

مدیریت مبتنی بر بازار منابع آب زیرزمینی با در نظر گرفتن عدم قطعیت حاصل از پایش مصارف

سروش شرقی^۱، رضا کراچیان^{۲*}، و صفورا صفری^۳

۱- دکتری مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران

۳- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه مریلند، کالج پارک

Email: kerachian@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش ۱۴۰۲/۰۴/۰۵

تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۱۰/۱۲

چکیده

کاهش دسترسی به منابع آب‌های زیرزمینی و افت مداوم تراز آبخوان‌ها در مناطق مختلف جهان به دلیل برداشت بی‌رویه و مدیریت ناپایدار این منابع، موجب ایجاد مشکلات محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی فراوان شده است. در این میان، بازار آب زیرزمینی به عنوان راه حلی مناسب برای تعادل بخشی و احیای آبخوان‌ها مورد توجه پژوهشگران و سیاست‌گذاران قرار گرفته است. این درحالی است که ایجاد بازار آب در مواردی به دلیل عدم وجود سازوکار مؤثر و عدم پایش و کنترل مناسب برداشت‌های آب موجب افزایش تنش به منابع آب شده است. در این مقاله با پیشنهاد و ارزیابی ساز و کار بازار آب فصلی هوشمند، به ارائه الگویی برای مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود پرداخته شده است. همچنین دورسنجی تبخیر-تعرق به عنوان رویکردی نوین برای اندازه‌گیری و پایش مصارف آب در بازار آب زیرزمینی در این تحقیق پیشنهاد شده است. در این راستا عدم قطعیت حاصل از خطای مدل دورسنجی تبخیر-تعرق به عنوان الگوریتم پایش مصارف در نتایج ساز و کار بازار آب زیرزمینی با استفاده از روش تصمیم‌گیری استوار^۱ RDM ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهند ساز و کار پیشنهادی بازار آب زیرزمینی فصلی موجب افزایش ۲۵ درصدی بهره‌وری اقتصادی مصرف آب در منطقه مطالعاتی شده است. همچنین با اجرای بازار آب، بازتوزیع حق‌آبه‌ها تناسب بهتری با سطح زیر کشت کاربران دارد.

واژه‌های کلیدی: بازار آب زیرزمینی، روش تصمیم‌گیری استوار، سنجش از دور، تبخیر-تعرق، عدم قطعیت.

۱- مقدمه

سیاست‌های محدود کننده در برداشت از منابع آب‌های زیرزمینی معمولاً با موانع اجتماعی فراوان از سوی آب‌بران به ویژه کشاورزان مواجه هستند چراکه محدودیت برداشت در چارچوب متداول آن راهی به سوی کاهش آورد اقتصادی و نابسامانی وضعیت معیشتی گروداران در حوزه کشاورزی است. بر این اساس، به نظر می‌رسد پیشنهاد ساز و کارهای کارا و مؤثر بازار آب زیرزمینی در شرایط اعمال محدودیت برداشت بتواند تا حدودی بر بهبود وضعیت منابع آب‌های زیرزمینی مؤثر باشد. در این رویکرد در عین حال که بر محدودیت و پایش برداشت‌ها از منابع آب‌های زیرزمینی تأکید شده است، بهبود وضعیت معیشتی کشاورزان نیز تحت یک ساز و کار اقتصادی مورد توجه قرار می‌گیرد.

در این مقاله، مفهوم جدیدی به عنوان بازار آب زیرزمینی هوشمند^۱ مبتنی بر دورسنجی تبخیر-تعرق معرفی می‌شود که در آن ساز و کار اجرایی بازار برپایه مدل‌های محاسباتی و بهینه‌سازی است و همچنین پایش مصارف و برداشت‌ها از منابع مشترک بر اساس دورسنجی تبخیر-تعرق صورت می‌پذیرد. انتظار می‌رود که تبدلات شکل گرفته در بازار مورد نظر در نهایت موجب شود که آب‌بران با بازده تولید محصول زیاده‌تر، با خرید حق‌آبه آب‌بران با بازده پایین‌تر، سود خالص خود را افزایش دهند و آب‌بران با بازده کمتر با فروش حق‌آبه خود سود خود را افزایش دهند. همچنین انتظار می‌رود پس از بازتخصیص آب، توازن میان تخصیص کاربران و سطح زیرکشت آنان برقرار شود و حق‌آبه کاربران متناسب با میزان سطح زیرکشت آنان تعیین شود. این مهم می‌تواند در راستای اهداف توزیع عادلانه‌ی آب باشد.

در این راستا Jamali Jaghdani & Brümmer [1] به بررسی عوامل تأثیر گذار بر مشارکت کشاورزان در بازار آب غیر رسمی در دشت رفسنجان پرداختند. تمرکز پژوهش آن‌ها روی خریداران آب بود. این پژوهشگران بیان داشتند که با وجود اینکه در ایران قوانین محدود کننده‌ای برای اجرای بازار

آب وجود دارد اما در دشت رفسنجان کشاورزانی که دارای چاه مشترک هستند به دلایل مختلف از جمله الگوی غیر یکنواخت مالکیت باغ‌های پسته، تفاوت بهره‌وری آبیاری و برداشت محصول، کمبود آب و ارزش اقتصادی بالای پسته در این منطقه به تشکیل بازار آب غیر رسمی همت گماشته‌اند. Manjunatha et al. [2] به بررسی تأثیر بازار آب زیرزمینی غیر رسمی در هند بر کارایی آبیاری مزارع پرداختند. در این پژوهش مهمترین بازوی محرک برای ایجاد بازار آب زیرزمینی توان مالی کشاورزان برای دسترسی به تمهیدات حفر چاه و پمپاژ از آن برای پاسخ به نیازهای آبیاری بود. این درحالی است که در بازار آب زیرزمینی در حوضه‌های دیگر جهان می‌تواند به دلایل مختلف همچون تفاوت در کیفیت آب زیرزمینی در نواحی مختلف یک آبخوان، تفاوت در بهره‌وری آب و زمین، تفاوت در پروانه بهره‌برداری کشاورزان و ... شکل بگیرد. Moghaddasi et al. [3] با بررسی تاب‌آوری سناریوهای مدیریت منابع آب در منطقه دشت رفسنجان به اولویت‌بندی این سناریوها پرداختند. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که ایجاد بازار آب در کنار انتقال آب بین حوضه‌ای از تاب‌آوری قابل توجهی برخوردار است. Ahmadi et al. [4] در پژوهشی چالش‌ها و ملاحظات حقوق بازار آب محلی در دشت اصفهان-برخوار را بررسی کردند. در این پژوهش با مطالعه و بررسی قوانین مرتبط با نظام حقوقی آب کشور ضمن شناسایی قوانین مشوق و بازدارنده بازار آب، برخی از چالش‌های حقوقی مبادله آب ارائه شد. در پژوهشی دیگر Razzaq et al. [5] به بررسی بازار آب زیرزمینی در نواحی خشک و نیمه خشک پاکستان پرداختند. آن‌ها با هدف پاسخ به این سوال که آیا تشکیل بازار آب زیرزمینی غیررسمی در پاکستان در پاسخ به کم آبی راه حل مطلوب و پایداری بوده به انجام این تحقیق همت گماشتند. آن‌ها با استفاده از مصاحبه و طرح پرسشنامه در میان ۱۲۰ کشاورز به بررسی کارایی اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی بازار آب زیرزمینی پرداختند. آنان دریافتند که کشاورزانی که وارد بازار آب زیرزمینی می‌شوند رویکرد بهینه‌تر و کارتری را در برابر برداشت از منابع آب‌های زیرزمینی نسبت به کشاورزانی که در بازار آب شرکت نمی‌کنند دارند.

در ارتباط با شبیه‌سازی رفتار کاربران در بازار آب زیرزمینی Aghaie et al. [6] یک مدل عامل بنیان بازار آب زیرزمینی را برای ارزیابی آثار اقتصادی و هیدرولوژی سازوکارهای سقف و تجارت^۱، حراج مبتنی بر قیمت یکنواخت^۲ و حراج مبتنی بر قیمت غیریکنواخت^۳ در دشت رفسنجان بکار گرفتند. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که ساز و کار حراج مبتنی بر قیمت غیریکنواخت کارایی اقتصادی و هیدرولوژیکی مناسب‌تری نسبت به سایر ساز و کارها دارد. در پژوهش مذکور نیز اثر اقتصادی و هیدرولوژیکی بازخرید آب از کشاورزان توسط بازار مورد بررسی قرار گرفت. Zolfagharipoor et al. [7] به توسعه یک چارچوب برای بازار آب بین بخشی (کشاورزی و صنعت) با هدف افزایش بازدهی اقتصادی مصرف آب در محدوده دشت اصفهان-برخوار پرداختند. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که تسهیل در اجرای سیاست کاهش مجوزهای آب زیرزمینی، بازدهی اقتصادی استفاده از این مجوزها را بهبود می‌بخشد. Matinju & Alizadeh [8] به توسعه یک مدل عامل بنیان برای شبیه‌سازی بازار آب در منطقه مجن استان سمنان پرداختند. در این تحقیق به بررسی چگونگی تخصیص و مبادله آب بین کشاورزان منطقه مجن پرداخته شد. از نتایج این تحقیق می‌توان به توانایی بازار آب برای کاهش ۲۵ درصدی فقر در میان کشاورزان و افزایش تاب‌آوری آب‌بران بازار آب در برابر خشکسالی اشاره کرد.

Zolfagharipoor & Ahmadi [9] برای شبیه‌سازی رفتار کاربران در بازار آب زیرزمینی بین بخشی (بین بخش‌های صنعت و کشاورزی) از مدل‌سازی عامل بنیان بهره بردند. در این پژوهش تأثیر مؤلفه‌های روانشناختی کاربران بازار آب-زیرزمینی بر میزان رقابت آنان در بازار مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین نشان داده شد که ساز و کار سقف و تجارت می‌تواند در برداشت پایدار از آبخوان ناحیه مطالعاتی تأثیر مطلوبی داشته باشد. همچنین Zolfagharipoor et al. [10] به پیشنهاد ساز و کار برای بازتوزیع حق‌آبه‌های منابع آب-

زیرزمینی بر اساس بازار آب با استفاده از یک مدل اقتصادی پرداختند. در این پژوهش تأثیر اقتصادی بازار آب زیرزمینی و تبادلات حق‌آبه‌های کاربران در بخش‌های صنعت و کشاورزی با به‌کارگیری یک مدل برنامه‌ریزی تبادلات آب بین بخشی^۴ مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین کارایی زیاد بازار آب در بازتوزیع منابع آب در شرایط کمبود آب تبیین شد. در نهایت در این پژوهش، تحلیل اجتماعی-هیدرولوژیکی بازار آب-زیرزمینی نشان داد که بازار آب زیرزمینی بین بخشی در مقیاس محلی قادر است اشتغال را ۴۵ درصد افزایش و در عین حال تنش بر آبخوان را کاهش دهد. Sharghi & Kerachian [11] به پیشنهاد ساز و کار فصلی برای پیاده‌سازی بازار آب زیرزمینی در دشت رفسنجان پرداختند. آن‌ها با ارائه ساز و کار برای مبادله حق‌آبه کاربران و قیمت‌گذاری روی حق‌آبه‌های مبادلاتی به این نتیجه دست یافتند که با پیاده‌سازی بازار آب زیرزمینی هوشمند در محدوده مطالعاتی می‌توان بهره‌وری مصرف آب را به میزان قابل توجهی افزایش داد. با این وجود در پژوهش مذکور به معرفی ابزاری برای پایش مصارف در بازار آب زیرزمینی و همچنین تحلیل و بررسی عدم قطعیت‌های تأثیرگذاری بر کارایی بازار آب زیرزمینی پرداخته نشده است.

