اقتصاد کشاورزی و توسعه، سال ۲۷، شمارهٔ ۱۰۷، پاییز ۱۳۹۸

DOI: 10.30490/aead.2020.252687.0

کاربرد روش نامتقارن نش در تعیین میزان برداشت بهینه از سفره‌های آب زیرزمینی دشت جیرفت

ابراهیم محمدی سلیمانی[۱]، مجید احمدیان[۲]، علی کرامت‌زاده[۳]، محسن شوکت فدایی[۴]، ابوالفضل محمودی[۵]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۴/۱۶

چکیده

برنامه‌ریزی برای تولید، جلوگیری از تخلیه زیان‌آور سفره‌های آب زیرزمینی و تعادل‌بخشی بدین منابع طبیعی مستلزم توازن در منابع آب و بهینه‌سازی فعالیت‌های زراعی

۱. نویسندهٔ مسئول و دانشجوی دکتری اقتصاد کشاورزی، دانشگاه پیام نور تهران، ایران.
(emohamadi58@yahoo.com)

۲. استاد گروه اقتصاد، دانشکدهٔ اقتصاد، دانشگاه تهران، ایران.

۳. استادیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران.

۴. دانشیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشگاه پیام نور تهران، ایران.

۵. دانشیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشگاه پیام نور تهران، ایران.

است. برداشت بیش از حد از سفره آب زیرزمینی دشت جیرفت منجر به افت سطح ایستابی آبخوان شده و در صورت تداوم روند فعلی، اقتصاد مبتنی بر کشاورزی منطقه با تهدید جدی مواجه می‌شود. از این‌رو، هدف مطالعهٔ حاضر تعیین میزان برداشت بهینه از منابع آب زیرزمینی دشت جیرفت با در نظر گرفتن همزمان اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی بود. بدین منظور، نخست، محاسبهٔ دو هدف متعارض حداکثرسازی سود کشاورزان و کاهش مخاطرات زیست‌محیطی متناظر با چهارده سناریوی برداشت از منابع آب زیرزمینی در یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی مثبت (اثباتی) (PMP) و با استفاده از نرم افزار GAMS صورت گرفت. سپس، با بهره‌گیری از نظریهٔ بازی‌ها (راه حل نامتقارن نش)، میزان برداشت بهینه از منابع آب زیرزمینی دشت جیرفت و الگوی کشت متناسب با آن تعیین شد. براساس نتایج مطالعه، هرچه میزان اهمیت اهداف زیست‌محیطی بیشتر می‌شود، مقدار برداشت از منابع آب کاهش می‌یابد و در صورت قائل شدن به وزن یکسان برای اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی، میانگین برداشت بهینه از منابع آب زیرزمینی در سال زراعی ۱۳۹۵-۱۳۹۴، ۷۷۳ میلیون مترمکعب می‌شود؛ همچنین، در الگوی کشت متناسب با برداشت بهینه آب، میزان برداشت آب ۹/۸ درصد، سطح زیر کشت موجود ۱۴/۹ درصد و درآمد خالص کشاورزان ۵/۹ درصد در سال کاهش می‌یابد. در نتیجه، پیشنهاد مطالعهٔ حاضر اصلاح الگوی کشت موجود و کاهش حجم برداشت آب از منابع آب زیرزمینی دشت جیرفت با رعایت ملاحظات زیست‌محیطی و منافع بلندمدت جامعه است.

طبقه‌بندی JEL : Q25,D74,C7

کلیدواژه‌ها: آب زیرزمینی، برنامه‌ریزی ریاضی مثبت (اثباتی) (PMP)، نظریهٔ بازی‌ها، جیرفت (دشت).

