

نشریه فنی:

شاخص های ارزیابی عملکرد تحویل آب در شبکه های آبیاری و زهکشی

محمدعلی شاهرخ نیا



بسم الله الرحمن الرحيم

مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

نشریه فنی:

شاخص‌های ارزیابی عملکرد تحویل آب در شبکه‌های
آبیاری و زهکشی

تهیه و تدوین:

محمدعلی شاهرخ‌نیا

عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی

فارس

سال انتشار: ۱۴۰۴



وزارت جهاد کشاورزی

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی



نوع نوشتار: نشریه فنی

عنوان نوشتار: شاخص‌های ارزیابی عملکرد تحویل آب در شبکه‌های آبیاری و زهکشی

نگارنده: محمدعلی شاهرخ‌نیا

ویراستار: محمدرضا داهی

صفحه‌آرا: شبنم جباری

طراح جلد: سمیه وطن‌دوست

ناشر: مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

شمارگان: محدود

نوبت چاپ: اول

سال انتشار: ۱۴۰۴



مسئولیت صحت مطالب با نگارنده است.

شماره ثبت ۶۸۶۳۲ در مرکز فناوری اطلاعات و اطلاع‌رسانی کشاورزی

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی به تاریخ ۱۴۰۴/۱۰/۲۱

مخاطبان نشریه

تشکل‌های آب‌بران، میراب‌ها، مدیران و مسئولان کانال‌های آبیاری

هدف‌های آموزشی

شما خوانندگان گرامی در این نشریه با :

- اصول مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی
- شاخص‌های ارزیابی تحویل آب در کانال‌ها

آشنا خواهید شد.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	مقدمه
۲	اصول کلی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی
۲	تعریف شبکه آبیاری و زهکشی
۴	اصول مورد توجه در فرایند مدیریت مطلوب
۴	هدف‌های مدیریت شبکه آبیاری و زهکشی
۵	دلایل مدیریتی ضعف شبکه‌های آبیاری و زهکشی
۵	روش‌های تحویل آب
۶	هدف‌های کلی سیستم تحویل آب
۶	شاخص‌های ارزیابی عملکرد تحویل آب
۶	شاخص کفایت تحویل آب
۸	شاخص راندمان تحویل آب
۹	شاخص عدالت تحویل آب
۱۱	شاخص اعتمادپذیری تحویل آب
۱۳	شاخص عملکرد کلی تحویل آب
۱۴	مثال کاربردی
۱۶	نتیجه‌گیری
۱۷	فهرست منابع

جمعیت در دنیا و بویژه در کشورهای جهان سوم در حال افزایش است و تهیه غذای این جمعیت در سال‌های آتی دغدغه مدیران کشورهاست. از طرف دیگر منابع آب، خاک و انرژی بسیاری از کشورها رو به زوال است که این مسئله نیز بر شدت بحران آب، غذا، انرژی و اقتصاد در آینده می‌افزاید. دلیل بسیاری از کشمکش‌های سیاسی و اقتصادی کنونی در دنیا نیز به محدودیت‌های آب، خاک، غذا و انرژی ارتباط دارد. در این میان، کشورهای واقع در مناطق خشک و نیمه‌خشک وضعیت بدتری دارند و زودتر دچار بحران می‌شوند. این مسائل و پیش‌بینی‌های آینده، کشورها را به سمت استفاده بهتر از منابع موجود و از جمله منابع آب و خاک سوق داده است. با توجه به محدودیت منابع آب شیرین در کره زمین، افزایش بهره‌وری مصرف آب در تولید محصولات کشاورزی می‌تواند کمک زیادی به امنیت غذایی در کشور کند.

سطح وسیعی از مزارع تحت آبیاری در دنیا با شبکه‌های مدرن آبیاری تغذیه می‌شود اما بهره‌وری بسیاری از این شبکه‌ها در سطح مطلوب نیست. در ایران نیز بسیاری از شبکه‌های آبیاری موجود با مشکلات متعددی از نظر فنی و مدیریتی روبه‌رو هستند که نتیجه آن کاهش عملکرد شبکه‌ها، اتلاف آب، و بروز مسائل اجتماعی و اقتصادی است. مشکلات شبکه‌های آبیاری و زهکشی جنبه‌های گوناگونی دارد و در شبکه‌های مختلف ممکن است متفاوت باشد. این تفاوت‌ها با نحوه مدیریت، نوع سازه‌های کنترل‌کننده جریان آب و غیره مرتبط است. در هر حال آشنایی مدیران، کارشناسان و پرسنل مرتبط با مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی امری است مهم که باید به آن توجه ویژه شود.

آبیاری با حداقل تلفات، موضوع اغلب تحقیقات گذشته در زمینه آبیاری است. برای اینکه بتوان تشخیص داد که آب تحویل داده شده به مزارع به اندازه و به موقع است یا در تحویل آب چه مشکلاتی وجود دارد، شاخص‌های ارزیابی مختلفی ارائه شده است. در شبکه‌های آبیاری و زهکشی که آب به صورت ثقیل منتقل می‌شود، از شاخص‌های متعددی بر اساس

حجم آب، دبی، مدت زمان و دور آبیاری می‌توان استفاده کرد. مولدن و گیتس^۱ (۱۹۹۰) چهار شاخص اصلی کفایت، راندمان، عدالت و اعتمادپذیری را به‌عنوان هدف عملکردی تحویل آب برشمرده‌اند و روابطی برای محاسبه این شاخص‌ها ارائه داده‌اند. این شاخص‌ها به حدی مهم هستند که محققان زیادی (یونال و همکاران، ۲۰۰۴^۲، واندرسپین و همکاران، ۲۰۰۶^۳، کازبکوف و همکاران، ۲۰۰۹^۴، کورکماز و همکاران^۵، آلی و همکاران، ۲۰۱۳^۶، دجن و همکاران، ۲۰۱۵^۷ و نام و همکاران، ۲۰۱۶^۸) از آن زمان تاکنون از آن‌ها استفاده کرده‌اند. در این نشریه، به معرفی و تشریح این شاخص‌ها و بعضی شاخص‌های دیگر پرداخته می‌شود که در ارزیابی و مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی کاربرد زیادی دارند.

