پمپ‌های موازی به‌دست می‌آید. در شکل ۴، نمونه‌ای از منحنی‌های مشخصهٔ پمپ‌های سانتریفوژ ایستگاه‌های پمپاژ شبکهٔ بیله‌وار آورده شده است.



شکل ٤- نمونه‌ای از منحنی‌های مشخصه پمپ‌های سانتریفوژ ایستگاه‌های پمپاژ شبکهٔ بیله‌وار

برای محاسبهٔ این شاخص باید از منحنی مشخصه ایستگاه‌های پمپاژ نسبت به فشار مشتق گرفت. منحنی مشخصه ایستگاه‌های پمپاژ در حالت کلی به‌صورت رابطهٔ ۱۰ است (Anton & Aldea, 2014):

$$H = Aq^2 + Bq + C \qquad (۱۰)$$

که در آن،

H = ارتفاع پمپاژ بر حسب متر؛ A، B، و C = ضریب‌هایی ثابت که از برازش منحنی مشخصهٔ پمپ برای هر ایستگاه

به‌دست می‌آیند.

با دیفرانسیل‌گیری از رابطهٔ ۱۰ و ساده‌سازی خواهیم داشت (رابطهٔ ۱۱):

$$\frac{dq/dH}{q}=\frac{1}{q(2Aq+B)} \qquad (۱۱)$$

رابطهٔ فشار و ارتفاع پمپاژ برابر $p=\gamma H$ است و با توجه به اینکه یک بار فشار حدود ۱۰۱۳۰۰ پاسکال است، رابطهٔ ۱۱ را می‌توان ساده و به‌صورت رابطهٔ ۱۲ نوشت:

$$S_{pq}=\frac{101300}{\gamma q(2Aq+B)} \qquad (۱۲)$$

که در آن،

γ = وزن مخصوص سیال بر حسب نیوتن بر مترمکعب؛ Spq = شاخص حساسیت دبی به فشار ایستگاه پمپاژ که واحد آن bar^{-1} است و بستگی به نوع پمپ و دبی عبوری دارد.

ایستگاه‌های پمپاژ شبکهٔ بیله‌وار در ماه‌هایی که نیاز آبی کم است ممکن است با یک پمپ و در ماه‌های پرمصرف با دو پمپ کار کنند که به‌صورت موازی به هم متصل شده‌اند.

شاخص حساسیت انتقال بازه

بررسی رفتار جریان عبوری از یک سازهٔ آبگیر و یا سازه تنظیم‌کننده نمی‌تواند به تنهایی اطلاعات کافی را در نحوهٔ پخش و توسعهٔ اختلالات به مدیران و بهره‌برداران از شبکه‌های آبیاری بدهد. از طرف دیگر، سازه‌ها در کانال‌های آبیاری رفتار هیدرولیکی مستقلی ندارند و به یکدیگر وابسته‌اند. برای مثال، تغییر مقدار دبی عبوری از آبگیر باعث تغییر عمق آب در بالادست تنظیم‌کننده می‌شود و این تغییر عمق آب باعث تغییر در پروفیل سطح آب در همان بازه می‌گردد. بدین‌ترتیب، مقدار دبی آبگیرهایی که تحت تأثیر پروفیل پس‌زدگی آب در این بازه هستند، افزایش یا کاهش می‌یابد. بنابراین، برای بررسی رفتار هیدرولیکی جریان باید شاخص‌های حساسیت را در سطح بازه توسعه داد. تغییرات جزئی در میزان دبی ورودی به بازه به‌صورت برنامه‌ریزی شده یا برنامه‌ریزی نشده باعث ایجاد اختلالات هیدرولیکی می‌شود. معادلهٔ بیلان دبی ناشی از اختلالات هیدرولیکی در یک بازه به‌صورت رابطهٔ ۱۳ است (Renault, 2000b):

$$\Delta Q_{in(k)}=\Delta Q_{d(k)}+\Delta Q_{out(k)} \qquad (۱۳)$$

که در آن،

$\Delta Qin(k)$ = میزان تغییر دبی ورودی به بازه kام بر حسب لیتر بر ثانیه؛ $\Delta Qout(k)$= میزان تغییر دبی خروجی از بازه kام، و $\Delta Qd(k)$ = میزان تغییر دبی تحویلی به آبگیرهای موجود در بازه kام بر حسب لیتر بر ثانیه.

با استفاده از شاخص حساسیت دبی آبگیرها نسبت به عمق آب، مجموع تغییرات دبی آبگیرها در یک بازه از رابطهٔ ۱۴ محاسبه می‌شود:

$$\Delta Q_{d(k)}=\Delta H_{(k)R}\sum_{i=1}^{i=n}S_{hq(k)i}q_{(o)(k)i} \qquad (۱۴)$$

با استفاده از شاخص حساسیت عمق آب بالادست تنظیم‌کننده نسبت به دبی، تغییرات ایجاد شده در دبی خروجی از بازه مطابق رابطهٔ ۱۵ است:

$$\Delta Q_{out(k)}=Q_{out(k)}\Delta H_{(k)R}(S_{qh(k)})^{-1} \qquad (۱۵)$$

برای مطالعهٔ پاسخ بازه‌ها به اختلالات هیدرولیکی، از شاخص حساسیت انتقال بازه، $S_{RC(k)}$، استفاده می‌شود. این شاخص بیان می‌کند که چه مقدار از اختلالات هیدرولیکی ورودی به بازه از آن خارج می‌شود و به‌صورت رابطهٔ ۱۶ است (Renault, 2000b):

$$S_{RC(k)} = \frac{\Delta Q_{out(k)}}{\Delta Q_{in(k)}} \qquad (۱۶)$$

با جایگزینی رابطه‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ در رابطهٔ ۱۶ و ساده‌سازی آن، شاخص حساسیت انتقال بازه kام به‌صورت تحلیلی مطابق رابطهٔ ۱۷ ارائه می‌شود:

$$S_{RC(k)} = Q_{out(k)} / \left\{ S_{qh(k)} \left[\sum_{i=1}^{i=n} S_{hq(k)i}\, q_{(o)(k)i} + Q_{out(k)} (S_{qh(k)})^{-1} \right] \right\} \qquad (۱۷)$$