اشاره به پژوهش‌های متنوع در زمینه بازار آب در داخل و خارج کشور این مهم را منعکس نمود که پیشنهاد ساز و کار نوین برای بازار آب زیرزمینی درون بخشی (بخش کشاورزی) به صورت فصلی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در بازار تا به امروز مغفول مانده است و این موضوع اجرا و کارایی بازار آب را محدود ساخته است. همچنین در پژوهش-های مذکور فقدان توجه به ابزاری برای پایش مصارف در بازار آب و همچنین عدم قطعیت‌های حاصل از خطای موجود در ابزار پایش موجب ضرورت یافتن پیشنهاد سازوکاری مؤثر و کارا با در نظر گرفتن مؤلفه‌های مذکور شده است. در این راستا در این مقاله به پیشنهاد ساز و کار نوین برای تشکیل بازار آب زیرزمینی درون بخشی (بخش کشاورزی) به صورت فصلی در قالب بازار آب زیرزمینی هوشمند^۵ پرداخته می‌شود.

1 Cap and trade

2 Uniform price double-auction

3 Discrimination-based double auction

4 Inter-Sectoral Water Exchanges Programming

5 Smart Water Market

شکل ۱. جانمایی منطقه مورد مطالعه [13]

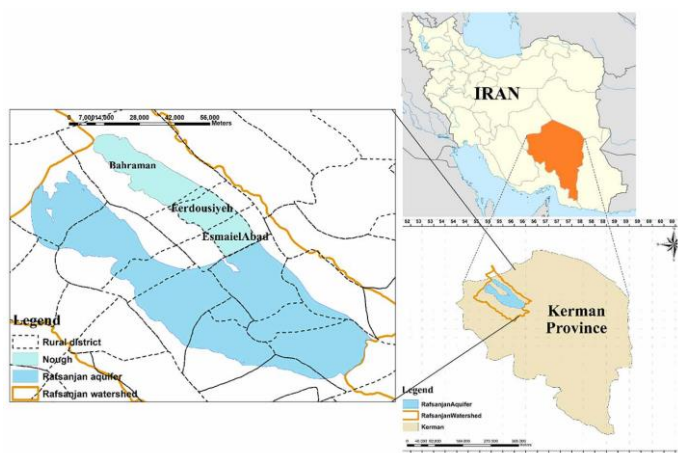


Fig. 1. Location of the study area [13]

ناحیه نوق از دشت رفسنجان می‌تواند محدوده‌ای مناسب برای تشکیل بازارهای آب محلی رسمی باشد چراکه این محدوده تجربه‌ی ایجاد بازار آب غیر رسمی را دارد. در بازار آب غیر رسمی با توجه به اینکه اطلاعات مربوط به مبادلات حق‌آبه‌های کاربران ثبت نمی‌شود و هیچ نهاد بالادستی ناظر بر حفظ حقوق کاربران بازار نیست ممکن است برخی کاربران به تعهدات متقابل خود عمل نکنند و موجب متضرر شدن دیگر کاربران شوند. همچنین در بازار آب رسمی مدیر بازار می‌تواند ساز و کار مبادلات و تعیین قیمت حق‌آبه‌های مبادلاتی را نظام ببخشد و موجب افزایش کارایی بازار آب در مصرف و تخصیص منابع آب شود. بر این پایه، رسمی شدن بازار آب می‌تواند مورد توجه هم کاربران بازار و هم نهادهای متولی مدیریت منابع آب باشد و مشارکت آبران در بازار را گسترش دهد.

در این محدوده، هر چاه دارای چندین مالک مشترک است. تفاوت در دسترسی کشاورزان به منابع آب زیرزمینی از نظر کمیت و کیفیت و به ویژه توزیع نامتوازن حق‌آبه کشاورزان به نسبت سطح زیر کشت آنان و همچنین تفاوت در تابع تولید محصول آن‌ها، تبدیل به بازوی محرکی برای تشکیل بازار آب میان کشاورزان شده است.

همچنین عدم قطعیت حاصل از خطای الگوریتم پایش در سازوکار بازار آب زیرزمینی پیشنهادی در این مقاله مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در ادامه به روش‌شناسی تحقیق و ارائه ساز و کار پیشنهادی برای پیاده‌سازی بازار آب زیرزمینی و معرفی ناحیه‌ی مطالعاتی پرداخته می‌شود. همچنین در بخش سوم نتایج حاصل از اجرای مدل بازار آب زیرزمینی ارائه می‌شود. بخش آخر مقاله به نتیجه‌گیری نهایی و جمع‌بندی تحقیق اختصاص دارد.

۲- موارد و روش‌ها

۲-۱- محدوده‌ی مطالعاتی

روش‌شناسی پیشنهادی در این مقاله برای همه نواحی مطالعاتی قابل فراگیری است اما برای ارزیابی کارایی آن در قالب مطالعه‌ی موردی در دشت رفسنجان، ناحیه مطالعاتی نوق به عنوان یکی از دشت‌های ممنوعه با ارزش اقتصادی زیاد آب از نظر تولید پسته پیاده‌سازی می‌شود. دشت رفسنجان از لحاظ اقتصادی، اجتماعی و سیاسی دارای اهمیت زیادی است. با توجه به وضعیت منطقه و برداشت بی‌رویه از آبخوان رفسنجان در طول سالیان گذشته، ذخیره این آبخوان به شدت کاهش یافته است.

شهرستان رفسنجان بخش نسبتاً وسیعی از استان کرمان است و در حوضه آبریز کویر درانجیر و در جنوب شرقی کویر مرکزی ایران قرار دارد. شهرستان رفسنجان در ناحیه مرکزی ایران در ۱۱۰ کیلومتری غرب شهر کرمان در منطقه‌ای پست به لحاظ ارتفاعی واقع شده است و وسعتی برابر ۱۰۷۴۰/۷ کیلومترمربع را دارا است. این شهرستان بین طول‌های جغرافیایی ۵۴°/۳۰' تا ۵۶°/۳۰' و عرض جغرافیایی ۲۹°/۱۵' تا ۲۹°/۵۲' قرار دارد و مرکز آن شهر رفسنجان است. شهرستان رفسنجان از شمال به دشت زرنند، از جنوب به بردسیر و سیرجان، از مغرب به شهر بابک و از مشرق به کرمان محدود است [12]. این شهرستان دارای چهار بخش فردوس، مرکزی، کشکویه و نوق است شکل (۱) تصویری از جانمایی و روستاها این منطقه را نشان می‌دهد.

۲-۲- مراحل پیاده‌سازی ساز و کار بازار آب‌زیرزمینی هوشمند فصلی

گام‌ها و مراحل مختلف انجام این تحقیق عبارت است از:
(۱) جمع آوری داده‌های اولیه، (۲) مدلسازی آبخوان (۳) پیشنهاد و ارزیابی ساز و کار بازار آب زیرزمینی فصلی و (۴) تحلیل نتایج مدل بازار آب‌زیرزمینی با توجه به عدم قطعیت حاصل از خطای الگوریتم پایش با استفاده از روش تصمیم‌گیری استوار^(۱) (RDM).

در این تحقیق فرض شده است که در ناحیه اجرای بازار آب، بازارهای آب محلی متعددی بطور همزمان تشکیل شده است زیرا آبخوان یک منبع آب مشترک است، بهبود بهره‌وری تنها در یک منطقه، به حفاظت آبخوان منجر نخواهد شد و عملاً آبی که برای حفظ آبخوان ذخیره شده است می‌تواند توسط نواحی مجاور مصرف شود. سازوکار پیشنهادی قرار است در یکی از این محدوده‌های از پیش شناسایی شده اعمال و نتایج آن ارزیابی شود. شایان ذکر است که نقش اصلی مدیر بازار در این تحقیق، دریافت نمودارهای پیشنهادی حجم-قیمت از کاربران، اجرای مدل بازار و تعیین و اعلام حق‌آبه‌های مبادلاتی میان خود و کاربران و تعیین قیمت این مبادلات (قیمت واحد حق‌آبه‌های مبادلاتی) در هر فصل مزایده است.

شکل (۲)، مراحل مختلف ساز و کار بازار آب‌زیرزمینی پیشنهادی را نشان می‌دهد. برای ایجاد سازوکاری مطلوب برای بازار آب‌زیرزمینی هوشمند استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی محیط‌زیستی (مدل شبیه‌سازی آب‌زیرزمینی) و مدل بهینه‌سازی اقتصادی لازم است. گام‌های کلی پیاده‌سازی ساز و کار فصلی در این عبارت اند از: (۱) تعیین محدوده تحت پوشش بازار آب محلی (محدوده مناسب برای تشکیل بازار آب محلی) در ناحیه مطالعاتی بر اساس معیارهای مختلف، (۲) تعیین حق‌آبه اولیه کاربران (تعیین ضریب تعدیل بهینه برای تعدیل پروانه‌ی کاربران و تعیین میزان آب در دسترس سالانه)، (۳) تعیین تابع پاسخ آبخوان در نقاط کنترل، (۴) تعیین توابع تولید در دوره‌های مختلف رشد گیاه برای تعیین توابع سود کاربران و (۵) فرموله

کردن ساز و کار بازار آب‌زیرزمینی فصلی با بهره‌گیری از یک مدل بهینه‌سازی با در نظر گرفتن قیود محیط‌زیستی.

۱-۲-۲- تعیین کاربران و محدوده تحت پوشش بازار آب محلی

گام اول شبیه‌سازی ساز و کار بازار آب‌زیرزمینی برای کاربران کشاورزی، تعیین کاربران شرکت‌کننده در تبادلات آب‌زیرزمینی است. تعیین کاربران بازار می‌تواند بر اساس معیارهای مختلفی صورت پذیرد اما هرچه این مهم به واقعیت عینی بازار نزدیک‌تر باشد، نتایج شبیه‌سازی ساز و کار بازار، قابل اتکاءتر خواهد بود. بر این اساس، با فرض اینکه مالک یا مالکان هر چاه بهره‌برداری یک کاربر در نظر گرفته شود، می‌توان هر چاه را به عنوان یک کاربر در این بازار در نظر گرفت. این کاربران (چاه‌ها) در درون هر یک از محدوده‌های بازار محلی آب زیرزمینی به تبادلات پروانه‌های اصلاح شده‌ی برداشت آب خود می‌پردازند.

تقسیم‌بندی ناحیه‌ی مطالعاتی به محدوده‌های بازار آب محلی مختلف و پیاده‌سازی سازوکارهای مدیریتی درون هر محدوده می‌تواند به مدیریت پایدار منابع مشترک از نظر اجتماعی و اقتصادی منتج شود بطوری‌که قانون‌گذار از پایش جزئی برداشت‌ها در هریک از محل‌های بهره‌برداری بی‌نیاز می‌سازد. تقسیم‌بندی ناحیه‌ی مطالعاتی به شکل‌های مختلف باید با استفاده از معیارهایی صورت پذیرد که مبین انتخاب منطقی و اختیاری کاربران برای ورود به محدوده‌های بازار محلی باشد. در این راستا، تقسیم‌بندی ناحیه مطالعاتی به بازارهای آب محلی بر اساس پژوهش Sharghi and Kerachian [11] صورت گرفته است.

