



Development Quantitative Index, and Model to Determine the Available and Achievable Flexibility in Irrigation Networks

Reyhaneh Naghaee¹ | Mohammad Javad Monem²

1. Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, the University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran. E-mail: r.naghahi@modares.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, the University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran. E-mail: monem_mj@modares.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 17 December 2024
Received in revised form
4 January 2025
Accepted 4 February 2025
Published online 17 May 2025

Keywords:

Delivery Factors
Flexibility Index
Operational Capacity
Pre-request time

ABSTRACT

Improving water productivity in irrigation networks requires increasing the authority of irrigation management and flexibility in water delivery. Increasing flexibility requires determining the existing flexibility. According to the capacity of the canals and water distribution management facilities, it is possible to determine the achievable flexibility and the amount of its increase. In this research, considering four water delivery factors, including flow rate, irrigation frequency, irrigation duration, and advance notice (pre-request time), and their weighting factors a quantitative flexibility index determination method is presented. The flexibility that can be achieved is determined by changing the range of water delivery factors and respecting the irrigation canal capacity. This research was conducted for 9 networks in different regions of Iran. The average flexibility in the surveyed networks was estimated at 19%, which is very low and should be improved. To determine the achievable flexibility, a model was prepared and implemented for the Eastern Aghili canal as an example. The design capacity of this canal is far from the current operating capacity, so there is significant scope for increasing its flexibility. The current flexibility of this canal is estimated at 45% and its maximum attainable flexibility at 86%. Flow delivery factors in accordance with the maximum flexibility are the maximum utilization capacity of 41.4 cubic meters per second, the irrigation frequency of 1 day, the minimum irrigation duration of 5 hours, and the minimum pre-request time of 1 day. By using the presented method and the provided model, it is possible to choose any suitable combination of delivery factors that improves flexibility according to the management policies, water delivery methods, existing facilities, and farmers' viewpoints.

Cite this article: Naghaee, R., & Monem, M. J. (2025). Development Quantitative Index, and Model to Determine the Available and Achievable Flexibility in Irrigation Networks. *Journal of Water and Irrigation Management*, 15 (1), 37-53. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.387052.1193>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.387052.1193>

Publisher: University of Tehran Press.



توسعه شاخص کمی و مدل برای تعیین انعطاف پذیری موجود و قابل دستیابی در شبکه های آبیاری

ریحانه نقائی^۱ | محمدجواد منعم^۲

۱. گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: r.naghai@modares.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: monem_mj@modares.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
بهبود بهره‌وری آب در شبکه‌های آبیاری، مستلزم افزایش اختیار مدیریت آبیاری و انعطاف‌پذیری در تحویل آب است. افزایش انعطاف‌پذیری نیازمند تعیین انعطاف‌پذیری موجود است. با توجه به ظرفیت کانال‌ها و امکانات مدیریت توزیع آب می‌توان انعطاف‌پذیری قابل دستیابی و میزان افزایش آن را تعیین کرد. در این پژوهش با در نظر گرفتن چهار عامل تحویل آب شامل نرخ جریان، دور آبیاری، مدت آبیاری و زمان پیش‌درخواست و ضریب اهمیت وزنی آن‌ها روش تعیین شاخص کمی انعطاف‌پذیری ارائه شد. انعطاف‌پذیری قابل دستیابی با تغییر دامنه عوامل تحویل آب با رعایت ظرفیت کانال‌های آبیاری مشخص می‌شود. این پژوهش برای نه شبکه در مناطق مختلف ایران انجام شد. متوسط انعطاف‌پذیری در شبکه‌های مورد بررسی ۱۹ درصد برآورد شد که بسیار پایین است و باید بهبود یابد. برای تعیین انعطاف‌پذیری قابل دستیابی مدلی تهیه گردید و به‌طور نمونه برای کانال عقیلی شرقی اجرا شد. ظرفیت طراحی این کانال با ظرفیت بهره‌برداری کنونی فاصله زیادی دارد، بنابراین زمینه قابل توجهی برای افزایش انعطاف‌پذیری آن وجود دارد. انعطاف‌پذیری کنونی این کانال ۴۵ درصد و حداکثر انعطاف‌پذیری قابل دستیابی آن ۸۶ درصد برآورد شد. عوامل تحویل جریان در تطابق با حداکثر انعطاف‌پذیری عبارتند از حداکثر ظرفیت بهره‌برداری ۴/۹۶ مترمکعب در ثانیه، دور آبیاری یک روز، حداقل مدت آبیاری پنج ساعت و حداقل زمان پیش‌درخواست یک روز. با استفاده از روش ارائه‌شده و این مدل می‌توان متناسب با سیاست‌های مدیریت توزیع و تحویل آب، امکانات موجود و نظر کشاورزان، هر نوع ترکیب مناسبی از عوامل تحویل که موجب بهبود انعطاف‌پذیری شود را انتخاب نمود.	نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۶ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷ کلیدواژه‌ها: زمان پیش‌درخواست شاخص انعطاف‌پذیری ظرفیت بهره‌برداری عوامل تحویل

استناد: نقائی، ریحانه و منعم، محمدجواد (۱۴۰۴). توسعه شاخص کمی و مدل برای تعیین انعطاف‌پذیری موجود و قابل دستیابی در شبکه‌های آبیاری.

نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۵ (۱)، ۳۷-۵۳. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.387052.1193>



۱. مقدمه

محدودیت‌های موجود در منابع موردنیاز برای توسعه شبکه‌های آبیاری، ضرورت ارتقا و بهبود بهره‌وری شبکه‌های موجود را ایجاب می‌کند. یکی از روش‌های مؤثر در بهبود بهره‌وری در شبکه‌های آبیاری افزایش اختیار کشاورزان در مدیریت آبیاری و انعطاف‌پذیری تحویل آب است. قبل از هرگونه برنامه‌ریزی برای افزایش انعطاف‌پذیری در شبکه‌های آبیاری، باید انعطاف‌پذیری موجود ارزیابی شود. محدودیت عوامل تحویل آب تأثیر مستقیمی در سطح پایین انعطاف‌پذیری شبکه‌های آبیاری دارد. اصول و مبانی انعطاف‌پذیری در شبکه‌های آبیاری و چگونگی تعیین کمی آن هنوز کاملاً شناخته‌شده نیست و نیاز به پژوهش‌های بیش‌تر دارد. Savari & Monem (2015) عوامل مؤثر در انعطاف‌پذیری روش توزیع و تحویل آب توافقی را بررسی و مبانی دسته‌بندی انعطاف‌پذیری را ارائه کردند (Savari & Monem, 2015). Naghaee & Monem (2018b) رویکرد مشابهی را برای دسته‌بندی انعطاف‌پذیری در روش‌های تحویل گردشی^۱ و توافقی^۲ پیشنهاد دادند (Naghaee & Monem, 2018b & Naghaee). Monem (2019) با بازنگری رویکردهای قبلی مبانی دسته‌بندی انعطاف‌پذیری روش توافقی را اصلاح کردند (Naghaee & Monem, 2019). Savari & Monem (2021) تعدادی از شبکه‌های داخلی و خارجی را که با روش تحویل توافقی بهره‌برداری می‌شوند مورد مطالعه قرار دادند. ایشان با تحلیل اطلاعات به‌دست‌آمده نشان دادند، شبکه‌های خارجی به‌دلیل متغیربودن همه عوامل تحویل، دارای حداکثر انعطاف‌پذیری می‌باشند (Savari & Monem, 2021).

بهبود انعطاف‌پذیری در شبکه‌های آبیاری مستلزم تعیین انعطاف‌پذیری موجود است. برای بیان شاخص انعطاف‌پذیری در کانال‌های آبیاری Merriam *et al.* (2007) مفهوم "سختی، یا انعطاف‌ناپذیری"^۳ را پیشنهاد کردند (Merriam *et al.*, 2007). این مفهوم منعکس‌کننده ظرفیت مازاد بلا استفاده کانال برای امکان تحویل آب با انعطاف‌پذیری بیش‌تر و مدت زمان بلا استفاده‌بودن آن است. به‌دلیل پیچیده‌بودن این مفهوم و مشکلات تعیین آن از این تعریف استفاده چندان صورت نگرفت. Burt *et al.* (2000)، ۶۱ ناحیه کشاورزی از منطقه پاسیفیک میانی در آمریکا را بررسی نمود و امتیازدهی توصیفی برای انعطاف‌پذیری پیشنهاد داد. در این روش سه عامل نرخ جریان، دور آبیاری و مدت زمان آبیاری از نظر میزان انعطاف‌پذیری از یک تا پنج رتبه‌بندی شد. سپس مجموع رتبه‌های هر سه عامل از حداقل سه تا حد اکثر ۱۵ به‌عنوان نمره انعطاف‌پذیری معرفی گردید (جدول ۱) (Burt *et al.*, 2000).

