مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد کارده با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی بازه‌ای چند مرحله‌ای

فاطمه رستگاری‌پور[1] محمود صبوحی صابونی[2]

(دریافت ۸۷/۸/۲۶ پذیرش ۸۹/۳/۲۷)

چکیده

در مطالعه حاضر مدیریت آب سد کارده با استفاده از روش برنامه‌ریزی تصادفی بازه‌ای چند مرحله‌ای در شرایط عدم قطعیت مورد بررسی قرار گرفت. برنامه‌ریزی بازه‌ای چند مرحله‌ای از ترکیب دو برنامه‌ریزی پویا و بازه‌ای در چارچوب بهینه‌سازی تصادفی تشکیل می‌شود. پویایی مدل، به‌کارگیری خط مشی از پیش تعریف شده در طی فرایند بهینه‌سازی و استفاده از پارامترهای بازه‌ای و احتمالات در شرایط عدم قطعیت از مزیتهای این تکنیک است. این روش، سناریوهای تصمیم‌گیری تحت مقادیر مختلف کمبود آب را ارائه می‌دهد. داده‌های مطالعه از سازمان آب منطقه‌ای و شرکت آب و فاضلاب استان خراسان رضوی و برای سالهای ۶۷ تا ۸۶ جمع‌آوری شد. نتایج نشان داد در بدترین شرایط، طی سه سال آینده (تا سال ۹۰) به‌ترتیب ۱/۹، ۲/۵۵ و ۳/۱ میلیون مترمکعب کمبود آب در بخش شهری و ۰/۲۲، ۰/۳۲ و ۰/۷۵ در بخش کشاورزی رخ خواهد داد. کاهش ۰/۵، ۰/۷ و ۱ مترمکعب در الگوی مصرف ماهانه بخش شهری و افزایش ۶، ۱۱ و ۲۰ درصد در راندمان آبیاری بخش کشاورزی تحت پوشش سد کارده، راهکارهای مناسبی برای رویارویی با بحران کم آبی در سه سال آینده است.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی تصادفی، روش چند مرحله ای، پارامترهای بازه‌ای، عدم قطعیت، سد کارده

An Optimization Model for Kardeh Reservoir Operation Using Interval-Parameter, Multi-stage, Stochastic Programming

Fatemeh Rastegaripour [1] *Mahmood Sabouhi Sabouni[2]*

(Received Nov. 17, 2008 Accepted Jun. 17, 2010)

Abstract

The present study investigates water allocation of Kardeh Reservoir to domestic and agricultural users using an Interval Parameter, Multi-stage, Stochastic Programming (IMSLP) under uncertainty. The advantages of the method include its dynamics nature, use of a pre-defined policy in its optimization process, and the use of interval parameter and probability under uncertainty conditions. Additionally, it offers different decision-making alternatives for different scenarios of water shortage. The required data were collected from Khorasan Razavi Regional Water Organization and from the Water and Wastewater Co. for the period 1988-2007. Results showed that, under the worst conditions, the water deficits expected to occur for each of the next 3 years will be 1.9, 2.55, and 3.11 million cubic meters for the domestic use and 0.22, 0.32, 0.75 million cubic meters for irrigation. Approximate reductions of 0.5, 0.7, and 1 million cubic meters in the monthly consumption of the urban community and enhanced irrigation efficiencies of about 6, 11, and 20% in the agricultural sector are recommended as approaches for combating the water shortage over the next 3 years.

Keywords: Stochastic Programming, Multi-Stage Method, Interval Parameter, Uncertainty, Kardeh Reservoir.

۱-دانشجوی دکترای اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل
۲- استادیار اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل
(نویسنده مسئول) ۲۲۳۲۱۱۲ (۰۵۴۲) msabuhi 39@yahoo.com

1. Ph.D. Student of Agriculture Economic, College. of Agriculture, Zabol University
2. Assist. Prof. of Agriculture Economic, College. of Agriculture, Zabol University
(Corresponding Author) (+98 542) 2232112 msabuhi 39@yahoo.com

۱- مقدمه

کمبود آب یکی از مهم‌ترین عوامل محدود کننده توسعه اقتصادی کشور به شمار می‌رود. افزایش تقاضای آب شرب و کشاورزی نیز موجب تشدید مسئله بحران آب شده است[۱]. لذا برنامه‌ریزی برای استفاده بهینه از منابع آب و تخصیص اقتصادی این عامل کمیاب بین مصارف مختلف، ضروری به‌نظر می‌رسد.

ایران با متوسط نزولات جوی ۲۶۰ میلی‌متر در سال از کشورهای خشک جهان به‌شمار می‌رود. از ۴۱۵ میلیارد مترمکعب نزولات سالانه، حدود ۷۰ درصد آن تبخیر می‌شود [۲]. از مقدار آب موجود، به‌ترتیب ۹۳، ۵ و ۲ درصد در بخشهای کشاورزی، شهری و صنعتی به مصرف می‌رسد[۳ و ۴]. محدودیت منابع آب، افزایش هزینه‌های استحصال و محدودیت منابع مالی، طرحهای توسعه بهره‌برداری از منابع جدید آب را با مشکل و محدودیت مواجه کرده است [۳]. افزون بر آن رشد جمعیت، ارتقای سطح زندگی، توسعه صنعتی و کشاورزی وحفاظت اکوسیستم‌ها سبب افزایش تقاضای آب شده است. این عوامل و نقش مهم آب در توسعه پایدار، سبب توجه بیش از پیش مسئولان به مدیریت تقاضا و عرضه آب در برنامه‌ریزی‌ها و سیاست‌گذاری‌های کلان و منطقه‌ای کشور شده است [۵].

سد کارده در چهل کیلومتری شمال شهر مشهد و بر روی رودخانه کارده و در پایین‌دست روستایی به‌همین نام در محل بند قدیمی کارده احداث گردیده است. این سد از محل سیلاب‌هایی که قبل از احداث سد به‌صورت غیر قابل استفاده در رودخانه جریان داشتند و در نهایت از طریق بستر رودخانه کشف‌رود از کشور خارج می‌شدند، برای آبرسانی شهر مشهد مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶]. تأمین نسبی آب برای اراضی کشاورزی موجود در پایین‌دست، از دیگر اهداف احداث سد کارده بوده است. پروژه احداث سد در سال ۱۳۶۱ آغاز شد و در سال ۱۳۶۶ به بهره‌برداری رسید. مساحت حوضه آبریز کارده ۵۴۷ کیلومتر مربع و متوسط بارندگی ۲۸۳/۵ میلی‌متر است. نوع اقلیم منطقه نیز سرد و خشک کوهستانی است[۷].

تا کنون مطالعاتی در زمینه برنامه‌ریزی خاکستری[1] انجام شده است. هانگ و همکاران[2] در سال ۱۹۹۲ برای اولین بار راهکار برنامه‌ریزی خطی خاکستری را در مدیریت ضایعات جامد آب در کانادا به‌کار بردند[۸]. هانگ و مور[3] در سال ۱۹۹۳ برنامه‌ریزی خاکستری را برای تخصیص آب کانالی در چین به‌کار بردند. سپس با استفاده از آنالیز حساسیت، اثر تغییر در پاسخها به ازای تغییر در داده‌های خاکستری را تجزیه و تحلیل نمودند. آنها دریافتند در شرایطی که درجه خاکستری بودن ضرایب خاکستری نهاده‌ها ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد باشد، درجه خاکستری بودن پاسخها نیز به‌ترتیب ۱۸/۷۶، ۳۵ و ۸۲/۳۵ درصد خواهد بود [۹]. هانگ در سال ۱۹۹۶ مدل پارامترهای بازه‌ای[4] را در کنترل آلودگی آب بین سیستم‌های کشاورزی کانادا، به‌کار برد. این مدل به‌علت انعطاف‌پذیری بالا و کاربردهای فراوان و ساده برای تصمیم‌گیری نهایی، مورد استقبال مدیران قرار گرفت. با استفاده از این مدل مجموعه جواب قابل قبولی برای کنترل آلودگی آب منطقه حاصل شد. در ادامه مطالعه با استفاده از آنالیز حساسیت، محدودیتهای کمّی و کیفی مؤثر بر درآمد کشاورزان، مبادله بین اهداف اقتصادی و محیط‌زیستی بررسی شده است [۱۰].