شکل ۲. مراحل مختلف پیاده سازی ساز و کار بازار آب زیرزمینی هوشمند فصلی

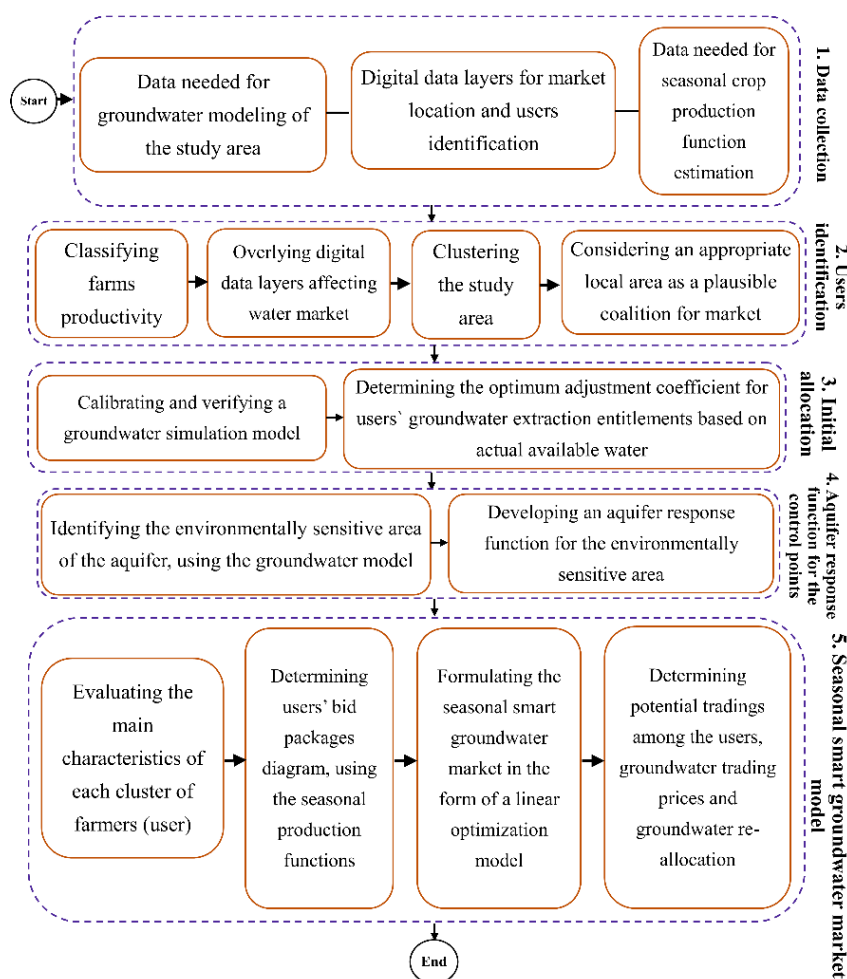


Fig. 2. A flow chart outlining the implementation steps of the seasonal smart groundwater market mechanism

۲-۲-۲- تعیین حق آبه های کاربران و معادله پاسخ آبخوان

در این تحقیق به منظور تعیین پروانه های اصلاح شده برداشت آب و تخمین میزان آب در دسترس (قابل برداشت) سالانه کل آبخوان در بازار آب زیرزمینی در دوره های مختلف مزایده بر اساس پژوهش Sharghi and Kerachian [11] با در دست داشتن مدل شبیه سازی کالیبره شده آبخوان با تعیین ضریب تعدیل پروانه ها، حق آبه های فعلی کاربران به صورتی کاهش می یابد که میزان کل برداشت برابر با برداشت مطمئن آبخوان شود. همچنین معادله ی پاسخ آبخوان بر اساس پژوهش مذکور با هدف کنترل تراز آبخوان در نقطه ی کنترل آبخوان بدست می آید. نقطه ی کنترل یا نقطه ی حساس محیط زیستی آبخوان محدوده ای از آبخوان است که اثر تجمعی مخروطه های

افت حاصل از برداشت از چاه های بهره برداری بیشترین افت را در آبخوان ایجاد می کند. این محدوده با اجرای مدل آب- زیرزمینی منطقه ی مطالعاتی قابل تشخیص است.

۲-۲-۳- مدل بازار آب زیرزمینی هوشمند

مدل بازار به گونه ای طراحی شده است که بتواند بدون پشتوانه مالی دولت به صورت محلی هر ساله برداشت از آبخوان را تعادل بخشد. شایان ذکر است که در مکانیزم بازار آب زیرزمینی پیشنهاد شده در این پژوهش، کاربران حق فروش همه ی حق آبه ی خود و خشک کردن باغ خود را ندارند و صرفاً با در نظر گرفتن حداقل میزان آبیاری مجاز در هر فصل به خرید و فروش بخشی از حق آبه های خود می پردازند. همچنین انگیزه ی اصلی تبادلات حق آبه های آب زیرزمینی میان کاربران

buy_w : حق‌آبه‌ی خریداری شده توسط کاربر w (مترمکعب/ فصل مزایده)
 $sell_w$: حق‌آبه‌ی فروخته شده توسط کاربر w (مترمکعب/ فصل مزایده)

قیمت تبادلات آب میان کاربران و مدیر بازار از قیمت سایه‌ای^۱ قید معادله ۵ حاصل می‌آید. قیمت سایه‌ای در این قید از مدل بهینه‌سازی، به معنای ارزش افزوده‌ی ایجاد شده از هر واحد آب مصرفی اضافی حاصل از آزاد نمودن قید معادله‌ی مذکور به اندازه‌ی یک واحد (یک واحد برداشت بیشتر از آب) است. بر این اساس می‌توان ارزش افزوده حاصل از یک واحد تخصیص بیشتر حق‌آبه به هر کاربر را معادل قیمت هر واحد آب تخصیص یافته برای هر کاربر در نظر گرفت چراکه ارزشی که هر واحد حق‌آبه مازاد برای هر کاربر ایجاد می‌کند مبین ارزش واقعی آب برای آن کاربران است.

یکی از ورودی‌های مهم در اجرای ساز و کار بازار آب هوشمند، بسته‌های پیشنهادی حجم-قیمت کاربران بر اساس توابع تولید فصلی آن‌ها در فصول مختلف مزایده (دوره‌های رشد گیاه) است. کاربران بازار این بسته‌های پیشنهادی را خود از طریق سامانه اینترنتی بازار آب به دست مدیر بازار می‌رسانند. بسته‌های پیشنهادی آنان در حقیقت مبین ارزش واحد آب آبیاری شده (یا باز مبادله شده) در احجام مختلف آب است، بنابراین با مشتق‌گیری از منحنی‌های توابع تولید فصلی در بازه‌های یکسان می‌توان بسته‌های حجم-قیمت کاربران فرضی موجود را تخمین زد. در این مقاله از توابع تولید فصلی و بسته‌های پیشنهادی حجم-قیمت بدست آمده در پژوهش Sharghi and Kerachian [11] استفاده شده است. این منحنی‌ها از جمع‌آوری داده‌های آبیاری گیاه در هر دوره رشد و داده‌های میزان تولید محصول و ایجاد منحنی‌های برازش میان این داده‌ها محاسبه شده‌اند. برای توضیحات بیشتر رجوع شود به مرجع [11].

در نهایت پس از اجرای مدل بهینه‌سازی، خرید و فروش حق‌آبه‌ها و بازتوزیع نهایی حق‌آبه‌های آب برای کاربران بازار در

بخش کشاورزی در هر فصل مزایده، توزیع نامتوازن حق‌آبه‌ی کاربران نسبت به زمین، تفاوت در کیفیت آب، تفاوت در کیفیت خاک مزرعه و تفاوت در رقم پسته است که انتظار می‌رود وجود یک ساز و کار مؤثر برای مبادلات حق‌آبه‌ها بتواند پس از بازتوزیع پروانه‌ها منتج به بهبود بهره‌وری اقتصادی شود. مدل بهینه‌سازی بازار آب‌زیرزمینی پیشنهادی با لحاظ معیارهای اقتصادی- محیط‌زیستی به صورت زیر است:

$$\text{Maximize } \sum_{user w} \sum_{bids b} BidPrice_{b,w} bid_{b,w} \quad (1)$$

$$q_w = \sum_{bid b} bid_{b,w} \quad \forall user w \quad (2)$$

$$bid_{b,w} \leq BidQty_{b,w} \quad (3)$$

$$f(q_1, q_2, \dots, q_w) \leq \Delta L_{i,max} \quad (4)$$

$$\sum_{auction} q_w \leq Aallowable \quad \forall auction interval \quad (5)$$

در نهایت برای محاسبه احجام حق‌آبه‌های خریداری شده و فروخته شده از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$buy_w \quad (6)$$

$$= \max(0, q_w - InitialEntitlement_w) \quad \forall user w$$

$$sell_w = \max(0, InitialEntitlement_w - q_w) \quad \forall user w \quad (7)$$

در این روابط:

$BidPrice_{b,w}$: ارزش یا قیمتی است که کاربر w در

محدوده بلوک b برای مصرف آب قائل می‌شود (تومان/مترمکعب)

$bid_{b,w}$: میزان آب مصرفی توسط کاربر w در

محدوده بلوک b (مترمکعب/فصل مزایده)

q_w : مقدار نهایی حق‌آبه‌ی کاربر w

(مترمکعب/فصل مزایده)

$BidQty_{b,w}$: حجم آبی که کاربر w برای بلوک

b اعلام می‌کند (مترمکعب/فصل مزایده)

$f(q_1, q_2, \dots, q_w)$: پاسخ آبخوان (متر) به برداشت کاربران

از آبخوان معادل q_w (مترمکعب/روز) در نقطه‌ی کنترل آبخوان

$\Delta L_{w,max}$: حداکثر افت مجاز سطح آبخوان در

نقطه‌ی کنترل (متر)

$Aallowable$: مجموع برداشت مجاز همه‌ی کاربران

از آبخوان محدوده‌ی بازار محلی

(مترمکعب/ فصل مزایده)

$InitialEntitlement_w$: حق‌آبه‌ی اولیه (مجوز برداشت اصلاح

شده) کاربر w پس از تعدیل پروانه‌ها

(مترمکعب/ فصل مزایده)