با توجه اینکه اختلالات هیدرولیکی ممکن است بر اساس تغییرات نیاز آبی و طبق برنامهٔ شرکت بهره‌بردار برای یکی از آبگیرها (در این تحقیق برای ایستگاه متمرکز پمپاژ B4) ایجاد شده باشد، این آبگیرها باید طبق برنامه تغییر دبی ورودی را دریافت کنند. مقدار دبی تحویل داده شده برای بازه‌ای که باید اختلالات دبی ورودی را جذب کنند به‌صورت رابطهٔ ۱۸ است:

$$\Delta Q_{d(kt)} = \Delta H_{(kt)R} \sum_{i=1}^{i=n-1} S_{hq(kt)i} q_{(o)(kt)i} + \Delta Q_{in(1)} \qquad (۱۸)$$

که در آن، زیرنویس *kt* مربوط به بازه‌ای است که باید اختلالات ورودی دبی را جذب کند. این رابطه برای بازه ۱۵ شبکهٔ بیله‌وار به‌کار می‌رود که ایستگاه متمرکز پمپاژ B4 در آن قرار دارد. با قرار دادن رابطه‌های ۱۸ و ۱۴ در رابطهٔ بیلان دبی و ساده‌سازی، خواهیم داشت (رابطهٔ ۱۹):

$$S_{RC(kt)} = Q_{out(kt)} / \left\{ S_{qh(kt)} \left[\sum_{i=1}^{i=n} S_{hq(kt)i}\, q_{(o)(kt)i} + Q_{out(kt)} (S_{qh(kt)})^{-1} \right] + Q_{in(kt)} / S_{KC(kt-1)} \right\} \qquad (۱۹)$$

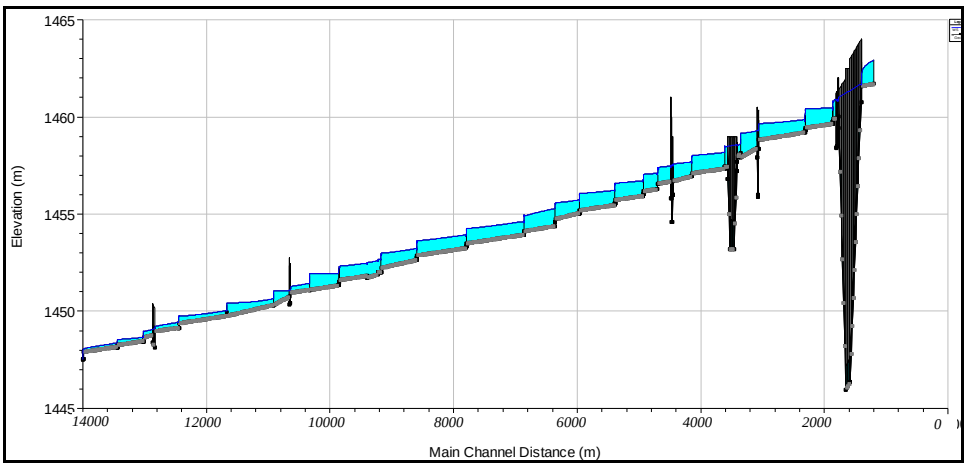
ایجاد اختلالات هیدرولیکی در شبکه‌های آبیاری باعث می‌شود تا بر اساس مقدار حساسیت سازه‌ها، مقداری از اختلالات به بازه‌های پایین‌دست منتقل شود. حساسیت سازه‌های آبگیر در بازه‌های بالادست اگر زیاد باشد، مقدار بیشتری از این اختلالات هیدرولیکی را جذب می‌کند و بنابراین مقدار کمتری از آن به قسمت‌های پایین‌دست شبکهٔ آبیاری منتقل می‌شود. با استفاده از شاخص حساسیت SRC، درصد انتقال اختلالات، $100\Delta Q_{out(k)}/\Delta Q_{in(1)}$، مطابق رابطهٔ ۲۰ ارائه می‌شود:

$$\text{درصد انتقال اختلالات} = 100 \times \prod_{i=1}^{i=k} S_{RC(i)} \qquad (۲۰)$$