لی و همکاران[5] در سال ۲۰۰۶ مدل برنامه‌ریزی تصادفی چند مرحله‌ای با پارامترهای بازه‌ای[6] را برای مدیریت منابع آب در کانادا تحت سناریوهای متفاوت به‌کار گرفتند. آنها در مطالعه خود علاوه بر تخصیص آب بین مصارف مختلف به بررسی مبادله بین اهداف محیط زیستی و اقتصادی پرداختند. نتایج مطالعه آنها طی ۸۱ سناریو برای سه مصرف کننده شهری، کشاورزی و صنعتی و سه دوره آینده ارائه شد. اگر آب وعده داده شده به مصرف کننده در دوره مورد نظر رها شود، سود خالص سیستم افزایش می‌یابد و اگر رها نشود، مصرف کننده باید آب را از منبع گران‌تری تهیه کند و یا فعالیتهای خود را کاهش دهد که در دو حالت مصرف کننده ضرر خواهد کرد [۱۱]. گلیان و همکاران در سال ۱۳۸۶به تحلیل سیاست‌های بهره‌برداری از منابع آب در حوضه آبریز رودخانه، آجی- چای با روش پویایی سیستم پرداختند. برای بررسی سناریوهای موجود، ده سری زمانی بیست ساله برای رواناب هر زیر حوضه با استفاده از مدل ARMA (1,1) تولید شده و تراز آب دریاچه مورد بررسی قرار گرفت [۷]. برهانی و مرتضوی در سال ۱۳۸۷ در مقاله خود روشهای کاوشی چون الگوریتم ژنتیک و الگوریتم مورچه را در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن مورد بررسی قرار دادند. به‌این منظور مطالعاتی به‌طور موردی در مدل کوتاه مدت (یک‌ساله) و بلند مدت بر روی مخزن دز انجام گرفت[۳].

هدف مطالعه حاضر تخصیص بهینه آب و تعیین حداکثر سود مصرف کننده شهری و کشاورزی با استفاده از روش برنامه‌ریزی تصادفی چندمرحله‌ای با پارامترهای بازه‌ای در شرایط عدم قطعیت بود.

[1] Grey Programming
[2] Huang et al.
[3] Moore
[4] Interval Parameter
[5] Li et al.
[6] Parameter Multistage Stochastic Programming

۲- داده‌های مطالعه

برای به‌دست آوردن احتمال شدت جریان آب (جریان آب کم، متوسط و یا زیاد) بر اساس داده‌های بارندگی ۳۰ سال گذشته در شهر مشهد و در محل سد و با استفاده از شاخص بارندگی استاندارد، درصد سالهای خشک، متوسط و تر محاسبه شد و از این درصدها برای احتمال وقوع سطح جریان کم، متوسط و زیاد خروجی آب سد، استفاده شد. شاخص بارندگی استاندارد به‌صورت زیر تعریف می‌شود[۱۲]:

$$SPI = \frac{(P_i - P)}{S} \qquad (۱)$$

که در آن

SPI شاخص بارندگی استاندارد، P_i بارندگی سال مورد نظر، P میانگین بارندگی بلندمدت و S انحراف معیار بلند مدت بارندگی است. اگر شاخص مذکور بیشتر از ۱ باشد ترسالی و اگر کمتر از ۱- باشد خشکسالی وجود دارد. اعداد بین ۱ و ۱- نشان دهنده سالی با بارندگی نرمال و متوسط است [۱۲]. نتایج نشان داد که در ۰/۶۶ درصد حالات طی ۳۰ سال گذشته شهر مشهد دارای سال نرمال، ۰/۱۶ درصد ترسالی و ۰/۱۸ درصد خشکسالی بوده است.

از آنجا که عرضه آب برای ۳ سال آینده، یک متغیر تصادفی است لذا با استفاده از روش شبیه‌سازی و کاربرد اعداد تصادفی برای سالهای مختلف، ۱۰۰ بار عرضه آب به‌صورت تصادفی شبیه‌سازی شد. این اعداد با در نظر گرفتن یک بازه با استفاده از حداکثر و حداقل داده‌های گذشته و انحراف معیار آنها در نظر گرفته شد. شایان ذکر است ۱۰۰ بار انتخاب تصادفی میزان عرضه برای حالت جریان کم آب، از سالهای خشک و برای دو حالت دیگر به‌ترتیب از سالهای نرمال و تر انتخاب شد [۱۳]. جدول ۱ نتایج حاصل را نشان می‌دهد. به‌علت عدم توسعه کشاورزی در محدوده سد در سه سال آینده، داده‌های میزان تخصیص آب برای کشاورزان از میزان آب مورد تقاضای سالهای قبل آنها بابت سطح زیر کشت سال ۸۶ با در نظر گرفتن یک بازه به‌دست آمد.

در مورد مصرف کنندگان شهری ابتدا با استفاده از نرخ رشد جمعیت سالانه، جمعیت سه سال آینده مشهد محاسبه شد [۱۴]. تقاضای آب مردم مشهد از سد کارده، از حاصلضرب جمعیت تحت پوشش سد در الگوی مصرف انفرادی آب شهر مشهد به‌دست آمد. جدول ۲ تخصیص آب هدف بین مصارف شهری و کشاورزی در طی افق برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد.

برای به‌دست آوردن سود و زیان مصرف کننده شهری به ازای یک واحد آب اضافی رها شده، تابع تقاضای آب شهر مشهد برآورد گردید [۱۵]. سپس با استفاده از مفهوم مازاد مصرف کننده، سود و زیان فرد شهری به ازای یک واحد تغییر در میزان آب مصرفی برای سال‌های گذشته به‌دست آمد و برای سه سال آینده با استفاده از مدل ARIMA[1] پیش بینی شد. نتایج حاصل از سود و زیان مصرف کننده شهری در جدول ۳ آمده است.

[1] Auto-Regressive Integrated Moving Average (ARIMA)

جدول ۱- اطلاعات مربوط به عرضه آب و احتمال انواع سطح جریان

سطح جریان	احتمال مربوطه	جریان آب(میلیون متر مکعب)		
		دوره ۱ (t=۱)	دوره ۲ (t=۲)	دوره ۳ (t=۳)
کم	۰/۱۸	(۹/۹۹و ۱۳/۰۹)	(۱۱/۱۸ و ۲۲/۶۲)	(۱۴/۰۲و ۲۹)
متوسط	۰/۶۶	(۱۰/۲و۱۳/۳)	(۱۲/۱۹ و ۲۵/۴۳)	(۱۴/۱۹و ۳۳/۲۵)
زیاد	۰/۱۶	(۹/۹ و ۱۳/۱)	(۱۲/۷ و ۲۶/۷)	(۱۵/۸۳ و ۳۰/۷۱)

جدول ۲- اطلاعات مربوط به تخصیص آب هدف بین مصارف شهری و کشاورزی در طی افق برنامه‌ریزی (میلیون متر مکعب)

تقاضای آب هدف	افق برنامه‌ریزی		
	دوره ۱ (t=۱)	دوره ۲ (t=۲)	دوره ۳ (t=۳)
مصرف کننده شهری	(۸/۵ و ۱۲/۶۱)	(۸/۹۲و ۱۳/۰۳)	(۹/۳۵و ۱۳/۴۶)
مصرف کننده کشاورزی	(۱/۴۶ و ۲/۱۵)	(۱/۳۷ و ۱/۹۸)	(۱/۳۷و ۱/۸۵)