پس از اجرای مدل بازار، میزان آب خالص مصرفی در محدوده تحت پوشش بازار در پایان هر فصل مزایده، پایش و اندازه‌گیری می‌شود. فارغ از اینکه در محدوده مورد نظر چقدر احتمال تخلف وجود دارد و میزان تخلف از مقدار مجاز چند درصد می‌تواند باشد، هنگامی که برداشت واقعی به هر میزانی بالاتر یا پایین‌تر از سقف تعیین شده برای محدوده‌ی بازار است، الگوریتم پایش (مدل دور سنجی تبخیر و تعرق) ممکن است حداکثر تا X درصد خطای برآورد داشته باشد (بر اساس دقت برآورد شده از مدل‌های برآورد تبخیر و تعرق) و میزان آب خالص مصرفی محدوده را در فصل مورد نظر حداکثر تا X درصد بیشتر یا کمتر از مقدار واقعی آب مصرف شده برآورد کند. در نتیجه، بر اساس خطای مذکور، محتمل است که الگوریتم پایش به اشتباه تخلف یا عدم تخلف بازار را در یک فصل ثبت کند. حال در ابتدای بازگشایی بازار و تعیین بازتوزیع حق‌آبه‌ها تا پایان سال آبی، اگر درصد تخلف بازار از آب قابل برداشت فصلی را در نظر بگیریم و فقط عدم قطعیت خطای پایش بازار در نظر گرفته شود آنگاه می‌توان برای حق‌آبه مجاز فصلی به‌جای یک میزان مطلق، یک بازه بر اساس درصد خطای پایش در نظر گرفت. با آگاهی از اینکه الگوریتم پایش ممکن است برداشت‌ها را X درصد بیشتر و یا X درصد کمتر از واقعیت برآورد کند، انتظار می‌رود مدیر بازار میزان حق‌آبه‌ی مجاز در هر فصل را نیز با اعمال این محدوده‌ی تغییرات در میزان امید ریاضی حق‌آبه‌ی مجاز فصلی مورد انتظار بازتاب دهد. بر اساس مفاهیم بیان شده، مقدار حق‌آبه‌ی مجاز در هر فصل در بازه‌ی مثبت و منفی X درصد از مقدار امید ریاضی مورد انتظار ممکن است متغیر باشد. این مهم منشأ ایجاد عدم قطعیت است و در نتیجه در شرایط عدم قطعیت مذکور، مدیر بازار باید با اتخاذ استراتژی پایدار و مؤثر با استفاده از روش‌های تحلیل عدم قطعیت غیراحتمالاتی، مقدار نهایی حق‌آبه‌ی مجاز فصلی را در بازه‌ی عدم قطعیت مذکور به عنوان یک استراتژی استوار تشخیص دهد.

همان‌گونه که بیان شد، بر اساس عدم قطعیت حاصل از خطای الگوریتم پایش، میزان حق‌آبه‌ی مجاز در هر فصل به صورت بازه‌ای است که مقادیر X درصد بیشتر یا کمتر از میزان

چهار دوره‌ی مزایده (معادل چهار فصل آبیاری محصول در یک سال آبی) تعیین می‌شود. همان‌گونه که در روابط ۶ و ۷ نشان داده شده است، از مقایسه حق‌آبه‌های بازتوزیع شده و حق‌آبه‌های اولیه، میزان خرید یا فروش هر عامل مشخص می‌شود. در واقع ساز و کار مدل به صورتی است که عوامل با ارائه بسته‌های پیشنهادی قیمت-حجم خود به مدیر بازار، پس از اجرای مدل بهینه‌سازی و تعیین شدن میزان خرید و فروش، معاملات خود را با مدیر بازار انجام می‌دهند.

۴-۲-۲- بررسی تأثیر عدم قطعیت حاصل از خطای الگوریتم پایش در ساز و کار بازار آب زیرزمینی

در یک ساز و کار کارا و مؤثر انتظار می‌رود برداشت‌ها از منابع آب‌های زیرزمینی با دقت مناسبی اندازه‌گیری شوند و تخلف کاربران بازار (تخلف برداشت آب ناحیه بازار محلی از مقدار تعیین شده) در هر فصل مورد پیگرد قرار گیرد. در این راستا اگر میزان دقیق تخلف کاربران در هر فصل مشخص باشد سزاوار است که کاربران بازار در فصل آتی به اندازه‌ی تخلفی که در فصل قبل کرده‌اند، از حق‌آبه مجاز فصل پیش‌رو محروم شوند. با این وجود، پیش از بازگشایی رسمی بازار و پایش برداشت‌ها در انتهای هر فصل مزایده، مدیر بازار بر اساس اطلاعات ارسالی کاربران (بسته‌های پیشنهادی قیمت) برای دوره‌های چهارگانه‌ی مزایده تا پایان سال پیاده‌سازی بازار، ساز و کار بازار را اجرا و برنامه‌ی بازتوزیع حق‌آبه‌های کاربران را تعیین می‌کند و از میزان تخلفی که ممکن است در فصول مزایده جاری و آتی صورت پذیرد هیچگونه اطلاعی ندارد. آنچه در ابتدای دوره‌ی بازگشایی و اجرای مدل بازار برای مدیر بازار روشن است میزان خطای الگوریتم پایش در برآورد تخلف یا عدم تخلف بازار است. بنابراین در تحلیل عدم قطعیت صورت گرفته در این بخش فرض می‌شود که مدیر بازار در نقطه‌ی شروع فصل اول مزایده بدون اطلاع از تخلف‌هایی که محتمل است صورت بگیرد و با در نظر گرفتن عدم قطعیت حاصل از خطای الگوریتم پایش، به تعیین برنامه‌ی بازتوزیع حق‌آبه‌ها در چهار فصل مزایده‌ی بازار می‌پردازد.

امید ریاضی حق‌آبه‌ی مجاز مورد انتظار را در بر می‌گیرد. از آنجایی‌که توزیع احتمالاتی این متغیرها در بازه مذکور مشخص نیست و در نتیجه برازش این عدم قطعیت به پارامترهای خروجی بازار با محدودیت مواجه است، بنابراین برای تحلیل عدم قطعیت الگوریتم پایش می‌توان از روش‌های غیراحتمالاتی بهره برد و به تصمیمی پایدار و استوار رسید. در این راستا با در نظر گرفتن عدم قطعیت خطای الگوریتم پایش در چهار فصل مزایده به تعیین سیاست پایدار بازار آب‌زیرزمینی در سال مبنا اجراء بازار پرداخته می‌شود.

با توجه به توضیحات داده شده، پارامتر حق‌آبه‌ی مجاز در هر فصل مزایده بر اساس خطای الگوریتم پایش به صورت یک بازه در مدل در نظر گرفته می‌شود. در ادامه قرار است با استفاده از روش تحلیل عدم قطعیت غیر احتمالاتی تصمیم‌گیری استوار (RDM)^۱، به تعیین پایدارترین سیاست بازتوزیع حق‌آبه با توجه به عدم قطعیت‌های عمیق موجود پرداخته شود. تئوری تصمیم‌گیری استوار بر این پایه است که به جای پیش‌بینی دقیق آینده، راه رسیدن به آینده‌ی مطلوب را در مقابل تصمیم‌گیر قرار می‌دهد (Lempert et al. [14]). به بیان دیگر، به جای تلاش برای پیش‌بینی دقیق پارامترهای مسئله در آینده، این پارامترها در قالب یکسری گزینه‌های کنش^۲ به گونه‌ای در مدل انتخاب می‌شوند که هدف مسئله در آینده به شکل مطلوبی به دست آید. تعیین پارامترهای مذکور نه بر اساس پیش‌بینی آن‌ها در آینده است و نه بر اساس تعیین مقادیر بهینه‌ی آن‌ها است، بلکه بر این اساس است که تعیین ترکیب‌های مناسبی از این پارامترها به عنوان استراتژی‌های مختلف منجر به تعیین سناریوهایی با پایداری زیاد و آسیب‌پذیری کم در مدل تصمیم‌گیری مورد نظر شود.

مراحل روش تصمیم‌گیری استوار در این تحقیق به این قرار است: (۱) تعیین پارامترها و استراتژی‌های مسئله. در این مرحله ترکیب‌های مختلف و محتمل از مقادیر پارامترهای مسئله به عنوان کنش‌های مختلف از سوی تصمیم‌ساز تعیین می‌شوند.

(۲) انتخاب معیارهای مناسب برای ارزیابی هر یک از کنش‌های مورد نظر در مرحله قبل. در این مرحله پس از انتخاب معیارهای مذکور، اطلاعات ورودی حاصل از کنش‌های مورد نظر به عنوان یک استراتژی وارد مدل شبیه‌سازی-بهینه سازی می‌شوند و بر اساس معیارها و اهداف مورد نظر، میزان مطلوبیت استراتژی مورد نظر یا شکست یا پیروزی آن تعیین می‌شود. (۳) تعیین محدوده پایدار و آسیب‌پذیر استراتژی‌ها و تعیین سناریوی برتر. در این مرحله با نمایش میزان کارایی هر استراتژی بر اساس معیارهای مختلف، می‌توان محدوده آسیب‌پذیری یا محدوده مطلوب و استوار استراتژی‌های مورد نظر را به عنوان یک یا چند سناریوی برتر مد نظر قرار داد و در نهایت یک محدوده را با بیشترین کارایی و عملکرد مناسب به عنوان سناریوی برتر برگزید.

در روش‌شناسی پیشنهادی، بر اساس مراحل مختلف روش تصمیم‌گیری پایدار که در فلوچارت شکل (۳) نیز به آن اشاره شده است، (۱) پارامترها (متغیرها) و اهداف مسئله تعیین می‌شوند. در این بخش، پارامترهای مسئله، حق‌آبه‌ی مجاز در چهار فصل مزایده (حق‌آبه‌ی اولیه‌ی فصلی) به عنوان چهار پارامتر دارای عدم قطعیت در نظر گرفته می‌شوند. در بازه‌ی تعیین شده برای پارامترهای مورد نظر، ترکیب‌های مختلفی به عنوان استراتژی‌های مختلف در مقابل عدم قطعیت پیش‌آمده در نظر گرفته می‌شود. در حقیقت برای بدست آوردن این استراتژی‌ها، در بازه‌ی مثبت و منفی X درصد به ترتیب بیشتر و کمتر از مقادیر امید ریاضی حق‌آبه‌ی مجاز فصلی (مقادیر مورد انتظار در سال اجرای بازار)، ۵۰۰ ترکیب چهارتایی مختلف از مقادیر این پارامتر در فصل‌های یک تا چهار در نظر گرفته می‌شوند. همچنین اهداف و معیارهای خروجی سازوکار بازار آب‌زیرزمینی پیشنهادی عبارت‌اند از مجموع سود مازاد کشاورزان حاصل از ورود به بازار (سوددهی بازار)، مجموع میزان آب مصرف شده در کل دوره‌ی اجرای بازار و حاصل تقسیم تراز آب در دو حالت پیش و پس از اجرای بازار در نقطه‌ی کنترل آبخوان در محدوده‌ی بازار در انتهای دوره. (۲) در این مرحله، هر کدام از استراتژی‌های تعیین شده در مرحله‌ی قبل، که از

1 Robust Decision Making

2 Alternative actions

روش K-means می‌توان محدوده‌ای از مقادیر پارامترها را به عنوان سناریوی برتر و استوار تعیین کرد.

۳- یافته‌های تحقیق

بر اساس پژوهش Sharghi and Kerachian [11] پهنه‌بندی نهایی باغات ناحیه‌ی نوق در قالب ۹ کلاس بر اساس معیارهای مؤثر در بهره‌وری تولیدی کاربران و شرکت و رقابت آن‌ها در بازار آب محاسبه شده است (شکل ۴).

