



دوره‌ی ۳۲، شماره‌ی ۳، شماره‌ی پیاپی ۱۲۴، پاییز ۱۳۹۸، صفحات: ۹۵-۱۱۰
شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/wmej.2019.125834.1205

پژوهش‌های آبخیزداری

توسعه‌ی مدل چندهدفی خطی تخصیص بهینه‌ی آب بر اساس چهار قاعده‌ی ورشکستگی و حل آن با روی‌کرد سازش‌فازی

علیرضا نفرزادگان*

استادیار، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

حسن وقار فرد

دانشیار، هسته پژوهشی آب و محیط‌زیست، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

محمد رضا نیکو

دانشیار، بخش مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه شیراز، شیراز

احمد نوحه‌گر

استاد، دانشکده‌ی محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران

* رایانامه‌ی نویسنده‌ی مسئول: a.r.nafarzadegan@gmail.com

تاریخ دریافت: ۲۳ فروردین ۱۳۹۸ تاریخ پذیرش: ۲۸ خرداد ۱۳۹۸

چکیده

در این پژوهش مدلی برای بهینه‌سازی خطی چندهدفی تهیه شد که برای تخصیص دادن آب و سطح کشت در دو شبکه‌ی آبیاری و زه‌کشی درودزن و کربال (دربرگیرنده‌ی پنج ناحیه‌ی زراعی) به کار رفت. این مدل براساس چهار قاعده‌ی ورشکستگی کم‌کردن نسبی (PC)، دریافتی‌های برابر محدودشده (CEA)، ضررهای برابر محدودشده (CEL) و تناسب تعدیل‌شده (APR) با لحاظ کردن قطعیت و عدم قطعیت در موجودی آب تدوین شد. مدل توسعه‌یافته چهار تابع هدف برای انعکاس دادن مطلوبیت‌های مختلف بخش کشاورزی و محیط زیست دارد، که برای دو وضعیت خشک و غیر خشک با روی‌کرد سازش‌فازی حل شد. به‌طور کلی خروجی مدل نشان داد که ناحیه‌های با سهم آب بیش‌تر، در شرایط خشک و غیر خشک به‌ترتیب براساس قواعد ورشکستگی PC و CEL مجموع آب تخصیص‌یافته‌ی بیش‌تری را دریافت می‌کنند. از طرفی، بیش‌ترین آب تخصیص‌یافته برای ناحیه‌های با سهم آب کم‌تر، در هر دو حالت آبی-اقلیمی براساس قاعده‌ی ورشکستگی CEA اتفاق می‌افتد. برون‌داد فرایند ارزیابی پایداری با شاخص پایداری ورشکستگی (BASI) نشان داد که این معیار نمی‌تواند برای ارزیابی پایداری در تمام حالت‌های ورشکستگی به کار رود. بنابراین، تصمیم‌گیری بر اساس خروجی آن باید با احتیاط باشد.

واژگان کلیدی: بهینه‌سازی چندهدفی، عدم قطعیت، مدیریت آب کشاورزی، نیاز آبی زیست‌محیطی، ورشکستگی آبی

مقدمه

یکی از مهم‌ترین مسائل مدیریت منابع آب تخصیص آب بین بخش کشاورزی و محیط‌زیست است. در مدیریت عملی برای منابع آب، تصمیم‌گیران باید هدف‌های مختلف و گاه متناقضی را در نظر بگیرند. برنامه‌ریزی چندهدفی روشی موثر برای مدیریت کردن سامانه‌هایی است که گروداران مختلف در آن‌ها نقش دارند. بنابراین روی کردهای چندهدفی به‌گسترده‌ی در مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب به‌کاررفته است. از طرف دیگر، برای کاهش خطر شکست در مدیریت کردن منابع آب در شرایط واقعی باید به عدم قطعیت در عامل‌هایی همچون میزان آب دست‌رس با روی کردهایی همچون بهره‌گیری از عددهای فازی پرداخته شود (نفرزادگان ۲۰۱۸).

مناقشه یا ورشکستگی آبی زمانی بروز می‌کند که آب حاصل از سامانه نمی‌تواند همه‌ی تقاضا را کامل برآورده کند. ورشکستگی منبع باید بین گروهی از سهام‌داران تقسیم شود، در حالی که میزان آن به اندازه‌ی نیست که بتواند تمام اندازه‌های ادعا شده را برآورده کند (هررو و ویلار ۲۰۰۱). این شباهت بین مسأله‌ی تخصیص آب و روی کردهای ورشکستگی، که ریشه در منابع مرتبط با اقتصاد و ریاضی (از جمله انیل ۱۹۸۲؛ آیومان و مسچلر ۱۹۸۵؛ داگان و ولیچ ۱۹۹۳) دارد، سبب شده است که در سال‌های اخیر، پژوهشگران برای تحلیل مسائل منابع آب از این روی کردها بهره‌گیرند (از جمله آنسینک و ویگارد ۲۰۱۲؛ مدنی و دینار ۲۰۱۳؛ میان‌آبادی و همکاران ۲۰۱۵). به‌طور کلی اگر برای یک منبع آبی، تعداد بهره‌برداران بیش‌تر از ۱، و مجموع تقاضای آن‌ها از مقدار آب دست‌رس بیش‌تر باشد، هدف اصلی روی کردهای ورشکستگی این خواهد بود که مقدار آب تخصیص‌یافته به هر بهره‌بردار را با روی کردی عادلانه مشخص کند. در پرداختن به این مسایل، می‌توان روی کردهای ورشکستگی را برای توسعه‌ی راه‌حل‌های تخصیص آب به‌کار گرفت (مدنی و همکاران ۲۰۱۴).

در سال‌های اخیر، برخی پژوهشگران از اصول نظری ورشکستگی در تدوین مدل‌های سهم‌بندی و تقسیم آب بهره‌برده‌اند. سچی و زوکا (۲۰۱۵) روشی برای تخصیص‌دادن منابع محدود آب در سامانه‌ی پیچیده‌ی تأمین با کاربرد اصول نظری بازی‌های ورشکستگی پیشنهاد کردند. این روش در سامانه‌ی آبی در جنوب ساردینیا در ایتالیا آزموده‌شد. پژوهشگران نتیجه گرفتند که این روش می‌تواند ابزاری کارآمد و پشتیبان تصمیم برای تخصیص‌دادن آب و برآوردن تقاضاهای در حال رقابت در شرایط خشک‌سالی یا کم‌بود آب باشد. دگفو و هی (۲۰۱۶) برای تخصیص‌دادن منصفانه‌ی آب بین هشت کشور مدعی در آبخیز رود نیل، کاربرد اصول نظری ورشکستگی و توجه به سهم هر گرودار در تولید

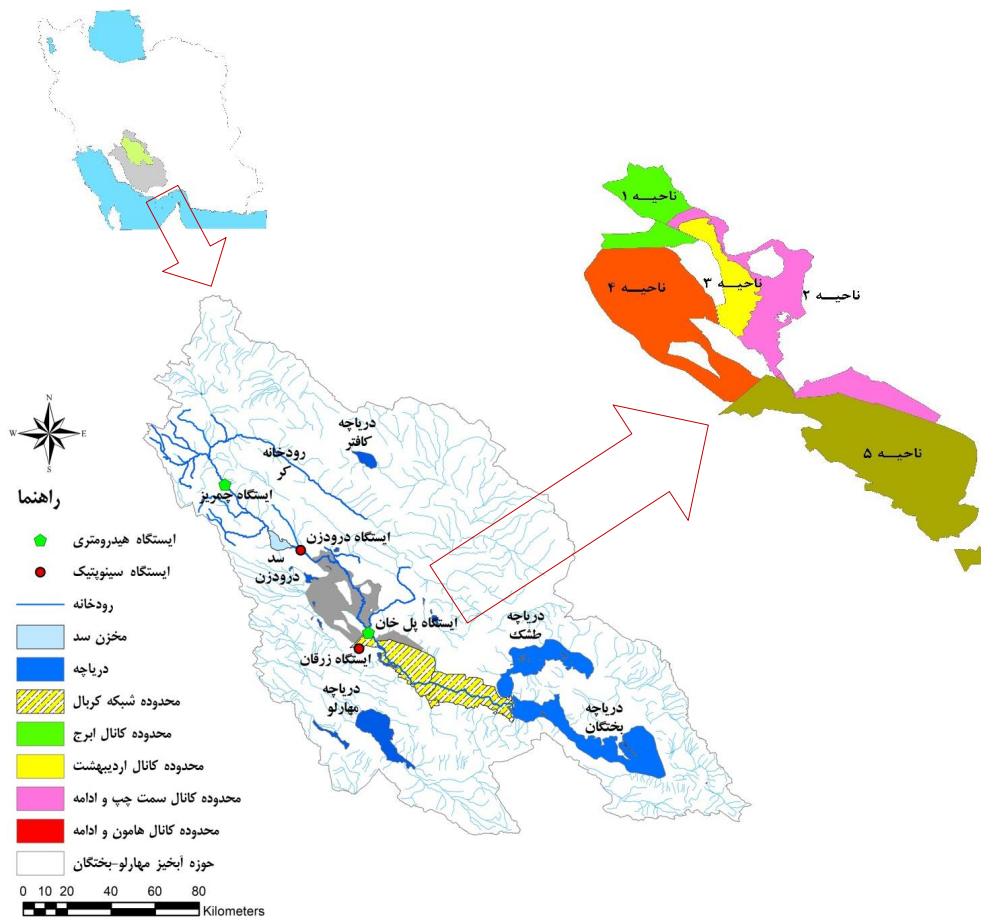
آب و ارزش نسبی هر گرودار در ائتلاف کلی مدعیان را ضروری دانستند. مریدی (۲۰۱۹) براساس قواعد ورشکستگی، روی کرد شبیه‌سازی بهینه‌سازی را در تخصیص‌دادن مجوزهای بار آلاینده‌ی در سامانه‌ی رودخانه‌ی منتهی به تالاب انزلی به‌کاربرد و نشان داد که می‌تواند باعث تسریع کردن فرآیند رفع مناقشه بین بهره‌برداران و افزایش دادن کیفیت آب رودخانه شود. لی و همکاران (۲۰۱۹) براساس مفهوم ورشکستگی مدلی برای تخصیص آب بین مناطق متقاضی در کناره‌ی رود دانگجیانگ چین دادند، و نشان دادند که نتایج آن منطق و انعطاف‌پذیری مناسبی برای حل مسائل پیچیده‌ی تخصیص‌دادن آب دارد.