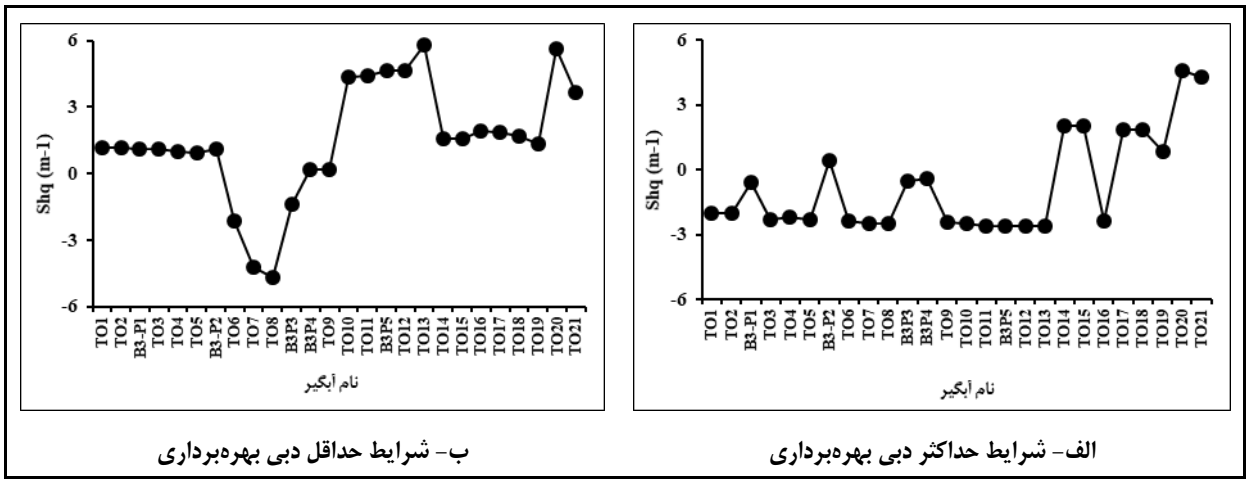
نتایج و بحث

با توجه به برنامهٔ آبیاری سال‌های قبل، حداقل و حداکثر دبی بهره‌برداری شبکهٔ بیله‌وار به‌ترتیب ۱/۱۸ و ۲/۱۱ متر مکعب بر ثانیه بوده است. با وارد کردن مشخصات هندسی شبکه، دبی ورودی به کانال، منحنی دبی- اشل دریچه‌های نیرپیک و سرریزها در مدل هیدرولیکی HEC-RAS پروفیل سطح آب برای حداقل و حداکثر دبی بهره‌برداری محاسبه شد. در شکل ۵، پروفیل سطح آب برای شرایط حداکثر دبی بهره‌برداری شبکه آورده شده است. گفتنی است که در فاصلهٔ ۱۲۰۲۴ و ۱۰۴۳۴ متری از انتهای شبکه، دو سیفون قرار دارد.

با محاسبهٔ پروفیل سطح آب با مدل HEC-RAS و رابطه‌های ۴ و ۶، شاخص حساسیت سازه‌ای در سناریوی اول بهره‌برداری برای آبگیرها و تنظیم‌کننده‌ها محاسبه شد. در شکل ۶، شاخص حساسیت دبی به عمق آب برای آبگیرهای مختلف در شرایط حداقل و حداکثر بهره‌برداری آورده شده است.



شکل ۵- پروفیل سطح آب در کانال BLMC شبکهٔ بیله‌وار برای شرایط حداکثر دبی بهره‌برداری



الف- شرایط حداکثر دبی بهره‌برداری

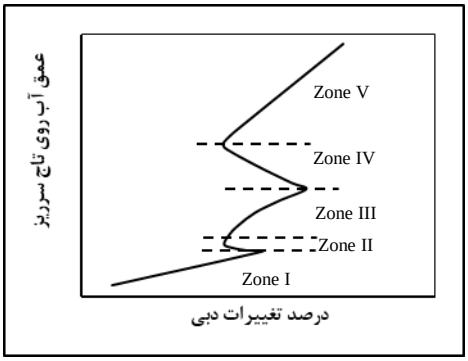
ب- شرایط حداقل دبی بهره‌برداری

شکل ٦- شاخص حساسیت دبی آبگیر نسبت به عمق آب مربوط به کانال BLMC شبکهٔ بیله‌وار

دیده می‌شود که در شرایط حداکثر دبی بهره‌برداری در ابتدای شبکهٔ آبیاری بیله‌وار، اکثر شاخص حساسیت آبگیرها منفی و در انتهای شبکه اکثر شاخص‌های حساسیت مثبت است. بنابراین، هرگاه دبی ورودی به کانال BLMC افزایش یابد، عمق آب بالادست آبگیرها افزایش خواهد یافت و با توجه به منفی بودن شاخص حساسیت، دبی ورودی به آبگیرهای ابتدای شبکه کاهش می‌یابد. حداقل شاخص حساسیت آبگیرها در شرایط حداکثر دبی بهره‌برداری مربوط به آبگیر TO11 و برابر $-۲/۶\ m^{-1}$ است یعنی وقتی عمق آب بالادست این آبگیر ۱ سانتی‌متر افزایش یابد، دبی عبوری از این آبگیر ۲/۶ درصد کاهش می‌یابد. در شرایط حداقل دبی بهره‌برداری نیز آبگیرهای TO6، TO7، TO8 و B3P3 دارای شاخص حساسیت منفی و بقیهٔ آبگیرها دارای شاخص حساسیت مثبت‌اند.