مقدمه

به‌لحاظ جغرافیایی، استان کرمان در زمینهٔ مسائل آب به‌ویژه آب کشاورزی وضعیت نگران‌کننده و بحرانی دارد. هم‌اکنون ۹۵ درصد آب مورد نیاز بخش کشاورزی استان از سفره‌های آب زیرزمینی تأمین می‌شود، در حالی که این رقم در کل کشور ۵۵ درصد است(۱۲). برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی آبخوان دشت جیرفت موجب افت سطح ایستابی این آبخوان شده است (۲۸). تداوم این روند می‌تواند اقتصاد منطقه را که بر پایه کشاورزی استوار است، مورد تهدید جدی قرار دهد. چنانچه اقدامی جدی و مؤثر در این زمینه صورت نگیرد، این دشت در آینده نه‌تنها با تشدید پیامدهای زیست‌محیطی بلکه با مشکلات اقتصادی و اجتماعی نیز مواجه خواهد شد. این عوامل حاکی از لزوم مدیریت منابع آب زیرزمینی در این منطقه است و باید همکاری‌ها در راستای کاهش استخراج تقویت شده و مقدار استخراج هر بهره‌بردار به مقدار پایدار آن کاهش یابد. هنگامی‌که هیچ مقرراتی برای کشاورزان وجود نداشته باشد، هزینه‌های بیرونی درونی‌سازی نمی‌شوند و باعث می‌شود که میزان پمپاژ از میزان تغذیه طبیعی آبخوان فراتر رفته و منجر به ایجاد آلودگی شود(۵). بهره‌برداران از منابع مشترک ناگزیرند به‌منظور تضمین افزایش سود و بهره‌مندی خود در بلندمدت، میزان بهره‌برداری خویش را در کوتاه‌مدت کاهش دهند (۱۷). اما در بسیاری از موارد، بی‌اعتمادی، مخاطره‌گریزی و کوتاه‌نگری ذی‌نفعان در بهره‌برداری از این نظام‌ها موجب می‌شود که رفتار آنها به‌جای آنکه بر عقلانیت جمعی و تلاش برای بهینه‌سازی سود این نظام و همه ذی‌نفعان در بلندمدت مبتنی باشد، براساس عقلانیت فردی و چشم‌پوشی نکردن از کاهش کوتاه‌مدت مزایایشان استوار شود (۱۸). بنابراین، لزوم تعیین میزان برداشت بهینه از منابع آب زیرزمینی به‌نحوی که هم هدف اقتصادی حداکثرسازی سود مد نظر کشاورزان و هم اهداف کاهش مخاطرات زیست‌محیطی (جلوگیری از افت سطح آب زیرزمینی، جلوگیری از نشست زمین، کاهش استفاده از کود و سموم شیمیایی و ...) مد نظر جامعه تأمین شود، بسیار ضروری است. به دیگر سخن، باید بین افزایش سود اقتصادی که هدف کشاورز است و کاهش اثرات

منفی زیست‌محیطی که هدف جامعه است، تعادل ایجاد شود. نظریهٔ بازی‌ها یک شیوهٔ ریاضی به‌منظور تجزیه و تحلیل مسائلی است که دربرگیرندهٔ موقعیت‌های در تعارض هستند (۳). در زمینه استفاده از نظریه بازی‌ها در حل مسائل مربوط به توزیع منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی تحقیقاتی در خارج و داخل کشور صورت گرفته است که در پی، به پاره‌ای از آنها اشاره می‌شود.

صبوحی و مجرد (۲۵)، با استفاده از نظریه بازی‌ها، به حل تعارض منافع بین دو گروه اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی در حوزه آبریز اترک پرداختند. در این مطالعه، تابع هدف کشاورزان با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی خطی به‌دست آمد و با توجه به سناریوهای مختلف برداشت از آب زیرزمینی نیز تابع عایدی کشاورزان به‌دست آمد؛ برای تعیین تابع هدف زیست‌محیطی، از میزان استخراج آب و ضریب برداشت بیش از حد استفاده شد؛ و در نهایت، بهترین سناریو برای برداشت آب بین ۶۴ تا ۱۱۷ میلیون مترمکعب در سال پیشنهاد شد. صالحی و همکاران (۲۷)، با استفده از رهیافت نظریهٔ بازی‌ها و مدل برنامه‌ریزی خطی، به روش حل تعارض بین کشاورزان در دشت تایباد پرداختند. نتایج نشان داد که با در نظر گرفتن ارزش یکسان برای هر کدام از اهداف زیست‌محیطی و اقتصادی، میزان برداشت بهینه برابر با ۱۳۳ میلیون مترمکعب خواهد بود. پورزند و زیبایی (۲۳)، برای تعیین میزان بهینه برداشت در دشت فیروزآباد، از رهیافت نظریه بازی‌ها استفاده کردند و با بهره‌گیری از مدل برنامه‌ریزی خطی و ضریب برداشت بیش از حد، به تعیین توابع عایدی اقتصادی و زیست‌محیطی و با استفاده از روش حل تعارض و نظریه بازی‌ها نیز به تحلیل مقدار بهینه برداشت از سفره‌های آب زیرزمینی فیروزآباد پرداختند و در صورت یکسانی اهمیت هر کدام از اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی، مقدار بهینه برداشت را برابر با ۱۶۶ میلیون مترمکعب محاسبه کردند. نجفی علمدارلو (۱۹) به کاربرد نظریه بازی‌ها در ارزیابی اقتصادی و زیست‌محیطی استفاده از منابع آب زیرزمینی در الگوی کشت دشت ورامین پرداخته و بدین منظور، برای به‌دست آوردن میزان بهینه برداشت از آب زیرزمینی و الگوی کشت بهینه، از مدل چانه‌زنی نش استفاده کرده است. در این مطالعه،