Table 1. Burt's definition of the flexibility rating (Burt *et al.*, 2000)

Point	Condition
(a) Flow Rate	
1	Same flow rate must always be delivered
2	Several flow rates are allowed during the season
3	Different flow rate is available for each irrigation, up to two changes per irrigation allowed
4	Flow rate can be changed any time, provided advance notice is given to the district
5	Flow rates can be different and changed by the farmer without giving advance notice to the district
(b) Frequency	
1	Always a fixed rotation
2	Fixed rotation with trading, or limited frequency, or fixed rotation during peak season only
3	24 hr. or more advance notice required before delivery is made
4	<24 hr. advance notice required before delivery
5	Farmer does not need to notify district before delivery
(c) Duration	
1	District assigns a fixed duration of irrigation
2	District assigns a fixed duration, but allows some flexibility
3	Farmers must select a duration with a 24-hr. segment
4	Farmers can choose any duration but must give notice before changing
5	Farmers can have any duration, with no advance notice required before changing

روش Burt متناسب با اطلاعات شبکه‌های آبیاری در آمریکا صورت گرفته که با روش‌های توزیع برحسب تمایل^۴ که همه عوامل تحویل با اختیار کشاورزان قابل تغییر است. در کشورهای در حال توسعه که اغلب روش‌های توزیع گردشی و توافقی به کار می‌رود این مقیاس دسته‌بندی، ارزیابی را دور از واقعیت می‌نماید. در روش Burt انعطاف‌پذیری به صورت توصیفی و از جنبه ثابت و متغیر بودن عوامل تحویل در نظر گرفته شده است. با توجه به این که در انعطاف‌پذیری میزان تغییرات عوامل تحویل اهمیت بالایی دارد، می‌توان با در نظر گرفتن دامنه تغییرات واقعی هر یک از عوامل، شاخص انعطاف‌پذیری را به صورت کمی ارائه داد. در پژوهش حاضر در شبکه‌های آبیاری مورد بررسی شاخص انعطاف‌پذیری با توجه به مقادیر واقعی دامنه تغییرات عوامل تحویل به صورت کمی تعیین شد. علاوه بر سه عامل نرخ جریان، مدت آبیاری و دور آبیاری، یکی دیگر از عوامل تحویل که بر انعطاف‌پذیری، به ویژه در روش توافقی مؤثر است زمان پیش‌درخواست است. این زمان عبارت است از فاصله میان اعلام درخواست کشاورز تا تحویل آب. هرچه این زمان کوتاه‌تر باشد، امکان تأمین به هنگام آب متناسب با نیاز محصول بهتر فراهم شده و کشاورز امکان مدیریت آبیاری بهتری دارد. در این پژوهش عامل زمان پیش‌درخواست نیز در نظر گرفته شد. قابل ذکر است که Burt تفاوتی میان اهمیت عوامل مختلف تحویل قائل نشده و وزن هر سه عامل را یکسان در نظر گرفته است. در حالی که در این پژوهش مشخص گردید که عوامل تحویل مؤثر بر انعطاف‌پذیری از اهمیت یکسانی برخوردار نیستند. در این پژوهش ضرایب وزنی متفاوتی برای عوامل تحویل در نظر گرفته شد و مقادیر آن‌ها برای هر یک از عوامل تحویل متناسب با نظرات دریافتی در شبکه‌های مختلف تعیین گردید.

چالش دیگری که در برابر افزایش انعطاف‌پذیری وجود دارد این است که به طور معمول افزایش انعطاف‌پذیری موجب افزایش ظرفیت کانال‌ها در شبکه می‌شود که هزینه‌های قابل توجهی را در بر دارد. ظرفیت کانال‌ها از یک طرف تابع درجه آزادی کشاورزان و دامنه تغییرات عوامل تحویل آب و از طرف دیگر تابع تعداد درخواست‌های هم زمان کشاورزان است. Naghaee & Monem (2018a و 2019) با تحلیل حساسیت عوامل تحویل آب در مدل Clement، اثر تغییرات این عوامل را بر ظرفیت کانال بررسی کردند (Naghaee & Monem, 2019; Naghaee & Monem, 2018a). در این پژوهش تلاش شده است که افزایش انعطاف‌پذیری با در نظر گرفتن ظرفیت کانال‌های آبیاری موجود صورت گیرد. برای این منظور درجه انعطاف‌پذیری کانال‌ها با استفاده از روش پیشنهاد شده در پژوهش حاضر و ظرفیت مورد نیاز کانال‌ها متناسب با سطوح انعطاف‌پذیری مختلف با استفاده از رابطه توسعه یافته Clement تعیین شده است (Monserrat et al., 2020). برای اطلاع بیش تر از جزئیات این رویکرد می‌توان به پژوهش Eftekhari & Monem (2023) مراجعه نمود (Eftekhari & Monem, 2023). پژوهش حاضر، با توجه به این که تاکنون مبانی و روش تعیین کمی شاخص انعطاف‌پذیری در کانال‌های آبیاری به نحوه مناسب و کاربردی ارائه نشده و از طرفی مشخص نیست در کانال‌های موجود تا چه اندازه می‌توان انعطاف‌پذیری را افزایش داد، صورت گرفته است. رویکرد اصلی پژوهش حاضر در گام اول تعیین مبانی و عوامل مؤثر بر انعطاف‌پذیری در کانال‌های آبیاری و روش تعیین کمی آن بوده و در گام دوم ارائه روشی برای تعیین انعطاف‌پذیری قابل دستیابی در کانال‌های آبیاری بوده است.

۲. مواد و روش‌ها

در این قسمت ابتدا شبکه‌های آبیاری مورد بررسی و مشخصات آن‌ها معرفی می‌شود، سپس روابط مورد استفاده برای تعیین ظرفیت مورد نیاز کانال‌ها با انعطاف‌پذیری متفاوت تشریح شده، بعد از آن مدل تهیه شده برای تعیین انعطاف‌پذیری موجود و قابل دستیابی معرفی شده و در انتها کانال عقلی شرقی که برای کاربرد این مدل و ارزیابی انعطاف‌پذیری استفاده شده معرفی می‌شود.

۱.۲. شبکه های آبیاری مورد بررسی

به منظور بررسی دامنه تغییرات عوامل تحویل آب و سطوح انعطاف پذیری آن ها و همچنین تعیین ضرایب وزنی عوامل تحویل، اطلاعات مورد نیاز از شبکه های آبیاری در نه ناحیه مختلف در ایران گردآوری شد. انتخاب شبکه ها برای پوشش تنوع اقلیمی، الگوی کشت، منابع آب، وسعت و روش های بهره برداری بوده است. این اطلاعات شامل شرایط بهره برداری و نحوه مدیریت عوامل تحویل آب نظیر نرخ جریان، دور آبیاری، مدت آبیاری و زمان پیش در خواست و اهمیت آن ها می باشند که با استفاده از پرسشنامه، بررسی مستندات موجود و مصاحبه با مدیران، کارشناسان، بهره برداران و کشاورزان شبکه ها گردآوری شد. مساحت اراضی تحت پوشش شبکه های مورد بررسی از ۲۲ تا ۲۳۵ هزار هکتار متفاوت بوده که با هر دو روش گردشی و توافقی بهره برداری می شوند (جدول ۲). هدف از بررسی شبکه های آبیاری که با روش گردشی بهره برداری می شوند، ارزیابی امکان افزایش انعطاف پذیری در این شبکه ها و تبدیل سیستم گردشی آن ها به سیستم توافقی می باشد.

Table 2. Information of studied networks and districts

Networks & Districts	Delivery methods	Area (ha.)	Flow rate	Frequency	Duration	Advance notice
Dez	Rotational	150000	Fixed ¹	Fixed	Fixed	Fixed
Karkhe Shavoor		235000	Fixed	Fixed	Fixed	Fixed
Sefidrood & Foumanat		235000	Fixed	Fixed	Fixed	Fixed
Dorudzan ³	Arranged	112000	Fixed	Variable (Limited) ²	Variable (Limited)	Without Advance notice
Garmsar ³		22000	Fixed	Variable (Limited)	Variable (Limited)	Without Advance notice
Karun ⁵		65000	Variable (Limited)	Variable (Limited)	Variable ⁴	< 24 hr.
Marun ⁵		100000	Fixed	Variable (Limited)	Variable	< 24 hr.
Moghan		90000	Variable (Limited)	Variable	Variable (Limited)	48 hr.
Qazvin		80000	Variable (Limited)	Variable (Limited)	Variable (Limited)	48 to 72 hr.