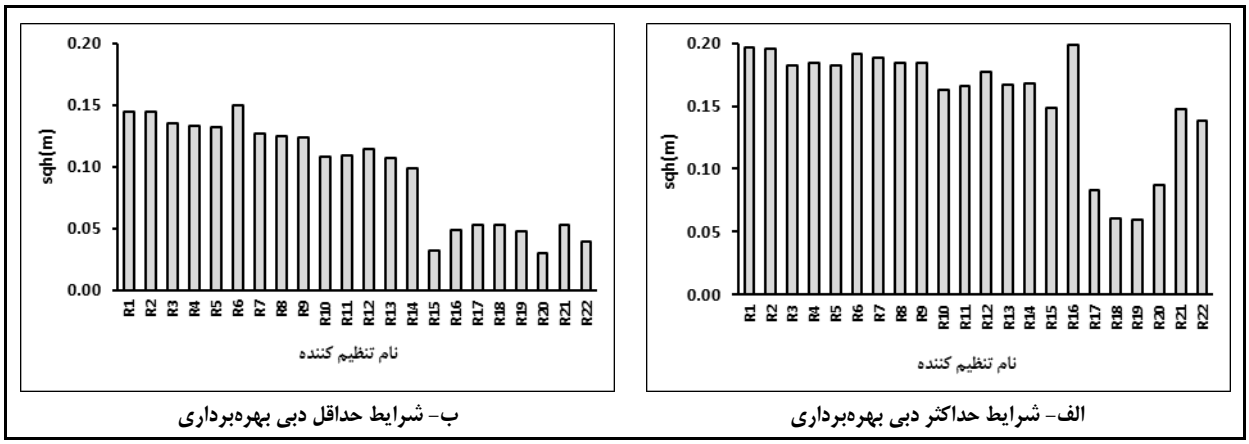
منحنی دبی- اشل مدول‌های نیرپیک دو نقابه بر اساس عمق آب روی تاج سرریز مطابق شکل ۷ به پنج بخش ارتفاعی تقسیم می‌شود. در بخش‌های II و IV شاخص حساسیت دبی آبگیر به عمق آب منفی است و مقدار دبی با افزایش عمق آب روی تاج سرریز کاهش می‌یابد و در بخش‌های I، III و V شاخص حساسیت مثبت است و تغییرات دبی رابطه‌ای مستقیم با تغییرات عمق آب دارد. برای محاسبهٔ شاخص حساسیت در آبگیرها، بر اساس دبی عبوری از تنظیم‌کننده‌ها (دبی حداقل و حداکثر بهره‌برداری) عمق آب روی تنظیم‌کننده محاسبه و

با توجه به نزدیکی آبگیر و تنظیم‌کننده در شبکهٔ آبیاری بیله‌وار، عمق آب در مجاورت آبگیر برابر عمق آب روی تنظیم‌کننده در نظر گرفته شد. با توجه به عمق آب روی آبگیر و همچنین با توجه به شکل ۷، یک بخش انتخاب و حساسیت آبگیر بر اساس آن ناحیه تعیین شده است. تراز نصب آبگیرها در ابتدا و انتهای شبکهٔ آبیاری بیله‌وار طوری انتخاب شده است که عمق آب در شرایط حداکثر بهره‌برداری به‌ترتیب در بخش IV و III قرار دارد، بنابراین، در شرایط حداکثر دبی بهره‌برداری در ابتدای شبکهٔ آبیاری بیله‌وار اکثر شاخص حساسیت آبگیرها منفی و در انتهای شبکه اکثر شاخص‌های حساسیت مثبت است.



شکل ۷- بخش‌های ارتفاعی منحنی دبی- اشل مدول‌های نیرپیک دو نقابه (Vatankhah *et al.*, 2008)

با توجه به اینکه شاخص حساسیت عمق آب بالادست تنظیم‌کننده نسبت به دبی بستگی به عمق آب روی تاج سرریز دارد، ابتدا پروفیل سطح آب و عمق آب روی تاج سرریزها با نرم‌افزار HEC-RAS محاسبه و پس از آن با استفاده از رابطهٔ ۶ شاخص حساسیت S_{qh} تعیین شد. در شکل ۸، شاخص حساسیت عمق آب بالادست تنظیم‌کننده نسبت به دبی برای کانال BLMC شبکهٔ بیله‌وار آورده شده است.

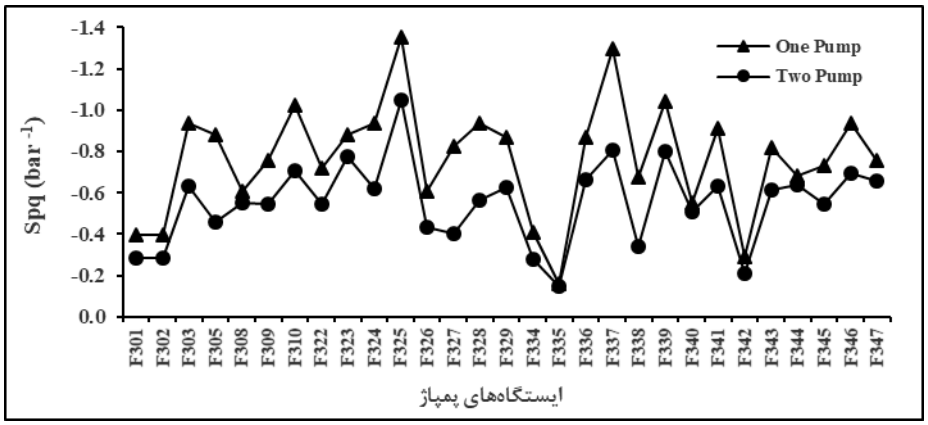


الف- شرایط حداکثر دبی بهره‌برداری **ب- شرایط حداقل دبی بهره‌برداری**

شکل ۸- شاخص حساسیت عمق آب بالادست تنظیم‌کننده نسبت به دبی مربوط به کانال BLMC شبکه بیله‌وار

شاخص حساسیت عمق آب بالادست تنظیم‌کننده نسبت به دبی برای تنظیم‌کننده‌های ابتدای شبکه در شرایط حداکثر دبی بهره‌برداری حدود ۰/۲ متر است، یعنی هرگاه دبی عبوری از سرریز ۱۰ درصد تغییر کند، عمق آب روی سرریز ۲ سانتی‌متر تغییر می‌کند. کمترین مقدار شاخص حساسیت S_{qh} در شرایط حداکثر دبی بهره‌برداری