جدول ۳- اطلاعات مربوط به سود و زیان مصرف کننده شهری به ازای یک واحد تغییر در مصرف آب(ریال)*

	دوره ۱ (t=۱)	دوره ۲ (t=۲)	دوره ۳ (t=۳)
سود	(۱۴۳۶۰/۲و ۱۸۸۷۷/۹)	(۱۵۱۴۸/۱و ۱۹۴۹۰/۷)	(۱۴۹۴۵/۱و ۲۰۱۶۶/۷)
ضرر	(۴۷۱۹/۱ و ۶۳۶۳/۶)	(۴۹۷۴/۴ و ۶۵۵۵/۲)	(۴۷۹۲/۷ و ۶۳۱۴/۶)

* منظور افزایش ۱ متر مکعب آب برای هر فرد شهری تحت پوشش سد

جدول ۴- اطلاعات مربوط به سود و زیان مصرف کننده کشاورزی به ازای یک واحد تغییر در مصرف آب(ریال)*

	دوره ۱ (t=۱)	دوره ۲ (t=۲)	دوره ۳ (t=۳)
سود	(۲۰۷۹/۶و۳۴۹۷)	(۱۹۹۲/۲و۳۴۱۶)	(۱۹۲۱/۲و۳۳۳۸/۷)
ضرر	(۱۹۷و۲۳۹/۳)	(۲۰۰و۲۴۲/۵)	(۲۰۳و۲۴۵/۶)

*افزایش ۱ متر مکعب آب برای هر هکتار از اراضی باغی تحت پوشش سد

برای حصول سود سه سال آینده کشاورزان، ابتدا الگوی کشت منطقه برای سال ۸۶ محاسبه و با تغییر ۱ واحدی آب، بازده ناخالص تعیین شد. این عمل به دفعات تکرار گردید تا مدلی بین میزان آب مصرفی و سود حاصل از آن به‌دست آید. سپس با استفاده از این مدل و آمار آب تخصیصی سد کارده به بخش کشاورزی در طی ۲۰ سال گذشته، سود حاصل برای ۲۰ سال گذشته محاسبه و توسط مدل ARIMA برای سه سال آینده پیش‌بینی گردید. در حالت ضرر، تفاوت بین قیمت خرید ۱ واحد آب از سایر منابع و قیمت خرید حقابه به‌عنوان کاهش در سود کشاورز در سالهای گذشته محاسبه و برای سه سال آینده پیش‌بینی شد. نتایج حاصل از سود و ضرر مصرف کننده کشاورزی در جدول ۴ آمده است.

۳- مواد و روشها

برنامه‌ریزی تصادفی بازه‌ای چندمرحله‌ای[1] یکی از جدیدترین تکنیک‌های بهینه‌سازی است. به‌کارگیری پارامترهای بازه‌ای در شرایط عدم قطعیت و در نظر گرفتن سود و زیان مصرف کننده در هنگام تأمین یا کمبود آب، از ویژگی‌های ممتاز این تکنیک است. همچنین مدل مذکور مقادیر کمبود آب در طی دوره برنامه‌ریزی را ارائه و به مدیر سیستم و مصرف کنندگان، فرصت سیاست‌گذاری برای رویارویی با بحران آب را می‌دهد. افزون بر آن، این تکنیک تخصیص نهایی آب بین مصرف کنندگان رقیب را با توجه به هدف حداکثرسازی سود کل سیستم ارائه می‌دهد [۱۶]. در حقیقت این مدل، مدلی بین اهداف اولیه بهره‌برداری از سد (تأمین آب مورد نیاز بخش‌ها تا حد امکان) و اهداف اقتصادی است. در مطالعه حاضر، برنامه‌ریزی برای یک دوره سه‌ساله صورت گرفت. لذا متغیر تصادفی عرضه آب با سطح احتمال P_{tk} (احتمال رخ دادن سناریوی k در دوره t) برای طرح یک مجموعه سناریو با ساختار شاخه‌ای ۳-۳-۳-۱ استفاده شد [۱۷]. بنابراین یک درخت با سه دوره (چهار مرحله) برای هر مصرف کننده ایجاد شد. به این ترتیب در دوره اول ۳ سناریو، در دوره دوم ۹ سناریو و در دوره سوم ۲۷ سناریو وجود داشت که در مجموع ۸۱ سناریو ایجاد گردید. این مدل به صورت زیر فرموله می‌شود [۱۱]:

(۲)

$$\text{Max}f = \sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T} NB_{it} W_{it} - \sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} p_{tk} C_{it} D_{itk}$$

$$\text{Subject to :}$$

$$\sum_{i=1}^{I} (W_{it} - D_{itk}) \le q_{th} + \varepsilon_{(t-1)k}$$

$$\forall h,k = 1,2,..., k_t, \qquad t = 1,2,..., T,$$

$$\varepsilon_{(t-1)k} = q_{(t-1)h} - \sum_{i=1}^{I} (W_{i(t-1)} - D_{i(t-1)k}) + \varepsilon_{(t-2)k},$$

$$\forall h,k = 1,2,..., k_{t-1},$$

$$W_{it\,max} \ge W_{it} \ge D_{itk} \ge 0, \qquad \forall i,t,k,$$

که در این رابطه

f سود خالص سیستم در افق برنامه‌ریزی، NB_{it} سود مصرف کننده i در دوره t به ازای هر واحد آب تخصیصی ، W_{it}آب وعده داده شده به مصرف کننده i در طی دوره t، C_{it} ضرر مصرف کننده i به ازای هر واحد آب وعده داده شده رها نشده در دوره t ، D_{itk}کمبود آب برای مصرف کننده i تحت سناریوی k در دوره t (به‌عبارت دیگر مقداری از W_{it} که در هنگام عرضه q_{th} رها نمی‌شود)، q_{th} متغیر تصادفی عرضه آب در دوره t و سطح جریان h، $W_{it\ max}$ بیشترین مقدار تخصیص آب برای مصرف کننده i در زمان t، P_{tk} احتمال رخ دادن سناریوی k در دوره t، ε_{tk} مازاد آب سد بعد از رها شدن آب تحت سناریوی k در دوره t، I کل تعداد مصرف کنندگان (در اینجا I=۲)، i مصرف کننده آب (i=۱ مصرف کننده کشاورزی و i =۲ مصرف کننده شرب) و h سطح جریان در دسترس(h=۱ جریان کم، h=۲ جریان متوسط و h=۳ جریان زیاد آب) است.

مدل ۲ عدم قطعیت در مقدار آب عرضه شده توسط سطح احتمال p_{tk} را بیان می‌کند ولی پارامترهای W_{it} ، C_{it} و NB_{it} را به‌صورت قطعی در نظر می‌گیرد. در صورتی که در دنیای واقعی این پارامترها نیز ممکن است قطعی نباشند. برای حل این مسئله پارامترهای مدل مذکور به‌صورت بازه‌ای در نظر گرفته شدند. در نتیجه مدل به‌صورت زیر ارائه شد[۱۱]:

[1] Interval-Parameter Multistage Programming

(۳)

$$\text{Max } f^{\pm} = \sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T} NB_{it}^{\pm} W_{it}^{\pm} - \sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} p_{tk}^{\pm} C_{tk}^{\pm} D_{itk}^{\pm}$$

Subject to:

$$\sum_{i=1}^{I}(W_{it}^{\pm} - D_{itk}^{\pm}) \le q_{th}^{\pm} + \varepsilon_{(t-1)k}^{\pm}$$

$$\forall h,k = 1,2,...,k_t, \quad t = 1,2,...,T,$$

$$\varepsilon_{(t-1)k}^{\pm} = q_{(t-1)k}^{\pm} - \sum_{i=1}^{I}(W_{i(t-1)}^{\pm} - D_{i(t-1)k}^{\pm}) +$$

$$\varepsilon_{(t-2)k}^{\pm}, \quad \forall h,k = 1,2,...,k_{t-1},$$

$$W_{it\max}^{\pm} \ge W_{it}^{\pm} \ge D_{itk}^{\pm} \ge 0, \quad \forall i,t,k,$$