1. Fixed, Delivery parameters are fixed and pre-determined by irrigation network manager during irrigation season

2. Variable (Limited), Little Variation for delivery parameters in short periods and specific situations is allowed

3. In Droodzan and Garmsar Irrigation networks at the beginning and end of the irrigation season and in specific situations little variation of irrigation duration, and irrigation frequency is allowed. Farmers could receive water without prior announcement in this situation. Marginal flexibility improvement is provided.

4. Variable, Delivery parameters are variable, and higher flexibility is provided.

5. Each irrigation district consists of several irrigation networks with similar delivery methods and rules. For instance, Karun and Maroon irrigation districts consist of 7 and 5 networks respectively.

۲.۲. معرفی رابطه توسعه یافته کلمان برای تعیین ظرفیت کانال های درجه دو

Clement (1966) برای تعیین ظرفیت شبکه های تحت فشار، رابطه ای احتمالاتی تحت عنوان فرمول کلمان ارائه داد (روابط ۱ و ۲). طبق این رابطه تعداد کشاورزانی که به طور هم زمان نیاز به آب دارند از توزیع نرمال تبعیت می کند (Lamaddalena et al., 2000; Clement, 1966).

$$Q_{Clement} = \bar{Q}_l + U_{pq} \sqrt{Var(Q_i)} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$Q_{Clement} = \frac{q_s}{r} \sum_{i=1}^R A_i + U_{pq} \sqrt{q_s^2 \left(\frac{E}{r} - \frac{1}{r^2} \right) \sum_{i=1}^R A_i^2} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این روابط، $Q_{Clement}$ ، کل دبی پایین دست هر هیدرانت (لیتر بر ثانیه)، $\bar{Q}_l$ ، میانگین دبی هیدرانت ها، $Var(Q_i)$ ، واریانس دبی هیدرانت ها، q_s ، نرخ جریان (لیتر بر ثانیه بر هکتار)، r ، ضریب بهره برداری از شبکه ($r = \frac{T_{avl}}{24}$) که T_{avl} ، زمان

بهره‌برداری از شبکه است که اغلب برابر ۲۴ ساعت و $r=1$ است و در شرایط انعطاف‌پذیری بیش‌تر می‌تواند کم‌تر از ۲۴ ساعت و $r \leq 1$ باشد)، R ، تعداد هیدرانت‌ها، A_i ، سطح زیر کشت هر هیدرانت (هکتار)، E ، درجه آزادی کشاورزان ($E = \frac{24}{T_{opr}}$)، که T_{opr} ، عبارت است از مدت آبیاری هر هیدرانت، هرچه مدت آبیاری هر هیدرانت کوتاه‌تر باشد، درجه آزادی کشاورز بیش‌تر است یعنی می‌تواند با دبی بیش‌تر و زمان کم‌تر آبیاری را تکمیل کند)، p_q احتمال تجمعی مبنی بر این‌که در میان R هیدرانت، حداکثر n هیدرانت هم‌زمان باز باشد و U_{pq} ، متغیر نرمال استاندارد متناسب با احتمال تجمعی p_q است.

با توجه به مشابهت عملکرد یک کانال و آبیگرهای آن با یک لوله و هیدرانت‌های آن و عملکرد مشابه آبیگرها با هیدرانت‌ها از نظر تحویل مقدار آب مشخص در زمان، از رابطه کلمان برای تعیین ظرفیت کانال‌های آبیاری روباز استفاده شده است (Clemmens, 1987; Anwar & Haq, 2016; Monserrat et al., 2020).

Monserrat et al. (2020) نشان دادند، در امتداد یک کانال درجه دو، دبی آبیگرها نیز یک متغیر نرمال است که با میانگین و انحراف معیار آن مشخص می‌شود. ایشان رابطه اصلاح‌شده کلمان را برای تعیین ظرفیت کانال‌های درجه دو به شکل روابط (۳) و (۴) ارائه دادند (Monserrat et al., 2020).

$$Q_{Secondary} = \sum_1^j \bar{Q}_{i_j} + U_{pq} \sqrt{\sum_1^j Var(Q_{i_j})} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$Q_{Secondary} = \frac{q_s}{r} \sum_{j=1}^T (\sum_{i=1}^R A_i)_j + U_{pq} \sqrt{q_s^2 \left(\frac{E}{r} - \frac{1}{r^2} \right) \sum_{j=1}^T (\sum_{i=1}^R A_i^2)_j} \quad \text{رابطه ۴}$$

در این رابطه، $\bar{Q}_{i_j}$ و $Var(Q_{i_j})$ ، به‌ترتیب میانگین و واریانس دبی آبیگرها در کانال درجه دو و T ، معرف تعداد آبیگرهای موجود در کانال درجه دو می‌باشد.

همان‌طور که رابطه (۴) نشان می‌دهد، ظرفیت کانال‌های درجه دو تابعی از $\sum_1^T A_i$ ، q_s ، E ، r ، U_{pq} ، $\sum_1^T A_i$ می‌باشد. بنابراین با تغییر دامنه هر یک از این عوامل که بر انعطاف‌پذیری مؤثر هستند می‌توان ظرفیت موردنیاز کانال را متناسب با آن تعیین نمود.

۳.۲. معرفی مدل تهیه‌شده برای تعیین انعطاف‌پذیری قابل دستیابی

برای افزایش انعطاف‌پذیری در کانال‌های آبیاری با درنظرگرفتن ظرفیت مجاز کانال‌ها و با توجه به طیف وسیع تغییرات عوامل تحویل، مدلی تحت عنوان مدل MONA-Flexibility تهیه شد. این مدل ظرفیت موردنیاز کانال‌های آبیاری را برای سطوح مختلف انعطاف‌پذیری با استفاده از رابطه کلمان (رابطه ۴) محاسبه می‌کند. چنانچه ظرفیت موردنیاز نسبت به ظرفیت موجود کانال مورد نظر کم‌تر باشد، عوامل تحویل را به‌ترتیب اولویت تعیین‌شده، تغییر داده و انعطاف‌پذیری را محاسبه می‌کند. مراحل افزایش انعطاف‌پذیری تا رسیدن به ظرفیت کانال ادامه می‌یابد. در این مدل عوامل تحویل به گونه‌ای انتخاب می‌شود که حداکثر انعطاف‌پذیری مشروط به عدم تجاوز از ظرفیت کانال تعیین گردد. با توجه به تعداد چهار عامل تحویل، بسته به آن که چه تعداد از عوامل تحویل و کدامیک از آن‌ها قابل‌تغییر باشند، تعداد زیرمجموعه‌های مختلفی به‌دست می‌آید. چنانچه تنها یکی از عوامل تحویل قابل‌تغییر باشد، چهار زیرمجموعه یک متغیره خواهیم داشت. در صورت تغییر دو عامل تحویل، شش زیرمجموعه دو متغیره به‌دست می‌آید. اگر سه عامل تحویل قابل‌تغییر باشد، چهار زیرمجموعه سه متغیره خواهیم داشت. و در نهایت در صورت امکان تغییر هر چهار عامل تحویل، تنها یک زیرمجموعه خواهیم داشت. بنابراین در کل ۱۵ زیرمجموعه وجود خواهد داشت. اطلاعات ورودی مدل شامل ظرفیت طراحی کانال، حداکثر جریان در دوران بهره‌برداری، عوامل تحویل قابل‌تغییر، اولویت، ضریب اهمیت و دامنه تغییرات آن‌ها در وضع موجود است. این اطلاعات در گام اول برای محاسبه انعطاف‌پذیری کنونی به‌کار می‌روند و مبنایی برای تعیین افزایش

انعطاف‌پذیری است. برای اجرای مدل با توجه به اطلاعات ورودی و روابط تعریف‌شده برای انعطاف‌پذیری و عوامل تحویل، نمره انعطاف‌پذیری کنونی عوامل تحویل و کانال محاسبه می‌شود. در مرحله بعد بسته به آن که چه تعداد و کدامیک از عوامل تحویل قابل‌تغییر باشند، مدل به زیرمجموعه‌های ۱۵ گانه مربوط هدایت می‌شود. در هر یک از زیرمجموعه‌ها با توجه به مقدار کنونی عوامل تحویل و اولویت تغییر آن‌ها، تغییراتی در گام‌های معین در جهت افزایش انعطاف‌پذیری اعمال می‌گردد و با استفاده از رابطه (۴)، ظرفیت موردنیاز کانال و میزان انعطاف‌پذیری مربوط محاسبه می‌شود. این مراحل برای پوشش ترکیب عوامل تحویل قابل‌تغییر و دامنه تغییرات مجاز آن‌ها تا رسیدن به ظرفیت طراحی کانال تکرار می‌شود و نتایج گزارش می‌شود. نمودار گردشی مدل تهیه‌شده در شکل (۱) ارائه شده است.