نیز مربوط به تنظیم‌کننده R18 و ۰/۰۶ متر است. حداکثر و حداقل شاخص حساسیت S_{qh} در شرایط حداقل دبی بهره‌برداری به‌ترتیب ۰/۱۵ و ۰/۰۳ متر و مربوط به تنظیم‌کنندهٔ R6 و R20 است. در سناریوی دوم، میراب با باز و بسته کردن شیر فلکه نصب شده روی لولهٔ رانش پمپ و مشاهدهٔ فشار خروجی پمپ، دبی ورودی به مزارع را تنظیم می‌کند. در این حالت، دریچه‌های ابتدای آبگیر کاملاً باز و تراز سطح آب در حوضچهٔ مکش پمپ‌ها با تراز سطح آب در کانال اصلی یکسان است. هرگاه رایزرهایی بیش از تعداد برنامه‌ریزی شده روی لوله‌های فرعی شبکهٔ تحت فشار واقع در مزارع قرار گیرد، مقدار فشار تولیدی پمپ کاهش می یابد، دبی بیشتری از طریق پمپ منتقل می شود، و راندمان شبکه کاهش پیدا می کند. با استفاده از رابطهٔ ۹، شاخص حساسیت دبی پمپاژ نسبت به تغییرات فشار برای حالتی محاسبه و در شکل ۹ آورده شده است که یک یا دو پمپ کار کند.



شکل ۹- شاخص حساسیت دبی پمپاژ نسبت به تغییرات فشار ایستگاه‌های پمپاژ کانال BLMC

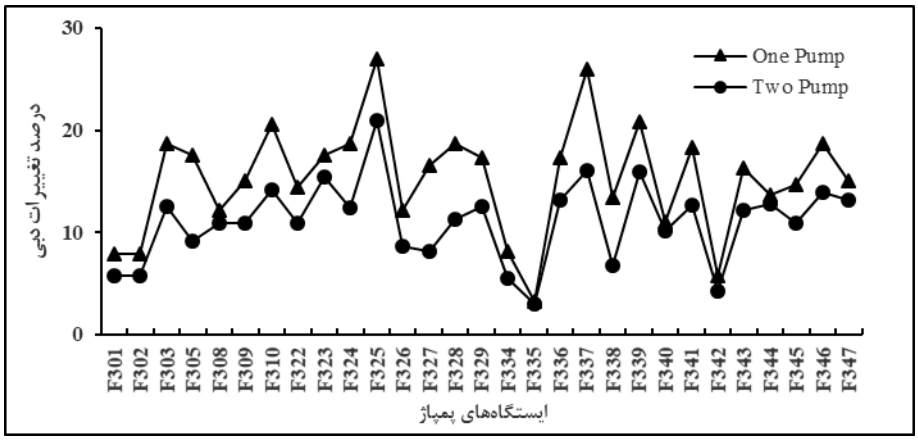
با توجه به آنکه فشار و دبی پمپاژ رابطه‌ای عکس با هم دارند، مقدار شاخص حساسیت S_{pq} منفی است. هرگاه یکی از پمپ‌ها روشن باشد، قدر مطلق حساسیت دبی نسبت به تغییرات فشار، در مقایسه با حالتی‌که دو پمپ به‌صورت موازی کار کند، بیشتر است. با توجه به رابطهٔ ۹، دبی پمپاژ نسبت عکس با شاخص حساسیت S_{qp} دارد، با افزایش دبی (در حالتی که دو پمپ مواز کار می‌کنند) شاخص حساسیت دبی نسبت به تغییرات فشار به صفر نزدیک‌تر می‌شود. قدر مطلق شاخص حساسیت S_{qp} ایستگاه پمپاژ F335 و F342 حداقل و به‌ترتیب ۰/۱۵ و ۰/۲۱۲ و شاخص حساسیت مورد نظر ایستگاه پمپاژ F325 و F337 حداکثر و به‌ترتیب ۱/۳۵ و ۱/۳ است. وقتی در ایستگاه پمپاژ F335 و F325 مقدار فشار ۰/۲ بار کاهش یابد، دبی پمپاژ به‌ترتیب ۳ و ۲۷ درصد افزایش می‌یابد.

ایستگاه‌های پمپاژ F335 و F342 که کمترین شاخص حساسیت S_{qp} را دارند مربوط به پمپ‌های فشار قوی سه طبقه هستند و ایستگاه‌های پمپاژ F325 و F337 که بیشترین حساسیت را دارند مربوط به پمپ‌های سانتریفوژ افقی یک طبقه‌اند. به‌عبارت دیگر، شاخص حساسیت S_{qp} با افزایش تعداد طبقات کاهش می‌یابد. بنابراین در بهره‌برداری، متصدی پمپ‌های سانتریفوژ افقی باید نسبت به پمپ‌های فشار قوی دقت بیشتری داشته باشد. کشاورزان با نصب تعدادی آب‌پاش بیش از تعداد برنامه‌ریزی شده، باعث کاهش فشار پمپ می‌شوند. روی لولهٔ رانش پمپ‌ها فشارسنج نصب می‌شود و اگر فشار اندازه‌گیری شده با فشارسنج ۰/۲ بار کمتر از فشار در نظر گرفته شده باشد، متصدی بهره‌برداری باید شیر تنظیم دبی را مقداری ببندد تا دبی کاهش یابد.

با توجه به اینکه شاخص حساسیت دبی نسبت به تغییرات فشار هر ایستگاه پمپاژ متفاوت است، کاهش ۰/۲ بار فشار برای هر ایستگاه پمپاژ تغییرات دبی متفاوتی ایجاد می‌کند. با استفاده از رابطهٔ ۲۱ می‌توان تغییرات دبی نسبت به تغییرات فشار را محاسبه کرد:

$$\Delta q / q = \Delta p \times S_{pq} \qquad (۲۱)$$

در شکل ۱۰، درصد تغییرات دبی پمپاژ به ازای کاهش ۰/۲ بار فشار برای ایستگاه‌های پمپاژ کانال BLMC شبکهٔ بیله‌وار آورده شده است.