اصول کلی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی

تعریف شبکه آبیاری و زهکشی

هر شبکه آبیاری و زهکشی، مجموعه‌ای است از سیستم‌های انتقال، توزیع، اندازه‌گیری، حفاظتی، کنترلی، تبدیل‌ها، سازه‌های جلوگیری کننده از فرسایش و سازه‌های زهکشی که آب را از منبع تا مزرعه انتقال می‌دهد و توزیع می‌کند و آب اضافی را از مزرعه و منطقه خارج می‌سازد. در مزارعی که تحت شبکه‌های آبیاری و زهکشی نیستند، مدیریت آبیاری و زهکشی معمولاً ساده‌تر است. اما در شبکه آبیاری و زهکشی که تعداد مزارع زیاد است، به مدیریتی جامع و دقیق نیاز خواهد بود تا بتوان آب مورد نیاز همه مزارع را از نظر زمان و مقدار تامین کند. شبکه کانال‌ها در هر شبکه آبیاری و زهکشی معمولاً از درجه ۱ تا ۴

¹ - Molden and Gates, 1990

² - Unal *et al.*, 2004

³ - Vandersypen *et al.*, 2006

⁴ - Kazbekov *et al.*, 2009

⁵ - Korkmaz *et al.*, 2009

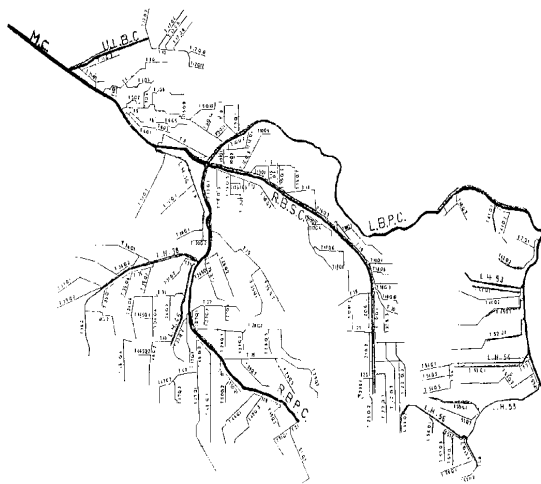
⁶ - Aly *et al.*, 2013

⁷ - Dejen *et al.*, 2015

⁸ - Nam *et al.*, 2016

شاخص‌های ارزیابی عملکرد تحویل آب در شبکه‌های آبیاری و زهکشی

نامگذاری می‌شوند. کانال درجه ۱، یا کانال اصلی، کانالی است که آب را از منبع اصلی به شبکه آبیاری منتقل می‌کند. معمولاً کانال درجه ۱ به تعدادی کانال درجه ۲، کانال درجه ۲ به تعدادی کانال درجه ۳، و کانال درجه ۳ به تعدادی کانال درجه ۴ تقسیم می‌شوند. مزارع، آب مورد نیاز را توسط آبگیرهایی از کانال‌های درجه ۳ یا ۴ دریافت می‌کنند. شکل ۱ تصویری از کانال‌های آبیاری را در شبکه آبیاری درودزن فارس نشان می‌دهد. در این شکل کانال درجه ۱ شبکه، کانال اصلی^۱ نام دارد که به سه کانال درجه ۲ با نام‌های کانال سمت چپ اولیه^۲، کانال سمت راست اولیه^۳ و کانال سمت راست ثانویه^۴ تقسیم و هر یک از این کانال‌ها به تعدادی کانال درجه ۳ تقسیم می‌شود.



شکل ۱- نمایی از شبکه کانال‌ها در شبکه آبیاری درودزن فارس

- 1-MC
- 2-LBPC
- 3-RBPC
- 4-RBSC

اصول مورد توجه در فرایند مدیریت مطلوب

هر فرایند مدیریتی مطلوب، صرف‌نظر از موضوع آن، اصولی دارد که قابل تعمیم برای کلیه موضوعات است. این اصول عبارت‌اند از:

۱. شناسایی سیاست‌ها و هدف‌ها
 ۲. تهیه برنامه‌ها و فعالیت‌های لازم برای نیل به هدف
 ۳. اجرای برنامه‌ها
 ۴. پایش و ارزیابی پیشرفت کار
 ۵. تجدید نظر و تعدیل هدف‌ها و برنامه‌ها
- در مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی نیز باید این اصول مدنظر قرار گیرد. هدف‌های مورد نظر از مطالعه، طراحی و اجرای شبکه آبیاری و زهکشی باید معلوم باشد. برنامه‌هایی برای رسیدن به هدف‌های شبکه آبیاری و زهکشی تهیه شود. سپس این برنامه‌ها به اجرا گذاشته شوند. در حین اجرای برنامه‌ها و پس از آن، پیشرفت کار ارزیابی گردد. سرانجام پس از تحلیل نتایج ارزیابی، در صورت نیاز، هدف‌ها و برنامه‌های تدوین شده اولیه بازنگری و تعدیل شوند. در این نشریه تاکید بیشتر بر اصل چهارم (پایش و ارزیابی تحویل آب) است.