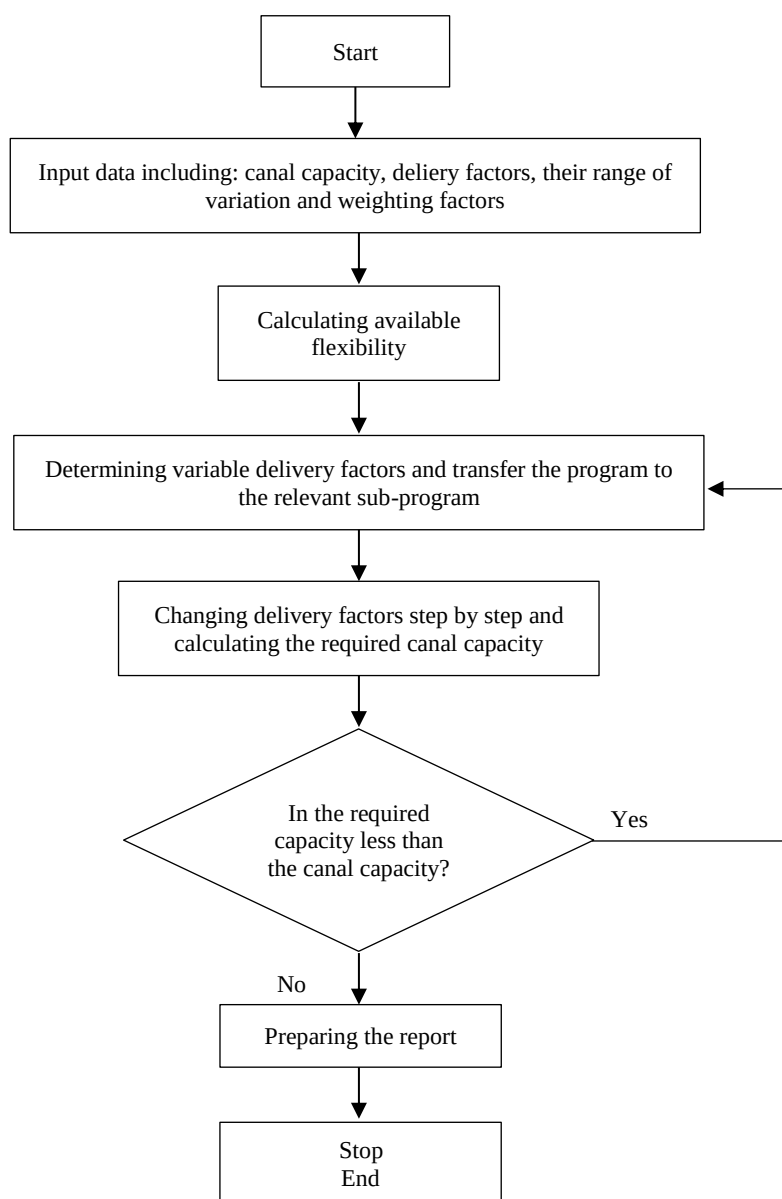


Figure 1. Flowchart of the MONA-Flexibility model

۴.۲. کانال عقیلی شرقی

برای تعیین انعطاف‌پذیری قابل دستیابی در کانال‌های آبیاری، مدلی تهیه گردید و کاربرد آن در کانال عقیلی شرقی که در ناحیه کارون قرار دارد، مورد ارزیابی قرار گرفت. شبکه آبیاری عقیلی در منطقه کارون و در سال ۱۹۸۰، در استان خوزستان بهره‌برداری شد. این شبکه متشکل از کانال اصلی عقیلی و دو کانال درجه یک به نام‌های عقیلی شرقی و عقیلی غربی می‌باشد. کانال اصلی با ظرفیت ۱۲ مترمکعب بر ثانیه از سد تنظیمی گتوند آبیگری نموده و در ۹۳۱+۱ دو کانال عقیلی شرقی و غربی به ترتیب با حداکثر ظرفیت پنج و هفت متر مکعب بر ثانیه از آن منشعب می‌شوند. دور آبیاری در این کانال ثابت و برابر ۱۰ روز است و امکان تغییر آن وجود ندارد. حداکثر مدت زمان تحویل آب در این کانال ۲۴ ساعت است که تا شش ساعت نیز قابل کاهش می‌باشد. زمان پیش‌درخواست نیز یک روز می‌باشد. تجربه بیش از ۲۰ ساله بهره‌برداری از این کانال نشان داده است که به دلایل مختلف هیچ‌گاه از ظرفیت کامل این کانال استفاده نشده و حداکثر جریان ثبت‌شده در دوره بهره‌برداری آن ۲/۱۶ مترمکعب بر ثانیه بوده است که نشان می‌دهد ظرفیت قابل توجهی برای افزایش انعطاف‌پذیری دارد.

۳. نتایج و بحث

نتایج بررسی‌های این پژوهش در چهار بخش جداگانه ارائه می‌شود. در قسمت اول نتایج بررسی‌های صورت‌گرفته برای تعیین کمی شاخص انعطاف‌پذیری عوامل تحویل ارائه می‌شود. در بخش دوم ضرایب اهمیت هر یک از عوامل تحویل در شبکه‌های مورد مطالعه بحث می‌شود. در قسمت سوم با توجه به مبانی پیش‌گفته و اطلاعات جمع‌آوری‌شده از شبکه‌ها انعطاف‌پذیری عوامل تحویل و شبکه‌های مورد بررسی محاسبه و گزارش شده است. در قسمت چهارم نتایج کاربرد مدل تهیه‌شده برای کانال عقیلی شرقی ارائه شده است.

۳.۱. شاخص کمی انعطاف‌پذیری

شاخص کمی انعطاف‌پذیری کانال و شبکه تابعی از انعطاف‌پذیری چهار عامل تحویل آب شامل نرخ جریان، دور تحویل آب، مدت تحویل آب و زمان پیش‌درخواست است. بنابراین، ابتدا نحوه تعیین انعطاف‌پذیری کمی عوامل تحویل آب تشریح می‌شود. قابل ذکر است که به عنوان گام اول برای کمی‌سازی شاخص انعطاف‌پذیری در شبکه‌های آبیاری و برای سهولت بررسی موضوع رابطه نمره انعطاف‌پذیری و عوامل تحویل به صورت خطی در نظر گرفته شده است. بدیهی است با توسعه پژوهش‌ها در این زمینه و تکمیل اطلاعات می‌توان روابط خاص آن‌ها را توسعه داد. بعد از آن اهمیت وزنی هریک از عوامل تحویل متناسب با دیدگاه‌های مدیران، مسئولین بهره‌برداری و کشاورزان تعیین گردید و در نهایت شاخص کمی انعطاف‌پذیری شبکه‌های آبیاری تعیین شده است.

۳.۱.۱. نمره انعطاف‌پذیری نرخ جریان

منظور از انعطاف‌پذیری در نرخ جریان این است که برای کشاورزان تا چه اندازه امکان تغییر نرخ جریان وجود دارد. در اکثر شبکه‌های آبیاری در ایران به دلایلی نظیر کمبود آب، کاهش سطح اراضی تحت پوشش شبکه، تغییر کاربری اراضی به مناطق مسکونی، مشکلات مدیریتی و بهره‌برداری و ... میزان آب تحویلی واقعی نسبت به ظرفیت طراحی کانال‌ها کمتر است و از بخشی از ظرفیت کانال‌ها استفاده نمی‌شود. در حالی که با برنامه‌ریزی مناسب تحویل و توزیع آب می‌توان از ظرفیت کانال‌ها بهتر استفاده نمود و انعطاف‌پذیری را افزایش داد. انعطاف‌پذیری در نرخ جریان را می‌توان تحت عنوان

ضریب تغییر نرخ جریان (e_R)^۵ به صورت نسبت حداکثر جریان بهره‌برداری کنونی (Q_0) به ظرفیت طراحی (Q_D) به شکل رابطه (۵) بیان کرد. حداکثر جریان بهره‌برداری کنونی را می‌توان به صورت حاصل ضرب مساحت تحت پوشش کانال (A) در نرخ جریان موجود (q_s) بیان نمود.

$$e_R = \frac{Q_0}{Q_D} = \frac{q_s \cdot A}{Q_D} \quad \text{رابطه (۵)}$$

مفهوم این ضریب برعکس مفهوم سختی یا انعطاف‌ناپذیری Merriam et al. (2007) است. اگر ضریب تغییر نرخ جریان برابر با یک باشد به معنی این است در بهره‌برداری کنونی از ظرفیت کامل طراحی کانال استفاده می‌شود و امکان افزایش انعطاف‌پذیری نرخ جریان وجود ندارد و نمره انعطاف‌پذیری آن صفر خواهد بود. کاهش این ضریب نشان‌دهنده آن است که جریان بهره‌برداری کنونی، از ظرفیت طراحی کانال کمتر است و در صورت درخواست زارعین برای دبی بیشتر، امکان تأمین آن وجود دارد و کشاورز می‌تواند نیاز آبیاری را در مدت زمان کمتر و با انعطاف‌پذیری بیش‌تر تأمین کند. هرچه مقدار جریان بهره‌برداری کنونی نسبت به ظرفیت کانال کمتر باشد، مقدار ضریب تغییر نرخ جریان کاهش می‌یابد، تا جایی که به حداقل می‌رسد و در آن شرایط انعطاف‌پذیری نرخ جریان برابر با ۱۰۰ درصد خواهد بود. رابطه انعطاف‌پذیری نرخ جریان در شکل (۲-ا) ارائه شده است.