در این پژوهش، مدلی برای بهینه‌سازی چندهدفی در تخصیص آب و سطح کشت توسعه داده شد. این مدل چهار تابع هدف برای انعکاس مطلوبیت‌های مختلف بخش کشاورزی (سود، اشتغال و بهره‌وری آب) و مطلوبیت زیست‌محیطی، و محدودیت‌هایی برای آب و سطح کشت و تخصیص براساس قاعده‌ی ورشکستگی کم‌کردن نسبی (PC) دارد. مدل تدوین‌شده با روی کرد سازش فازی حل شد. اصلی‌ترین ورودی این مدل مقدار قطعی و غیرقطعی آب دست‌رس در دو حالت خشک و غیرخشک برای شبکه‌ی آبیاری و زه‌کشی درودزن شامل چهار محدوده‌ی عمرانی-زراعی به‌علاوه‌ی شبکه‌ی کربال است. بخشی از این آب نیز باید به محیط‌زیست (دریاچه‌ی بختگان) داده شود. اندازه‌های بهینه‌ی تخصیص آب با اجرای مدل تدوین‌شده براساس سه روی کرد ورشکستگی دیگر شامل دریافتی‌های برابر محدودشده (CEA)، ضررهای برابر محدودشده (CEL) و تناسب تعدیل‌شده (APR) نیز در دو حالت خشک و غیرخشک تعیین شد. پایداری (امکان‌پذیری) سیاست‌های بهینه‌ی به‌دست‌آمده برای تخصیص‌دادن آب در شرایط ورشکستگی ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

موقعیت و سیمای منطقه

زمین‌های کشاورزی آبخور سد درودزن بخشی از آبخیز بختگان-مه‌ارلو با مساحت ۳۱۴۹۲ کیلومتر مربع در شمال استان فارس در مختصات جغرافیایی ۴۲° ۵۱' تا ۵۴° ۳۱' طول شرقی و ۰۰' ۲۹° تا ۳۱° ۱۴' عرض شمالی است (شکل ۱). حدود نیمی از مساحت این آبخیز (۱۴۸۸۱ کیلومتر مربع) دشت و دریاچه است. بارش سالانه‌ی این حوزه عمدتاً در زمستان و بهار، و معمولاً بین ۲۰۰ میلی‌متر در جنوب شرق تا ۷۰۰ میلی‌متر در شمال غرب است (چوبین و همکاران ۲۰۱۶).



شکل ۱- موقعیت زمین‌های آبخور سد درودزن (ناحیه‌های زراعی)، دریاچه‌ی بختگان و ایستگاه‌های هم‌دید و آب‌سنجی در نظر گرفته‌شده در آبخیز مهارلو-بختگان در استان فارس.

یخبندان ۵۴ روز در سال است (نفرزادگان و همکاران، ۲۰۱۸ الف و ب). در جدول ۱ خلاصه‌ی داده‌های متغیرهای اقلیمی اصلی در دو ایستگاه هم‌دید در منطقه، و در جدول ۲ خلاصه‌ی داده‌های روان‌آب در دو ایستگاه آب‌سنجی رودخانه‌ی کر آورده شد.

ارتفاع دشت درودزن-کربال بین ۱۵۶۰ متر تا ۱۶۶۰ متر بالاتر از تراز دریا است. اقلیم منطقه بر اساس طبقه‌بندی دومارتن نیمه خشک با میانگین ساعت‌های آفتابی ۹/۱ ساعت در روز، میانگین تبخیر ۶/۲ میلی‌متر در روز و میانگین تعداد روز

جدول ۱- میانگین و انحراف معیار (۱۳۶۶-۱۳۹۴) متغیرهای اصلی اقلیمی در ایستگاه‌های هم‌دید.

ایستگاه	طول شرقی	عرض شمالی	ارتفاع (متر)	بارش (میلی‌متر)	دما (درجه)	رطوبت (درصد)
سد درودزن	۵۲° ۱۷'	۳۰° ۱۱'	۱۶۵۰	۱۶۶٫۹±۴۶۹٫۲	۰٫۵±۱۷٫۶	۳±۴۳
زرقان	۵۲° ۴۳'	۲۹° ۴۷'	۱۵۹۶	۱۱۸٫۵±۳۱۳٫۵	۰٫۷±۱۶٫۴	۴±۴۳

جدول ۲- میانگین و انحراف معیار (۱۳۶۱-۱۳۹۴) آب‌دهی در ایستگاه‌های آب‌سنجی.

ایستگاه	طول شرقی	عرض شمالی	ارتفاع (متر)	آب‌دهی (مترمکعب بر ثانیه)
چمریز	۵۲° ۰۶'	۳۰° ۲۸'	۱۷۸۶	۱۲٫۵±۲۵٫۰
پل خان	۵۲° ۴۶'	۲۹° ۵۱'	۱۵۹۳	۱۹٫۶±۲۸٫۱

هر تابع هدف در محدودیت‌های مسأله تشکیل شده‌اند، جواب دل‌خواه (چن و چو ۱۹۹۶) دانسته می‌شود:

(۲)

$$Z^* = [Z_1^*, \dots, Z_N^*] = [\max(Z_1(x)), \dots, \max(Z_N(x))]$$

به‌طور مشابه راه‌حل دل‌خواه منفی به‌شکل زیر تعریف می‌شود:

(۳)

$$Z^- = [Z_1^-, \dots, Z_N^-] = [\min(Z_1(x)), \dots, \min(Z_N(x))]$$

نواب اولیه‌ی که تصمیم‌گیر به مدل داده است به‌شکل زیر نظر گرفته می‌شود:

$$O = [O_1, \dots, O_N] \quad (۴)$$

برای انتخاب جواب اولیه، تصمیم‌گیرنده می‌تواند راه‌حل دل‌خواه منفی را نقطه‌ی مرجع بگیرد، به این صورت که جواب اولیه کم‌تر از راه‌حل دل‌خواه منفی نیست. علاوه بر این، تابع عضویت برای درجه‌های رضایت هر تابع هدف به‌شکل زیر تعریف می‌شود:

(۵)

$$u_k(x) = \begin{cases} 1, & Z_k(x) > Z_k^* \\ 1 - \frac{Z_k^* - Z_k(x)}{Z_k^* - O_k} & O_k < Z_k(x) \leq Z_k^*, \quad k = 1, \dots, N. \\ 0, & Z_k(x) \leq O_k \end{cases}$$

اگر راه‌حل دل‌خواه منفی جواب اولیه گرفته شود، تابع عضویت برای درجه‌های رضایت هر تابع هدف به‌شکل زیر تعریف می‌شود:

(۶)

داده‌های این پژوهش با جمع‌آوری، بررسی و تحلیل داده‌های شرکت بهره‌برداری از شبکه‌های آبیاری و زه‌کشی استان فارس، سازمان جهاد کشاورزی استان فارس، سند ملی آبیاری کشور، و گزارش برنامه‌ریزی منابع آب (مطالعات بهنگام اقلیمی) زمین‌های کشاورزی پایین‌دست سد درودزن (مهندسين مشاور مهتاب قدس، ۱۳۹۱) و مصاحبه با بعضی از کشاورزان منطقه به‌دست آمد.