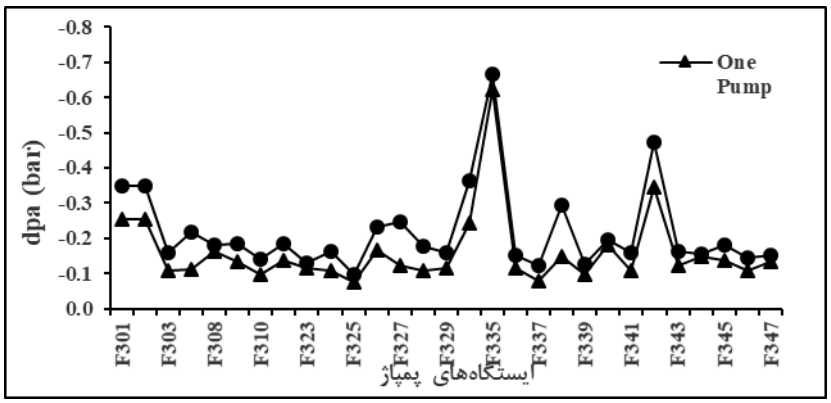
شکل ۱۰- درصد تغییرات دبی پمپاژ به‌ازای کاهش ۰/۲ بار فشار برای ایستگاه‌های پمپاژ کانال BLMC

تغییرات ۰/۲ بار فشار ایستگاه پمپاژ باعث می‌شود تا تعداد زیادی از ایستگاه‌ها بیش از ۱۰ درصد تغییر دبی داشته باشند، نتیجه آن است که عملکرد هیدرولیکی شبکه کاهش می یابد. هرگاه تغییرات مجاز دبی برای هر ایستگاه پمپاژ ۱۰ درصد در نظر گرفته شود، برای هر ایستگاه پمپاژ باید تغییرات مجاز فشار مطابق رابطهٔ ۲۲ محاسبه شود:

$$dp_a = 0.1 / S_{pq} \qquad (۲۲)$$

که در آن،

dpa تغییرات فشار مجاز هر ایستگاه بر حسب بار است. در شکل ۱۱، تغییرات فشار مجاز با در نظر گرفتن ۱۰ درصد تغییرات دبی برای ایستگاه‌های پمپاژ آورده شده است.



شکل ۱۱- تغییرات فشار مجاز ایستگاه‌های پمپاژ با در نظر گرفتن ۱۰ درصد تغییرات دبی

ایستگاه‌های پمپاژ F335 و F342 که حساسیت کمی دارند تغییرات فشار مجاز آنها تا ۰/۶۶- و ۰/۴۷- بار است. بنابراین هرگاه فشارسنج نصب شده روی لوله از مقادیر فوق تجاوز کند، میراب باید شیر تنظیم دبی را مقداری ببندند. به‌دلیل متنوع بودن الگوی کشت در واحد عمرانی B4، در هر دور آبیاری تا ۲۰ درصد دبی آبگیر آن در مواردی تغییر کرده است. بنابراین، برای شرایط حداقل و حداکثر دبی بهره‌برداری از شبکه، اختلالات هیدرولیکی ورودی به شبکه ۲۰ درصد دبی واحد B4 در نظر گرفته شد. شاخص‌های حساسیت بازه‌ای با استفاده از روش تحلیلی محاسبه شد. یادآوری می‌شود که دبی واحد B4 در شرایط حداقل و حداکثر دبی بهره‌برداری به‌ترتیب ۳۲۱ و ۷۵۰ لیتر بر ثانیه است و با استفاده از یک ایستگاه پمپاژ متمرکز به‌صورت اتوماتیک منتقل می‌شود. درصد انتقال اختلالات هیدرولیکی در شرایط حداقل و حداکثر دبی بهره‌برداری با استفاده از روش تحلیل حساسیت و مدل هیدرودینامیکی HEC-RAS در شکل ۱۲ آورده شده است.

الف- شرایط حداکثر دبی بهره‌برداری

ب- شرایط حداقل دبی بهره‌برداری

شکل ۱۲- درصد انتقال اختلال هیدرولیکی مجموعه بازه‌ها در شرایط حداکثر و حداقل دبی بهره‌برداری

در شرایط حداکثر دبی بهره‌برداری، در بازه‌های بالادست (از بازه ۱ تا ۱۴) درصد انتقال اختلالات هیدرولیکی به‌تدریج افزایش می‌یابد و بیش از ۱۰۰ درصد می رسد. در بازه ۱۴ به‌صورت تحلیلی مقدار انتقال اختلالات هیدرولیکی حداکثر و برابر ۱۱۲ درصد و بدین معناست که اگر دبی ورودی به کانال ۱۰۰ لیتر بر ثانیه افزایش یابد، دبی خروجی از بازه ۱۴ به‌میزان ۱۱۲ لیتر بر ثانیه افزایش می‌یابد. یکی از عوامل مؤثر بر درصد انتقال اختلالات هیدرولیکی، حساسیت سازه‌های آبگیر است. با توجه به اینکه قسمت‌های بالادست شبکه در شرایط حداکثر دبی بهره‌برداری، دارای شاخص حساسیت دبی به عمق آبگیرها منفی است، بنابراین با افزایش عمق آب در بالادست آبگیرها، به‌دلیل افزایش دبی کانال اصلی، دبی ورودی به آبگیرها کاهش می‌یابد و باعث افزایش دبی کانال اصلی می‌شود. در قسمت‌های پایین‌دست شبکه، درصد اختلالات هیدرولیکی به‌تدریج کاهش می‌یابد که دلیل آن مثبت بودن شاخص حساسیت دبی به عمق آبگیرهاست. در این حالت، با افزایش دبی کانال اصلی عمق آب افزایش می یابد و دبی عبوری از آبگیرها را افزایش می دهد. با توجه به اینکه تغییرات نیاز آبی واحد B4 که در بازه ۱۵ قرار دارد سبب تغییر دبی ورودی به شبکه شده است، جذب تغییرات دبی ورودی توسط آبگیر این بازه