هدف‌های مدیریت شبکه آبیاری و زهکشی

مدیریت شبکه آبیاری باید به گونه‌ای باشد که همه ابعاد سیاست‌گذاری، سازمانی، اقتصادی، مالی، فنی، زیست محیطی و اجتماعی با هم تلفیق شوند و توسعه و بهره‌برداری پایدار از شبکه مقدر گردد. مهم‌ترین هدف مدیریت هر شبکه آبیاری و زهکشی عبارت است از ارائه خدمات در سطح مورد توافق دولت (یا مدیر طرح) و استفاده کنندگان از خدمات (یا کشاورزان) با کمترین هزینه. این موارد را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد.

۱. بهره‌برداری از شبکه و ارائه خدمات به کشاورزان
۲. نگهداری مستمر شبکه بر مبنای معیارهای بهره‌برداری بهینه

۳. اعمال مدیریت شبکه با کمترین هزینه

دلایل مدیریتی ضعف شبکه‌های آبیاری و زهکشی

متداول‌ترین دلیل عملکرد ضعیف شبکه‌های آبیاری، ناتوانی در طراحی و برنامه‌ریزی طرح در جهت تشخیص نیازها و ناتوانی در کنترل و مدیریت آب تحویلی است. یعنی باید بتوان نیاز آبی مزارع تحت پوشش هر کانال را با دقت برآورد و برای تحویل آب مورد نیاز برنامه‌ریزی کرد. علاوه بر این، کنترل جریان آب و دیگر مسائل هیدرولیکی در کانال‌های شبکه اهمیت ویژه‌ای دارد و در صورت بی‌توجه بودن به این موارد، آب مورد نیاز در زمان و مکان مورد نظر نمی‌تواند تحویل شود. بنابراین، برای اینکه بتوان تشخیص داد آیا آب مورد نیاز در مکان و زمان مناسب تحویل شده یا نه، نیاز به شاخص‌های ارزیابی عملکرد تحویل آب است که در این نشریه به معرفی آن پرداخته می‌شود.

تجربه در سراسر دنیا نشان می‌دهد که توجه بسیار کمی به ایجاد واحد‌های ارزیابی و پایش معطوف می‌گردد در حالی که این واحد در ارزیابی و افزایش عملکرد طرح آبیاری اهمیت خاصی دارد. برای ارزیابی شبکه‌ها، شاخص‌های متعددی وجود دارد که برای تعیین این شاخص‌ها نیاز به اندازه‌گیری پارامترهای مختلفی است.

روش‌های تحویل آب

۱. بر اساس تقاضا: در این روش کشاورزان به میزان دلخواه آب برداشت می‌کنند. تماس بین کشاورز و مدیر کمتر می‌شود. سیستم باید به گونه‌ای طراحی شود تا اگر یک نفر آب بیشتری دریافت کرد بر میزان آب دریافتی دیگران تاثیری نگذارد.
۲. نیمه تقاضا: کشاورزان مقدار و مدت تحویل آب را از یک یا دو روز پیش اعلام می‌کنند. در این روش، باید ارتباط خوبی بین کشاورز و مدیر وجود داشته باشد.
۳. چرخشی یا نوبتی: در این روش آب به نوبت بین مزارع تقسیم می‌شود.

هدف‌های کلی سیستم تحویل آب

۱. کفایت آبیاری: به معنی کافی بودن مقدار آب داده شده به مزرعه است.
۲. راندمان بالا: راندمان بالا به معنی کاهش تلفات آب در سیستم است.
۳. عدالت توزیع آب: به معنی متناسب بودن آب تحویل شده در مکان‌های مختلف است.
۴. اعتمادپذیری: به معنی متناسب بودن آب تحویل شده در زمان‌های مختلف است.

شاخص‌های ارزیابی عملکرد تحویل آب

با توجه به تحقیقات پیشین در داخل و خارج از کشور، برای ارزیابی شبکه‌های آبیاری مختلف در دنیا تا کنون از شاخص‌های مولدن و گیتس (۱۹۹۰) استفاده شده است. این شاخص‌ها عبارت‌اند از کفایت تحویل آب، بازده تحویل آب، اعتمادپذیری، و عدالت تحویل آب.

شاخص کفایت تحویل آب^۱

شاخص کفایت تحویل آب نشان می‌دهد چه کسری از آب مورد نظر از کانال دریافت شده است (رابطه ۱ و ۲). هر چه شاخص فوق به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد کفایت آبیاری بهتر است. مقادیر کمتر از ۱ نشان دهنده آن است که آب کمتر از میزان مورد نیاز به مزرعه یا کانال پایین دست تحویل شده است. مقادیر بیشتر از ۱ نشان دهنده این است که آب بیشتر از حد نیاز دریافت شده است که در این حالت مقدار آن طبق رابطه ۱ همان عدد ۱ منظور می‌شود. محدوده مقادیر ضعیف، متوسط و خوب این شاخص در جدول ۱ آورده شده است.

$$P_A = 1 \quad Q_D \leq Q_I \quad (1)$$

$$P_A = \frac{1}{T} \sum_T \left(\frac{1}{R} \sum_R \frac{Q_D}{Q_I} \right) \quad Q_D \leq Q_I \quad (2)$$

¹ - Adequacy of water delivery

شاخص‌های ارزیابی عملکرد تحویل آب در شبکه‌های آبیاری و زهکشی

در این رابطه‌ها، P_A شاخص کفایت آبیاری، Q_D = مقدار واقعی آب داده شده به واحد زارعی، Q_I = مقدار آب مورد نیاز واحد زارعی، R = تعداد مناطق اندازه‌گیری شده، و T = تعداد دفعات اندازه‌گیری است.