الگوریتم حل مدل‌های خطی چندهدفی با روش سازش فازی به‌طور کلی مسأله‌ی برنامه‌ریزی چندهدفی خطی به‌شکل زیر نشان داده می‌شود:

(۱)

$$\begin{aligned} \text{Max } Z(x) &= [c_1x, \dots, c_nx]^T = [Z_1(x), \dots, Z_k(x)]^T \\ \text{s.t. } x &\in X, \quad X = \{x \in R^n : Ax \leq b, x \geq 0\} \end{aligned}$$

که در آن ، ، ، $b \in R^m$ ، $c_i \in R^n (0 \leq i \leq N)$ ، ماتریس $A = (a_{ij})_{m \times n}$ و $Z_k(x)$ تابع هدف k ام، ماتریس ضریب‌های فنی محدودیت‌ها، X ماتریس متغیرهای تصمیم و b ماتریس مقدارهای سمت راست محدودیت‌ها می‌باشد. با توجه به محدودیت‌های موجود، بعید است همه‌ی تابع‌های هدف می‌توانند هم‌زمان به مقدار بهینه‌ی خود برسند. در عمل تصمیم‌گیران یکی از جواب‌های مسأله را بر اساس میزان تأمین درجه‌ی رضایت یا ترجیح‌های تابع‌های هدف مختلف تصمیم نهایی خود برمی‌گزینند. رویکرد فازی پیشنهادشده‌ی لی و همکاران (۲۰۰۶) روشی موثر برای اندازه‌گیری درجه‌ی رضایتمندی در برنامه‌ریزی چندهدفی خطی به‌دست می‌دهد. بر اساس این روش، بردار زیر که اجزای آن از مقدار بیشینه‌ی

روی کردهای تخصیص در شرایط ورشکستگی

تاکنون روی کردهای مختلفی برای حل مسائل ورشکستگی داده شده است. پرکاربردترین روشهای حل مسائل ورشکستگی در مرجعها، قاعدهی کم کردن نسبی (PC)^۱، ضررهای برابر محدودشده (CEL)^۲، و دریافتیهای برابر محدودشده (CEA)^۳ است؛ که هر دو ویلار (۲۰۰۱) این سه قاعده را «سه تفنگدار» نامیدهاند. البته در منبعهای مختلف روشهای دیگری نیز برای حل مسائل ورشکستگی داده شده است، که از جملهی آن می توان به تناسب تعدیل شده (APR)^۴ اشاره کرد.

روی کرد PC

در روش PC تقاضای آب هر گروه بر اساس نسبتی از حجم آب ادعاشدهی آن تأمین می شود. رابطههای زیر نحوه محاسبه سهم هر آببر را بر اساس قاعدهی PC نشان می دهد:

$$PC_i = \lambda c_i \quad \forall i \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n c_i} = \frac{E}{C} \quad (10)$$

E مجموع آب دسترس برای تخصیص دادن به بهره برداران و C مجموع تقاضاهای آبی است.

روی کرد CEA

در این روش برای کمترین کردن تعداد بهره برداران ناراضی، تلاش می شود که تقاضاهای کم تر تا جای ممکن برآورده شود. به عبارت دیگر، از آنجا که تقاضاها برای اندازههای کم تر معمولاً از سوی بهره برداران ضعیف تر (آسیب پذیرتر به کمبود) است، اولویت این روش برآورده کردن آنها است (مدنی و دینار ۲۰۱۳). رابطهی زیر نحوه محاسبه سهم هر آببر را بر اساس قاعدهی CEA نشان می دهد:

$$CEA_i = \text{Min}(\lambda, c_i) \quad \forall i \quad \text{if} \quad \sum_{i=1}^n c_i > E \quad (11)$$

در این روش λ مقداری است که معادلهی $\sum_{i \in N} \text{Min}\{c_i, \lambda\} = E$ را حل می کند. اگر مجموع

$$u_k^-(x) = \begin{cases} 1, & Z_k(x) > Z_k^* \\ 1 - \frac{Z_k^* - Z_k(x)}{Z_k^* - Z_k^-}, & Z_k^- < Z_k(x) \leq Z_k^*, \\ 0, & Z_k(x) \leq Z_k^- \end{cases} \quad k = 1, \dots, N.$$

با توجه به تحلیل بالا، مسألهی اولیه به مسألهی برنامه ریزی خطی زیر تبدیل می شود (روی کرد سازش فازی):

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & \lambda = \sum_{k=1}^N \omega_k \lambda_k \\ \text{s.t.} \quad & \lambda_k^l \leq \lambda_k \leq u_k(x), \quad k = 1, \dots, N, \\ & x \in X, \quad \sum_{k=1}^N \omega_k = 1, \quad \omega_k > 0, \end{aligned} \quad (7)$$

کمترین درجهی رضایت برای آمین تابع هدف انتخاب شدهی تصمیم گیرنده است. افزایش کمترین درجهی رضایت تابع هدف، به این معنی که مقدار تابع هدف به مقدار بهینه نزدیک باشد، از طرفی ممکن است باعث دور شدن سایر تابعهای هدف از مقدارهای بهینهی خودشان شود. در نتیجه هنگامی که کمترین درجهی رضایت انتخاب شدهی تصمیم گیرنده خیلی بزرگ باشد، ممکن است هیچ جوابی به دست نیاید. بنابراین، برای اطمینان از رسیدن به راه حل ممکن، باید به درستی تنظیم شود. در نتیجه، روی کرد دومرحلهی سازش فازی برای حل مسائل برنامه ریزی خطی چندهدفی ارائه گردید (لی و همکاران ۲۰۰۶) که دو مرحلهی آن به شرح زیر است:

۱- در نظر گرفتن راه حل دل خواه منفی به جای راه حل اولیهی عمل گر بیشترین-کمترین یعنی $O = Z^-$ ، حل کردن مدل عمل گر بیشترین-کمترین برای رسیدن به راه حل بهینهی $u_k(x^0)$ ($1 \leq k \leq N$) و سپس محاسبه کردن عضویت نسبی برای درجهی رضایت هر تابع هدف.

۲- برابر کردن λ_k^l با $u_k(x^0)$ حل کردن مدل بر اساس روی کرد سازش فازی برای رسیدن به جواب بهینهی x^* ، به عبارتی حل کردن برنامهی زیر:

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & \lambda = \sum_{k=1}^N \omega_k \lambda_k \\ \text{s.t.} \quad & u_k(x^0) \leq \lambda_k \leq u_k(x), \quad k = 1, \dots, N, \\ & x \in X, \quad \sum_{k=1}^N \omega_k = 1, \quad \omega_k > 0, \end{aligned} \quad (8)$$

- 1- Proportional cutback
- 2- Constrained equal losses
- 3- Constrained equal awards
- 4- Adjusted proportional

$$\text{if } \sum_{i=1}^n c_i > E > 0$$

مقدار بازبینی‌شده‌ی ادعای گرودار i از دارایی موجود (E) و

از معادله $c_i^E = \text{Min}\{c_i, E\}$ به دست می‌آید.

به عبارت دیگر در این رویکرد توزیع کردن در دو مرحله است. در مرحله‌ی اول هر مدعی مقداری را که مدعیان دیگر برای او

تعیین کردند، یعنی $E - \sum_{j \neq i} c_j$ دریافت می‌کند. به عبارت دیگر، برای محاسبه‌ی میزان اولیه‌ی تخصیص برای بهره‌بردار، مجموع اندازه‌های ادعاشده‌ی گروداران دیگر از موجودی آب کم می‌شود، و اگر چیزی باقی بماند به بهره‌بردار داده می‌شود؛ در مرحله‌ی دوم مقدار نهایی تخصیص مجاز به هر آب‌بر در شرایط ورشکستگی (C,E)AP با رابطه‌ی ۱۴ تعیین می‌شود.

ارزیابی پایداری سیاست‌های تخصیص

رویکردهای ورشکستگی، اندازه‌های مختلفی از تخصیص را بر اساس خوانش‌های متنوعی از مفهوم عدالت^۵ و انصاف^۶ به دست می‌دهد. بنابراین، پذیرش آن‌ها همیشه در تردید است، زیرا همیشه کمینه‌ی ذی‌نفعی هست که گزینه‌های داده‌شده را ناعادلانه می‌داند، زیرا می‌تواند بر اساس قاعده‌ی دیگری، دریافتی بیش‌تری به دست آورد (مدنی و لوند ۲۰۱۱). از طرف دیگر در مسائل تصمیم‌گیری با چند سهام‌دار با قدرت‌های نامتقارن (خصوصاً زمانی که اقلیت قدرت کافی داشته باشد)، تصمیم جمعی، یا به عبارت دیگر داشتن اکثریت لزوماً عامل تعیین‌کننده نیست. بنابراین در شرایطی که بی‌توازی قدرت بین ذی‌نفعان باشد، برای کمی کردن مقبولیت بالقوه‌ی گزینه‌های تخصیص باید رویکردهای خاصی را در نظر داشت (ریس و همکاران ۲۰۱۴). یکی از این روش‌ها شاخص قدرت (PI)^۷ است که پژوهشگرانی همچون لوهمن و همکاران (۱۹۷۹) به کار برده‌اند. این شاخص، قدرت بازیگران را در مسائل بازی همکارانه ارزیابی می‌کند. در این مسائل بازیگران به دنبال بهترین روش برای تخصیص سود اضافی حاصل از تشکیل ائتلاف بین اعضا اند.

$$PI_i = \frac{x_i - x'_i}{\sum_{j \in N} x_j - x'_j} \quad i \in N, \quad \sum_{i \in N} PI_i = 1 \quad (15)$$

اندازه‌های ادعاشده از موجودی بیش‌تر باشد، λ مقداری منحصر به فرد می‌شود (داگان و ولیچ، ۱۹۹۳).