باعث کاهش شدید درصد انتقال اختلالات هیدرولیکی به پایین‌دست شده است. میانگین میزان انتقال اختلالات در پایین‌دست شبکه در شرایط حداکثر دبی بهره‌برداری حدود ۸ درصد است و بدان معناست که اگر ۱۰۰ لیتر بر ثانیه دبی ورودی به کانال افزایش یابد، حدود ۸ لیتر بر ثانیه دبی ورودی به بازه‌های پایین‌دست افزایش خواهد یافت. در شرایط حداقل دبی بهره‌برداری، شاخص حساسیت دبی به عمق آب تعداد زیادی از آبگیرهای بالادست شبکه مثبت است، بنابراین با افزایش دبی ورودی به کانال اصلی، عمق آب بالادست آبگیر افزایش و در نتیجه دبی عبوری به آبگیرها افزایش می‌یابد و از طرفی بازه ۱۵ مقدار دبی مورد نیاز را به صورت کامل جذب می‌کند و این عمل باعث کاهش دبی ورودی به بازه پایین‌دست و کاهش دبی ورودی به آبگیرهای پایین‌دست می‌شود. میانگین میزان خطا در روش تحلیل حساسیت با شبیه‌سازی مدل HEC-RAS در محاسبه میزان انتقال اختلالات برابر ۳/۴۲ درصد است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، برای بهره‌برداری از شبکهٔ آبیاری بیله‌وار دو سناریو در نظر گرفته شده است. در سناریوی اول، دبی ورودی به ایستگاه‌های پمپاژ را دریچه‌های نیرپیک کنترل می کنند و میراب دبی ورودی به ایستگاه‌های پمپاژ را با باز و بسته کردن کشوهای دریچه تنظیم می‌کند. در سناریوی دوم، کنترل دبی از طریق پمپ‌هاست و میراب با باز و بسته کردن شیر فلکهٔ نصب شده روی لولهٔ رانش پمپ و مشاهدهٔ فشار تولید شده با پمپ، دبی ورودی به مزارع را تنظیم می‌کند.

در سناریوی اول حساسیت دبی تحویلی آبگیر به تغییرات عمق آب، حساسیت تغییرات عمق آب بالادست تنظیم‌کننده به تغییرات دبی، و شاخص‌های حساسیت هیدرولیکی در سطح بازه شامل حساسیت انتقال بازه به‌صورت تحلیلی محاسبه و با مدل هیدرودینامیکی HEC-RAS مقایسه شد. در سناریوی دوم نیز شاخص حساسیت دبی ایستگاه‌های پمپاژ نسبت به تغییر فشار توسعه یافت و تغییرات فشار مجاز برای هر ایستگاه محاسبه شد. در ابتدای شبکهٔ آبیاری بیله‌وار اکثر شاخص حساسیت آبگیرها در شرایط حداکثر دبی بهره‌برداری منفی و در انتهای شبکه اکثر شاخص‌های حساسیت مثبت است. در صورتی‌که با افزایش عمق آب بالادست آبگیر، دبی عبوری کاهش یابد شاخص حساسیت منفی و اگر رابطه‌ای مستقیم بین عمق آب بالادست سازه با دبی عبوری داشته باشد، حساسیت دبی تحویلی آبگیر به تغییرات عمق آب مثبت است. بنابراین، هرگاه دبی ورودی به کانال BLMC در شرایط حداکثر دبی بهره‌برداری افزایش یابد، عمق آب روی سازه‌های تنظیم‌کننده افزایش می‌یابد و در نتیجه دبی ورودی به آبگیرهای ابتدای شبکه کاهش و دبی آبگیرهای انتهای شبکه افزایش می‌یابد. کمترین مقدار شاخص حساسیت Sqh در شرایط حداکثر دبی بهره‌برداری مربوط به تنظیم‌کننده R18 و برابر ۰/۰۶ متر است، یعنی هرگاه دبی عبوری از سرریز ۱۰ درصد تغییر کند، عمق آب روی سرریز ۰/۶ سانتی‌متر تغییر می‌کند. بیشترین مقدار شاخص حساسیت S_{qh} در شرایط حداکثر دبی بهره‌برداری می‌شود. درصد انتقال اختلالات هیدرولیکی در بازه‌های بالادست (از بازه ۱ تا ۱۴) در شرایط حداکثر دبی بهره‌برداری بیش از ۱۰۰ درصد است و به‌صورت تدریجی افزایش می‌یابد. در بازه ۱۴ به‌صورت تحلیلی مقدار انتقال اختلالات هیدرولیکی حداکثر و برابر ۱۱۲ درصد و بدان معناست که اگر ۱۰۰ لیتر بر ثانیه دبی ورودی به کانال افزایش یابد، دبی خروجی از بازه ۱۴حدود ۱۱۲ لیتر بر ثانیه تغییر می‌کند.