که در این رابطه

$f^{\pm}$ بازه سود خالص سیستم، $NB_{it}^{\pm}$ بازه سود مصرف کننده i در دوره t به ازای هر واحد آب تخصیصی، $W_{it}^{\pm}$ بازه آب وعده داده شده به مصرف کننده i در طی دوره t، $C_{it}^{\pm}$ بازه ضرر مصرف کننده i به ازای هر واحد آب وعده داده شده رها نشده در دوره t، D_{itk} بازه کمبود آب برای مصرف کننده i تحت سناریوی k در دوره t (به‌عبارت دیگر مقداری از $W_{it}^{\pm}$ که در هنگام عرضه q_{th} رها نمی‌شود)، $q_{th}^{\pm}$ بازه متغیر تصادفی عرضه آب در دوره t و سطح جریان h، $W_{it\max}^{\pm}$ بازه بیشترین مقدار تخصیص آب برای مصرف کننده i در زمان t، p_{tk} احتمال رخ دادن سناریو k در دوره t، $\varepsilon_{tk}^{\pm}$ بازه مازاد آب سد بعد از رها شدن آب تحت سناریوی k در دوره t می‌باشد [۱۱].

از آنجا که $W_{it}^{\pm}$ به‌عنوان یک پارامتر بازه‌ای در نظر گرفته می‌شود، رابطه ۳ به‌طور مستقیم قابل حل نیست و باید ساده‌سازی شود. برای حل این مسئله پارامتر y_{it} به‌عنوان متغیر تصمیم تعریف می‌شود[۱۱]:

$$W_{it}^{\pm} = W_{it}^{-} + \Delta W_{it}$$
$$\Delta W_{it} = W_{it}^{+} - W_{it}^{-} \qquad (۴)$$
$$y_{it} \in [0,1]$$

که در این رابطه

y_{it} به‌عنوان یک متغیر تصمیم برای تعریف بازه بهینه $W_{it}^{\pm}$ به‌کار می‌رود. هنگامی که y_{it} در بالاترین حد قرار دارد ($y_{it}=۱$)، اگر آب مورد نیاز بخش‌ها تأمین شود، بالاترین میزان سود و اگر تأمین نشود، بیشترین میزان ضرر برای سیستم حاصل می‌شود. اما هنگامی که y_{it} در پایین‌ترین حد قرار دارد ($y_{it}=۰$)، اگر آب مورد نیاز بخش‌ها تأمین شود کمترین میزان سود و اگر تأمین نشود، کمترین ضرر برای سیستم به‌دست می‌آید. به‌عبارت دیگر در این حالت حداقل ریسک در سیستم وجود دارد [۱۱]. با جایگزینی مدل ۴ در ۳، مدل زیر به‌دست می‌آید:

(۵)

$$\text{Max} f^{\pm} = \sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T} NB_{it}^{\pm}(W_{it}^{-} + \Delta W_{it} y_{it}) -$$

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} p_{tk}^{\pm} C_{tk}^{\pm} D_{itk}^{\pm}$$

Subject to:

$$\sum_{i=1}^{I}(W_{it}^{-} + \Delta W_{it} y_{itopt} - D_{itk}^{\pm}) \le q_{th}^{\pm} + \varepsilon_{(t-1)k}^{\pm}$$

$$\forall h,k = 1,2,...,k_t, \quad t = 1,2,...,T,$$

$$\varepsilon_{(t-1)k}^{\pm} = q_{(t-1)k}^{\pm} - \sum_{i=1}^{I}(W_{i(t-1)}^{-} + \Delta W_{i(t-1)} y_{i(t-1)} - D_{i(t-1)k}^{\pm})$$

$$+ \varepsilon_{(t-2)k}^{\pm}, \quad \forall h,k = 1,2,...,k_{t-1},$$

$$W_{it\max}^{\pm} \ge W_{it}^{-} + \Delta W_{it} y_{it} \ge D_{itk}^{\pm} \ge 0,$$

$$\forall i,t,k,$$

$$0 \le y_{it} \le 1, \quad \forall i,t.$$

هنگامی که بازه $W_{it}^{\pm}$ به‌صورت بهینه تعریف شود، مدل ۴ برای حل به دو زیر مدل تقسیم می‌شود و از حل دو زیر مدل، حد بالا و حد پایین سود کل سیستم به‌دست می‌آید [۱۱]. در مدل ۶ برای به‌دست آوردن بالاترین حد سود کل سیستم (f^{+})، حد بالای سود مصرف کنندگان (NB^{+}) و حد پایین ضرر مصرف کنندگان (C^{-}) از مصرف آب در نظر گرفته شد. مدل ۶ به‌صورت زیر فرموله می‌شود[۱۱]:

(۶)

$$\text{Max} f^{+} = \sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T} NB_{it}^{+}(W_{it}^{-} + \Delta W_{it} y_{it})$$

$$- \sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} p_{tk} C_{tk}^{-} D_{itk}^{-}$$

Subject to:

$$\sum_{i=1}^{I}(W_{it}^{-} + \Delta W_{it} y_{itopt} - D_{itk}^{-}) \le q_{th}^{+} + \varepsilon_{(t-1)k}^{+}$$

$$\forall h,k = 1,2,...,k_t, \quad t = 1,2,...,T,$$

$$\varepsilon_{(t-1)k}^{+} = q_{(t-1)k}^{+} - \sum_{i=1}^{I}(W_{i(t-1)}^{-} + \Delta W_{i(t-1)} y_{i(t-1)}$$

$$- D_{i(t-1)k}^{-}) + \varepsilon_{(t-2)k}^{+}, \quad \forall h,k = 1,2,...,k_{t-1},$$

$$W_{it\max}^{+} \ge W_{it}^{-} + \Delta W_{it} y_{it} \ge D_{itk}^{-} \ge 0, \quad \forall i,t,k,$$

$$0 \le y_{it} \le 1, \quad \forall i,t.$$

D^{+}_{itk} و y_{itopt} و f^{+}_{opt} از حل مدل ۶ به‌دست می‌آید. در مدل ۷، برای به‌دست آوردن پایین‌ترین حد سود کل سیستم(f^{-})، حد پایین سود مصرف کنندگان (NB^{-}) و حد بالای ضرر مصرف‌کنندگان (C^{+}) از مصرف آب در نظر گرفته شد. مدل ۷ به‌صورت زیر فرموله می‌شود[۱۴]:

(۷)

$$Maxf = \sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T} NB_{it}(W^{-}_{it} + \Delta W_{it} y_{it}) - \sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T}\sum_{k=1}^{K} p_{tk} C^{+}_{tk} D^{+}_{itk}$$

Subject to:

$$\sum_{i=1}^{I}(W^{-}_{it} + \Delta W_{it} y_{itopt} - D^{+}_{itk}) \le q^{-}_{th} + \varepsilon^{-}_{(t-1)k}$$

$$\forall h,k = 1,2,\ldots,k_t, \quad t = 1,2,\ldots,T,$$

$$\varepsilon^{-}_{(t-1)k} = q^{-}_{(t-1)k} - \sum_{i=1}^{I}(W^{-}_{i(t-1)} + \Delta W_{i(t-1)} y_{i(t-1)} - D^{+}_{i(t-1)k}) + \varepsilon^{-}_{(t-2)k}, \qquad \forall h,k = 1,2,\ldots,k_{t-1},$$

$$W^{-}_{itmax} \ge W^{-}_{it} + \Delta W_{it} y_{it} \ge D^{+}_{itk} \ge 0, \qquad \forall i,t,k,$$

$$D^{\pm}_{itk} \ge D^{-}_{itkopt} \text{ و } \qquad t = 1,2,\ldots,T$$

مقدار f^{-}_{opt} و D^{+}_{itk} از حل مدل ۷ به‌دست می‌آید. با استفاده از جوابهای مدل ۶ و ۷ روابط زیر به دست می‌آید[۱۱].