ترکیب مقادیر مختلف پارامترهای مورد نظر به دست آمده‌اند، وارد مدل بازار آب فصلی می‌شوند و بعد از اجرای ساز و کار بازار، مقادیر معیارهای معرفی شده (مجموع آب مصرفی بازار در سال، مجموعه سوددهی بازار و نسبت تراز آبخوان در انتهای سال اجراء) در انتهای دوره‌ی اجرای بازار محاسبه می‌شوند. (۳) با تعیین استراتژی‌های مذکور و رسم نمودار مقادیر معیارهای مورد نظر برای هر کدام از استراتژی‌ها و خوشه‌بندی آن‌ها با

شکل ۳. مراحل روش تصمیم‌گیری استوار برای در نظر گرفتن عدم قطعیت الگوریتم پایش تبخیر-تعرق در ساز و کار بازار

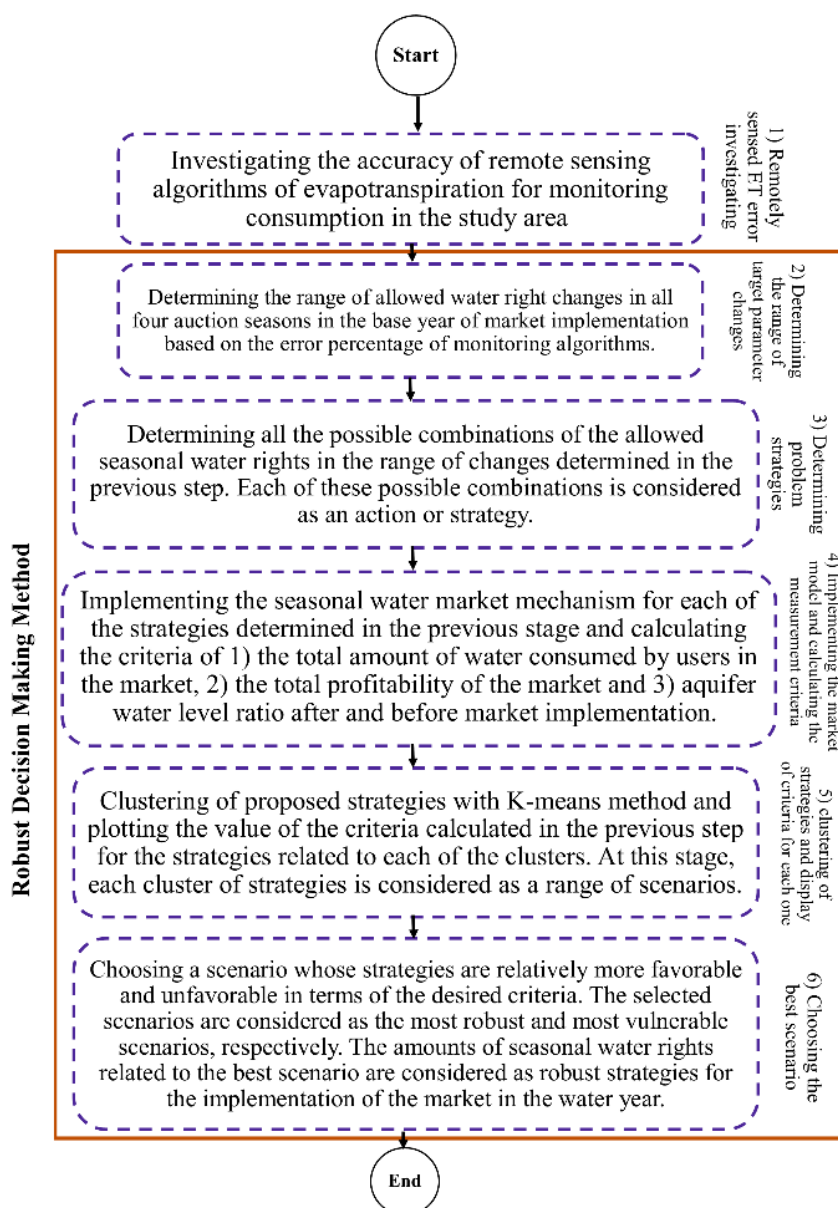


Fig. 3. The main steps of the robust decision-making method to consider the uncertainty of the evapotranspiration monitoring algorithm in the market mechanism

تنوع در خریداران و فروشندگان (تنوع در پارامترهای مذکور) تعیین نمود و سازوکار بازار را در آن ناحیه پیاده‌سازی کرد. بر این اساس، نقشه پهنه بندی بهره‌وری باغات به همراه pH و EC آبخوان ناحیه مطالعاتی تهیه و در نرم‌افزار GIS بر هم نهی شدند تا ناحیه مناسب برای بازار آب تعیین شود.

این ناحیه پایلوت دارای ۲۰ کاربر (۲۰ چاه بهره‌برداری) است که مشخصات آن‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است و با توجه به تنوع بهره‌وری تولید در آن، کاربران آن بطور بالقوه تمایل دارند وارد بازار تبادلات آب شوند.

در پژوهش مذکور، عوامل مؤثر در شرکت کشاورزان در بازار آب غیر رسمی و ایجاد رقابت کامل در بازار آب‌زیرزمینی در دشت رفسنجان، pH آب زیرزمینی، بهره‌وری باغ و EC آب‌زیرزمینی معرفی شدند. بر اساس این پژوهش، با بیشتر شدن pH و کمتر شدن EC آب‌زیرزمینی و همچنین بیشتر شدن بهره‌وری باغ در دشت رفسنجان، تمایل کشاورزان برای خرید آب بیشتر می‌شود. عکس همین موضوع نیز برای فروش آب صادق است. بر اساس این موضوع می‌توان محدوده‌ای از کاربران را به عنوان یک ناحیه‌ی بازار آب محلی با بیشترین

شکل ۴. محدوده تعیین شده برای بازار آب‌زیرزمینی محلی پایلوت و تعیین محدوده کاربران آن

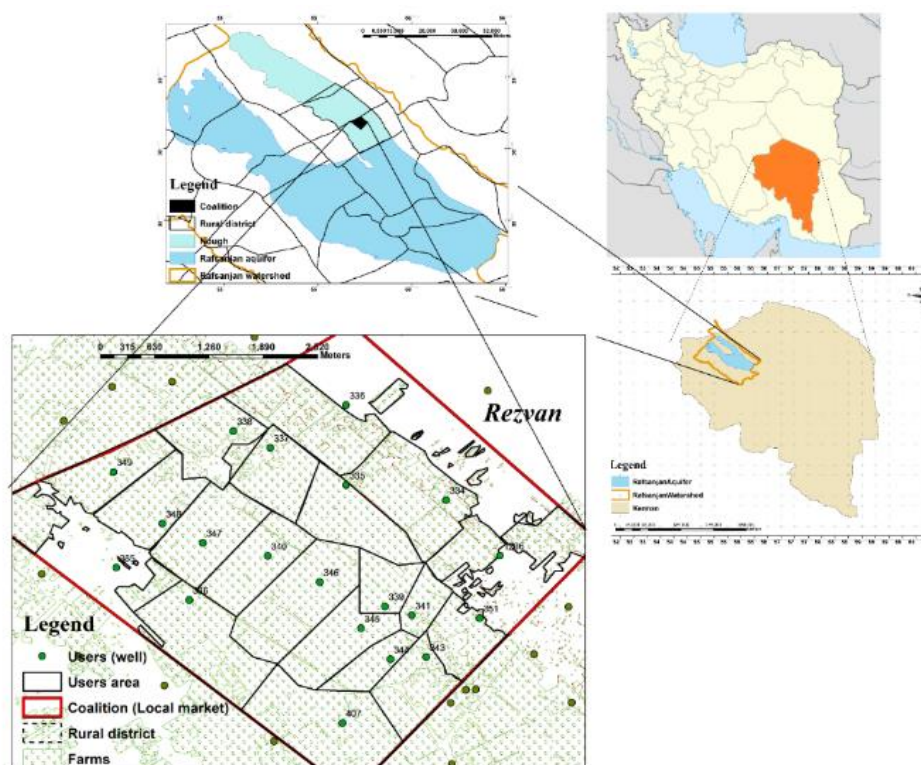


Fig. 4. The pilot location of groundwater market and its users

جدول ۱. ویژگی‌های مهم کاربران بازار آب‌زیرزمینی محلی نمونه

EC ($\mu\text{Si/cm}$)	Depth to GW (m)	Area (hectare)	Well ID	User number
4079	95	120.02	407	1
4297	95	30.00	344	2
4349	105	55.43	343	3
4364	105	62.99	345	4
4451	100	24.16	341	5
4493	105	33.22	339	6
4573	95	43.82	351	7

4987	130	74.96	1236	8
5099	105	100.48	334	9
4453	100	99.07	346	10
4441	105	63.56	340	11
4803	95	69.94	335	12
4378	105	95.94	386	13
4363	105	75.88	347	14
4391	110	52.55	385	15
4321	105	62.24	348	16
4525	105	63.39	337	17
4919	105	95.73	336	18
4418	95	71.00	338	19
4251	105	56.37	349	20

Table 1. Users' characteristics of the regional groundwater market

دوره‌های رشد گیاه) طبق روابط معرفی شده در پژوهش Sharghi and Kerachian [11] تعیین می‌شوند. توزیع درون‌سالی تولید محصول پسته و آورد اقتصادی کشاورزان را می‌توان بر اساس ارزیابی نتایج بدست آمده از رژیم‌های مختلف آبیاری با در نظر گرفتن کم‌آبیاری تنظیم شده^۱ در دوره‌های مختلف رشد محصول و میزان محصول دهی نهایی استخراج نمود. شکل (۵) به عنوان نمونه بسته پیشنهادی تخمین زده شده برای کاربر ۱ را به منظور ورودی به بازار آب زیرزمینی نشان می‌دهد.

جدول ۲: فصول مختلف مزایده معادل دوره‌های مختلف رشد

درخت پسته (Ferguson and Haviland [15])			
Approximate phenology	Growth stage	Auction interval	Month
Boom-Leaf out	Stage I	Trading season 1	Apr
Shell expansion			May
Shell hardening	Stage II	Trading season 2	Jun
Nut filling	Stage III	Trading season 3	Jul
Nut filling			Aug
Shell splitting-Hull slip			Sep
Harvest	Stage IV	Trading season 4	Oct
Post-harvest			Nov

Table 2. Auction seasons equivalent to different pistachio growth stages .

در مرحله بعد، ضریب تعدیل پروانه‌های کاربران در راستای برداشت پایدار از آبخوان محاسبه می‌شود. برای این منظور از مدل شبیه‌سازی آب زیرزمینی منطقه مطالعاتی پرداخته می‌شود بر اساس پژوهش Sharghi and Kerachian [11] استفاده می‌شود. بر اساس این مدل با کاهش ۳۰ درصدی پروانه‌های برداشت آب کاربران از منابع آب‌های زیرزمینی دشت رفسنجان، تغییرات تراز آبخوان به حالت تعادل خواهد رسید بنابراین می‌توان از ضریب تعدیل ۰/۷ برای تعیین حق‌آبه فصلی و سالانه کاربران در بازار آب زیرزمینی استفاده نمود و هر سال برای تغییر این ضریب تعدیل بر اساس تغییرات شرایط مرزی و پیش‌بینی بلند مدت بارش اهتمام ورزید.