رویکرد CEL

این رویکرد متضاد روش CEA شناخته می‌شود، به طوری که سعی می‌کند ابتدا بیش‌ترین اندازه‌های ادعاشده‌ی را - که معمولاً از سوی ذی‌نفعان قدرتمندتر است برآورده کند. زمانی که بیش‌ترین تقاضا برآورده شد، فرآیند برای دارایی و سهام‌داران باقی‌مانده تکرار می‌شود، و در هر مرحله (حتی مرحله‌ی اول) که منابع کافی نباشد فرآیند متوقف خواهد شد، و دارایی موجود به‌طور مساوی بین همه‌ی مدعیان تقسیم می‌شود. رابطه‌ی زیر نحوه‌ی محاسبه‌ی سهم هر آب‌بر را بر اساس قاعده‌ی CEL نشان می‌دهد:

$$CEL_i = \text{Max}\{0, c_i - \lambda\} \quad \forall i \quad \text{if } \sum_{i=1}^n c_i > E$$

در این روش λ مقداری است که معادله‌ی $\sum_{i \in N} \text{Max}\{0, c_i - \lambda\} = E$ را حل می‌کند. اگر مجموع اندازه‌های ادعاشده از موجودی بیش‌تر باشد، λ مقداری منحصر به فرد می‌شود.

رویکرد APR

در این روش مبنای تخصیص بر اساس مقداری است که برای بهره‌بردار باقی می‌ماند، اگر نظام تخصیص، همه‌ی سهام‌داران دیگر را راضی کرده باشد (کوریل و همکاران ۱۹۸۷). این مقدار برابر است با:

$$v_i = \text{Max}\left\{0, E - \sum_{j \neq i} c_j\right\} \quad (13)$$

یعنی مقدار v_i برابر با کم‌ترین مقدار آبی است که می‌توان به بهره‌بردار i داد، به عبارت دیگر v_i مقدار سهم تخصیص داده‌شده به مدعی i است که توسط دیگر مدعیان تعیین و تصدیق می‌شود. بر اساس روش APR وقتی این مقدار محاسبه شد می‌توان سهم آب هر ذی‌نفع را محاسبه کرد:

$$x_i = v_i + \left(c_i^E - v_i\right) \left(\sum_{j \in N} (c_j^E - v_j)\right)^{-1} \left(E - \sum_{j \in N} v_j\right) \quad (14)$$

5- Equity

6 - Fairness

7 - Power index

8 - Status quo

برای تعیین مقدار شاخص پایداری تخصیص در شرایط ورشکستگی (BASI)^{۱۱}، ضریب تغییر BPI محاسبه می‌شود (مدنی و همکاران ۲۰۱۴):

$$BASI = \frac{\sigma_{BPI}}{BPI} \quad (20)$$

σ_{BPI} انحراف معیار قدرت‌های ذی‌نفعان و \overline{BPI} میانگین قدرت در شرایط ورشکستگی است، و هر چه شاخص بیش‌تر باشد، پایداری (امکان‌پذیری) راه‌حل تخصیص کم‌تر است.

ساختار و رابطه‌نویسی مدل پیشنهاد شده

در روش پیشنهاد شده این پژوهش ابتدا نحوه‌ی تخصیص آب بین بخش زراعت (شبکه‌ی درودزن و شبکه‌ی کربال) و محیط-زیست در شرایط خشک و غیر خشک بهینه‌یابی می‌شود. در حین همین فرآیند بهینه‌یابی، آب بین محدوده‌های عمرانی شبکه‌ی درودزن بر اساس قاعده‌ی ورشکستگی PC توزیع می‌شود. در مراحل بعدی اجرای مدل، مجموع آب بهینه‌ی تخصیص داده‌شده به شبکه‌ی درودزن از اجرای اولیه‌ی مدل بر اساس سه قاعده‌ی ورشکستگی CEA، APR، و CEL نیز بهینه‌یابی می‌شود. سپس با روش‌های مختلف ارزیابی پایداری (امکان‌پذیری) در شرایط ورشکستگی، مناسب‌ترین سیاست بهینه‌ی تخصیص دادن آب برای هر وضعیت آبی-اقلیمی شناسایی می‌شود.

مدل تدوین‌شده‌ی بهینه‌سازی چندهدفی خطی با چهار هدف بهینه‌سازی سود کشاورزی، بهینه‌سازی اشتغال کشاورزی، بهینه‌سازی بهره‌وری آب (کمینه‌سازی محتوای آب مجازی)، و بهینه‌سازی آب تخصیص داده‌شده به محیط‌زیست رابطه‌نویسی شد، و با رویکرد سازش‌فازی حل کرده شد (معادله‌های ۲۱ تا ۳۴).

$$\text{Max } Z_1 = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^m (Y_{ij} \times Pc_{ij} - Cost_{ij}) \times x_{ij}^a \quad (21)$$

$$\text{Max } Z_2 = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^m Emp_{ij} \times x_{ij}^a \quad (22)$$

$$\text{Max } Z_3 = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^m [Y_{ij} / (IWR_{ij} / \eta_i)] \times x_{ij}^a \quad (23)$$

$$\text{Max } Z_4 = (x_w^{D(env)} + x_w^{K(env)}) + (x_s^{D(env)} + x_s^{K(env)}) \quad (24)$$

به‌کار برده شد در:

x_i سهم بازیگر i از سود تخصیص داده‌شده به دست‌آمده از همکاری، x'_i میزان منفعت بازیگر i در وضعیت فعلی^{۱۰} (نبود همکاری) و N مجموعه‌ی تمام بازیگران است.

زیادبودن مقدار شاخص قدرت منعکس‌کننده‌ی قدرت کم‌تر یا تمایل بیش‌تر به همکاری و تشکیل ائتلاف است. گزینه‌ی پایدار برای تخصیص زمانی به دست می‌آید که قدرت کم‌وبیش مساوی بین بازیگران تقسیم شده باشد (دینار و هوویت ۱۹۹۷). بنابراین، ضریب تغییر قدرت‌ها که به شاخص پایداری (SI)^۹ نیز شناخته می‌شود (مدنی و همکاران، ۲۰۱۴) همچون نمایه‌ی برای پایداری گزینه‌های تخصیص به‌کار می‌رود.

$$SI = \frac{\sigma_{PI}}{PI} \quad (16)$$

σ_P انحراف معیار اندازه‌های قدرت‌ها و \overline{P} میانگین اندازه‌های آن‌ها است. هر چه شاخص پایداری کم‌تر باشد، پایداری گزینه‌ی پیشنهاد شده برای تخصیص بیش‌تر است.

در مسائل ورشکستگی، تشکیل ائتلاف و همکاری سود اضافی نخواهد داشت، و سود طرف‌ها در وضع موجود (نبود همکاری) صفر است، بنابراین شاخص پایداری در مسائل ورشکستگی به راحتی تعیین‌کردنی نیست. بنابراین مدنی و همکاران (۲۰۱۴) شاخص قدرت اصلاح‌شده‌ی به نام شاخص قدرت ورشکستگی (BPI)^{۱۰} را به شکل زیر پیشنهاد کردند.

$$BPI_i = \frac{S_i - v_i}{\sum_{j \in N} (S_j - v_j)} \quad i \in N, \quad \sum BPI_i = 1 \quad (17)$$

$$S_i = \sum_{t=1}^n S_{i,t}, \quad (18)$$

$$v_i = \sum_{t=1}^n v_{i,t}, \quad (19)$$

در این معادله‌ها BPI_i بیانگر مقدار شاخص قدرت ورشکستگی برای گرودار S_i ، مجموع آب تخصیص داده‌شده‌ی تأمین‌شدنی

و v_i مجموع آب تصویب‌شده‌ی دیگر سهام‌داران برای بهره‌بردار i در همه‌ی بازه‌های زمانی (t) در کل افق برنامه‌ریزی است. پس N مجموعه‌ی بهره‌برداران و n تعداد بازه‌های زمانی در افق برنامه‌ریزی است.