در سناریوی دوم به بررسی تأثیر تغییرات فشار خروجی پمپ بر دبی پمپاژ پرداخته شد. حساسیت دبی نسبت به تغییرات فشار در حالتی که یکی از پمپ‌ها آب را منتقل کند بیشتر از حالتی است که دو پمپ به‌صورت موازی کار کنند. با توجه به اینکه دبی پمپاژ رابطهٔ عکس با

شاخص حساسیت Sqp دارد، با افزایش دبی (در حالتی‌که دو پمپ موازی کار می‌کنند) شاخص حساسیت دبی نسبت به تغییرات فشار کاهش می‌یابد. شاخص حساسیت Sqp با افزایش تعداد طبقات کاهش می‌یابد. بنابراین، در بهره‌برداری باید متصدی پمپ‌های سانتریفوژ افقی نسبت به پمپ‌های فشار قوی دقت بیشتری داشته باشد.

مراجع

Anton, A. and Aldea, A. 2014. Pumping stations: solving algorithm with inverse functions, J. Procedia Eng. 70, 67-74.

Anon. 1967. Multilingual Technical Dictionary on Irrigation and Drainage. English-French International Commission of Irrigation and Drainage,. New Delhi, India.

Heidari, M. M. and Kouchakzadeh, S. 2015. Developing sensitivity indicators for hydraulic perturbation, Water Soil Sci. 25(3): 169-179. (in Persian)

Horst, L. 1983. Irrigation system. Internal Report. Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.

Kouchakzadeh, S. and Montazar, A. 2005. Hydraulic sensitivity indicators for canal operation assessment. J. Irrig. Drain. 54(4): 443-454.

Mahbub, S. I. and Gulati, N. D. 1951. Irrigation Outlets. Atma Ram, Delhi, India.

Malaterre, P. O. and Baume, J. P. 1997. Sic 3.0 a simulation model for canal automation design. International Workshop on Regulation of Irrigation Canals, State of The Art of Research and Applications. April 22-24. Marrakech, Morocco.

Monem, M. J. and Massah, A. 2002. Development of mathematical model of neyrpic modules. Proceeding of the 11th Seminar of Iranian National Committee on Irrigation and Drainage. Nov. 16-17. Tehran, Iran. (in Persian)

Renault, D. 2000a. Operational sensitivity of irrigation structures. J. Irrig. Drain. Eng. 126(3): 157-162.

Renault, D. 2000b. Aggregated sensitivity indicators of irrigation systems hydraulic behavior. J. Agr. Water Manage. 43(2): 151-171.

Renault, D. and Hemakumara, H. M. 1999. Irrigation offtake sensitivity. J. Irrig. Drain. Eng. 125(3): 131-136.

Shahrokhnia, M. A., Javan, M. and Keshavarzi, A. R. 2002. Application of HEC-RAS and MIKE 11 models to Doroodzan irrigation system. Proceeding of the 4th Iranian Hydraulic Conference. Oct. 21-23. Shiraz, Iran. (in Persian)

Shahrokhnia, M. A. and Javan, M. 2002. Assessment of delivery structures' sensitivities in Doroodzan irrigation system by mathematical modeling. Proceeding of 11th seminar of Iranian National Committee on Irrigation and Drainage. Nov. 16-17. Tehran, Iran. (in Persian)

Shahrokhnia, M. A. and Javan, M. 2007. Influence of roughness changes on offtaking discharge in irrigation canals. J. Water Resour. Manage. 21, 635-647.

Shahrokhnia M. A., Javan, M. and Shahrokhnia, M. H. 2009. Influence of lateral canal water depth on offtake and crossregulator discharge. J. Irrig. Drain. 58, 561-568.

Seyedjavad, M. S., Mashaal, M. and Montazar, A. 2013. Evaluation of hydraulic sensitivity indicators for baffle modules (case study: Varamin irrigation and drainage network). J. Hydraul. Struct. 1(2): 33-43.

Vatankhah, A. R., Kouchakzadeh, S. and Hoorfar, A. 2008. Developing effective sensitivity indicator for irrigation network components. Int. J. Appl. Agr. Res. 3, 17-36.

Irrigation and Drainage Structures Engineering Research/Vol.19/No.72/ Autumn 2018/P:115-132

Development of Hydraulic Sensitivity Indicators for Bilavar Irrigation Network in Different Operation Conditions

M. S. Bahrami, M. M. Heidari* and A. Ahmadi

* Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran. Email: mm.heidari@razi.ac.ir
Received: 4 October 2017, Accepted: 1 February 2018

Hydraulic sensitivity analysis is considered as a new approach for flow behavior investigation in irrigation networks during the last decade. Operation methods along irrigation canals can be investigated using sensitivity indicators. In this study, operation methods along BLMC canal which irrigated the B3 and B4 development regions of Bilavar irrigation network in Kermanshah province was studied. According to the water irrigation scheduling in the previous years, the maximum and minimum discharge of the canal were 1.18 and 2.11 cubic meter/sec respectively. In this research, two scenarios were considered for operation of Bilavar irrigation network. In the first scenario, the delivered flow to the fieldswas controlled by neyrpic orifice module, and in the second scenario, control of the flow was done through valve on the pumps. In the first scenario, most off take's sensitivity index for the maximum discharge operation condition at the beginning and end of the canal were negative and positive, respectively. Hence, once the flow of the BLMC channel increased, the discharge delivered to off takes at the beginning of the cannal decreased due to the negative sensitivity indicators. In the second scenario, the discharge sensitivity indicator base on pressure for pumping stations was developed, and the amount of acceptable pressure variations was calculated considering the permissible variations in discharge for each station. In this study, considering a variation of 20% in flow rate entering the B4 region as hydraulic perturbation, the sensitivity indicator for conveyance was calculated and results were compared with the results of HEC-RAS model. The average percentage error for calculating conveyance of perturbation based on sensitivity analysis method was found to be 3.42%.

Keywords: Bilavar Irrigation Network, HEC-RAS Model, Hydraulic Perturbation, Sensitivity Analysis