نتایج بررسی‌های این پژوهش نشان داد در شبکه‌های آبیاری موردبررسی، کشاورزان تمایل دارند نرخ جریان بیش‌تر را در مدت زمان آبیاری کم‌تر دریافت کنند. در ۲۳ درصد از شبکه‌های مورد مطالعه در این پژوهش نرخ جریان متغیر بوده است. با توجه به ثابت بودن ظرفیت طراحی و سطح تحت پوشش در یک کانال مشخص، ضریب تغییر نرخ جریان (e_R) را می‌توان به صورت تابعی از نرخ جریان (q_s) بیان نمود. اثر تغییرات نرخ جریان بر روی ظرفیت کانال‌ها توسط پارامتر q_s در رابطه (۴) منعکس می‌شود.

۳.۱.۲. نمره انعطاف‌پذیری دور آبیاری

از میان شبکه‌های موردبررسی تنها در شبکه آبیاری مغان، با توجه به عدم کمبود آب در شبکه امکان تغییر دور آبیاری وجود دارد. در مابقی شبکه‌ها یا دور آبیاری ثابت است و یا تنها در برخی از فصول سال و در شرایط خاص متغیر می‌باشد. در برخی از شبکه‌های آبیاری با توجه به محدودیت‌های موجود دور آبیاری ممکن است تا ۳۰ روز افزایش یابد. پیش‌بینی امکان کاهش دور آبیاری به معنی افزایش اختیار کشاورز برای مدیریت بهتر آبیاری متناسب با نیاز آبیاری است. بنابراین برای دور آبیاری یک روز و کم‌تر حداکثر انعطاف‌پذیری و برای دور آبیاری ۳۰ روز و بیش‌تر حداقل انعطاف‌پذیری در نظر گرفته شد. بدین ترتیب، در صورت امکان کاهش دور آبیاری به یک روز و کم‌تر نمره انعطاف‌پذیری (۱۰۰ درصد) و برای دور آبیاری ۳۰ روز و بیش‌تر نمره انعطاف‌پذیری صفر می‌باشد. رابطه نمره انعطاف‌پذیری دور آبیاری در شکل (۲-ب) نشان داده شده است.

کاهش دور آبیاری این امکان را فراهم می‌کند که کشاورزان در فواصل آبیاری کوتاه‌تر با دبی بیش‌تر آب را دریافت کنند و از طرفی امکان آبیاری هم‌زمان کشاورزان به علت کوتاه‌تر بودن دور آبیاری کاهش می‌یابد. بنابراین کاهش دور آبیاری اگرچه باعث افزایش انعطاف‌پذیری می‌شود، اما به دلیل دو ویژگی بیان شده که یکدیگر را خنثی می‌نمایند تأثیر چندانی در ظرفیت کانال نخواهد داشت. بنابراین دور آبیاری تنها از جنبه افزایش انعطاف‌پذیری زارعین در مدیریت آبیاری موردبررسی قرار گرفته است.

۳.۱.۳. نمره انعطاف‌پذیری مدت آبیاری

در اکثر شبکه‌های آبیاری ایران زمان تنظیم دریاچه‌ها هر ۲۴ ساعت یک‌بار می‌باشد، بنابراین حداکثر مدت زمان آبیاری برابر ۲۴ ساعت است. در برخی نواحی نظیر کارون و مارون کشاورزان این امکان را دارند که در شرایط خاص و با در نظر گرفتن امکانات شبکه، مدت زمان آبیاری را تا حدودی کاهش دهند. بدین ترتیب، نمره انعطاف‌پذیری برای دامنه تغییرات مدت زمان آبیاری از صفر تا ۲۴ ساعت، به‌ترتیب برابر با ۱۰۰ تا صفر درصد در نظر گرفته شد (شکل ۲-۳). چنانچه مدت زمان آبیاری بیش از ۲۴ ساعت باشد نمره آن صفر در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد با توجه به رابطه $E = \frac{24}{T_{opr}}$ ، کاهش مدت آبیاری باعث افزایش درجه آزادی کشاورزان و افزایش ظرفیت کانال‌ها می‌شود. بررسی اثر تغییرات مدت آبیاری بر روی ظرفیت کانال‌ها توسط پارامتر E ، در رابطه (۴) صورت می‌گیرد.

۳.۱.۴. نمره انعطاف‌پذیری زمان پیش‌درخواست

زمان پیش‌درخواست، نشان‌دهنده حداقل مدت زمان لازم از اعلام درخواست تا دریافت آب است. این پارامتر یکی از عوامل مؤثر در انعطاف‌پذیری کشاورزان برای مدیریت آبیاری مزرعه می‌باشد. هرچه این مدت زمان کوتاه‌تر باشد امکان تأمین آب موردنیاز گیاه و مدیریت آبیاری بهتر فراهم می‌شود. برای مصرف‌کننده مطلوب است که حتی اگر عوامل تحویل ثابت باشند، بتواند در مدت زمان کوتاهی از اعلام درخواست آن را در اختیار داشته باشد. بدیهی است با کاهش زمان پیش‌درخواست، انعطاف‌پذیری افزایش می‌یابد. در شبکه‌هایی که فاصله منبع آب تا نقطه تحویل کوتاه است، یا مخازن ذخیره درون شبکه وجود داشته باشد و تعداد درخواست‌های هم‌زمان کم باشد، زمان پیش‌درخواست می‌تواند کمتر از ۲۴ ساعت باشد. بالعکس در شرایط کمبود آب، فاصله طولانی بین منبع آب و نقطه تحویل و یا امکان افزایش تعداد درخواست‌های هم‌زمان، زمان پیش‌درخواست افزایش می‌یابد و به ۷۲ ساعت و حتی در برخی شبکه‌ها تا چهار روز افزایش می‌یابد. در ۱۵ درصد از شبکه‌های موردبررسی زمان پیش‌درخواست حداقل ۲۴ ساعت بوده است. در هشت درصد از شبکه‌ها این زمان حداقل ۴۸ ساعت و در هفت درصد از شبکه‌ها زمان پیش‌درخواست حداقل ۷۲ ساعت می‌باشد. نمره انعطاف‌پذیری برای زمان پیش‌درخواست چهار روز و بالاتر برابر با صفر در نظر گرفته شد. در شبکه‌هایی که به محض اعلام درخواست امکان تأمین آب وجود داشته باشد (روش تحویل برحسب تمایل) نمره انعطاف‌پذیری برابر ۱۰۰ درصد می‌باشد. بر این اساس، رابطه نمره انعطاف‌پذیری برای زمان پیش‌درخواست به‌صورت شکل (۲-۴) در نظر گرفته شد.

تأثیر زمان پیش‌درخواست بر روی ظرفیت کانال‌ها توسط پارامتر U_{pq} ، در رابطه (۴) مشخص می‌گردد. با کاهش زمان پیش‌درخواست (d)، احتمال آگیری هم‌زمان آگیرها (P_q) افزایش می‌یابد. با فرض رابطه خطی بین این دو عامل می‌توان مقادیر P_q و در نتیجه آن U_{pq} ، را برای زمان‌های پیش‌درخواست مختلف (d) تعیین کرد (جدول ۳ و شکل ۳).