برای مثال، اگر کانال اصلی دارای ۴ کانال فرعی باشد، باید برای هر ۴ کانال فرعی مقادیر دبی یا حجم آب تحویل شده (Q_D) و دبی یا حجم آب مورد نظر (Q_I) معلوم باشد (ستون ۳ و ۴ در جدول ۱). پس از آن نسبت Q_D به Q_I برای هر کانال فرعی محاسبه می‌شود. برای نمونه، این نسبت برای کانال ۱ در آبیاری اول ۰/۷۸ خواهد بود که از تقسیم عدد ۱۵۶ بر عدد ۲۰۰ به دست آمده است (ستون ۵). این نسبت برای کانال ۲ در آبیاری اول از تقسیم عدد ۳۷۰ بر عدد ۳۳۰ برابر با ۱/۱۲ خواهد بود که چون این نسبت از عدد ۱ بزرگ‌تر است، مقدار شاخص کفایت تحویل آب برای این کانال عدد ۱ خواهد بود (ستون ۶). میانگین این نسبت‌ها در هر نوبت آبیاری برای ۴ کانال فرعی، همان عبارت داخل پرانتز در رابطه ۲ است که عددی بین صفر و ۱ است. بنابراین، اگر مثلاً دو مرتبه آبیاری شده باشد، عبارت داخل پرانتز در رابطه ۲ برای این دو آبیاری محاسبه و بدین ترتیب دو عدد ۰/۹۲ و ۰/۹۶ به دست می‌آید. میانگین این دو عدد (۰/۹۴) برابر با شاخص کفایت تحویل آب برای کانال اصلی است (ستون ۶).

جدول ۱- نمونه اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه شاخص کفایت تحویل آب

ستون ۱	ستون ۲	ستون ۳	ستون ۴	ستون ۵	ستون ۶
ردیف آبیاری	نام کانال فرعی	دبی تحویلی (لیتر بر ثانیه) Q_D	دبی مورد نظر (لیتر بر ثانیه) Q_I	نسبت Q_D به Q_I	P_A
آبیاری اول	کانال ۱	۱۵۶	۲۰۰	۰/۷۸	۰/۷۸
	کانال ۲	۳۷۰	۳۳۰	۱/۱۲	۱/۰۰
	کانال ۳	۸۷۱	۶۵۰	۱/۳۴	۱/۰۰
	کانال ۴	۷۴۶	۸۲۰	۰/۹۱	۰/۹۱
دوم آبیاری	کانال ۱	۲۰۷	۲۲۰	۰/۹۴	۰/۹۴
	کانال ۲	۳۳۴	۳۸۰	۰/۸۸	۰/۸۸
	کانال ۳	۸۵۴	۷۰۰	۱/۲۲	۱/۰۰

۱/۰۰	۱/۰۷	۸۶۰	۹۲۰	کانال ۴
۰/۹۲	۱/۰۴			میانگین آبیاری اول
۰/۹۶	۱/۰۳			میانگین آبیاری دوم
۰/۹۴	۱/۰۳۵			میانگین کل دو آبیاری

شاخص راندمان تحویل آب^۱

با اندازه‌گیری شاخص راندمان یا بازدهی تحویل آب (P_F) از روابط ۳ و ۴، می‌توان ارزیابی خوبی از لحاظ اتلاف آب در سیستم به‌دست آورد. این شاخص نشان دهنده بازدهی کل سیستم نیست و فقط مربوط است به تحویل آب در کانال یا مزرعه مورد مطالعه. این شاخص نیز هرچه به یک نزدیک‌تر باشد بهتر است. مقادیر کوچک‌تر از ۱ نشان دهنده اتلاف آب است. این شاخص ارزیابی خوبی از لحاظ اتلاف آب در سیستم نشان می‌دهد. محدوده مقادیر ضعیف، متوسط و خوب این شاخص در جدول ۱ آورده شده است. نحوه محاسبه شاخص راندمان تحویل آب نیز مشابه محاسبه شاخص کفایت تحویل آب است که پیش‌تر توضیح داده شده است.

$$P_F = 1 \quad Q_D < Q_I \quad (۳)$$

$$P_F = \frac{1}{T} \sum_T \left(\frac{1}{R} \sum_R \frac{Q_I}{Q_D} \right) \quad Q_D \geq Q_I \quad (۴)$$

برای مثال، اگر کانال اصلی دارای ۴ کانال فرعی باشد، باید برای هر ۴ کانال فرعی مقادیر دبی یا حجم آب تحویل شده (Q_D) و دبی یا حجم آب مورد نظر (Q_I) معلوم باشد (ستون ۳ و ۴ در جدول ۲). پس از آن نسبت Q_I به Q_D برای هر کانال فرعی محاسبه می‌شود. برای مثال، برای کانال ۲ در آبیاری اول، نسبت ۰/۸۹ از تقسیم عدد ۳۳۰ بر ۳۷۰

^۱ -Efficiency of water delivery

شاخص‌های ارزیابی عملکرد تحویل آب در شبکه‌های آبیاری و زهکشی

به دست آمده است. شاخص راندمان تحویل آب برای نسبت‌هایی که بیشتر از عدد ۱ هستند برابر با عدد ۱ و برای نسبت‌های کوچک‌تر از ۱ همان عدد خواهد بود.