بهترین میزان برداشت ازآب زیرزمینی ۳۳۳/۱۷ و ۲۲۵/۶۴میلیون مترمکعب برای کشاورزان سنتی و مدرن تعیین شده است. در این مطالعات اغلب از روش برنامه ریزی خطی برای به‌دست آوردن هدف اقتصادی یا عایدی کشاورزان استفاده شده است.

سالازار و همکاران (۲۶)، با استفاده از نظریه بازی‌ها، به حل تعارض در برداشت آب زیرزمینی در مکزیک در قالب دوازده سناریوی برداشت آب پرداختند و در هر کدام از سناریوها، عایدی کشاورزان و میزان خسارات زیست‌محیطی را محاسبه کردند. در این مطالعه، از روش برنامه‌ریزی خطی برای به‌دست آوردن تابع سود کشاورزان استفاده شده و در نهایت، با اعمال وزن‌های مختلف میان صفر و یک به فاصلهٔ ۰/۰۲۵ به هر کدام از دو گروه هدف اقتصادی و زیست‌محیطی، مقادیر بهینه مختلف برای برداشت آب به‌دست آمده است. همچنین، مدنی (۱۶)، با به‌کارگیری نجموعه‌ای از بازی‌های عاری از همکاری، دامنه کاربرد نظریه بازی‌ها در زمینه مدیریت منابع آب و حل مناقشات موجود در این بخش را ارزیابی کرده و با استفاده از بازی‌های سادهٔ دو به دو، نشان داده است که چگونه نتایج نظریه بازی‌ها ممکن است برای کل نظام بهره‌برداری مطلوب نباشد. در پایان این مطالعه هم نتیجه‌گیری شدکه بازی‌های عاری از همکاری در غیاب اطلاعات کمی دقیق می‌تواند تعارضات دنیای واقعی را توضیح دهد. استبان و دینار (۷)، برای ارزیابی میزان همکاری در یک آبخوان مواجه با پدیده استخراج بی‌رویه، از روش نظریه بازی‌ها استفاده کردند و این مدل را در آبخوان معروف استرلامانچا شامل سه قسمت کوچک‌تر آزمودند؛ و در نهایت، برای تخصیص پایدار از دو نوع روش نظریه بازی‌ها به نام «چانه‌زنی نش- هرسانی» و «ارزش شیلی» استفاده شده است. بر پایهٔ نتایج این مطالعه، راه حل همکارانه وقتی اتفاق می‌افتد که مسئله حداکثرسازی سود کشاورزان با توجه به اثرات بیرونی زیست‌محیطی و استخراج صورت می‌گیرد. مدنی و دینار (۱۷)، با بهره‌گیری از یک مدل برنامه‌ریزی پویا، به نقش تشکیل نهادهای عاری از همکارای در مدیریت پایدار منابع طبیعی مشترک مانند آب‌های زیرزمینی پرداختند. در این مدل، بازده خالص ناشی از برداشت آب در طول زمان حداکثر می‌شود. در این مطالعه، چنین نتیجه‌گیری شد که بهره‌برداران از

یک منبع طبیعی مشترک در صورتی می‌توانند عایدات پایدارتری داشته باشند که به طرح‌های توسعه‌ای بلندمدت بیشتر توجه کنند و در درونی‌سازی اثرات بیرونی خود بکوشند.