(۸)

$$f^{+}_{opt} = \left[f^{-}_{opt}, f^{+}_{opt}\right]$$

$$D^{\pm}_{itkopt} = \left[D^{-}_{itkopt}, D^{+}_{itkopt}\right]$$

در نتیجه تخصیص بهینه آب برای دوره برنامه‌ریزی(A_{itkopt}) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

(۹)

$$A^{\pm}_{itkopt} = W^{\pm}_{itopt} - D^{\pm}_{itkopt}, \qquad \forall i,t,k$$

مدل ۱۰ (IMSLP)[1]، راهکار مذکور را برای سه دوره زمانی و به‌صورت ۸۱ سناریو ارائه می دهد:

(۱۰)

$$Maxf = \sum_{i=1}^{2}\sum_{t=1}^{3} NB^{\pm}_{it}(W^{-}_{it} + \Delta W_{it} y_{it}) - \sum_{i=1}^{2}\sum_{k=1}^{3} p_{1k} C^{\pm}_{i1} D^{\pm}_{i1k} - \sum_{i=1}^{2}\sum_{k=1}^{9} p_{2k} C^{\pm}_{i2} D^{\pm}_{i2k} - \sum_{i=1}^{2}\sum_{k=1}^{27} p_{3k} C^{\pm}_{i3} D^{\pm}_{i3k}$$

Subject to:

$$\sum_{i=1}^{2}(W^{-}_{i1} + \Delta W_{i1} y_{i1} - D^{\pm}_{itk}) \le q^{\pm}_{1h}$$

$$\forall h,t = 1, \quad k = 1,2,3,$$

$$W^{\pm}_{i1max} \ge W^{\pm}_{i1} \ge D^{\pm}_{i1k} \ge 0 \qquad \forall i,k;$$

$$\sum_{i=1}^{2}(W^{-}_{i2} + \Delta W_{i2} y_{i2} - D^{\pm}_{i2k}) \le q^{\pm}_{2h} + \varepsilon^{\pm}_{1k},$$

$$\forall h,t = 2, \quad k = 1,2,\ldots 9,$$

$$\varepsilon^{\pm}_{1k} = q^{\pm}_{1h} - \sum_{i=1}^{2}(W^{-}_{i1} + \Delta W_{i1} y_{i1} - D^{\pm}_{i1k}),$$

$$\forall h,t = 1,k,$$

$$W^{\pm}_{i2max} \ge W^{-}_{i2} + \Delta W_{i2} y_{i2} \ge D^{\pm}_{i2k} \ge 0$$

$$\sum_{i=1}^{2}(W^{-}_{i3} + \Delta W_{i3} y_{i3} - D^{\pm}_{i3k}) \le q^{\pm}_{3h} + \varepsilon^{\pm}_{2k},$$

$$\forall h,t = 3, \quad k = 1,2,\ldots 27,$$

$$\varepsilon^{\pm}_{2k} = q^{\pm}_{2h} - \sum_{i=1}^{3}(W^{-}_{i2} + \Delta W_{i2} y_{i2} - D^{\pm}_{i2k}) + \varepsilon^{\pm}_{1k},$$

$$\forall h,t = 2,k,$$

$$W^{\pm}_{i3max} \ge W^{-}_{i3} + \Delta W_{i3} y_{i3} \ge D^{\pm}_{i3k} \ge 0, \quad \forall i,k,$$

$$\Delta W_{it} = W^{+}_{it} - W^{-}_{it}, \qquad \forall i,t,$$

$$0 \le y_{it} \le 1, \qquad \forall i,t.$$

با حل مدل مذکور، تخصیص آب بین مصرف کنندگان رقیب وکمبود آب در سناریوهای مختلف به‌دست می‌آید.

۴- نتایج و بحث

جدول ۵ تخصیص بهینه آب تحت ۹ سناریو در دوره اول را با استفاده از مدل IMSLP نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود تقاضای هدف برای مصرف کننده شهری و کشاورزی به‌ترتیب برابر با W_{11} =۸/۶۶ و W_{21} =۱/۴۶ بود. متغیر W_{213} =۰ نشان می‌دهد که برای مصرف کننده کشاورزی در سال تر، کمبود آبی وجود نخواهد داشت. در سایر حالات، مسئله مبهم‌تر می‌شود و اگر سایر مصرف کنندگان تمام تقاضای هدف خود را استفاده نکنند، کمبود آب کاهش می‌یابد اما تحت شرایط رسیدن به تقاضای هدف توسط سایر مصرف کنندگان، کمبود آب افزایش

[1] Interval Multi Stage Stochastic Linear Programming

مـی‌یابـد. متغیرهـای (۲/۲ و ۰)=D_{111} و (۱/۹ و ۰)=D_{113} نـشان می‌دهد که در حالت سطح جریان کم (۱۸ درصد)، کمبـود آب بـرای مصرف کننده شـهری بـین ۰ و ۲/۲ میلیـون مترمکعـب و در حالـت سطح جریـان زیـاد (۱۶ درصـد) بـین ۰ و ۱/۹ میلیـون مترمکعـب است. به‌طور کلی هنگامی که سطح جریان، متوسط یـا زیـاد باشـد و تقاضای آب هدف توسط یکی از بخش‌ها صورت نگیرد کمبـود آب ممکن است کاهش یابد اما اگر تقاضای هدف صـورت گیـرد، کمبـود آب تشدید می‌گردد.

جـدول ۶ تخـصیص بهینـه آب را تحـت سـناریوهای ممکـن در دوره دوم نشان می‌دهد. حـل [۲/۵۵ و ۰] = D_{121} ، [۲/۲۷ و ۰] = D_{122} و [۱/۲ و ۰] = D_{123} به این معناست که برای مصرف کننـده ۱ (شهری)، تحـت سـطوح جریـان پـایین، متوسـط و بـالا در دوره ۲، کمبـود آب برابـر بـا (۲/۵۵و۰)، (۲/۲۷و۰) و (۱/۲و۰) اسـت. مجموعه جواب $D_{228}=D_{229}$ = ۰ نشان می‌دهد که اگـر سـطح جریـان آب در دوره اول بـالا باشـد، در حالـت سـطح جریـان دوره دوم در بخش کشاورزی، کمبود آبی وجود ندارد. جـدول ۷ تخـصیص بهینـه آب برای دو مصرف کننده را تحت تمام سناریوهای ممکـن در دوره ۳ نشان می‌دهد.