9 - Stability index

10 - Bankruptcy power index

11- Bankruptcy allocation stability index

$$x_j^a \leq A_{W_i}, \quad i=1,2,\dots,5. \quad (25)$$

$j = l_1 + 1, l_1 + 2, \dots, m$ نشان‌دهنده‌ی محصولات بهاره.

$$\sum_{j=l_1+1}^m x_{ij}^a \leq A_{S_i}, \quad i=1,2,\dots,5. \quad (26)$$

$$x^a, \quad (27)$$

$$x_w^{D(env)}, x_s^{D(env)}, \quad (28)$$

$$x_w^{K(env)}, x_s^{K(env)} \quad (28)$$

$$a_{ij}^{\min} \leq x_{ij}^a \leq a_{ij}^{\max}, \quad i=1,2,\dots,5; \quad j=1,2,\dots,m. \quad (28)$$

متغیرهای تصمیم مدل شامل سطح کشت (هکتار)، سهم محیط‌زیست (متر مکعب) از آب دست‌رس شبکه‌ی درودزن (D) و کربال (K) برای کشت‌های پاییزه (W) و بهاره (S).

$$x_w^{D(env)} + \left(\sum_{j=1}^{l_1} IWR_{ij} / \eta_i \times x_{ij}^a \right) \times \left[\left(\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^{l_1} IWR_{ij} / \eta_i \right) \right] \leq \sum_{i=1}^4 Q_{S_i} \quad (29)$$

Y عمل‌کرد محصول (تن در هکتار).

$$x_s^{D(env)} + \left(\sum_{j=l_1+1}^m IWR_{ij} / \eta_i \times x_{ij}^a \right) \times \left[\left(\sum_{i=1}^4 \sum_{j=l_1+1}^m IWR_{ij} / \eta_i \times a_{ij}^{\max} \right) / \left(\sum_{i=1}^4 \sum_{j=l_1+1}^m IWR_{ij} / \eta_i \times a_{ij}^{\max} \right) \right] \leq \sum_{i=1}^4 Q_{S_i} \quad (30)$$

PC قیمت محصول (ریال بر تن).

$$x_w^{K(env)} + (U_w \times x_w^{D(env)}) + \left(\sum_{j=1}^{l_1} IWR_{5j} / \eta_5 \times x_{5j}^a \right) \leq Q_{W_5} \quad (31)$$

$Cost$ هزینه‌ی تولید محصول شامل آب‌بها و سایر هزینه‌ها (ریال بر هکتار).

$$x_s^{K(env)} + (U_s \times x_s^{D(env)}) + \left(\sum_{j=l_1+1}^m IWR_{5j} / \eta_5 \times x_{5j}^a \right) \leq Q_{S_5} \quad (31)$$

Emp نیروی کار لازم در فرآیند تولید محصول (نفر-روز در هکتار).

$$(x_w^{D(env)} + x_w^{K(env)}) + (x_s^{D(env)} + x_s^{K(env)}) \leq q_{env_max} \quad (32)$$

IWR نیاز آبیاری محصول (متر مکعب در هکتار).

$$(x_w^{D(env)} + x_w^{K(env)}) + (x_s^{D(env)} + x_s^{K(env)}) \geq q_{env_min} \quad (33)$$

U_s, U_w, η بازده کل و درصد آب بازگشته برای کشت‌های پاییزه (W) و بهاره (S).

$$(x_w^{D(env)} + x_w^{K(env)}) + (x_s^{D(env)} + x_s^{K(env)}) \geq q_{env_min} \quad (34)$$

a^{\min}, a^{\max} کمینه و بیشینه‌ی سطح کشت (هکتار).

$$x_w^{D(env)} \geq 0, x_s^{D(env)} \geq 0, x_w^{K(env)} \geq 0, x_s^{K(env)} \geq 0$$

که در آن:

A_{W_i}, A_{S_i} مجموع سطح کشت برای کشت‌های پاییزه (W) و بهاره (S).

Z_1, Z_2, Z_3 سه تابع هدف برای بخش کشاورزی شامل بیشینه‌کردن سود خالص، بیشینه‌کردن نیروی کار نیازداشته، و کمینه‌کردن محتوای آب مجازی آبی.

$Q_{W_i}^{\pm}, Q_{S_i}^{\pm}$ حجم آب تأمین‌شدنی برای کشت‌های پاییزه (W) و بهاره (S).

Z_4 تابع هدف بیشینه‌سازی سهم آب محیط‌زیست از آب داده‌شده به هر شبکه در هر فصل کشت.

$i = 1, 2, \dots, 5$ نمایه‌ی نشان‌دهنده‌ی ناحیه‌ی عمرانی-زراعی.

$j = 1, 2, \dots, l_1$ نمایه‌ی نشان‌دهنده‌ی محصولات پاییزه.

نتایج و بحث

اندازه‌های قطعی و غیرقطعی برای آب دست‌رس

مقدار قطعی آب دست‌رس برای شبکه‌های آب‌خور سد درودزن و بازه‌ی تغییرات آن در دو حالت خشک و غیرخشک در دوره‌ی ۱۲ ساله (سال‌های آبی ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۱) تعیین شد. آب در شش سال

از این دوره برای دو کشت پاییزه و بهاره (شرایط غیر خشک)، و برای شش سال تنها برای کشت پاییزه داده شد (شرایط خشک). عدم قطعیت در آب دسترس در شبکه‌های درودزن و کربال در

برش آلفاهای مختلف برای عدد فازی مثلی آب دسترس برای شرایط خشک و غیرخشک به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ آورده شد.

جدول ۳- اندازه‌های آب دسترس در شبکه‌های درودزن و کربال در برش آلفاهای مختلف برای شرایط خشک.

آب دسترس (میلیون متر مکعب)				
شبکه‌ی کربال	شبکه‌ی درودزن		برش آلفا	
	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین
۱۰۶	۲۳۵	۹۹	۲۸۸	۰
۱۱۹	۲۱۶	۱۲۵	۲۶۷	۰٫۲۵
۱۳۲	۱۹۷	۱۵۱	۲۴۵	۰٫۵۰
۱۴۵	۱۷۸	۱۷۷	۲۲۴	۰٫۷۵
۱۵۹	۱۵۹	۲۰۳	۲۰۳	۱

جدول ۴- اندازه‌های آب دسترس در شبکه‌های درودزن و کربال در برش آلفاهای مختلف برای شرایط غیر خشک.

آب دسترس (میلیون متر مکعب)								
شبکه‌ی کربال	شبکه‌ی درودزن				برش آلفا			
	کشت بهاره		کشت پاییزه		کشت پاییزه		کشت بهاره	
	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	
۱۱۷	۲۱۹	۱۵۷	۲۵۸	۱۵۷	۳۰۹	۲۳۵	۴۴۱	۰
۱۳۳	۲۱۰	۱۶۷	۲۴۳	۱۷۴	۲۸۸	۲۵۷	۴۱۲	۰٫۲۵
۱۵۰	۲۰۱	۱۷۷	۲۲۸	۱۹۲	۲۶۸	۲۷۹	۳۸۲	۰٫۵۰
۱۶۷	۱۹۲	۱۸۷	۲۱۳	۲۰۹	۲۴۷	۳۰۱	۳۵۳	۰٫۷۵
۱۸۳	۱۸۳	۱۹۷	۱۹۷	۲۲۶	۲۲۶	۳۲۴	۳۲۴	۱

اندازه‌های قطعی تخصیص آب و زمین در شرایط مختلف بر اساس قاعده‌ی ورشکستگی PC اندازه‌های تابع‌های هدف مدل در شرایط خشک و غیرخشک برای تأمین آب کشاورزی (شامل پنج ناحیه‌ی زراعی) و برآورده کردن نیاز آبی دریاچه‌ی بختگان بر اساس اندازه‌های قطعی در جدول‌های ۵ و ۶ آورده شد.

از آن‌جا که در برش آلفای برابر با ۱، حد بالا و پایین برای هر عدد فازی یکسان است، مقدار متناظر این برش آلفا از این به بعد مقدار قطعی (مرکزی) دانسته می‌شود. برای بررسی نبود قطعیت در موجودی آب بر اساس نتایج تخصیص بهینه‌ی آب و سطح کشت، علاوه بر لحاظ کردن مقدار قطعی، مدل برای مقدار آب دسترس در برش آلفای ۰/۵ (مقدار غیر قطعی) نیز بر اساس چهار قاعده‌ی ورشکستگی در دو شرایط خشک و غیرخشک اجرا شد.

جدول ۵- اندازه‌های بهینه‌ی قطعی برای تابع‌های هدف مدل در شرایط خشک بر اساس قاعده‌ی ورشکستگی PC.