مدل‌های برنامه‌ریزی خطی که اغلب مطالعات یادشده نیز از آن بهره گرفته‌اند، با تأکید بر محدودیت‌های واردشده، به حداکثرسازی تابع هدف می‌پردازند. در این مدل‌ها، هیچ تضمینی برای رسیدن به شرایط موجود یا بازتولید داده‌های مشاهده‌شده وجود ندارد. نتایج به‌دست آمده از آن نیز به‌دلیل خصوصیت هنجاری بودن الگوها اطمینان کافی نداشته و قبولاندن جواب‌های این نوع الگوها به تصمیم‌گیرندگان به‌ویژه کشاورزان مشکلات زیادی را به‌همراه خواهد داشت. از این‌رو، در مطالعهٔ حاضر، برای تعیین هدف اقتصادی هر راه حل برداشت، از روش برنامه‌ریزی ریاضی مثبت (اثباتی) (PMP)[6] استفاده شده است. روش PMP که در سال ۱۹۹۵ به‌طور رسمی توسط هاویت (۱۱) معرفی شد، یک روش تحلیل تجربی است که از تمام اطلاعات شرایط موجود برای ساخت الگوی کالیبره استفاده می‌کند. این روش در وضعیتی که داده‌های سری زمانی اندک باشد و به‌ویژه در تحلیل‌های سیاستی منطقه‌ای و بخشی اهمیت دارد (۲). هاویت (۱۰) رهیافت نوین برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی (PMP) را به‌منظور غلبه بر مشکلات الگوهای برنامه‌ریزی هنجاری در تحلیل سیاست‌ها برای کالیبره کردن مدل‌های تولید کشاورزی و مصرف منابع که از توابع تولید و هزینه غیرخطی استفاده می‌کنند، معرفی کرد که بعدها، در بسیاری از مطالعات کاربردی مورد استفاده قرار گرفت. مطالعهٔ حاضر نیز با به‌کارگیری نظریه بازی‌ها، به بررسی تعادل بهینه و همزمان اهداف اقتصادی- زیست‌محیطی و میزان بهینه برداشت از منابع آب زیرزمینی دشت جیرفت با اعمال وزن‌های مختلف به اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی و همچنین، تعیین الگوی کشت متناسب با برداشت بهینهٔ‌آب از سفره آب زیرزمینی می‌پردازد.

6. positive mathematical programming

مبانی نظری

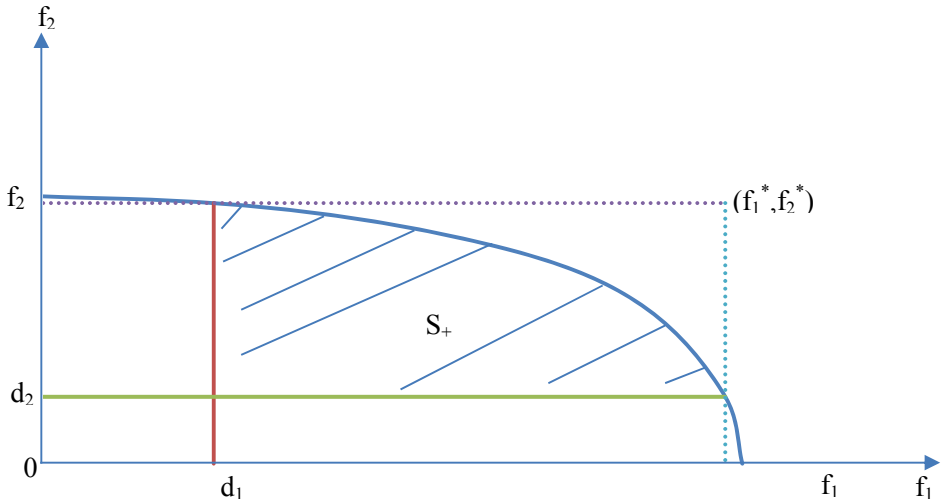
طی دهه‌های اخیر، نظریه بازی‌ها کاربرد زیادی در بحث مدیریت آب‌های زیرزمینی داشته است و در این مدل‌ها، هم محدودیت‌های اقتصادی و هم اثرات بیرونی استخراج را پوشش می‌دهد. بعضی از تصمیمات در حوزه استفاده از منابع طبیعی با هم در تضادند؛ برای نمونه، برداشت از آب‌های زیرزمینی که در نتیجهٔ حداکثرسازی سود انجام می‌گیرد، باعث ایجاد خسارت‌های زیست‌محیطی می‌شود. در این حالت، تصمیم‌گیرندگان باید با استفاده از مدل‌های همکارانه، به بررسی تضادهای خود بپردازند. وقتی که تضاد در اهداف پیش می‌آید، ممکن است افزایش در سود یک گروه منجر به زیان گروه دیگر شود. برای حل این‌گونه تعارض‌ها، بهترین راه پیشنهادی استفاده از روش نظریه بازی‌هاست (۲۶). از این‌رو، برای حل تعارض میان اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی منطقهٔ مورد مطالعه و همچنین، تعیین میزان برداشت آب زیرزمینی، از نظریهٔ بازی‌ها استفاده شده است. تعارض میان اهداف به روش ریاضی با زوج s,d تعریف می‌شود که مجموعه‌ای از منافع ممکن و مجموعه‌ای از بدترین نتایج ممکن است. هر کدام از بازیگران تمایل دارند که ارزش منافع خود را به بهترین نتایج ممکن افزایش دهند. معمولاً جواب بازی را از هر روشی که به‌دست آمده باشد و در هر نوع بازی‌ای که باشد، می‌توان از لحاظ اجتماعی ارزیابی کرد. معیاری که برای ارزیابی استفاده می‌شود، بهینگی پارتویی[۷] است. معمولاً ترکیب راهبردهای غالب پارتویی از لحاظ اجتماعی مطلوب است؛ یعنی، به نفع همهٔ بازیگران است. یک ترکیب راهبرد را غالب پارتویی می‌گویند که در آن، پیامد هر بازیگر نسبت به ترکیب دیگر بزرگ‌تر باشد (یا برابر ولی دست‌کم برای یک بازیگر بیشتر باشد). ترکیب راهبردهایی که مغلوب پارتویی هیچ‌کدام از ترکیبات دیگر نباشد، بهینهٔ پارتو یا مرز پارتویی[۸] است؛ یعنی، حرکت از آنها پیامد دست‌کم یکی از بازیگران را افزایش و دیگری را کاهش می‌دهد (۱). مرز پارتویی توسط تابع مقعر و اکیداً نزولی g در