از سوی دیگر، دوره‌های مزایده بازار آب زیرزمینی با توجه به دوره‌های مختلف رشد و آبیاری درخت پسته بر اساس جدول (۲) که دوره‌های مختلف رشد گیاه را نشان می‌دهد انتخاب می‌شود. بنابراین مدیر بازار برای این بازه‌ها به اجرای مدل بازار آب زیرزمینی هوشمند می‌پردازد و با توجه به حق‌آبه اولیه تعیین شده برای کاربران، در این دوره‌ها، به بازتوزیع حق‌آبه‌ها می‌پردازد.

در قسمت بعد، به منظور شبیه‌سازی رفتار کشاورزان در ارائه بسته‌های قیمت-حجم آب در بازار آب زیرزمینی و محاسبه سود نهایی کاربران پیش و پس از ورود به بازار آب، توابع فصلی تولید برای درخت پسته در هر دوره‌ی مزایده (یا همان

¹ Regulated deficit irrigation

شکل ۵. بسته‌ی پیشنهادی حجم-قیمت ارسال شده توسط کاربر

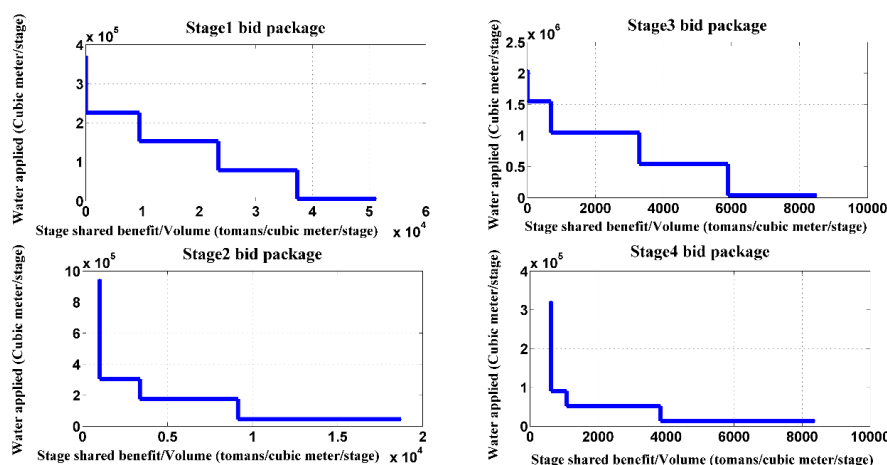


Fig. 5. A user's submitted bid packages

اعمال می‌شود. در نهایت حق‌آبه‌ی اولیه کاربران پس از اعمال این ضریب تعدیل محاسبه و به مدل بازار آب‌زیرزمینی معرفی می‌شود. با اجرای ساز و کار مورد نظر به صورت بهنگام^۱ می‌توان قیمت و حجم خرید و فروش حق‌آبه‌ها را با رعایت قیود محیط‌زیستی برآورد کرد و به کاربران ارائه داد. بعد از اجرای مدل بهینه‌سازی ساز و کار ارائه شده برای بازار آب زیرزمینی هوشمند، برنامه‌ی تبادلاتی آب در هر دوره‌ی مزایده در سال پایه اجرای ساز و کار مورد نظر (سال ۲۰۲۰) بر اساس بازتوزیع نهایی بدست آمده حق‌آبه‌ها برای کاربران به همراه قیمت تبادلاتی آب بدست می‌آید (جدول ۴). قیمت تبادلات برای همه کاربران در دوره‌ی اول تا چهارم به ترتیب ۹۱۲۶، ۵۸۸۵ و ۳۸۳۲ (تومان بر مترمکعب) به عنوان خروجی مدل بهینه‌سازی (قیمت سایه‌ای) محاسبه شده است. همانطور که پیداست، به دلیل نیاز آبی کم گیاه در زمان برداشت و پس از برداشت محصول (دوره‌ی رشد چهارم) و نیاز آبی زیاد گیاه در دوره‌ی اول، قیمت تبادلاتی آب به‌ترتیب به کمترین و بیشترین حد خود رسیده است. شایان ذکر است که به دلیل اینکه ویژگی‌های کاربران از نظر کیفیت آب‌زیرزمینی در دسترس، مساحت باغ و ... تفاوت قابل توجهی با هم ندارند و همچنین اصلاح پروانه کاربران پیش از ورود به بازار از ایجاد افت موضعی در نقطه کنترل آبخوان جلوگیری می‌کند بنابراین قیمت تبادلات برای همه کاربران یکسان به دست آمده است

با توجه به اینکه کاربران مجاز نیستند تمام حق‌آبه‌ی خود را خرید و فروش کنند بنابراین برای حق‌آبه‌ی نهایی کاربران یک کران پایین در نظر گرفته شده است بطوری‌که بلوک‌های اولیه‌ی نمودارهای پیشنهادی که معمولاً قیمت قابل توجهی دارند در محدوده کمترین حق‌آبه‌ی کاربران قرار گرفته و مورد مبادله قرار نمی‌گیرند.

پس از انتخاب ضریب تعدیل پروانه‌ها (کاهش ۳۰ درصد از دبی مجاز پروانه‌ی کاربران) برای پیاده‌سازی سازوکار بازار آب‌زیرزمینی در سال آبی جاری لازم است بر اساس مقیاس زمانی انجام تبادلات به تعیین حق‌آبه‌ی اولیه‌ی فصلی (مربوط به هر فصل مزایده) هر کدام از کاربران و در نتیجه برداشت مجاز فصلی و آب در دسترس سالانه‌ی ناحیه‌ی مربوط به محدوده‌ی مورد نظر پرداخت. در این راستا پس از تعدیل پروانه‌های موجود بر حسب مترمکعب بر روز برای همه کاربران بازار آب محلی مورد نظر و سپس تبدیل آن به مقیاس فصلی و سالانه، حق‌آبه‌های تعدیل یافته در سال پایه (۲۰۲۰) معادل جدول (۳) خواهد شد. تعدیل پروانه‌ها بر اساس نتایج حاصل از اجرای مدل آب‌زیرزمینی صورت می‌گیرد به طوری که با اعمال ضرایب کاهنده مختلف در نرخ موجود برداشت کاربران از چاه‌ها، میزان هیدروگراف تراز آب‌زیرزمینی محاسبه می‌شود و ضریبی که موجب پایدار شدن سطح آبخوان شود به عنوان ضریب تعدیل منتخب به پروانه‌های موجود کاربران (چاه‌ها)

¹ Real time

جدول ۳. حق آبه‌ی اولیه کاربران هنگام ورود به بازار آب زیرزمینی در فصول مختلف مزایده (مترمکعب)

Well ID	User number	Current water right	Initial water rights (based on adjusted entitlements)			
		Annual	Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 4
407	1	385759	123255	48963	101494	23026
344	2	545708	174361	69265	143576	32574
343	3	249332	79665	31647	65600	14883
345	4	270502	86429	34334	71169	16147
341	5	733883	234485	93149	193086	43806
339	6	743292	237491	94343	195561	44368
351	7	635091	202920	80610	167093	37909
1236	8	413985	132274	52546	108920	24711
334	9	710362	226970	90163	186897	42402
346	10	286967	91690	36424	75501	17129
340	11	270502	86429	34334	71169	16147
335	12	541004	172858	68668	142339	32293
386	13	362237	115739	45977	95305	21622
347	14	338715	108224	42992	89116	20218
385	15	425746	136031	54038	112014	25413
348	16	272854	87180	34632	71788	16287
337	17	357533	114236	45380	94067	21342
336	18	404577	129267	51351	106445	24150
338	19	395168	126261	50157	103969	23588
349	20	493960	157826	62696	129961	29485
Seasonal available water			2823591	1121669	2325072	527503
Annual available water		8837185		6797835		

Table 3. Initial water withdrawal permits of the users in different auction stages

مطالعاتی مورد نظر و پیاده‌سازی ساز و کار پیشنهاد شده، در کنار پایداری محیط‌زیستی ناحیه مطالعاتی، امنیت معیشتی کشاورزان و باغداران را می‌توان به سمت مسیر پایداری سوق داد. همانطور که پیشتر نیز اشاره شد، مهمترین عامل محرک برای تبادلات حق آبه میان کاربران بخش کشاورزی، توزیع نامتناسب پروانه‌های کاربران به نسبت سطح زیر کشت آن‌ها است. شکل (۶) چگونگی توزیع حق آبه‌های سالانه میان کاربران را قبل و بعد از اجرای بازار آب زیرزمینی به ترتیب تحت حق آبه‌های اصلاح شده (حق آبه‌ی اولیه) و بازتوزیع نهایی حق آبه‌ها بر حسب سطح زیر کشت کاربران نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، توزیع حق آبه میان کاربران بعد از ورود به بازار یکنواخت شده و حق آبه‌ی آنان به نسبت میزان سطح زیرکشت محصولاتشان تنظیم شده است. می‌توان گفت که این

در نهایت همانطور که در جدول (۵) نشان داده شده است، با وجود اینکه قیود محیط‌زیستی برای همه‌ی کاربران پس از ورود به بازار آب زیرزمینی رعایت شده است اما سود نهایی بدست آمده توسط کاربران بازار حدود ۲۰ درصد نسبت به عدم مشارکت آن‌ها در بازار فزونی یافته است. همچنین بر اساس جدول (۵)، بهره‌وری آب در تولید محصول بعد از پیاده‌سازی بازار آب زیرزمینی نسبت به شرایط فعلی تقریباً ۲۵ درصد افزایش یافته است در حالی که همه قیود محیط‌زیستی در شرایط پیاده‌سازی بازار در نظر گرفته شده است.

از این موضوع می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که پیاده‌سازی این ساز و کار می‌تواند تا حدی موجب ایجاد انگیزه برای پذیرش اجتماعی قانون تعدیل پروانه‌ها میان کشاورزان شود چرا که در صورت ایجاد ائتلاف‌های محلی در سراسر حوضه‌ی

مهم زیر سایه‌ی ساز و کار بازار آب پیشنهاد شده، سازگاری
بیشتری با مفهوم عدالت در توزیع عادلانه‌ی آب دارد که بهره‌ی
هر کاربر بر اساس میزان بهره‌وری تولید و سطح زیر کشت او
تعیین شود.