جدول ۲- نمونه اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه شاخص راندمان تحویل آب

ستون ۱	ستون ۲	ستون ۳	ستون ۴	ستون ۵	ستون ۶
نوبت آبیاری	نام کانال فرعی	دبی تحویلی (لیتر بر ثانیه) Q_D	دبی مورد نظر (لیتر بر ثانیه) Q_I	نسبت Q_I به Q_D	P_F
	کانال ۱	۱۵۶	۲۰۰	۱/۲۸	۱/۰۰
آبیاری اول	کانال ۲	۳۷۰	۳۳۰	۰/۸۹	۰/۸۹
	کانال ۳	۸۷۱	۶۵۰	۰/۷۵	۰/۷۵
	کانال ۴	۷۴۶	۸۲۰	۱/۱۰	۱/۰۰
	کانال ۱	۲۰۷	۲۲۰	۱/۰۶	۱/۰۰
آبیاری دوم	کانال ۲	۳۳۴	۳۸۰	۱/۱۴	۱/۰۰
	کانال ۳	۸۵۴	۷۰۰	۰/۸۲	۰/۸۲
	کانال ۴	۹۲۰	۸۶۰	۰/۹۴	۰/۹۴
میانگین آبیاری اول	-			۱/۰۱	۰/۹۱
میانگین آبیاری دوم	-			۰/۹۹	۰/۹۴

شاخص عدالت تحویل آب^۱

عدالت توزیع یا تحویل آب (P_E) نیز یکی از شاخص‌های مهم در ارزیابی سیستم آبیاری است و آن را می‌توان با استفاده از رابطه ۵ به دست آورد. هرچه مقدار شاخص عدالت توزیع آب به صفر نزدیک‌تر باشد، عدالت تحویل آب در منطقه بیشتر خواهد بود. این شاخص نشان می‌دهد که عدالت در تحویل آب در نقاط مختلف کانال یا شبکه در چه حدی است. محدوده مقادیر ضعیف، متوسط و خوب این شاخص در جدول ۱ آورده شده است.

$$P_E = \frac{1}{T} \sum T CV_R \left[\frac{Q_D}{Q_I} \right] \quad (5)$$

¹ -Equity of water delivery

$CV_R \frac{(Q_D)}{(Q_I)}$: ضریب مکانی تغییرات دبی تحویلی به دبی مورد نیاز میان آبگیرها در یک دوره زمانی است. برای محاسبه ضریب تغییرات کافی است انحراف معیار اعداد به میانگین آنها تقسیم شود. برای اطلاعات بیشتر به منابع علم آمار رجوع شود.

برای مثال، اگر کانال اصلی دارای ۴ کانال فرعی باشد، باید برای هر ۴ کانال فرعی مقادیر دبی یا حجم آب تحویل شده (Q_D) و دبی یا حجم آب مورد نظر (Q_I) معلوم باشد (جدول ۳). پس از آن نسبت Q_D به Q_I برای هر کانال فرعی محاسبه و ضریب تغییرات آنها نیز محاسبه می‌شود. بنابراین، برای هر نوبت آبیاری یک ضریب تغییرات مکانی محاسبه می‌گردد که برابر با شاخص عدالت تحویل آب در آن آبیاری است. برای مثال، عدد $0/24$ در ستون ۴، ضریب تغییرات چهار عدد $0/78$ ، $1/12$ ، $1/34$ و $0/91$ است. حال اگر دو نوبت آبیاری شده باشد، دو عدد ضریب تغییرات یا به عبارتی دو مقدار برای شاخص عدالت تحویل آب محاسبه خواهد شد که میانگین این دو عدد، مقدار نهایی شاخص عدالت تحویل آب کانال اصلی را به دست می‌دهد.

جدول ۳- نمونه اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه شاخص عدالت تحویل آب

ستون ۱	ستون ۲	ستون ۳	ستون ۴
نوبت آبیاری	نام کانال فرعی	نسبت Q_D به Q_I	P_E یا ضریب تغییرات اعداد ستون ۳
آبیاری اول	کانال ۱	۰/۷۸	۰/۲۴
	کانال ۲	۱/۱۲	
	کانال ۳	۱/۳۴	
	کانال ۴	۰/۹۱	
آبیاری دوم	کانال ۱	۰/۹۴	۰/۱۵
	کانال ۲	۰/۸۸	
	کانال ۳	۱/۲۲	
	کانال ۴	۱/۰۷	
میانگین	-	۱/۰۴	۰/۲۴
آبیاری اول			

۰/۱۵	۱/۰۳	-	میانگین آبیاری دوم
۰/۱۹۵	۱/۰۳۵	-	میانگین کل دو آبیاری

شاخص اعتمادپذیری تحویل آب^۱

شاخص اعتمادپذیری تحویل آب (PD) سیستم، بیانگر یکنواختی یا عدالت زمانی تحویل آب در کانال یا شبکه است که از رابطه ۶ برآورد می‌شود. در این رابطه، $CV_T \left(\frac{Q_D}{Q_I} \right)$ ضریب تغییرات زمانی بده تحویلی به بده مورد نیاز است و مقدار آن هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد یکنواختی زمانی تحویل آب بیشتر است. در این رابطه، عبارت $\frac{1}{R} \sum R$ بیانگر متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده در مکان‌های مختلف است. محدوده مقادیر ضعیف، متوسط و خوب این شاخص در جدول ۱ آورده شده است.

$$p_D = \frac{1}{R} \sum R \left[\frac{Q_D}{Q_I} \right] \quad (۶)$$

برای مثال، اگر کانال اصلی دارای ۴ کانال فرعی باشد و دو مرتبه آبیاری شده باشد، باید برای هر ۴ کانال فرعی مقادیر دبی یا حجم آب تحویل شده (Q_D) و دبی یا حجم آب مورد نظر (Q_I) در هر نوبت آبیاری معلوم باشد. پس از آن نسبت Q_D به Q_I برای هر دو نوبت آبیاری در تک‌تک کانال‌های فرعی محاسبه خواهد شد (ستون ۲ و ۳) و برای تک‌تک کانال‌های فرعی ضریب تغییرات آن در آبیاری‌های مختلف محاسبه می‌شود (ستون ۴). برای مثال، در جدول ۴ عدد ۰/۱۳ ضریب تغییرات دو عدد ۰/۷۸ و ۰/۹۴ است. بنابراین برای هر کانال فرعی، یک ضریب تغییرات زمانی محاسبه می‌شود که در مجموع ۴ عدد ضریب

^۱ -Dependability of water delivery

تغییرات محاسبه خواهد شد (ستون ۴). حال میانگین این ۴ عدد، مقدار نهایی (۰/۱۲) شاخص اعتمادپذیری تحویل آب را به دست می‌دهد.