7. Pareto
8. Pareto frontier

فاصلهٔ $[d_1,f_1^*]$ مشخص می‌شود که در آن، $g(f_1^*)=d_2$ و $f_2^*=g(d_1)$ است (نمودار ۱). برخی مواقع، بردار d به‌عنوان بردار منافع در حالت نبود توافق (وضعیت موجود[۹]) و ترکیبی از منافع بازیگران در حالتی که به یک توافق کلی نمی‌رسند، در نظر گرفته می‌شود. در این موارد، مجموعهٔ منافع ممکن S به مجموعهٔ S_+ که در زیر تعریف شده است، محدود می‌شود، چراکه هیچ بازیگر عاقلی توافقی را که بدتر از حالت نبود توافق یا وضعیت موجود است، نمی‌پذیرد(۲۰):

$$S_+ = \{f=(f_1,f_2)/f\in S, f\geq d\} \qquad (۱)$$

اگر بردار d به‌عنوان بدترین نتایج ممکن دو گروه هدف انتخاب شود، آنگاه $S_+=S$ خواهد بود(۲۶).



نمودار ۱. مرز پارتوی دو بازیگر در موقعیت تعارض

جان نش تعریف راهبرد بهینه را تعمیم داد، به‌گونه‌ای که از طریق آن می‌توان در هر بازی دونفره و بدون همکاری، تعادل را پیدا کرد (۱). در راه حل نش، یک نقطهٔ منحصربه‌فرد

9. status quo

روی مرز پارتو به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که حاصل‌ضرب منافع، بیشترین (حداکثر) شود. راه‌حل نش حل منحصربه‌فرد مسئلهٔ بهینه‌سازی زیر است:

$$\text{Maximize } (f_1 - d_1)(f_2 - d_2) \qquad (۲)$$

$$\text{Subject to } d_1 \le f_1 \le f_1^*, f_2 = g(f_1)$$

اگر $f_1 = d_1$ و $f_1 = f_1^*$ باشد، تابع هدف برابر با صفر و برای همه مقادیر $f_1 \in (f_1, f_1^*)$ ، تابع هدف مثبت است. در صورتی که محدودیت دوم، $f_2 = g(f_1)$ ، در تابع هدف جایگزین شود، مسئله به‌صورت تک‌بعدی زیر درمی‌آید و با یک الگوریتم جست‌وجوی سادهٔ تک‌بعدی می‌توان آن را حل کرد (۲۶):

$$\text{Maximize } (f_1 - d_1)(f_2 - d_2) \qquad (۳)$$

$$\text{Subject to } d_1 \le f_1 \le f_1^*$$

راه حل نامتقارن نش یک راه حل منحصربه‌فرد مسئلهٔ زیر است:

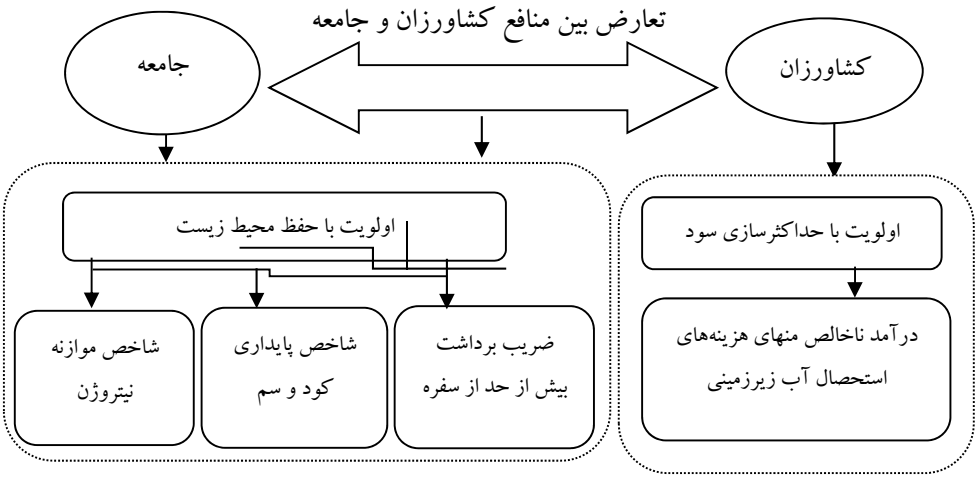
$$\text{Maximize}(f1 - d1)^{w_1} (f2 - d2)^{w_2} \qquad (۴)$$

$$\text{Subject to } d_1 \le f_1 \le f_1^*, f_2 = g(f_1)$$

این روش تعمیمی از رابطهٔ (۳) با وزن‌های نامساوی است که این وزن‌های W_1 و W_2 به هر کدام از بازیگران داده می‌شود. جمع وزن‌ها یک است. هر بازیگر که وزن بیشتری داشته باشد، در تابع هدف اهمیت بیشتری دارد (۹).

روش تحقیق

در مطالعهٔ حاضر، برای تعیین میزان برداشت بهینه از منابع آب زیرزمینی، از نظریهٔ بازی‌ها استفاده شد. بازیگران این بازی دونفره عبارت‌اند از: در یک سو، کشاورزان که برداشت بیشتر از منابع آب را با هدف حداکثرسازی سود اقتصادی خود دنبال می‌کنند؛ و در سوی دیگر، جامعه که به پیگیری کاهش برداشت آب با هدف کاهش زیان‌های زیست‌محیطی می‌پردازد. گروه‌های چانه‌زننده در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. گروه‌های چانه‌زننده در بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی

قبل از به‌کارگیری نظریه بازی‌ها لازم است ماتریس تاوان اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی محاسبه و سپس، با استفاده از این ماتریس، مرز پارتو استخراج شود. بدین‌منظور، ابتدا چهارده سناریوی برداشت از آب‌های زیرزمینی فرض شد. این سناریوها مشابه مطالعات پیشین در این زمینه (۲۵، ۲۶، ۲۷) بین کمترین میزان تغذیه و بیشترین میزان تخلیه دشت در سال‌های گذشته مد نظر قرار گرفت. کمترین میزان تغذیهٔ دشت در بیست سال گذشته در سال ۱۳۹۲ و معادل ۵۷۳ میلیون مترمکعب بوده است (۱۳). بیشترین حجم برداشت از منابع آب زیرزمینی نیز برای سال زراعی مورد مطالعه (۹۵-۱۳۹۴) معادل ۸۵۷ میلیون مترمکعب برابر با حجم آب قابل دسترس از چاه‌های آب دشت در نظر گرفته شد. راه حل‌های مختلف برداشت از آب‌های زیرزمینی بین این دو حد به‌صورت افزایشی با درصدهای مساوی، از کمترین مقدار برداشت تا بیشترین مقدار برداشت، در نظر گرفته شده و در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. راه حل‌های مختلف برداشت آب زیرزمینی در دشت جیرفت