Table 3. Standard normal cumulative distribution function

Advance notice d (Day)	0 (Instant delivery)	1	2	3	4	5	6	7
P_q (%)	99	92	85	78	71	64	57	50
U_{pq}	2.324	1.41	1.04	0.775	0.555	0.357	0.175	0

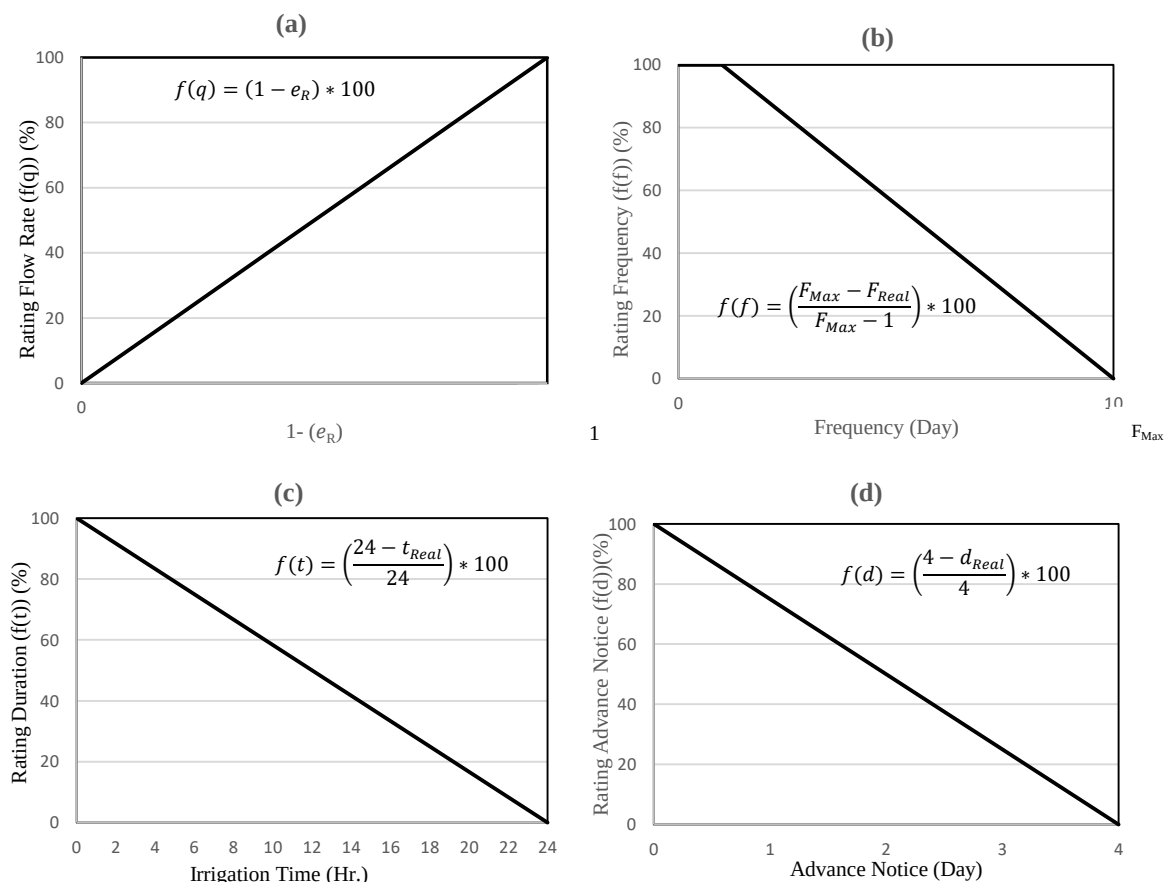


Figure 2. Relation of the delivery factors and the flexibility rating

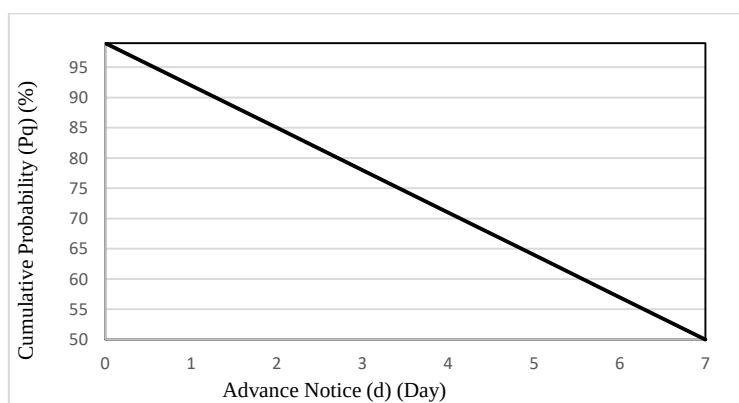


Figure 3. Relation between advance notice and cumulative probability of simultaneous operation of turnouts

۲.۳. تعیین ضریب اهمیت عوامل تحویل

هریک از عوامل تحویل با توجه به شرایط خاص شبکه‌های آبیاری دارای اهمیت متفاوتی در انعطاف‌پذیری هستند. بنابراین وزن عوامل تحویل در انعطاف‌پذیری متفاوت در نظر گرفته شد و شاخص کمی انعطاف‌پذیری به صورت مجموع وزنی نمره انعطاف‌پذیری هر یک از عوامل تحویل به صورت رابطه (۶) معرفی شد.

$$F = A * f(q) + B * f(f) + C * f(t) + D * f(d) \quad \text{رابطه ۶}$$

در این رابطه، F شاخص کمی انعطاف‌پذیری کل کانال (برحسب درصد) است که حداکثر مقدار آن ۱۰۰ درصد می‌باشد. f (q)، f (f)، f (t) و f (d) به‌ترتیب نمره انعطاف‌پذیری نرخ جریان، دور آبیاری، مدت آبیاری و زمان پیش‌درخواست (برحسب درصد) می‌باشد که با توجه به نمودارها و روابط شکل (۱)، تعیین می‌شود. A ، B ، C و D به‌ترتیب وزن هر یک از عوامل نام‌برده می‌باشد که مجموع آن‌ها باید برابر یک باشد.

وزن هر یک از عوامل تحویل وابسته به عواملی نظیر، شرایط آب‌وهوایی، نوع کشت، وضعیت منابع آب، سیاست‌های مدیریتی، تجربیات و دیدگاه‌های کشاورزان است. به‌علت کمبود آب در شبکه‌های آبیاری ایران، از دیدگاه کشاورزان، نرخ جریان از اهمیت بیش‌تری نسبت به بقیه عوامل تحویل برخوردار است. طبق مصاحبه‌های صورت‌گرفته با کشاورزان از نظر ۴۰ درصد آن‌ها، اولویت اهمیت عوامل تحویل به‌ترتیب عبارتند از نرخ جریان، دور آبیاری، مدت آبیاری و زمان پیش‌درخواست. از نظر ۳۷ درصد کشاورزان زمان پیش‌درخواست اهمیت زیادی در انعطاف‌پذیری دارد. در مقابل ۲۶ درصد کشاورزان اعلام کردند که زمان پیش‌درخواست تأثیر چندانی در انعطاف‌پذیری ندارد. چکیده نتایج به‌دست‌آمده در مورد ضریب اهمیت عوامل تحویل از نظر کشاورزان در شبکه‌های موردبررسی به شرح زیر است.

- در شبکه آبیاری دز، به‌دلیل شرایط آب‌وهوایی گرم، کشاورزان ترجیح می‌دهند نرخ جریان بیش‌تری را در مدت زمان کوتاه‌تر دریافت کنند، بنابراین نرخ جریان و مدت زمان آبیاری از وزن بیش‌تری نسبت به بقیه عوامل تحویل برخوردار است. در این شبکه به‌علت آب کافی و وجود جریان دائمی در کانال‌ها، زمان پیش‌درخواست از اهمیت زیادی برخوردار نمی‌باشد.

- در شبکه‌های آبیاری کارون و کرخه شاوور، کشاورزان اظهار داشته‌اند اولویت وزن‌دهی به‌ترتیب عبارت است از نرخ جریان، دور آبیاری، مدت آبیاری و زمان پیش‌درخواست و اهمیت نرخ جریان نسبت به سایر عوامل تحویل حدود ۴۰ درصد است.

- در شبکه‌های آبیاری سفیدرود و فومنات کشت اصلی برنج است. بنابراین مهم‌ترین عامل از نظر کشاورزان دائمی‌بودن جریان و تحویل به موقع آب پس از درخواست است. لذا مدت زمان آبیاری و زمان پیش‌درخواست از وزن بالایی برخوردار هستند.

- در شبکه آبیاری درودزن، به‌دلیل کمبود آب اهمیت نرخ جریان ۵۰ درصد است. دور و مدت آبیاری دارای وزن یکسان بوده و زمان پیش‌درخواست از اهمیت زیادی برخوردار نیست.

- در شبکه آبیاری گرمسار، به‌دلیل منبع آب ناپایدار، نرخ جریان نیز از اهمیت بالایی برخوردار است.

- در شبکه آبیاری مارون، کشاورزان تمایل دارند نرخ جریان بیش‌تری را در مدت زمان کم‌تر دریافت کنند، بنابراین در این شبکه نرخ جریان و مدت آبیاری از اهمیت بالایی برخوردار است.

- در شبکه‌های آبیاری مغان و قزوین، با توجه به کفایت نسبی آب موجود و مدیریت مناسب شبکه، درخواست‌های کشاورزان به‌طورعمده پذیرفته می‌شود. بنابراین انعطاف‌پذیری نسبی در همه عوامل تحویل وجود دارد. تنها مسئله در این شبکه‌ها این است که به‌دلیل فاصله طولانی منبع آب تا نقاط تحویل، زمان پیش‌درخواست طولانی است. بنابراین عامل زمان پیش‌درخواست به‌ویژه در دوره حداکثر مصرف از اهمیت بالایی برخوردار است.