جدول ۴- نمونه اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه شاخص عدالت تحویل آب

ستون ۱	ستون ۲	ستون ۳	ستون ۴
نوبت آبیاری	نام کانال فرعی	نسبت Q_D به Q_I در آبیاری اول	نسبت Q_D به Q_I در آبیاری دوم
آبیاری اول	کانال ۱ کانال ۲ کانال ۳ کانال ۴	۰/۷۸ ۱/۱۲ ۱/۳۴ ۰/۹۱	۰/۹۴ ۰/۸۸ ۱/۲۲ ۱/۰۷
میانگین کل دو آبیاری	-	۱/۰۴	۱/۰۳
			۰/۱۳ ۰/۱۷ ۰/۰۷ ۰/۱۱ ۰/۱۲

مقادیری که از محاسبه چهار شاخص ارزیابی عملکرد شبکه شامل کفایت، راندمان، عدالت و اعتمادپذیری تحویل آب به دست می‌آید با جدول (۵) مقایسه می‌شود و با این کار می‌توان وضعیت عملکرد شبکه را مقایسه یا ارزیابی کرد.

جدول ۵- مقادیر توصیه شده شاخص‌های چهارگانه ارزیابی عملکرد شبکه آبیاری

شاخص ارزیابی		کلاس‌های عملکرد	
		ضعیف	متوسط
کفایت تحویل آب (P_A)	$< 0/80$	$0/80 - 0/89$	$0/9 - 1/0$
راندمان تحویل آب (P_F)	$< 0/70$	$0/70 - 0/84$	$0/85 - 1/0$
عدالت توزیع آب (P_E)	$> 0/25$	$0/11 - 0/25$	$0/0 - 0/1$
اعتمادپذیری توزیع آب (P_D)	$> 0/20$	$0/11 - 0/20$	$0/0 - 0/1$

شاخص عملکرد کلی تحویل آب^۱

در استفاده از شاخص‌های چهارگانه تحویل آب برای شبکه آبیاری خاص، این امکان وجود دارد که بعضی از این شاخص‌ها در حد خوب، بعضی در حد ضعیف و بعضی در حد متوسط باشند. در چنین شرایطی، قضاوت در خصوص عملکرد کلی شبکه سخت خواهد بود و به همین دلیل اخیراً با ترکیب شاخص‌های چهارگانه تحویل آب، شاخصی کلی به نام شاخص عملکرد کلی تحویل آب (رابطه ۷) ارائه گردیده است. حداکثر مقدار این شاخص نیز طبق گفته شاهرخ نیا و علیان غیائی^۲ (۲۰۱۹) برابر با عدد ۱ است.

$$OPI = \frac{P_A + P_F + (1 - P_E) + (1 - P_D)}{4} \quad (7)$$

رابطه (۷) را که به منظور برآورد شاخص عملکرد کلی تحویل آب ارائه شده است می‌توان به شکل ساده‌تری نیز نوشت و شاخص دیگری را به صورت رابطه (۸) ارائه داد. این شاخص "شاخص مجموع عملکرد تحویل آب"^۳ نام گرفته است (شاهرخ نیا، ۱۳۹۹). مقادیر توصیه شده این دو شاخص کلی را می‌توان از جدول (۶) استخراج کرد. حداکثر مقدار شاخص مجموع عملکرد تحویل آب عدد ۲ است و آن زمانی است که شاخص‌های کفایت و راندمان تحویل آب بیشترین (عدد ۱) مقدار خود و شاخص‌های عدالت و اعتمادپذیری تحویل آب کمترین (عدد صفر) مقدار خود را داشته باشند. کمترین مقدار این شاخص از نظر تئوری عدد ۲- است، وقتی که کفایت و راندمان کمترین مقدار خود (عدد صفر) و شاخص‌های عدالت و اعتمادپذیری تحویل آب بیشترین مقدار خود (عدد ۱) را داشته باشند که البته در عمل این شرایط به وجود نخواهد آمد زیرا ممکن نیست مقادیر هر دو شاخص کفایت و راندمان برابر با صفر شود.

$$SPI = P_A + P_F - P_E - P_D \quad (8)$$

^۱ -Overall Performance Index

^۲ -Shahrokhnia and Olyan-Ghiasi, 2019

^۳ - Summation Performance Index

جدول ۶- مقادیر توصیه شده شاخص مجموع عملکرد تحویل آب

شاخص ارزیابی			کلاس‌های عملکرد
ضعیف	متوسط	خوب	
شاخص عملکرد کلی تحویل آب (OPI)	< 0.76	$0.76 - 0.88$	$0.89 - 1.0$
شاخص مجموع عملکرد تحویل آب (SPI)	$1.04 >$	$1.04 - 1.55$	$1.56 - 2.0$

مثال کاربردی:

در یک کانال اصلی که ۴ کانال فرعی دارد، دو مرتبه آبیاری صورت گرفته است. در هر ۴ کانال فرعی مقادیر دبی آب تحویل شده (Q_D) و دبی آب مورد نظر برای تحویل (Q_I) در هر نوبت آبیاری اندازه‌گیری یا محاسبه شده که نسبت آنها در ستون ۳ جدول ۷ آورده شده است. برای محاسبه و تفسیر ۶ شاخص ارزیابی عملکرد تحویل آب به ترتیب زیر عمل می‌شود:

- ۱- شاخص کفایت تحویل آب برابر با نسبت Q_D به Q_I است، به شرطی که از عدد ۱ کوچک‌تر باشد. اعداد بزرگ‌تر از ۱ برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود (ستون ۴). مقدار این شاخص در آبیاری اول و دوم به ترتیب ۰/۹۲ و ۰/۹۶ و به طور میانگین ۰/۹۴ شده است. با مقایسه این ارقام با جدول ۵ مشاهده می‌گردد که هر سه عدد بین ۰/۹ و ۱ قرار گرفته‌اند، بنابراین، به‌طور کلی میانگین کفایت تحویل آب دو آبیاری در کانال اصلی در حد خوب بوده است. البته کفایت تحویل آب کانال ۱ در آبیاری اول عدد ۰/۷۸ است که از ۰/۸ کمتر است و در حد ضعیف قرار می‌گیرد و باید دلیل آن بررسی شود. کفایت تحویل آب کانال ۲ در آبیاری دوم برابر با ۰/۸۸ است که بین ارقام ۰/۸ تا ۰/۸۹ قرار دارد و در حد متوسط است.
- ۲- شاخص راندمان تحویل آب برابر با معکوس نسبت Q_D به Q_I است، به شرطی که از عدد ۱ کوچک‌تر باشد. اعداد بزرگ‌تر از ۱ برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود (ستون ۵). مقدار این شاخص در آبیاری اول و دوم به ترتیب ۰/۹۱ و ۰/۹۴ و به‌طور میانگین ۰/۹۲۵ شده است.

مقایسه این ارقام با جدول ۵ نشان می‌دهد که راندمان تحویل آب نیز در هر دو آبیاری و میانگین دو آبیاری بیشتر از $0/۸۵$ است که در رده خوب قرار می‌گیرد. مقدار این شاخص برای کانال ۳ در آبیاری اول ($0/۷۵$) و برای کانال ۳ در آبیاری دوم ($0/۸۲$) در رده متوسط قرار می‌گیرد که باید دلیل آن بررسی شود.

۳- برای محاسبه شاخص عدالت تحویل آب در هر نوبت آبیاری، ضریب تغییرات نسبت Q_D به Q_1 ها در هر آبیاری جداگانه محاسبه می‌شود (ستون ۶). بدین ترتیب دو عدد $0/۲۴$ و $0/۱۵$ به دست می‌آید که میانگین این دو عدد ($0/۱۹۵$)، شاخص عدالت تحویل آب کل کانال اصلی را نشان می‌دهد. مقایسه این ارقام با جدول ۵ نشان می‌دهد که عدالت تحویل آب کانال اصلی در هر دو آبیاری در رده متوسط قرار می‌گیرد.

۴- برای محاسبه شاخص اعتمادپذیری تحویل آب در هر کانال فرعی، ضریب تغییرات نسبت Q_D به Q_1 ها در هر کانال فرعی جداگانه محاسبه می‌شود (ستون ۷). بدین ترتیب چهار عدد ($0/۱۳$ ، $0/۱۷$ ، $0/۰۷$ و $0/۱۱$) به دست می‌آید که میانگین این اعداد، شاخص اعتمادپذیری کل کانال اصلی را نشان می‌دهد که برابر با عدد $0/۱۲$ شده است. مقایسه این ارقام با جدول ۵ نشان می‌دهد که به جز کانال ۳ که از نظر این شاخص در مرتبه خوب قرار می‌گیرد، اعتمادپذیری تحویل آب در سه کانال دیگر در مرتبه متوسط قرار می‌گیرد.

۵- با محاسبه چهار شاخص قبلی، شاخص‌های عملکرد کلی تحویل آب و مجموع عملکرد تحویل آب از روابط ۷ و ۸ قابل محاسبه است که در ردیف آخر ستون‌های ۸ و ۹ آورده شده‌اند ($0/۸۹$ و $۱/۵۵$). مشاهده می‌گردد که در کانال مورد بررسی بعضی از شاخص‌های چهارگانه قبلی در رده متوسط و بعضی دیگر در رده خوب قرار می‌گیرند. بنابراین، تصمیم‌گیری در مورد اینکه ارزیابی کلی چگونه خواهد بود مشکل است. مقایسه دو شاخص عملکرد کلی تحویل آب و مجموع عملکرد تحویل آب با جدول ۶ نشان می‌دهد که شاخص عملکرد کل تحویل آب در مرز رده متوسط و خوب و متمایل به خوب قرار می‌گیرد. شاخص مجموع عملکرد تحویل آب در مرز رده متوسط با خوب و متمایل به متوسط قرار می‌گیرد.

بنابراین با اندکی بهبود در مدیریت شبکه، عملکرد کلی تحویل آب کاملاً در رده خوب یا مطلوب قرار خواهد گرفت.