جدول ۵- حل مدل IMSLP در دوره اول

سناریو	مصرف کننده	جریان آب (h)	احتمال وقوع سطح جریان (p)	تقاضای آب (w)	کمبودآب (D)	تخصیص بهینه (A)
۱۱۱	شهری	کم	۰/۱۸	۸/۶۶	(۲/۲۷ و ۰)	(۸/۶۶و۶/۴۶)
۲۱۱	کشاورزی	کم	۰/۱۸	۱/۴۶	(۰/۲۲و۰)	(۱/۴۶و۱/۲۴)
۱۱۲	شهری	متوسط	۰/۶۶	۸/۶۶	(۲/۲و۰)	(۸/۶۶و۶/۴۶)
۲۱۲	کشاورزی	متوسط	۰/۶۶	۱/۴۶	۰	۱/۴۶
۱۱۳	شهری	زیاد	۰/۱۶	۸/۶۶	(۱/۹و۰)	(۸/۶۶و۶/۷۶)
۲۱۳	کشاورزی	زیاد	۰/۱۶	۱/۴۶	۰	۱/۴۶

جدول ۶- حل مدل IMSLP در دوره دوم

سناریو	مصرف کننده	جریان آب (h)	احتمال وقوع سطح جریان (p)	تقاضای آب (p)	کمبودآب (D)	تخصیص بهینه (A)
۱۲۱	شهری	کم-کم	۰/۱۸	۹/۴۴	(۲/۵۵و۰)	(۹/۴۴و۶/۸۹)
۲۲۱	کشاورزی	کم-کم	۰/۱۸	۱/۳۷	(۰/۳۲و۰)	(۱/۳۷و۱/۰۵)
۱۲۲	شهری	کم- متوسط	۰/۶۶	۹/۴۴	(۲/۲۷و۰)	(۹/۴۴و۷/۲۴)
۲۲۲	کشاورزی	کم- متوسط	۰/۶۶	۱/۳۷	(۰/۲و۰)	(۱/۳۷و۱/۱۷)
۱۲۳	شهری	کم- زیاد	۰/۱۶	۹/۴۴	(۱/۲و۰)	(۹/۴۴و۸/۲۴)
۲۲۳	کشاورزی	کم- زیاد	۰/۱۶	۱/۳۷	۰	۱/۳۷
۱۲۴	شهری	متوسط- کم	۰/۱۸	۹/۴۴	(۲/۵و۰)	(۹/۴۴و۶/۲۴)
۲۲۴	کشاورزی	متوسط- کم	۰/۱۸	۱/۳۷	(۰/۱۷و۰)	(۱/۳۷و۱/۲)
۱۲۵	شهری	متوسط- متوسط	۰/۶۶	۹/۴۴	(۲/۲و۰)	(۹/۴۴و۷/۸۹)
۲۲۵	کشاورزی	متوسط- متوسط	۰/۶۶	۱/۳۷	۰	۱/۳۷
۱۲۶	شهری	متوسط- زیاد	۰/۱۶	۹/۴۴	(۱/۲و۰)	(۹/۴۴و۸/۲۴)
۲۲۶	کشاورزی	متوسط- زیاد	۰/۱۶	۱/۳۷	۰	۱/۳۷
۱۲۷	شهری	زیاد- کم	۰/۱۸	۹/۴۴	(۱/۵۵و۰)	(۹/۴۴و۷/۸۹)
۲۲۷	کشاورزی	زیاد- کم	۰/۱۸	۱/۳۷	۰	۱/۳۷
۱۲۸	شهری	زیاد- متوسط	۰/۶۶	۹/۴۴	(۱/۲و۰)	(۹/۴۴و۸/۲۴)
۲۲۸	کشاورزی	زیاد- متوسط	۰/۶۶	۱/۳۷	۰	۱/۳۷
۱۲۹	شهری	زیاد- زیاد	۰/۱۶	۹/۴۴	۰	۹/۴۴
۲۲۹	کشاورزی	زیاد- زیاد	۰/۱۶	۱/۳۷	۰	۱/۳۷

جدول ۷- حل مدل IMSLP در دوره سوم

سناریو	مصرف کننده	جریان آب (h)	احتمال وقوع سطح جریان(p)	تقاضای آب (w)	کمبودآب (D)	تخصیص بهینه (A)
۱۳۱	شهری	کم-کم-کم	۰/۱۸	۹/۵۱	(۰و۳/۱)	(۶/۴۱و۹/۵۱)
۲۳۱	کشاورزی	کم-کم-کم	۰/۱۸	۱/۳۷	(۰ و۰/۷۵)	(۰/۶۲و۱/۳۷)
۱۳۲	شهری	کم-کم- متوسط	۰/۶۶	۹/۵۱	(۰و۳/۱)	(۶/۴۱و۹/۵۱)
۲۳۲	کشاورزی	کم-کم- متوسط	۰/۶۶	۱/۳۷	(۰و۰/۲)	(۱/۱۷و۱/۳۷)
۱۳۳	شهری	کم-کم- زیاد	۰/۱۶	۹/۵۱	(۰و۰/۱)	(۹/۴۱و۹/۵۱)
۲۳۳	کشاورزی	کم-کم- زیاد	۰/۱۶	۱/۳۷	۰	۱/۳۷
۱۳۴	شهری	کم- متوسط- کم	۰/۱۸	۹/۵۱	(۰و۳/۱)	(۶/۵۱و۹/۵۱)
۲۳۴	کشاورزی	کم- متوسط- کم	۰/۱۸	۱/۳۷	(۰و۰/۱)	(۱/۲۷و۱/۳۷)
۱۳۵	شهری	کم- متوسط- متوسط	۰/۶۶	۹/۵۱	(۰و۲/۱)	(۷/۴۱و۹/۵۱)
۲۳۵	کشاورزی	کم- متوسط- متوسط	۰/۶۶	۱/۳۷	۰	۱/۳۷
۱۳۶	شهری	کم- متوسط- زیاد	۰/۱۶	۹/۵۱	۰	۹/۵۱
۲۳۶	کشاورزی	کم- متوسط- زیاد	۰/۱۶	۱/۳۷	۰	۱/۳۷
۱۳۷	شهری	کم- زیاد- کم	۰/۱۸	۹/۵۱	(۰و۱/۲)	(۸/۳۱و۹/۵۱)
۲۳۷	کشاورزی	کم- زیاد- کم	۰/۱۸	۱/۳۷	(۰و۰/۱)	(۱/۲۷و۱/۳۷)
۱۳۸	شهری	کم- زیاد- متوسط	۰/۶۶	۹/۵۱	(۰و۱/۲)	(۸/۳۱و۹/۵۱)
۲۳۸	کشاورزی	کم- زیاد- متوسط	۰/۶۶	۱/۳۷	۰	۱/۳۷
۱۳۹	شهری	کم- زیاد- زیاد	۰/۱۶	۹/۵۱	۰	۹/۵۱
۲۳۹	کشاورزی	کم- زیاد- زیاد	۰/۱۶	۱/۳۷	۰	۱/۳۷
۱۳۱۰	شهری	متوسط- کم- کم	۰/۱۸	۹/۵۱	(۰و۲/۹)	(۶۱/۶۱و۹/۵۱)
۲۳۱۰	کشاورزی	متوسط- کم- کم	۰/۱۸	۱/۳۷	(۰و۰/۶)	(۰/۷۷و۱/۳۷)
۱۳۱۱	شهری	متوسط- کم- متوسط	۰/۶۶	۹/۵۱	(۰و۲/۱)	(۷/۴۱و۹/۶۱)
۲۳۱۱	کشاورزی	متوسط- کم- متوسط	۰/۶۶	۱/۳۷	۰	۱/۳۷
۱۳۱۲	شهری	متوسط- کم- زیاد	۰/۱۶	۹/۵۱	۰	۹/۵۱
۲۳۱۲	کشاورزی	متوسط- کم- زیاد	۰/۱۶	۱/۳۷	۰	۱/۳۷
۱۳۱۳	شهری	متوسط- متوسط- کم	۰/۱۸	۹/۵۱	(۰و۲/۲)	(۷/۳۱و۹/۵۱)
۲۳۱۳	کشاورزی	متوسط- متوسط- کم	۰/۱۸	۱/۳۷	۰	۱/۳۷
۱۳۱۴	شهری	متوسط- متوسط- متوسط	۰/۶۶	۹/۵۱	۰	۹/۵۱
۲۳۱۴	کشاورزی	متوسط- متوسط- متوسط	۰/۶۶	۱/۳۷	۰	۱/۳۷
۱۳۱۵	شهری	متوسط- متوسط- زیاد	۰/۱۶	۹/۵۱	۰	۹/۵۱
۲۳۱۵	کشاورزی	متوسط- متوسط- زیاد	۰/۱۶	۱/۳۷	۰	۱/۳۷
۱۳۱۶	شهری	متوسط- زیاد- کم	۰/۱۸	۹/۵۱	۰	۹/۵۱
۲۳۱۶	کشاورزی	متوسط- زیاد- کم	۰/۱۸	۱/۳۷	(۰و۰/۱)	(۱/۲۷و۱/۳۷)
۱۳۱۷	شهری	متوسط- زیاد- متوسط	۰/۶۶	۹/۵۱	۰	۹/۵۱
۲۳۱۷	کشاورزی	متوسط- زیاد- متوسط	۰/۶۶	۱/۳۷	۰	۱/۳۷
۱۳۱۸	شهری	متوسط- زیاد- زیاد	۰/۱۶	۹/۵۱	۰	۹/۵۱
۲۳۱۸	کشاورزی	متوسط- زیاد- زیاد	۰/۱۶	۱/۳۷	۰	۱/۳۷
۱۳۱۹	شهری	زیاد- کم- کم	۰/۱۸	۹/۵۱	(۰و۱/۹)	(۷/۶۱و۹/۵۱)
۲۳۱۹	کشاورزی	زیاد- کم- کم	۰/۱۸	۱/۳۷	(۰ و۰/۳)	(۱/۰۷و۱/۳۷)