جدول ۴. بازتوزیع نهایی بدست آمده برای حق‌آبه‌های کاربران بعد از ورود به بازار آب (مترمکعب)

User number	Stage 1	Stage 2	Stage 3	Stage 4
1	386756	219510	576914	62966
2	59401	54868	144204	15739
3	109756	101380	266445	29081
4	124727	54815	134342	33047
5	47828	9125	7300	12672
6	65774	12549	10040	17427
7	86764	16554	13243	5064
8	148419	28318	22654	8662
9	198950	37959	30367	11611
10	196151	37425	29940	51972
11	125856	24013	19210	33346
12	138477	26421	21137	8082
13	189965	36245	28996	50333
14	150250	138783	364748	39810
15	104057	19854	15883	27571
16	123232	113827	299159	32651
17	125503	23946	19157	12213
18	189542	36164	28931	11062
19	140574	26821	21457	34623
20	111610	103092	270945	29572
Seasonal reallocated water	2823591	1121669	2325072	527503
Annual reallocated water	6797835			

Table 4. Final groundwater right redistribution after entering water market (cubic meter)

جدول ۵. سود نهایی کاربران در شرایط مختلف در ساز و کار بازار آب پیشنهادی

User number	Status que (tomans/year)	Pre-market condition (tomans/year)	Post market condition (tomans/year)
1	5.53E+09	4.53E+09	7.47E+09
2	4.66E+09	3.82E+09	4.53E+09
3	4.55E+09	3.73E+09	3.86E+09
4	5.17E+09	4.24E+09	4.31E+09
5	3.99E+09	3.27E+09	5.40E+09
6	5.49E+09	4.50E+09	5.84E+09
7	5.37E+09	4.40E+09	5.65E+09
8	6.12E+09	5.02E+09	5.66E+09
9	1.03E+10	8.45E+09	8.50E+09
10	3.70E+09	3.03E+09	5.95E+09
11	5.21E+09	4.27E+09	4.33E+09
12	7.34E+09	6.02E+09	6.20E+09
13	4.40E+09	3.61E+09	6.27E+09
14	6.22E+09	5.10E+09	5.27E+09
15	5.55E+09	4.55E+09	4.79E+09

16	5.11E+09	4.19E+09	4.30E+09
17	5.20E+09	4.26E+09	4.84E+09
18	7.82E+09	6.41E+09	6.49E+09
19	5.82E+09	4.77E+09	5.40E+09
20	5.95E+09	4.88E+09	5.36E+09
Total benefit (tomans/year)			
	1.14E+11	9.30E+10	1.10E+11
Consumed water from aquifer (Cubic meter/year)			
	8837185	6797835	6797835
Water productivity (tomans/cubic meter)			
	12900	13680	16200

Table 5. Final users' benefits in the different conditions

شکل ۶. توزیع حق آبه‌های سالانه آب زیرزمینی میان کاربران قبل و بعد از ورود به ساز و کار بازار آب زیرزمینی فصلی

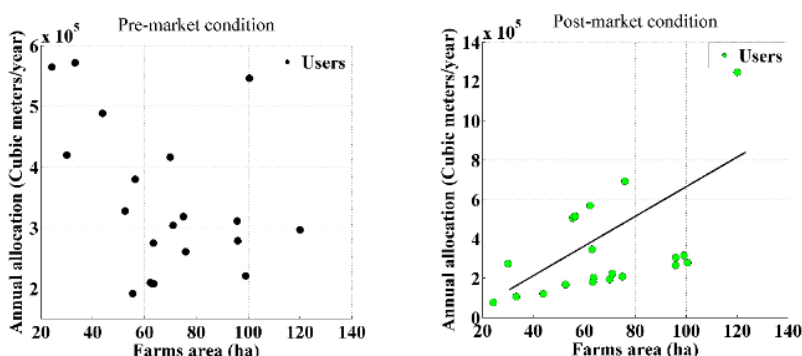


Fig. 6. Distribution of annual groundwater rights among users before and after implementing seasonal groundwater market

برای سهولت در تحلیل کارایی استراتژی‌ها و تعیین محدوده اقدامات مربوط به سناریوی پایدار، استراتژی‌های مورد نظر با استفاده از جعبه‌ابزار K-means در نرم‌افزار MATLAB خوشه‌بندی و به ۱۰ خوشه تقسیم شده‌اند. هر خوشه را می‌توان به عنوان یک سناریو در نظر گرفت و در نهایت پایدارترین سناریو که شامل محدوده‌ای از اقدامات و استراتژی‌های مختلف در قالب انتخاب مقادیر مطلوب حق آبه‌ی مجاز فصلی است را انتخاب نمود. شکل‌های (۷ و ۸) مقادیر مربوط به معیارهای ارزیابی برای استراتژی‌ها و خوشه‌های مختلف آن‌ها را نشان می‌دهد. بر اساس معیارهای ارزیابی مورد نظر، پایدارترین و آسیب‌پذیرترین آن‌ها تعیین کرد. همانطور که اشاره شد اگرچه در این مرحله، برنامه بازتوزیع حق آبه‌ها در بازار برای فصل اول مد نظر است، معیارهای کارایی و برنامه‌ی بازتوزیع حق آبه‌ها بر اساس اجرای مدل بازار تا پایان سال پایه‌ی مورد نظر محاسبه می‌شوند.

بر اساس پژوهش [16] Safari et al.، مدل دور سنجی تبخیر-تعرق متریک با خطای نسبی ۱۵ درصدی (براساس راستی‌آزمایی نتایج حاصل از مدل متریک و داده‌های لایسومتر موجود در منطقه) می‌تواند به شکل مطلوبی به تخمین میزان تبخیر-تعرق روزانه بپردازد. همانطور که در بخش مواد و روش‌ها بیان شد، برای در نظر گرفتن عدم قطعیت حاصل از خطای الگوریتم پایش بازار (الگوریتم دورسنجی تبخیر و تعرق) و تعیین سیاست بازتوزیع پایدار حق آبه‌ها لازم است بازه‌ی تغییرات حق آبه‌ی مجاز هر فصل مزایده را بر اساس خطای ۱۵ درصدی الگوریتم پایش بازار تعیین نمود و به تحلیل عدم قطعیت مدل با استفاده از روش غیر احتمالاتی تصمیم‌گیری استوار (RDM) پرداخت.

نتایج حاصل از اجرای ساز و کار بازار آب زیرزمینی فصلی برای یک سال و همچنین خروجی مدل برنامه‌ریزی استوار مبتنی بر عدم قطعیت در ادامه ارائه و تحلیل شده است.

شکل ۷. معیارهای مجموعه آب مصرفی و نسبت تراز آب زیرزمینی برای استراتژی‌ها و خوشه سناریوهای مختلف

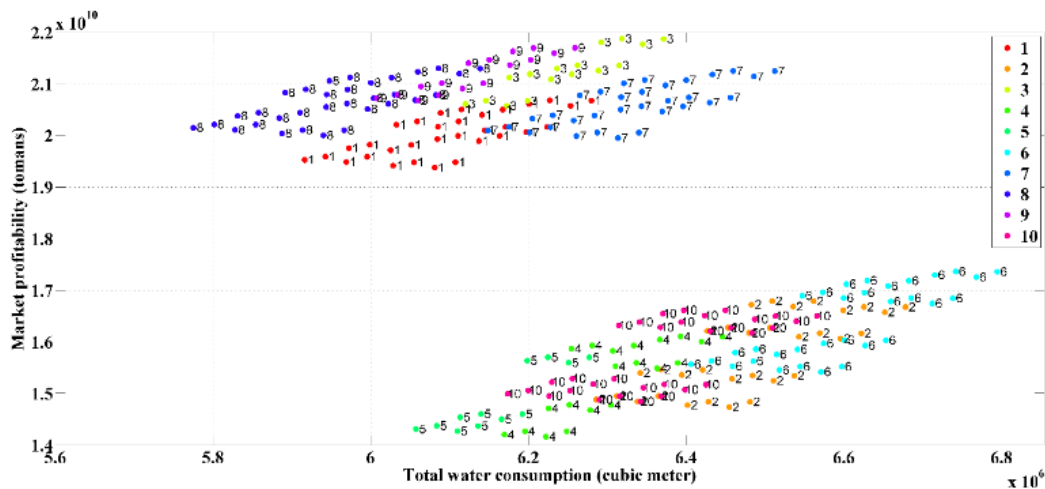


Fig. 7. The values of consumed water and the groundwater level ratio for different strategies and clusters of scenarios

شکل ۸. معیارهای سنجش پایداری برای استراتژی‌ها و خوشه سناریوهای مختلف

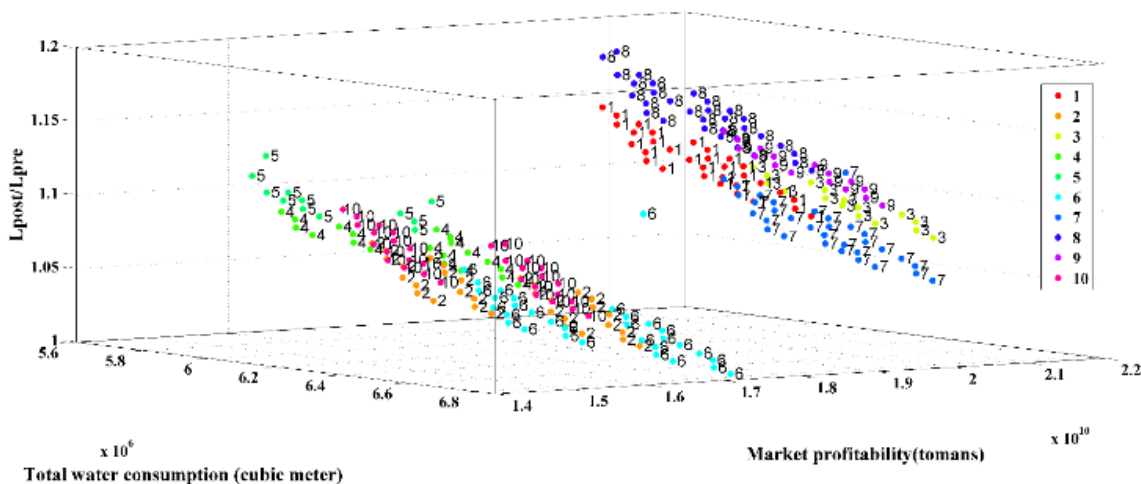


Fig. 8. Sustainability criteria for different strategies and cluster of scenarios

۶) به ترتیب به عنوان پایدارترین و ناپایدارترین سناریو می‌توانند انتخاب شوند. در سناریوی ۸ بطور نسبی با استراتژی‌هایی روبرو هستیم که دارای پارامتر آب مصرفی بطور نسبی اندک و سوددهی بازار و نسبت تراز آبخوان بالایی هستند. در مقابل در سناریوی ۶ که می‌تواند نشان‌دهنده محدوده‌ی نامطلوب استراتژی‌ها باشد، میزان آب مصرفی به نسبت زیاد و سوددهی بازار و نسبت تراز به نسبت سایر سناریوها در محدوده مقادیر اندکی قرار دارد.

بر اساس نتایج بدست آمده، با وجود کنترل تراز آبخوان در نقطه کنترل آبخوان، در همه استراتژی‌های استخراج شده، سوددهی بازار پس از اجرای ساز و کار مثبت است و با توجه به مقادیر بالاتر از ۱ پارامتر نسبت تراز، تراز آبخوان پس از بازتوزیع حق‌آبه‌ها نیز افزایش یافته است. با این وجود می‌توان در شرایط وجود عدم قطعیت حاصل از خطای الگوریتم پایش، محدوده‌ی مطلوب استراتژی‌های مورد نظر را به عنوان سناریو یا سناریوهای پایدار انتخاب کرد. بر این پایه با توجه به شکل-های (۷ و ۸) سناریوی ۸ (خوشه‌ی ۸) و سناریوی ۶ (خوشه‌ی

همانطور که اشاره شد، بهترین و بدترین سناریوهای منتخب شامل مجموعه‌ای از استراتژی‌هایی هستند که هر کدام از آن‌ها به عنوان یک تصمیم شامل مقادیر حق‌آبه‌ی مجاز برای چهار فصل مزایده در سال اجرای بازار در نظر گرفته شده‌اند. با انتخاب حق‌آبه‌ی مجاز فصلی در محدوده‌ی استراتژی‌های مرتبط با بهترین سناریو (سناریوی ۸) می‌توان به سیاست پایدار بازتوزیع فصلی حق‌آبه‌های زیرزمینی در سال اجرای بازار در شرایط عدم قطعیت الگوریتم پایش بازار دست یافت.