با توجه به مجموع اطلاعات جمع‌آوری‌شده و مصاحبه‌های انجام‌شده، ضریب اهمیت عوامل تحویل در شبکه‌های موردبررسی مطابق مقادیر جدول (۴) در نظر گرفته شد. قابل ذکر است که تدقیق این ضرایب نیازمند بررسی‌های بیش‌تر می‌باشد.

Table 4. Weight of delivery factors in Iran's irrigation networks and districts

Networks & Districts	Weight of flow rate (%)	Weight of frequency (%)	Weight of irrigation time (%)	Weight of Advance notice (%)
Dez	40	20	40	0
Karkhe Shavoor	40	30	20	10
Sefidrood & Foumanat	15	25	30	30
Dorudzan	50	25	25	0
Garmsar	50	25	25	0
Karun	40	30	20	10
Marun	30	25	30	15
Moghan	20	20	20	40
Qazvin	20	20	20	20

۳.۳. انعطاف‌پذیری شبکه‌های موردبررسی

برای تعیین انعطاف‌پذیری، داده‌های موردنیاز در شبکه‌های موردبررسی جمع‌آوری گردید که در جدول (۵) ارائه شده است. خطوط تیره در جدول، نشان‌دهنده عدم تغییر عوامل تحویل و ثابت‌بودن آن‌هاست که شرایط معمول در شبکه‌های آبیاری با تحویل گردشی است.

Table 5. Real values of delivery factors in irrigation networks

Networks & Districts	Flow rate variation coefficient (e_R ,%)	Frequency (day)	Irrigation time (hr.)	Advance notice (day)
Dez	-	-	-	-
Karkhe Shavoor	-	-	-	-
Sefidrood & Foumanat	-	-	-	-
Dorudzan	-	15	24	1
Garmsar	-	15	24	1
Karun	0.43	10	6-24	1
Marun	-	15	6-24	1
Moghan	0.67	7-10	24	0-2
Qazvin	0.5	10	24	3

با توجه به داده‌های ارائه‌شده در جدول‌های (۴) و (۵) و ثابت یا متغیربودن عوامل تحویل و دامنه تغییرات آن‌ها با استفاده از روابط و نمودارهای شکل (۲)، نمره انعطاف‌پذیری برای هر یک از عوامل تحویل و شاخص کمی انعطاف‌پذیری شبکه‌های آبیاری مورد مطالعه محاسبه و در جدول (۶) ارائه شد.

Table 6. Flexibility rating and quantitative flexibility index in Iran's irrigation networks

Networks & Districts	Flow rate $f(q)(\%)$	Frequency $f(f)(\%)$	Irrigation time $f(t)(\%)$	Advance notice $f(d)(\%)$	Total flexibility $F(\%)$
Dez	0	0	0	0	0
Karkhe Shavoor	0	0	0	0	0
Sefidrood & Foumanat	0	0	0	0	0
Dorudzan	0	0	0	70	0
Garmsar	0	0	0	75	0
Karun	67	0	75	75	45.3
Marun	0	0	75	75	33.75
Moghan	67	57	0	100	61.8
Qazvin	50	0	0	25	33.4

در پنج شبکه موردبررسی که با روش گردشی با عوامل ثابت از پیش تعیین‌شده بهره‌برداری می‌شوند مقدار انعطاف‌پذیری برابر صفر است. در سایر شبکه‌ها انعطاف‌پذیری از ۳۳/۴ درصد برای شبکه قزوین تا حداکثر ۶۱/۸ درصد برای شبکه مغان محاسبه شد. متوسط نمره انعطاف‌پذیری در شبکه‌های موردبررسی برابر با ۱۹ درصد است. این نتایج

نشان می‌دهد شاخص انعطاف‌پذیری در اغلب شبکه‌های آبیاری موردبررسی بسیار پایین است و کشاورزان قابلیت مانور چندانی برای مدیریت آبیاری مزارع ندارند که باید برای ارتقای آن چاره‌ای اندیشید.

۴.۳. انعطاف‌پذیری قابل دستیابی در کانال عقیلی شرقی

برای کاربرد مدل تهیه‌شده، کانال عقیلی شرقی که در ناحیه کارون قرار دارد موردآزمایی قرار گرفت. در طی بیش از ۲۰ سال بهره‌برداری از این کانال حداکثر جریان ثبت‌شده آن ۲/۱۶ مترمکعب در ثانیه بوده است، درحالی‌که ظرفیت طراحی کانال برابر پنج مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. بنابراین امکان افزایش انعطاف‌پذیری عوامل تحویل و کل کانال وجود دارد. در اغلب شبکه‌های آبیاری ناحیه کارون امکان تغییرات در همه عوامل تحویل وجود دارد. در کانال عقیلی شرقی برای افزایش انعطاف‌پذیری، امکان تغییر دامنه نرخ جریان، مدت آبیاری و زمان پیش‌درخواست به‌ترتیب برابر صفر تا ۱۰۰ درصد، یک تا ۲۴ ساعت و صفر تا چهار روز وجود دارد. در این کانال دور آبیاری ثابت بوده و انعطاف‌پذیری آن صفر است. برای تعیین حداکثر انعطاف‌پذیری قابل دستیابی با ورود اطلاعات کانال و اجرای مدل، ترکیبی از عوامل تحویل با انعطاف‌پذیری‌های مختلف به شرط عدم تجاوز از ظرفیت کانال استخراج شد. نتایج خروجی مدل در شکل (۴) نشان داده شده است. مقدار حداکثر انعطاف‌پذیری قابل دستیابی در این کانال و مقادیر عوامل تحویل مربوط نیز در کنار شکل گزارش شده است.

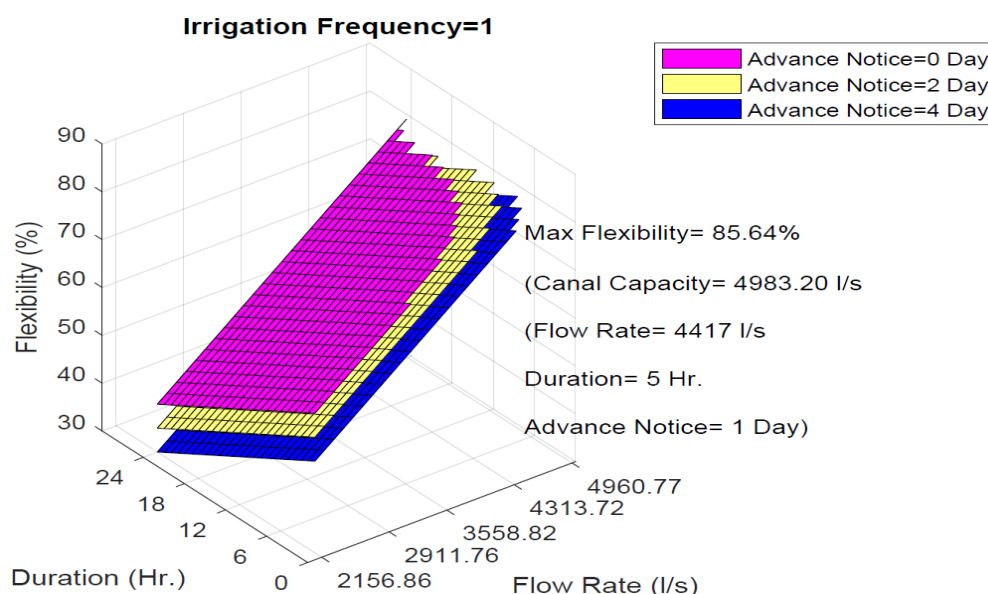


Figure 4. The output of MONA-Flexibility model

در شکل (۴)، تغییرات نمره انعطاف‌پذیری نسبت به تغییرات نرخ جریان و مدت آبیاری برای سه زمان پیش‌درخواست برای سه سطح زمان پیش‌درخواست صفر، دو و چهار روز و دور آبیاری یک روز نشان داده شده است. میزان تأثیر هر یک از عوامل تحویل بر نمره انعطاف‌پذیری متناسب با ضرایب وزنی آن‌ها در شکل مشهود است. از آنجاکه، زمان پیش‌درخواست در کانال عقیلی شرقی از اهمیت پایینی برخوردار است، تغییرات آن تأثیر محدودی بر افزایش انعطاف‌پذیری داشته است. به‌عنوان نمونه، برای زمان آبیاری ۲۴ ساعت و نرخ جریان ۲/۱۶ مترمکعب در ثانیه، نمره انعطاف‌پذیری برای زمان