تابع هدف			
سود کشاورزی (میلیون ریال)	اشتغال کشاورزی (نفر-روز)	بهره‌وری آب $[(kg/m^3) \times ha]$	تأمین آب محیط طبیعی (هزار متر مکعب)
۲۳۵۸۶	۱۰۹۴۰	۹۵۲	
۳۷۶۹۰	۲۳۸۳۴	۱۰۳۰	
۱۱۳۰۵	۷۸۳۲	۴۱۹	۴۲۸۸۲
۲۹۶۸۷	۲۷۱۳۹	۱۱۳۸	
۵۵۰۱۶	۴۰۸۰۷	۱۵۹۲	

توسعه‌ی مدل چندهدفی خطی تخصیص بهینه‌ی ...

جدول ۶- اندازه‌های بهینه قطعی برای تابع‌های هدف مدل در شرایط غیرخشک بر اساس قاعده‌ی ورشکستگی PC.

تابع هدف					
	تأمین آب محیط طبیعی (هزار متر مکعب)	بهره‌وری آب [(kg/m ³)×ha]	اشتغال کشاورزی (نفر-روز)	سود کشاورزی (میلیون ریال)	
		۹۷۸۷	۸۰۷۵۹	۱۴۰۳۳۸	ناحیه‌ی ۱
		۱۱۲۴۴	۱۳۶۱۸۳	۲۴۳۷۲۶	ناحیه‌ی ۲
	۷۴۳۳۵	۳۵۰۳	۶۹۴۱۹	۸۶۴۳۳	ناحیه‌ی ۳
		۱۵۵۵۰	۱۷۰۹۳۸	۲۷۵۱۶۹	ناحیه‌ی ۴
		۱۴۵۷۴	۲۱۳۸۸۵	۳۳۹۲۸۱	ناحیه‌ی ۵

آبی محصولات (کیلوگرم بر متر مکعب) در سطح کشت متناظر آن‌ها (هکتار) است، شاخص مناسبی برای ارزیابی بهره‌وری آب در ناحیه‌های زراعی مختلف و در شرایط مختلف آبی اقلیمی نیست. برای رفع این نقص مقدار متوسط بهره‌وری آب برای هر ناحیه‌ی زراعی به همراه متوسط سود و اشتغال در واحد سطح آن بر اساس سیاست‌های بهینه‌ی تخصیص تعیین شده برای شرایط خشک و غیرخشک در جدول ۷ و ۸ آورده شد.

آب تخصیص داده شده به محیط زیست در شرایط غیرخشک حدود ۳۱ میلیون متر مکعب بیش‌تر از شرایط خشک است (جدول ۵ و ۶). بر اساس نتایج مدل بهینه‌سازی، سود و اشتغال بهینه در کل سامانه‌ی کشاورزی در شرایط غیرخشک به ترتیب حدود ۷ و ۶ برابر اندازه‌های بهینه‌ی آن‌ها در شرایط خشک، و دلیل آن بیش‌تر بودن سطح کشت پاییزه و دادن آب برای کشت بهاره در شرایط غیرخشک است. از آن‌جا که مقدار تابع هدف بهره‌وری آب منعکس‌کننده‌ی مجموع حاصل ضرب بهره‌وری

جدول ۷- متوسط اندازه‌های قطعی سود و اشتغال و بهره‌وری و تخصیص بهینه‌ی آب در شرایط خشک بر اساس قاعده‌ی ورشکستگی PC.

	تخصیص آب (هزار متر مکعب)	بهره‌وری آب (10 ⁻³ kg/m ³)	اشتغال کشاورزی (۱۰ ^۳ نفر-روز در هکتار)	سود کشاورزی (هزار ریال در هکتار)	
	۲۱۵۰۹	۴۲۵	۴۸۸۵	۱۰۵۳۲	ناحیه‌ی ۱
	۶۹۹۲۷	۲۰۶	۴۷۷۳	۷۵۴۸	ناحیه‌ی ۲
	۲۱۵۴۶	۲۳۴	۴۳۸۳	۶۳۲۷	ناحیه‌ی ۳
	۷۶۷۳۶	۱۸۵	۴۴۱۶	۴۸۳۰	ناحیه‌ی ۴
	۱۲۷۰۵۴	۱۷۸	۴۵۶۶	۶۱۵۵	ناحیه‌ی ۵

جدول ۸- متوسط اندازه‌های قطعی سود و اشتغال و بهره‌وری و تخصیص بهینه‌ی آب در شرایط غیرخشک بر اساس قاعده‌ی ورشکستگی PC.

	تخصیص آب (هزار متر مکعب)	بهره‌وری آب (10 ⁻³ kg/m ³)	اشتغال کشاورزی (۱۰ ^۳ نفر-روز در هکتار)	سود کشاورزی (هزار ریال در هکتار)	
	۶۳۵۰۲	۱۶۱۵	۱۳۳۲۴	۲۳۱۵۴	ناحیه‌ی ۱
	۱۸۲۰۸۴	۹۱۴	۱۱۰۷۰	۱۹۸۱۲	ناحیه‌ی ۲
	۶۲۲۹۲	۷۹۱	۱۵۶۷۲	۱۹۵۱۳	ناحیه‌ی ۳
	۲۱۷۵۱۲	۱۰۲۳	۱۱۲۵۱	۱۸۱۱۱	ناحیه‌ی ۴
	۳۲۷۲۰۸	۷۷۱	۱۱۳۰۹	۱۷۹۳۹	ناحیه‌ی ۵

نقش بسیار مهمی در این برون داد دارد. اندازه‌های غیرقطعی تخصیص دادن آب و زمین در شرایط مختلف بر اساس قاعده‌ی ورشکستگی PC مدل خطی چندهدفی تدوین شده برای اندازه‌های غیرقطعی آب دسترس (بر اساس برش آلفای ۰/۵) اجرا شد. اندازه‌های بهینه برای تابع هدف کشاورزی و محیط‌زیست در شرایط خشک و غیرخشک در جدول ۹ و ۱۰ آورده شد.

متوسط سود و اشتغال در واحد سطح ناحیه‌های زراعی و متوسط بهره‌وری آب در شرایط غیرخشک بسیار بیش‌تر از شرایط خشک است (جدول ۷ و ۸). به عبارت دیگر، با تحلیل کلی این جدول می‌توان نتیجه گرفت که با ۲/۸ برابر شدن حجم آب داده شده سود و اشتغال در واحد سطح به ترتیب ۲/۹ و ۲/۷ برابر می‌شود. این افزایش برای بهره‌وری آب ۴/۳ برابر است. تفاوت در آب مصرفی محصولات در شرایط خشک و غیرخشک

جدول ۹- اندازه‌های بهینه‌ی غیرقطعی برای تابع‌های هدف مدل در شرایط خشک بر اساس قاعده‌ی ورشکستگی PC.

تابع هدف								
تأمین آب محیط طبیعی (هزار متر مکعب)		مجموع بهره‌وری آب [(kg/m ³)×ha]		کل اشتغال کشاورزی (نفر-روز)		کل سود کشاورزی (میلیون ریال)		
حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	
		۶۹۱	۱۱۷۰	۸۰۴۰	۱۳۳۷۲	۱۶۹۶۳	۲۹۱۴۱	ناحیه‌ی ۱
		۷۴۱	۱۲۸۰	۱۷۶۹۶	۲۸۸۰۲	۲۷۰۰۶	۴۶۷۳۷	ناحیه‌ی ۲
۴۱۹۹۴	۴۲۸۸۲	۳۲۲	۵۱۳	۵۳۹۸	۹۴۲۸	۷۷۷۲	۱۴۲۹۸	ناحیه‌ی ۳
		۸۰۸	۱۳۸۶	۲۰۳۶۴	۳۲۶۷۹	۲۲۴۷۱	۳۷۲۷۱	ناحیه‌ی ۴
		۱۲۵۷	۲۰۸۰	۳۲۵۶۴	۵۲۶۷۲	۴۳۶۵۱	۷۴۲۳۸	ناحیه‌ی ۵

جدول ۱۰- اندازه‌های بهینه‌ی غیرقطعی برای تابع‌های هدف مدل در شرایط غیرخشک بر اساس قاعده‌ی ورشکستگی PC.