در تحلیل عدم قطعیت خطای پایش در این بخش فرض شده است که بازار ابتدای هر فصل مزایده تا انتهای سال مورد نظر اجرا شده و پایان هر فصل میزان برداشت کل محدوده بازار آب زیرزمینی محلی با استفاده از الگوریتم پایش اندازه‌گیری می‌شود و حاجتی بر اندازه‌گیری میزان برداشت هر کاربر در محدوده مزرعه خود نیست. بنابراین تأثیر خطای پایش متوجه میزان آب مصرفی کل بازار در فصول مورد نظر است نه یکایک کاربران. بر این پایه، حق‌آبه‌ی مجاز کل محدوده بازار در چهار فصل مزایده به عنوان پارامتر مورد هدف در روش تحلیل عدم قطعیت استوار در تولید استراتژی‌ها، مورد بررسی قرار گرفت. این در حالی است که پایش برداشت هر کاربر به‌طور مجزا در ساز و کار مورد نظر مد نظر است و تحلیل عدم قطعیت مورد نظر می‌توانست بر اساس خطای پایش برداشت یکایک کاربران صورت پذیرد چراکه سهم هر کاربر در وقوع تخلف کل بازار متفاوت است. بر این پایه، این مهم به عنوان پیشنهاد برای پژوهش‌های آینده مطرح می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به پیشنهاد و ارزیابی ساز و کار فصلی برای بازارهای آب زیرزمینی با در نظر گرفتن عدم قطعیت موجود در ابزار پایش مصرف خالص آب در بازار پرداخته شد. انگیزه عمده تشکیل بازار آب زیرزمینی کشاورزی در این تحقیق، توزیع نامتناسب تخصیص منابع آب زیرزمینی به نسبت سطح زیر کشت کاربران و تفاوت کاربران از نظر عوامل تأثیرگذار بر تولید محصول همچون کیفیت آب زیرزمینی معرفی شد. در این

ساز و کار به تخمین ضریب تعدیل پروانه برداشت آب کاربران، تخمین توابع تولید فصلی با در نظر گرفتن مفهوم کم‌آبیاری تنظیم شده، تعیین برنامه مناسب برای برگزاری مزایده‌های فصلی با در نظر گرفتن دوره‌های مختلف رشد گیاه، تعیین محدوده مناسب برای تشکیل بازار آب محلی و پیاده‌سازی ساز و کار تبادلات حق‌آبه در قالب بازار آب زیرزمینی محلی پرداخته شد. نتایج حاصل از اجرای این ساز و کار نشان‌دهنده افزایش ۲۵ درصدی بهره‌وری مصرف آب نسبت به شرایط پیش از اجرای بازار آب بود. همچنین در این ساز و کار سود کاربران (نسبت به شرایطی که در بازار آب مشارکت نمی‌کردند) و همچنین بهره‌وری مصرف آب تا ۲۵ درصد افزایش یافت و توزیع حق‌آبه‌ها متناسب با سطح زیر کشت کاربران صورت پذیرفت. در عین حال همه‌ی قیود محیط‌زیستی در ساز و کارهای پیشنهادی رعایت شدند. از سوی دیگر با توجه به ضرورت پایش مصارف در بازار آب با استفاده روش تصمیم‌گیری استوار، تحلیل عدم قطعیت حاصل از خطای الگوریتم پایش در مدل بازار آب زیرزمینی محلی فصلی صورت گرفت.

در نهایت شایان ذکر است که در پیاده‌سازی بازار آب کارا و مؤثر باید به مجموعه مسائل و مؤلفه‌های اجتماعی، اقتصادی، حقوقی، قانونی، اداری و ... توجه شود. عدم در نظر گرفتن هر کدام از این مؤلفه‌ها موجب می‌شود بازار آب کارکرد مطلوبی در مدیریت اقتصادی و محیط‌زیستی ناحیه اجرای بازار نداشته باشد. در این پژوهش با مدلسازی آبخوان محدوده مطالعاتی و تعیین اثر کاربران بر پاسخ آبخوان و مدلسازی ساز و کار مبادلات و قیمت‌گذاری حق‌آبه‌های کاربران بازار آب زیرزمینی فقط به بررسی جنبه‌های اقتصادی و محیط‌زیستی بازار آب پرداخته شده است. بنابراین در پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود به بررسی جامع ساز و کار بازار آب زیرزمین از منظرهای اجتماعی، حقوقی، قانونی و ساختار اجرایی-اداری بازار آب پرداخته شود. یکی دیگر از محدودیت‌های پژوهش حاضر این است که هر چاه به عنوان یک کاربر بازار در نظر گرفته شده است در حالی که در محدوده مطالعه هر چاه به بیش از یک کشاورز اختصاص دارد. در پژوهش‌های آینده می‌توان با

[6] Aghaie, V., Alizadeh, H., & Afshar, A. (2020). Agent-based hydro-economic modelling for analysis of groundwater-based irrigation water market mechanisms. *Agricultural Water Management*, 234, 106140.

[7] Zolfagharipoor, M. A., Ahmadi, A., & Nikouei, A. (2020). Development of Inter-Sectional Water Market Framework for Improving Economic Efficiency of Groundwater Consumption. *Iran-Water Resources Research*, 16(1), 332-346. (In Persian)

[8] Matinju, M. H., & Alizadeh, H. (2021). Hydro-Economic Agent-Based Modelling for Simulation of the Water Market in Mojen. *Iran-Water Resources Research*, 16(4), 127-142. (In Persian)

[9] Zolfagharipoor, M. A., & Ahmadi, A. (2021). Agent-based modeling of participants' behaviors in an inter-sectoral groundwater market. *Journal of Environmental Management*, 299, 113560.

[10] Zolfagharipoor, M. A., Ahmadi, A., & Nikouei, A. (2022). Market-based groundwater resources allocation mechanism: An inter-sectoral water exchanges programming analysis. *Water Resources and Economics*, 100193.

[11] Sharghi, S., & Kerachian, R. (2022). A seasonal smart market mechanism for sustainable groundwater management in agricultural regions. *Sustainable Production and Consumption*, 32, 214-229.

[12] Rahnama, M. (2006), study of the subsidence phenomenon of the Rafsanjan plain. Final report of the project, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman Regional Water Company, Ministry of Energy. (In Persian)

[13] Sharghi, S., & Kerachian, R. (2022). An uncertainty-based smart market model for groundwater management. *Water Supply*, 22(3), 3352-3373.

[14] Lempert, R. J., Popper, S. W., & Bankes, S. C. (2003). *Shaping the Next One Hundred Years: New Methods for Quantitative, Long-term Policy Analysis*. Santa Monica, CA, RAND Corporation, MR-1626-RPC

[15] Ferguson, L., & Haviland, D. (2016). *Pistachio production manual* (Vol. 3545). UCANR Publications.

[16] Safari, S., Sharghi, S., Kerachian, R., & Noory, H. (2023). A market-based mechanism for long-term groundwater management using remotely sensed data. *Journal of Environmental Management*, 332, 117409.

جمع‌آوری اطلاعات صاحبان هر چاه در منطقه، این فرض ساده کننده را رفع نمود.

۵- اعلام تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ نوع تعارض منافع

وجود ندارد.

۶- حمایت مالی

این پژوهش هیچ کمک‌هزینه خاصی از هیچ مؤسسه

سرمایه‌گذار در بخش عمومی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

۷- مراجع

[1] Jaghdani, T. J., & Brümmer, B. (2015). Determinants of water purchases by pistachio producers in an informal groundwater market: A case study from Iran. *Water Policy*, 18(3), 599-618.

[2] Manjunatha, A. V., Speelman, S., Aravindakshan, S., Ts, A. B., & Mal, P. (2016). Impact of informal groundwater markets on efficiency of irrigated farms in India: a bootstrap data envelopment analysis approach. *Irrigation Science*, 34(1), 41-52

[3] Moghaddasi, P., Kerachian, R., & Sharghi, S. (2022). A stakeholder-based framework for improving the resilience of groundwater resources in arid regions. *Journal of Hydrology*, 609, 127737.

[4] Ahmadi, A., Zolfagharipoor, M. A., & Ebrahimi, B. (2019). Challenges and Considerations of Regional Water Market Rights, A Case Study: Isfahan-Borkhar Plain. *Iran-Water Resources Research*, 14(5), 146-159. (In Persian)

[5] Razzaq, A., Qing, P., Abid, M., Anwar, M., & Javed, I. (2019). Can the informal groundwater markets improve water use efficiency and equity? Evidence from a semi-arid region of Pakistan. *Science of The Total Environment*, 666, 849-857

Market-based Groundwater Resources Management Considering the Uncertainty of Water Consumption Monitoring

Sorouh Sharghi¹, Reza Kerachian¹ * and Safoura Safari³

1 Research Assistant (Ph.D.), School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

2 Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

* Corresponding Author (kerachian@ut.ac.ir)

3 PhD Student, Department of Civil and Environment Engineering, University of Maryland, College Park, Maryland, USA.

Abstract

The decline in access to groundwater resources in different regions of the world due to the over-extraction and unsustainable management of these resources has led to significant environmental, economic, and social problems. In this regard, several researches have been carried out on the groundwater markets as a potential solution for aquifer restoration. However, in some cases, water markets have increased the tension on water resources due to the lack of proper water market mechanisms and monitoring of water withdrawals. The main purpose of this paper is to propose and evaluate a mechanism for the groundwater market to redistribute the water rights of groundwater resources and determine the exchange price in the market, taking into account the existing uncertainties. Therefore, proposing an efficient and effective groundwater market mechanism, encompassing the institutional, economic, social, and environmental components, is of great importance. In this article, proposing and evaluating the mechanism of the smart water market, a model has been presented for the management of groundwater resources by considering the existing uncertainties. Additionally, it suggests hiring remote sensing tools to estimate evapotranspiration as a novel approach for monitoring water consumption in the groundwater market. In this regard, the uncertainty arising from the error of remotely-sensed evapotranspiration in the results of the groundwater market mechanism has been evaluated using the robust decision-making (RDM) method. Based on the uncertainty resulting from the error of the remote sensing of the evapotranspiration, the amount of allowed water rights in each season has been considered as an interval. Given the unknown probabilistic distribution of variables, non-probabilistic methods are employed to analyze the uncertainty and reach a robust decision. In this regard, considering all possible combinations of seasonal water rights (as different market scenarios) and assessing the decision criteria for each of them, the degree of desirability of these scenarios can be determined. The methodology can be generalized for different study areas, however to evaluate its efficiency, the proposed models and algorithms are assessed using the data of Nough region in Rafsanjan plain, as one of the forbidden plains with high economic value of water in terms of pistachio production. By designing and evaluating groundwater market mechanism, taking into account the economic and social components, sustainable management of groundwater resources is expected to be promoted and farmers' livelihoods to be less affected by water restrictive policies. The results show that the proposed mechanism of the seasonal groundwater market has increased the economic efficiency of water consumption in the study area by 25%. Furthermore, with the implementation of the water market, the redistribution of water rights has a better fit with the users' cultivated area. Finally, the RDM method identifies the best scenario, incorporating allowed water rights for four auction seasons, offering a sustainable policy for seasonal groundwater rights redistribution amid market monitoring uncertainties.

Keywords: Groundwater market, robust decision-making method, remote sensing, evapotranspiration, uncertainty.