ادامه جدول ۷- حل مدل IMSLP در دوره سوم

سناریو	مصرف کننده	جریان آب (h)	احتمال وقوع سطح جریان(p)	تقاضای آب (w)	کمبودآب (D)	تخصیص بهینه (A)
۱۳۲۰	شهری	زیاد- کم- متوسط	۰/۶۶	۹/۵۱	۰	۹/۵۱
۲۳۲۰	کشاورزی	زیاد- کم- متوسط	۰/۶۶	۱/۳۷	۰	۱/۳۷
۱۳۲۱	شهری	زیاد- کم- زیاد	۰/۱۶	۹/۵۱	۰	۹/۵۱
۲۳۲۱	کشاورزی	زیاد- کم- زیاد	۰/۱۶	۱/۳۷	۰	۱/۳۷
۱۳۲۲	شهری	زیاد- متوسط- کم	۰/۱۸	۹/۵۱	۰	۹/۵۱
۲۳۲۲	کشاورزی	زیاد- متوسط- کم	۰/۱۸	۱/۳۷	۰	۱/۳۷
۱۳۲۳	شهری	زیاد- متوسط- متوسط	۰/۶۶	۹/۵۱	۰	۹/۵۱
۲۳۲۳	کشاورزی	زیاد- متوسط- متوسط	۰/۶۶	۱/۳۷	۰	۱/۳۷
۱۳۲۴	شهری	زیاد- متوسط- زیاد	۰/۱۶	۹/۵۱	۰	۹/۵۱
۲۳۲۴	کشاورزی	زیاد- متوسط- زیاد	۰/۱۶	۱/۳۷	۰	۱/۳۷
۱۳۲۵	شهری	زیاد- زیاد- کم	۰/۱۸	۹/۵۱	۰	۹/۵۱
۲۳۲۵	کشاورزی	زیاد- زیاد- کم	۰/۱۸	۱/۳۷	۰	۱/۳۷
۱۳۲۶	شهری	زیاد- زیاد- متوسط	۰/۶۶	۹/۵۱	۰	۹/۵۱
۲۳۲۶	کشاورزی	زیاد- زیاد- متوسط	۰/۶۶	۱/۳۷	۰	۱/۳۷
۱۳۲۷	شهری	زیاد- زیاد- زیاد	۰/۱۶	۹/۵۱	۰	۹/۵۱
۲۳۲۷	کشاورزی	زیاد- زیاد- زیاد	۰/۱۶	۱/۳۷	۰	۱/۳۷

حل [۳/۱ و ۰] = D_{131}، [۰/۷۵ و ۰] = D_{231} به این معناست که اگر سطح جریان آب در هر سه دوره کم باشد، مقدار (۳/۱ و ۰) و (۰/۷۵ و ۰) واحد کمبود آب به‌ترتیب برای مصرف کننده شهری و کشاورزی تحت دوره سوم وجود دارد. اگر جریان آب در دوره سوم زیاد باشد، تحت هر سطح جریان در دو سال قبل، کمبود آبی برای مصرف کننده شهری و کشاورزی در دوره سوم وجود نخواهد داشت. اگر در سال سوم جریان آب کم باشد در صورتی که در دو سال گذشته سطح جریان آب زیاد و متوسط و یا در هر دو سال زیاد باشد، باز هم کمبود آب قابل توجهی در سال سوم وجود نخواهد داشت. زیرا آب کافی برای تأمین نیاز شهری و کشاورزی از سالهای گذشته در مخزن ذخیره شده است. حل مدل همچنین نشان داد که تحت بدترین شرایط وقتی که سطح جریان در تمام دوره برنامه‌ریزی کم باشد، کل آب تخصیص داده شده [۳۱/۸۱ و ۲۲/۹۲]= A میلیون مترمکعب و کل آب مورد تقاضا از سوی ۲ مصرف کننده برابر ۳۱/۸۱ میلیون مترمکعب است. این مسئله نشان می‌دهد که ۹ میلیون مترمکعب کمبود در حد پایین تخصیص بهینه آب نسبت به تقاضای بخش‌ها وجود دارد. بنابراین مصرف کننده برای برآورده نمودن نیاز ضروری باید آب را از منابع دیگر به‌دست آورد و یا مصرف را کاهش دهد. البته در مورد مصرف کننده شهری، معمولاً کاهش در مصرف رخ می‌دهد. در مقابل، تحت سناریوی سطح جریان متوسط در کل طول دوره، کل آب تخصیص یافته [۳۱/۸۱ و ۲۷/۴۱]= A میلیون مترمکعب و تقاضای آب کل مصرف کنندگان ۳۱/۸۱ میلیون مترمکعب است. این اطلاعات کمبود آب کمتری را نسبت به حالت قبل نشان می‌دهد. بنابراین مصرف کنندگان باید بین تهیه آب از منبع گران‌تر و یا کاهش تقاضای آب توازن برقرار کنند. در حالت بهترین سناریو یعنی هنگامی‌که سطح جریان آب در طی افق برنامه‌ریزی زیاد است، کل تخصیص آب برابر با [۳۱/۸۱ و ۲۹/۹۱]=A میلیون مترمکعب است که نشان می‌دهد تقاضای آب دو مصرف کننده خیلی راحت‌تر از دو حالت قبل تأمین خواهد شد. اگر چه احتمال وقوع بدترین سناریو (کم- کم- کم) پایین است اما، ضرری که در ازای رخ دادن این سناریو در سیستم به‌وجود خواهد آمد، قابل توجه است. بنابراین در سیاست‌گذاری برای بهینه‌سازی آب، نه تنها سود بلکه ریسک موجود در سیستم (فاصله بازه‌ای) نیز باید در نظر گرفته شود.