تابع هدف								
تأمین آب محیط طبیعی (هزار متر مکعب)		مجموع بهره‌وری آب [(kg/m ³)×ha]		کل اشتغال کشاورزی (نفر-روز)		کل سود کشاورزی (میلیون ریال)		
حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	
		۸۷۷۷	۱۰۴۱۹	۶۴۷۹۳	۸۵۶۳۱	۱۲۲۶۶۶	۱۵۵۲۸۵	ناحیه‌ی ۱
		۹۶۱۲	۱۲۱۱۸	۱۲۱۴۷۹	۱۴۵۵۴۱	۲۱۰۹۴۰	۲۷۳۹۳۹	ناحیه‌ی ۲
۷۳۴۹۷	۷۸۴۰۴	۲۳۶۰	۳۸۰۵	۶۶۷۷۲	۷۲۶۱۹	۷۳۷۹۱	۹۵۸۲۰	ناحیه‌ی ۳
		۱۴۱۷۰	۱۶۴۸۰	۱۳۹۴۵۹	۱۸۱۸۱۳	۲۴۲۹۸۱	۳۰۴۲۶۹	ناحیه‌ی ۴
		۱۳۳۸۴	۱۶۰۷۸	۲۱۲۸۸۵	۲۴۸۴۵۰	۲۸۷۱۷۲	۳۹۲۳۹۵	ناحیه‌ی ۵

برای سود بهینه‌ی سامانه‌ی کشاورزی در شرایط خشک و غیرخشک به ترتیب ۲۶ و ۱۳٪، و برای اندازه‌های بهینه‌ی اشتغال به ترتیب ۲۴ و ۱۰٪ است. از آن‌جا که میزان ابهام در برش آلفای ۰/۵ برای مجموع آب دسترس در شرایط خشک و

آب تخصیص داده شده به محیط‌زیست در وضعیت غیرخشک بین ۳۱/۵ تا ۳۵/۵ میلیون متر مکعب بیش‌تر از وضعیت خشک است (جدول ۹ و ۱۰). اجرای مدل بهینه‌سازی در عدم قطعیت نشان می‌دهد که میزان ابهام -نسبت به مرکز-

توسعه‌ی مدل چندهدفی خطی تخصیص بهینه‌ی...

جدول ۱۱- اندازه‌های بهینه‌ی توزیع کردن آب بین ناحیه‌های زراعی شبکه‌ی درودزن در وضعیت خشک بر اساس قاعده‌های ورشکستگی مختلف.

تخصیص آب (متر مکعب)			
قاعده‌ی CEA	قاعده‌ی APR	قاعده‌ی PC	
۴۷۴۲۹۵۵۴	۲۳۵۳۷۴۹۴	۲۱۵۰۹۴۱۳	ناحیه‌ی ۱
۴۷۴۲۹۵۵۴	۷۱۳۰۱۵۱۶	۶۹۹۲۶۹۴۶	ناحیه‌ی ۲
۴۷۴۲۹۵۵۴	۲۳۵۷۷۶۸۹	۲۱۵۴۶۱۴۵	ناحیه‌ی ۳
۴۷۴۲۹۵۵۴	۷۱۳۰۱۵۱۶	۷۶۷۳۵۷۱۱	ناحیه‌ی ۴
۰/۰۰	۰/۵۸	۰/۶۳	ضریب تغییرات

جدول ۱۲- اندازه‌های بهینه‌ی توزیع کردن آب بین ناحیه‌های زراعی شبکه‌ی درودزن در وضعیت غیر خشک بر اساس قاعده‌های ورشکستگی مختلف.

تخصیص آب (متر مکعب)				
قاعده‌ی CEL	قاعده‌ی CEA	قاعده‌ی APR	قاعده‌ی PC	
۳۷۲۵۰۸۲۳	۸۵۹۶۲۴۱۶	۵۹۹۶۴۹۳۸	۶۳۵۰۲۴۱۰	ناحیه‌ی ۱
۲۰۴۱۰۴۸۶۰	۱۷۴۰۹۵۸۸۲	۱۸۱۴۰۸۶۶۱	۱۸۲۰۸۴۱۷۳	ناحیه‌ی ۲
۳۵۹۵۵۳۲۴	۸۴۶۶۶۹۱۶	۵۸۶۳۳۶۰۷	۶۲۲۹۲۲۹۴	ناحیه‌ی ۳
۲۴۸۰۷۹۵۴۲	۱۸۰۶۶۵۳۳۵	۲۲۵۳۸۳۳۴۴	۲۱۷۵۱۱۶۷۳	ناحیه‌ی ۴
۰/۸۴	۰/۴۱	۰/۶۵	۰/۶۱	ضریب تغییرات

ورشکستگی
برای به‌دست دادن اطلاعات کافی قبل از پرداختن به نتایج ارزیابی پایداری، اندازه‌های بهینه‌ی آب تخصیص داده‌شده در نتیجه‌ی اجرای مدل بر اساس چهار قاعده‌ی ورشکستگی CEA، APR، PC، و CEL به تفکیک ناحیه‌های زراعی

غیر خشک به ترتیب ۲۲ و ۱۵٪ است، بیش‌تر بودن میزان ابهام در اندازه‌های تابع‌های هدف مدل در وضعیت خشک-نسبت به وضعیت غیر خشک توجیه‌پذیر است.

ارزیابی پایداری سیاست‌های تخصیص آب در شرایط

جدول ۱۳- اندازه‌های شاخص قدرت ورشکستگی و شاخص پایداری تخصیص ورشکستگی برای سیاست‌های بهینه‌ی تخصیص آب بر اساس قاعده‌های ورشکستگی مختلف در دو وضعیت خشک و غیر خشک.

شاخص BPI								
قاعده‌ی CEL		قاعده‌ی CEA		قاعده‌ی APR		قاعده‌ی PC		
غیر خشک	خشک	غیر خشک	خشک	غیر خشک	خشک	غیر خشک	خشک	
۰/۰۸	-	۰/۲۲	۰/۲۵	۰/۱۴	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۱۱	ناحیه‌ی ۱
۰/۴۲	-	۰/۳۴	۰/۲۵	۰/۳۶	۰/۳۸	۰/۳۶	۰/۳۷	ناحیه‌ی ۲
۰/۰۸	-	۰/۲۲	۰/۲۵	۰/۱۴	۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۱۱	ناحیه‌ی ۳
۰/۴۲	-	۰/۲۳	۰/۲۵	۰/۳۶	۰/۳۸	۰/۳۳	۰/۴۰	ناحیه‌ی ۴
۰/۸۰	-	۰/۲۳	۰/۰۰	۰/۵۰	۰/۵۸	۰/۴۵	۰/۶۳	شاخص BASI

را بر اساس تفسیرهای متنوعی از مفهوم عدالت و انصاف به‌دست می‌دهد. بنابراین، پایداری (امکان‌پذیری) آن‌ها باید بررسی شود. نتیجه‌ی ارزیابی پایداری سیاست‌های بهینه‌ی تخصیص آب بر اساس قاعده‌های ورشکستگی مختلف با دو شاخص قدرت

شبکه‌ی درودزن در شرایط خشک و غیر خشک در جدول‌های ۱۱ و ۱۲ آورده شد.

جدول‌های ۱۱ و ۱۲ به خوبی نشان می‌دهد که قاعده‌های ورشکستگی مختلف، سیاست‌های مختلف توزیع کردن موجودی

دو حالت خشک و غیرخشک است. این مدل با روی کرد سازش فازی براساس چهار روی کرد ورشکستگی PC، APR، CEA و CEL در چهار شرایط خشک قطعی، خشک غیرقطعی، غیرخشک قطعی و غیرخشک غیرقطعی برای ناحیه‌های زراعی آبخور سد درودزن و دریاچه‌ی بختگان در پایین دست حل شد. به طور کلی، نتایج تایید می‌کند که این چهار قاعده‌ی ورشکستگی سیاست‌های مختلف تقسیم موجودی را بر اساس تفسیرهای متنوعی از مفهوم عدالت و انصاف به دست می‌دهند، به طوری که گروداران با سهم آب بیش تر در شرایط خشک و غیرخشک به ترتیب بر اساس قاعده‌های ورشکستگی PC و CEL مجموع آب بیش تری می‌گیرند. از طرفی، بهترین مطلوبیت گروداران با سهم آب کم تر در همه‌ی شرایط آبی-اقلیمی بر اساس قاعده‌ی ورشکستگی CEA برآورده می‌شود.

نتایج ارزیابی پایداری سیاست‌های بهینه‌ی تخصیص آب بر اساس قاعده‌های ورشکستگی مختلف با شاخص BASI (مدنی و همکاران ۲۰۱۴) برای شرایط خشک و غیرخشک نشان داد که این معیار نمی‌تواند برای ارزیابی پایداری در تمام حالت‌های ورشکستگی به کار رود، بنابراین تصمیم‌گیری بر اساس آن باید با احتیاط لازم و بررسی کامل باشد.

پیشنهاد می‌شود بررسی‌های مفصلی برای تعیین ارزش اقتصادی واقعی آب و تعیین اندازه‌های مطمئن نیاز آبیاری، به‌علاوه‌ی برآورد دقیق تابع‌های تولید به‌زای آب مصرفی محصولات مختلف با نصب سامانه‌های پایش لحظه‌ی ریزاقلیم و رطوبت خاک در منطقه انجام شود، زیرا این اطلاعات در نتیجه‌ی خروجی مدل‌های تخصیص آب و سطح کشت، و در تصمیم‌سازی برای نحوه‌ی مدیریت منابع آب و رفع مناقشه بین گروداران مختلف نقش بسیار مهمی خواهد داشت.