پیش‌درخواست چهار، دو و صفر به ترتیب حدود ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درصد به دست آمده که چندان قابل توجه نیست. عمده افزایش انعطاف‌پذیری در این کانال با تغییرات سایر عوامل تحویل حاصل شده است. برای مقادیر ثابت نرخ جریان ۲/۱۶ مترمکعب در ثانیه و زمان پیش‌درخواست چهار روز، نمره انعطاف‌پذیری برای مدت آبیاری ۲۴ و یک ساعت به ترتیب ۳۰ و ۵۰ درصد به دست آمده است. بیش‌ترین افزایش انعطاف‌پذیری نسبت به تغییر نرخ جریان حاصل شده است. برای مقادیر ثابت زمان پیش‌درخواست چهار روز و مدت آبیاری یک ساعت، نمره انعطاف‌پذیری برای نرخ جریان از ۲/۱۶ و ۴/۳۱ به ترتیب ۵۰ و ۸۰ درصد به دست آمده است. حداکثر انعطاف‌پذیری در کانال عقلی شرقی بدون تخطی از ظرفیت کانال ۸۶ درصد حاصل شده است که نسبت به انعطاف‌پذیری موجود ۴۱ درصد قابل بهبود است. این انعطاف‌پذیری متناسب با نرخ جریان ۴/۹۶ مترمکعب، مدت آبیاری پنج ساعت و زمان پیش‌درخواست یک روز می‌باشد. با استفاده از این نتایج کمی می‌توان با توجه به سیاست‌های مدیریت توزیع و تحویل آب، امکانات موجود از نظر منابع آب و تعداد و مهارت پرسنل بهره‌برداری و نظرات کشاورزان، هر نوع ترکیب مناسبی از عوامل تحویل را که موجب افزایش انعطاف‌پذیری گردد انتخاب نمود. لازم به ذکر است که حداکثر انعطاف‌پذیری قابل دست‌یابی با توجه به ظرفیت استفاده‌نشده کانال تعیین شده است. بدیهی است که عملیاتی‌شدن آن نیازمند فراهم‌بودن شرایط مختلف اجرایی است. از جمله این شرایط عبارتند از اراده مسئولین برای افزایش انعطاف‌پذیری، آمادگی کارکنان بهره‌برداری در اجرای تغییرات عوامل تحویل، آگاهی و پذیرش کشاورزان، شرایط کانال و سازه‌ها، موجودی آب و ... نتایج این پژوهش سقف انعطاف‌پذیری قابل دست‌یابی را به عنوان هدف‌گذاری مدیریت شبکه تعیین می‌کند. این پتانسیل در صورت برقراری شرایط اجرایی موردنیاز قابل تحقق است. بدیهی است در صورت فقدان بخشی از شرایط موردنیاز، متناسب با امکانات موجود انعطاف‌پذیری را تا حدودی می‌توان افزایش داد. در این صورت برای ارتقای انعطاف‌پذیری و دست‌یابی به پتانسیل تعیین‌شده آن، مدیریت شبکه باید در حد امکان نسبت به فراهم‌نمودن شرایط لازم تلاش نماید.

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بهبود بهره‌وری شبکه‌های آبیاری از طریق افزایش انعطاف‌پذیری ضروری است. افزایش انعطاف‌پذیری نیازمند ارزیابی کمی انعطاف‌پذیری کنونی و قابل دست‌یابی است. روش ارائه‌شده در این پژوهش امکان ارزیابی کمی انعطاف‌پذیری را براساس اطلاعات واقعی دامنه تغییر عوامل تحویل و ضریب اهمیت آن‌ها فراهم می‌کند. مدل تهیه‌شده ظرفیت موردنیاز کانال‌های آبیاری را متناسب با انعطاف‌پذیری موردنظر تعیین می‌کند. مدیران و بهره‌برداران شبکه‌های آبیاری می‌توانند با توافق صورت گرفته و با استفاده از روش ارائه‌شده و مدل تهیه‌شده متناسب با سیاست‌های بهره‌برداری و امکانات موجود، ترکیب مناسب عوامل تحویل را بدون تخطی از ظرفیت کانال برای بهبود انعطاف‌پذیری انتخاب نمایند. به عنوان اولین گام برای کمی‌سازی انعطاف‌پذیری کانال‌های آبیاری، رابطه نمره انعطاف‌پذیری و عوامل تحویل به صورت خطی در نظر گرفته شد. همچنین ضریب اهمیت عوامل تحویل در انعطاف‌پذیری براساس اطلاعات جمع‌آوری شده به صورت توصیفی تعیین شد. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های بیش‌تر برای تعیین دقیق‌تر روابط انعطاف‌پذیری و عوامل تحویل صورت گیرد و وزن عوامل تحویل با استفاده از روش‌های تحلیلی تعیین شود.

۵. تشکر و قدردانی

از همکاری صادقانه مدیران، کارشناسان، بهره‌برداران و کشاورزان شبکه‌های آبیاری مورد مطالعه که جهت گردآوری اطلاعات کمک شایانی نمودند و کمال همکاری را داشتند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۶. پی‌نوشت‌ها

1. Rotational Method
2. Arranged Delivery
3. Congestion
4. Flow Rate Variation Coefficient or Elasticity of the canal

۷. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

۸. منابع

- Anwar, A. A., & Haq, Z. U. (2016). Arranged-demand irrigation scheduling with no identical discharges. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142 (9), 04016033. DOI: 10.1061/ (ASCE) IR.1943-4774.0001029.
- Burt, C. M., & Styles, S. W. (2000). Irrigation district service in the western United States, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126 (5), 279-282.
- Clemmens, A. (1987). Delivery system schedules and required capacities. Proc. *planning, operation, rehabilitation and automation of irrigation water delivery systems, irrigation division. ASCE, Portland, OR, USA*, pp. 18-34.
- Clement R. (1966). Calcul des debits dans les reseaux d'irrigation fonctionnant a la demand. *La Houille Blanche*, 5, 553-575. (In French)
- Eftekhari, H., & Monem, M.J. (2023). Determination irrigation canal capacity and achievable flexibility for arranged Delivery. *Journal of Water and Irrigation Management*, 13 (3), 803-816. DOI:10.22059/jwim.2023.359786.1080 (In Persian).
- Lamaddalena, N., & Sagardoy, J. A. (2000). *Performance analysis of On-demand pressurized irrigation systems*. FAO Irrigation and Drainage. Paper 59.
- Merriam, J. L., Styles, S. W., & Freeman, B. J. (2007). Flexible irrigation systems: concept, design, and application. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133 (1) 2-11. DOI: 10.1061/ (ASCE) 0733-9437.
- Monserat, J., Naghaee, R., Monem, M. J., & Cots, L. (2020). Application of Clément's first formula to an arranged-schedule secondary canal. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 147(2). DOI: 10.1061/ (ASCE) IR.1943-4774.0001531.
- Naghaee, R., & Monem, M.J. (2018a). Determining the basics of three rotational, arranged, and on-demand delivery Methods for calculating the capacity of irrigation canals using the Clement model (Case study: Aghili network). *The 17th Iranian Hydraulic Conference*, Faculty of Technology and Engineering, University of Shahrekord, Sharekord, Iran (In Persian).
- Naghaee, R., & Monem, M.J. (2018b). Sensitivity analysis of irrigation canal capacity with respect to irrigation time using first Clements model (case study: Aghili network). *The 4th Iranian Congress on Soil and Water Engineering and Management*, College of Agriculture and natural resources, University of Tehran, Iran. (In Persian).
- Naghaee, R., & Monem, M.J. (2019). Classification of arranged delivery methods and their flexibility with respect to the main delivery factors and management policies of irrigation networks (Case study: Aghili network). *The 1th International and 4th National Congress on Iranian Irrigation & Drainage*, University of Urmia, Iran. (In Persian).
- Naghaee, R. (2022). *Theoretical analysis and planning of arranged delivery method in accordance with existing irrigation canals and development a method for determining operational pattern using artificial intelligence systems*. Doctoral Dissertation, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (In Persian).
- Naghaee, R., & Monem M. J. (2019). Sensitivity analysis of irrigation canal capacity with respect to farmers' degree of freedom using first Clemment's model (Case Study: East Aghili Canal). *The 3rd world Irrigation Forume*, 1-7 September 2019, Bali, Indonesia.

- Savari, H., & Monem, M.J. (2015). Compilation of basics and classification of arranged delivery method in irrigation networks. *The 15th Iranian Hydraulic Conference*, Imam Khomeini International University, Qazvin, Qazvin, Iran, 24 and 25 December 2015. (In Persian).
- Savari, H., & Monem, M.J. (2021). Analysis and classification of arranged water delivery methods in irrigation networks. *Journal of Water and Irrigation Management*, 11 (2), 145-158. DOI:10.22059/jwim.2021.311437.828 .(In Persian).