جدول ۷- نمونه ای از شاخص های ارزیابی عملکرد محاسبه شده

ستون ۱	ستون ۲	ستون ۳	ستون ۴	ستون ۵	ستون ۶	ستون ۷	ستون ۸	ستون ۹
نوبت آبیاری	نام کانال فرعی	نسبت Q_D به Q_I	P_A هر کانال	P_F هر کانال	P_E هر آبیاری	P_D هر کانال	SPI	OPI
آبیاری اول	کانال ۱	۰/۷۸	۰/۷۸	۱/۰۰	-	-	-	-
	کانال ۲	۱/۱۲	۱/۰۰	۰/۸۹	۰/۲۴	-	-	-
	کانال ۳	۱/۳۴	۱/۰۰	۰/۷۵	-	-	-	-
	کانال ۴	۰/۹۱	۰/۹۱	۱/۰۰	-	-	-	-
آبیاری دوم	کانال ۱	۰/۹۴	۰/۹۴	۱/۰۰	-	-	-	-
	کانال ۲	۰/۸۸	۰/۸۸	۱/۰۰	۰/۱۵	-	-	-
	کانال ۳	۱/۲۲	۱/۰۰	۰/۸۲	-	-	-	-
	کانال ۴	۱/۰۷	۱/۰۰	۰/۹۴	-	-	-	-
میانگین آبیاری اول	-	۱/۰۴	۰/۹۲	۰/۹۱	۰/۲۴	-	-	-
میانگین آبیاری دوم	-	۱/۰۳	۰/۹۶	۰/۹۴	۰/۱۵	-	-	-
میانگین کل دو آبیاری	-	۱/۰۳۵	۰/۹۴	۰/۹۲۵	۰/۱۹۵	-	-	-
میانگین کانال ۱	-	۰/۸۶	۰/۸۶	۱/۰۰	-	۰/۱۳	-	-
میانگین کانال ۲	-	۱/۰۰	۰/۹۴	۰/۹۴۵	-	۰/۱۷	-	-
میانگین کانال ۳	-	۱/۲۸	۱/۰۰	۰/۷۸۵	-	۰/۰۷	-	-
میانگین کانال ۴	-	۰/۹۹	۰/۹۵۵	۰/۹۷	-	۰/۱۱	-	-
میانگین کل کانال اصلی	-	۱/۰۳۵	۰/۹۴	۰/۹۲۵	-	۰/۱۲	۱/۵۵	۰/۸۹

نتیجه گیری

ارتقای عملکرد تحویل آب در شبکه های آبیاری و زهکشی نیاز به دانستن وضعیت فعلی این شبکه هاست. برای اطلاع از وضعیت کنونی عملکرد شبکه و مقایسه آن با دیگر شبکه ها، باید شاخص های مناسبی معرفی و مقدار آن شاخص ها محاسبه یا اندازه گیری گردد. چهار شاخص کفایت، راندمان، عدالت و اعتمادپذیری تحویل آب به عنوان شاخص های اصلی

معرفی و تاکنون در بسیاری از شبکه‌های آبیاری دنیا مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که در هر شبکه آبیاری ممکن است برخی از این شاخص‌ها در محدوده خوب و برخی دیگر در محدوده ضعیف قرار گیرد. در چنین شرایطی، قضاوت در مورد اینکه عملکرد کلی شبکه خوب است یا ضعیف کاری است مشکل و بنابراین استفاده از یک شاخص کلی‌تر، که هر چهار شاخص پیشین را نیز در بر بگیرد، می‌تواند باعث سهولت قضاوت در خصوص عملکرد شبکه و مقایسه آن با دیگر شبکه‌ها گردد. شاخص‌های عملکرد کلی تحویل آب و مجموع عملکرد تحویل آب هر یک دارای مزیتی است. مزیت شاخص مجموع عملکرد تحویل آب دامنه تغییرات بیشتری دارد ولی شاخص عملکرد کلی تحویل آب بین صفر و ۱ قرار می‌گیرد که اولی از لحاظ مقایسه بین شبکه‌ها و دومی از لحاظ تشابه دامنه با دیگر شاخص‌ها (کفایت، راندمان) قبلی می‌تواند مزیت داشته باشد.

فهرست منابع

شاهرخ نیا، م.ع. ۱۳۹۹. معرفی و بررسی شاخص مجموع عملکرد تحویل آب در شبکه آبیاری و زهکشی درودزن. مجله تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، ۲۱(۷۹): ۱۰۹-۱۲۶

Aly AM, Kitamura Y, Shimizu K. 2013. Assessment of irrigation practices at the tertiary canal level in an improved system- a case study of Wasat area, the Nile Delta. *Paddy Water Environ*, 11: 445-454.

Dejen ZA, Schultz B, Hayde L. 2015. Water delivery performance at Metahara large-scale irrigation scheme, Ethiopia. *Irrigation and Drainage* 64: 470-490.

Kazbekov J, Abdullaev I, Manthrithilake H, Qureshi A, Jumaboev K. 2009. Evaluating planning and delivery performance of water user associations (WUAs) in Osh province, Kyrgyzstan. *Agric Wat Manage* 96: 1259-1267.

Korkmaz N, Avic M, Unal HB, Asik S, Gunduz M. 2009. Evaluation of the water delivery performance of the Menemen Left Bank irrigation

- system using variables measured on-site. *J Irrig Drain Engrg* 135: 633-642.
- Molden DJ, Gates TK. 1990. Performance measures for evaluation of irrigation- water- delivery system. *J Irrig DrainEngrg* 116 (6):804-23.
- Nam WH, Hong EM, Choi JY.2016. Assessment of water delivery efficiency in irrigation canals using performance indicators. *Irrig Sci* 34: 129-143.
- Shahrokhnia M.A., and Olyan-Ghiasi, A. 2019. Determination of overall water delivery performance based on adequacy, efficiency, equity and dependability in the Doroodzan irrigation network. *Irrigation and Drainage*, 68:637-645.
- Unal HB, Asik S, Avci M, Yasar S, Akkuzu E. 2004. Performance of water delivery system at tertiary canal level: a case study of the Menemen Left Bank Irrigation System, Gediz Basin, Turkey. *Agric Wat Manage* 65: 155-171.
- Vandersypen K, Bengaly K, Keita ACT, Sidibe S, Raes D, Jamin JY. 2006. Irrigation performance at tertiary level in the rice schemes of the Office du Niger (Mali): adequate water delivery through over supply. *Agric Water Manag* 83: 144-152.