ورشکستگی (BPI) و شاخص پایداری تخصیص ورشکستگی (BASI) پیشنهادشده‌ی مدنی و همکاران (۲۰۱۴) برای شرایط خشک و غیرخشک در جدول ۱۳ آورده شد.

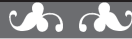
سیاست تقسیم آب باید بر اساس قاعده‌ی ورشکستگی CEA پایدارترین گزینه‌ی تخصیص از بین گزینه‌ها شناخته شود (جدول ۱۳). بررسی نحوه‌ی محاسبه‌ی دو شاخص در نظر گرفته‌شده و دلیل انتخاب قاعده‌ی CEA نشان می‌دهد که از آن‌جا که مقدار BASI برای هر سیاست تخصیص معادل ضریب تغییرات اندازه‌های BPI مربوط به گروداران مسأله است؛ و از آن‌جا که یکی از فراسنجه‌هایی که در محاسبه‌ی BPI نقش دارد میزان دریافتی است که گروداران دیگر به هر گرودار داده اند، اگر در مسأله‌ی ورشکستگی این میزان برای همه‌ی گروداران صفر باشد، نتیجه‌ی محاسبه‌ی BASI به شیوه‌ی جلو خواهد رفت که هر سیاست تخصیص که توزیع یکنواخت‌تری -بی توجه به تقاضاهای نامتقارن گروداران بدهد، پایدارترین گزینه دانسته خواهد شد. در مسأله‌ی بررسی شده در این پژوهش نیز چنین شد. پس سیاستی که آب موجود را یکنواخت‌تر بین گروداران تقسیم کرد (جدول ۱۱) پایدارترین گزینه دانسته شد (جدول ۱۳). این بررسی نشان می‌دهد که معیار BASI را نمی‌توان برای ارزیابی پایداری در همه‌ی حالت‌های ورشکستگی به کار برد. در نتیجه، تصمیم‌گیری بر اساس آن باید با احتیاط لازم و پس از بررسی کامل باشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدل بهینه‌سازی خطی چهار هدفی برای تخصیص دادن آب بین کشاورزی و محیط‌زیست، و توزیع کردن آب بین ناحیه‌های زراعی توسعه داده شد. اصلی‌ترین ورودی این مدل مقدار قطعی و غیرقطعی موجودی آب دسترس در

- Ansink E, Weikard HP. 2012. Sequential sharing rules for river sharing problems. *Social Choice and Welfare*. 38(2): 187–210.
- Aumann RJ, Maschler M. 1985. Game theoretic analysis of a bankruptcy problem from the Talmud. *Journal of Economic Theory*. 36(2): 195–213.
- Chen H-K, Chou H-W. 1996. Solving multiobjective linear programming problems- a generic approach. *Fuzzy Sets and Systems*. 82(1): 35–38.
- Choubin B, Khalighi-Sigaroodi S, Malekian A, Kişi Ö. 2016. Multiple linear regression, multi-layer perceptron network and adaptive neuro-fuzzy inference system for forecasting precipitation based on large-scale climate signals. *Hydrological Sciences Journal*. 61(6): 1001–1009.
- Curiel IJ, Maschler M, Tijs SH. 1987. Bankruptcy games. *Zeitschrift für Operations Research*. 31(5): A143–A159
- Dagan N, Volij O. 1993. The bankruptcy problem: a cooperative bargaining approach. *Mathematical Social Sciences*. 26(3): 287–297.
- Degefu DM, He W. 2016. Allocating water under bankruptcy scenario. *Water Resources Management*. 30(11): 3949–3964.
- Dinar A, Howitt RE. 1997. Mechanisms for allocation of environmental control cost: empirical tests of acceptability and stability. *Journal of Environmental Management*. 49(2): 183–203.
- Herrero C, Villar A. 2001. The three musketeers: four classical solutions to bankruptcy problems. *Mathematical Social Sciences*. 42(3): 307–328.
- Li S, He Y, Chen X, Zheng Y. 2019. The improved bankruptcy method and its application in regional water resource allocation. *Journal of Hydro-environment Research*. In Press.
- Li X-q, Zhang B, Li H. 2006. Computing efficient solutions to fuzzy multiple objective linear programming problems. *Fuzzy Sets and Systems*. 157(10): 1328–1332.
- Loehman E, Orlando J, Tschirhart J, Whinston A. 1979. Cost allocation for a regional wastewater treatment system. *Water Resources Research*. 15(2): 193–202.
- Madani K, Dinar A. 2013. Exogenous regulatory institutions for sustainable common pool resource management: Application to groundwater. *Water Resources and Economics*. 2-3: 57–76.
- Madani K, Lund JR. 2011. A Monte-Carlo game theoretic approach for multi-criteria decision making under uncertainty. *Advances in Water Resources*, 34(5): 607–616.
- Madani K, Zarezadeh M, Morid S. 2014. A new framework for resolving conflicts over transboundary rivers using bankruptcy methods. *Hydrology and Earth System Sciences*. 18(8): 3055–3068.
- Mahab Ghods Consulting Engineers. 2012. Report on water resources planning; From studies for the project of performance evaluation, monitoring of operation and maintenance management, restoration, and improvement of Dorudzan irrigation and drainage network. Regional Water Company of Fars. (In Persian).
- Mianabadi H, Mostert E, Zarghami M, van de Giesen N. 2015. A new bankruptcy method for conflict resolution in water resources allocation. *Journal of Environmental Management*. 144: 152–159.
- Moridi A. 2019. A bankruptcy method for pollution load reallocation in river systems. *Journal of Hydroinformatics*. 21(1): 45–55.
- Nafarzadegan AR. 2018. Developing a stochastic optimization model for water allocation based on the virtual water concept using game theory

- and bankruptcy approaches. Ph.D. Dissertation. Faculty of Agriculture and Natural Resources. University of Hormozgan. 174 p. (In Persian).
- Nafarzadegan AR, Vagharfard H, Nikoo MR, Nohegar A. 2018a. Socially-Optimal and Nash Pareto-Based Alternatives for Water Allocation under Uncertainty: an Approach and Application. *Water Resources Management*. 32(9): 2985–3000.
- Nafarzadegan AR, Vagharfard H, Nikoo MR, Nohegar A. 2018b. Resolving conflict on the trade-off curve generated by a multi-purpose sustainability model for the natural environment and farming under water bankruptcy. *Journal of Environmental Studies*. 43(4): 699-713. (In Persian).
- Neill B. 1982. A problem of rights arbitration from the Talmud. *Mathematical Social Sciences*. 2(4): 345–371.
- Read L, Madani K, Inanloo B. 2014. Optimality versus stability in water resource allocation. *Journal of Environmental Management*. 133: 343–354.
- Sechi GM, Zucca R. 2015. Water resource allocation in critical scarcity conditions: a bankruptcy game approach. *Water Resources Management*. 29(2): 541–555.



Watershed Management Research

VOL. 32, No. 3, Ser. No: 124, Autumn 2019, pp. 95-110
DOI: 10.22092/wmej.2019.125834.1205

Developing a Multi-Objective Linear Model for an Optimal Water Allocation Based on Four Bankruptcy Rules and Solve it Through the Fuzzy Compromise Approach

Ali Reza Nafarzadegan*

(Corresponding Author)* Assistant Professor, Department of Natural Resources Engineering, University of Hormozgan, Bandar-Abbas, Iran

Hassan Vagharfard

Associate Professor, Water and Environmental Research Group, University of Hormozgan, Bandar-Abbas, Iran

Mohammad Reza Nikoo

Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran.

Ahmad Nohegar

Professor, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

*Corresponding Author Email: a.r.nafarzadegan@gmail.com

Received: 12 April 2019 Accepted: 18 June 2019

Abstract

A multi-objective linear optimization model has been formulated, which is used for water and crop area allocation in two irrigation and drainage networks of Dorudzan and Karbal, including five farming regions. The developed model is based on four bankruptcy rules of proportional cutback (PC), constrained equal awards (CEL), constrained equal losses (CEL), and adjusted proportional (APR) in terms of the certainty and uncertainty in the water availability. The developed model has four objective functions to reflect the various agricultural and environmental consumptions and is solved for two dry and non-dry conditions using a fuzzy compromise approach. The outputs of the model showed that the regions with higher shares of water receives the most allocated water through the bankruptcy rules of the PC and CEL in dry and non-dry condition, respectively. On the other hand, the most allocated water for the regions with lower shares of water occurs through the bankruptcy rule of the CEA in both hydro-climatic conditions. The outcome of the stability evaluation using the bankruptcy stability index (BASI) indicated that this criterion could not be used to evaluate stability under all bankruptcy situations; thus, one should take the necessary precaution for making a decision according to its output.

Keywords: Agricultural water management, environmental water need, multi-objective optimization, uncertainty, water bankruptcy