حل تابع هدف [۵۳۷۲۱۱ و ۴۰۵۳۱۵]=$f^{\pm}$ دو حد نهایی ارزش مورد انتظار سود خالص سیستم را در طی افق برنامه‌ریزی نشان می‌دهد. سود خالص سیستم نیز مانند سایر متغیرهای مدل بین دو حد بالا و پایین f^{+} و f^{-} تغییر می‌کند. در شرایطی که تقاضای آب

جدول ۸- کالیبره نمودن مدل IMSLP (میلیون متر مکعب)

سال	مصرف کننده	سطح جریان آب	تقاضای آب	کمبود آب	تخصیص بهینه آب	تخصیص حقیقی آب
۱۳۸۴	شهری	متوسط	۹/۷۳	(۱/۲ و ۰)	(۸/۵۳ و۹/۷۳)	۱۲/۶۲
۱۳۸۴	کشاورزی	متوسط	۱/۶	(۰/۲ و ۰)	(۱/۴ و۱/۶)	۱/۷۴
۱۳۸۵	شهری	متوسط-کم	۱۰/۱۵	(۰/۸و۰)	(۹/۳ و۱۰/۱)	۷/۰۱
۱۳۸۵	کشاورزی	متوسط-کم	۱/۵	(۰/۲ و ۰)	(۱/۳ و۱/۵۵)	۱/۱
۱۳۸۶	شهری	متوسط-کم-کم	۱۰/۵	(۱/۲۳ و ۰)	(۹/۲۷ و۱۰/۵)	۷/۵۷
۱۳۸۶	کشاورزی	متوسط-کم-کم	۱/۶۲	(۰/۱۴و۰)	(۱/۴۸ و۱/۶۲)	۲/۵۹
				سود (هزار ریال)	(۳۳۴۱۲۵و۴۸۲۳۹۹)	۲۸۵۸۲۰

هدف توسط مصرف کنندگان صورت گیرد، یک طرح با پایین‌ترین سود، بهتر می‌تواند در مقابل کم آبی مقاومت کند. تمایل برای رسیدن به حد بالای سود سیستم مطابق با رسیدن به ریسک بالاتر است و برعکس. در حالت $W_i^{\pm} = W^-$، مدیر سیستم محافظه کارانه عمل می‌کند و حد پایین تقاضای آب هدف را به مصرف کنندگان وعده می‌دهد. این مسئله موجب می‌شود هر دو متغیر کمبود آب $D_{ijopt}^{\pm}$ و تخصیص نهایی آب $A_{ijopt}^{\pm}$ نسبت به حالت عادی کاهش یابد. در صورتی که تقاضای آب هدف به بالاترین حد خود برسد ($W_i^{\pm} = W^+$) مدیر به‌صورت خوش بینانه آب را در اختیار مصرف کنندگان قرار می‌دهد. در این حالت هر دو متغیر کمبود آب $D_{ijopt}^{\pm}$ و تخصیص نهایی آب $A_{ijopt}^{\pm}$ نسبت به حالت عادی افزایش می‌یابد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در این حالت با رخ دادن ترسالی به احتمال زیاد، آب مورد نیاز مصرف کنندگان تأمین می‌شود اما در سالهای خشک، ریسک تأمین آب مورد نیاز مصرف کنندگان بالا است. برای ارزیابی نتایج مدل با مقادیر واقعی تخصیص آب سازمان آب منطقه‌ای، ابتدا داده‌های سه سال آخر یعنی سالهای ۸۴، ۸۵ و ۸۶ از داده‌های اولیه حذف و مدل دوباره حل شد. جدول ۸ نتایج حاصل در طی این دوره را نشان داد.

با قرار دادن مقادیر کمبود و تخصیص بهینه آب در تابع هدف، سود حاصل از تخصیص حقیقی آب و تخصیص بهینه آب به‌دست آمد. نتایج نشان داد که سود نهایی ۳ دوره در حالت تخصیص بهینه آب افزایش می‌یابد.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق مدیریت آب سد کارده با استفاده از روش برنامه‌ریزی تصادفی بازه‌ای چند مرحله‌ای در شرایط عدم قطعیت بررسی شد. حداکثر کمبود آب در سال اول با کاهش ۰/۵ متر مکعب آب در الگوی مصرف شهری هر خانوار و افزایش ۶ درصدی در راندمان آبیاری قابل جبران است. حداکثر کمبود آب در سال دوم با کاهش ۰/۷ متر مکعب مصرف ماهانه شهری افراد و افزایش ۱۱ درصدی راندمان آبیاری بهبود می‌یابد. بدترین شرایط در طول ۳ سال با کاهش ۱ واحدی در الگوی مصرف ماهانه افراد و افزایش ۲۰ درصدی در راندمان آبیاری منطقه تا حدودی بهتر می‌شود. توصیه می‌شود حد پایین تقاضای هدف برای مصرف‌کنندگان در نظر گرفته شود زیرا در این شرایط تحت بدترین حالت در کل دوره ۲/۹ و ۰/۵ میلیون مترمکعب کم آبی در بخش شهری و کشاورزی وجود خواهد داشت که نسبت به رقم مشابه کاهش داشته است. در تمام حالات بروز کم‌آبی می‌توان از آب سدهای جدید برای آبرسانی به مشهد استفاده نمود. در بخش کشاورزی، افزایش راندمان آبیاری و در صورت امکان استفاده از سیستم‌های آبیاری مدرن و در بخش شهری اصلاح شبکه آبرسانی، به‌کارگیری تکنولوژی‌های مدرن کاهنده آب، آموزش صرفه جویی در مصارف آب شهری و کاهش الگوی مصرف توصیه می‌شود. اصلاح سیاست قیمت‌گذاری به نحوی که قیمت آب انعکاسی از قیمت‌گذاری واقعی باشد نیز راهکاری مناسب در این زمینه است.

۶- مراجع

1-Tajrishi, M., and Abrishamchi, A. (2004). "Demand management of water resources in the country." *Conf. on Methods to Prevent Waste of Natural Resources*, Tehran, 24-41. (In Persian)

2- <www.khrw.ir> (online in web at 2007)

3- Borhani Daryan, A., and Mortazavi Naeeni, S. M. (2009). "Comparison of heuristic methods applied for optimal operation of water resources." *J. of Water and Wastewater*, 68, 57-66. (In Persian)

4- Samani, J. (2003).*Water resource management and sustainable development*, Report of Research Dept. Infrastructure studies, Tehran. (In Persian)

5- Azarmsa, M., Fayaz, M., and Tathiir, M. (2002). "Water resource management and Sefid Rud river irrigation and drainage network." *Collection of 1.th Conf. on Iran Irrigation and Drainage*, Tehran, 111-124. (In Persian)

6- Dept. of Energy. (2007). *Kardeh dam*, Statistics Unit of Khorasan Regional water Company, Mashhad. (In Persian)

7- Golyan, S., Abrishamchi, A., and Tajrishi, M. (2007). "Analysis of operational policies in the basin's water resources with system dynamics." *J. of Water and Wastewater*, 63, 70-80. (In Persian)

8- Huang, G., Baetz, B.W., and Patry, G.G. (1992). "A grey linear programming approach for municipal solid waste management planning under uncertainty." *Civil Engineering Systems*., 9, 319-335.

9- Huang, G., and Moore, R. D. (1993). "Grey linear programming, its solving approach, and its application." *International J. of Systems Science*., 24, 159-172.

10- Huang, G. H. (1996). "IPWM: An interval parameter water quality management model." *Engineering Optimization*., 26, 79-103.

11- Li, Y. P., Huang, G. H., and Nie, S.L. (2006). "An interval-parameter multi-stage stochastic programming model for water resources management under uncertainty." *Advances in Water Resources*, 29, 776-789.

12- Najafi Hajivar, M., Kohpeima, A., and Tahmasbi, A. (2006). "Indices of drought in the province of Chahar Mahal and Bakhtiari." *The 1st Regional conf. of Exploitation of Water Resources and Basins of Karun Zayanderood*, Shahrekord University. (In Persian)

13- Hardaker, J.B., Huirne, B.M., Anderson, R., and Lien, G. (2004). *Copying with risk in agriculture*, CABI Publishing, U. K.

14- <www.sci.org.ir> (online in web at 2007)

15- Saedi, M. (1997). "Estimate the demand function of drinking water in Mashhad." MSc. Thesis, Ferdowsi University of Mashhad. (In Persian)

16- Huang, G. H., and Loucks, D. P. (2000). "An inexact two-stage stochastic programming model for water resources management under uncertainty." *Civil Engineer Environmental Systems*., 17, 95-118.

17- Li, Y. P., Huang, G. H., Nie, S. L., and Liu, L. (2007b). "An inexact multi-stage stochastic integer programming method for water resource management." *J. of Environmental Management*, <Online available in sciencedirect> .