(میلیون مترمکعب در سال)

سناریو	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴
برداشت آب زیرزمینی	۵۷۳	۵۹۵	۶۱۷	۶۳۹	۶۶۰	۶۸۲	۷۰۴	۷۲۶	۷۴۸	۷۷۰	۷۹۲	۸۱۳	۸۳۵	۸۵۷

مأخذ: یافته‌های تحقیق

ابتدا هدف اقتصادی حداکثرسازی سود کشاورزان با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی به‌شرح زیر و سه شاخص زیست‌محیطی مبین هدف جامعه، متناظر با هر سناریوی برداشت آب در نرم‌افزار GAMS محاسبه شدند. برای اینکه شاخص‌های زیست‌محیطی متفاوت در قالب هدف واحد در مقابل هدف اقتصادی قرار گیرد، شاخص‌های متفاوت زیست‌محیطی نرمال‌سازی می‌شوند و هدف زیست‌محیطی (عایدی گروه جامعه) از ترکیب شاخص‌های زیست‌محیطی نرمال شده و از طریق رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$WE_s = \alpha AI + \beta F + kNE \qquad (۵)$$

که در آن، WE_s نشان دهنده زیان جامعه در نتیجهٔ برداشت بیش از حد از سفره آب زیرزمینی، مصرف زیاد کود و سموم شیمیایی و عدم توازن نیتروژن ورودی وخروجی به خاک است. AI ضریب برداشت بیش از حد از سفره آب زیرزمینی، Fمیزان مصرف کود و سم و NE شاخص موازنه نیتروژن است. در پی، این شاخص‌ها و اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه آنها تشریح شده است. ضرایب α ، βو kدرجه اهمیت و وزنی است که با توجه به نظرات کارشناسان محیط زیست، آب منطقه‌ای و جهاد کشاورزی شهرستان جیرفت برای هرکدام از این شاخص‌ها منظور شده است. با نرمال‌سازی هدف اقتصادی، اکنون ماتریس تاوان اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی نرمال‌شده به‌دست می‌آید و می‌توان هدف نرمال‌شده زیست‌محیطی را بر روی هدف نرمال‌شدهٔ اقتصادی رگرس کرد و مرز پارتو را به‌دست آورد. اما با توجه به تعداد کم

سناریوها به‌منظور تخمین بهتر و دقت بیشتر و لحاظ کردن درجه آزادی کافی برای برآورد مرز پارتو، تعداد سناریوهای برداشت آب زیرزمینی به چهل سناریو بین کمترین و بیشترین حجم برداشت به‌صورت افزایشی و با درصدهای مساوی بسط داده شد و هدف نرمال‌شدهٔ زیست‌محیطی بر روی هدف نرمال‌شدهٔ اقتصادی رگرس شد و مرز پارتو به‌دست آمد. سپس، براساس این مرز پارتو و روش حل نامتقارن نش و اعمال وزن‌های مختلف میان صفر و یک به فاصلهٔ ۰/۰۲۵ به هر کدام از دو گروه هدف اقتصادی و زیست‌محیطی، میزان منافع اقتصادی و زیست‌محیطی متناظر با هر وزن به‌دست آمد. در ادامه، با استفاده از مقادیر نرمال منافع اقتصادی و زیست‌محیطی به‌دست آمده و توابع نرمال‌سازی داده‌ها، مقادیر درآمد خالص کشاورزان و میزان برداشت بهینه آب در روش نامتفارن نش متناسب با وزن‌های اعمال‌شده به‌دست آمد. قابل ذکر است که با افزایش وزن منافع زیست‌محیطی (به نفع افراد جامعه و گروه غیرکشاورزان)، مقدار برداشت از آب زیرزمینی کاهش می‌یابد؛ همچنین، با افزایش وزن منافع اقتصادی، مقدار برداشت از آب زیرزمینی و نیز درآمد کشاورزان افزایش یافته است. بهترین وزن اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی وزنی است که در آن، ماکزیمم منحنی بهینه پارتو واقع شود. نحوه به‌دست آوردن هدف اقتصادی با استفاده از الگوی برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی و شاخص‌های لحاظ‌شده در هدف زیست‌محیطی در پی شرح داده شده است.

تبیین هدف اقتصادی

کشاورزان در پی آنند که درآمد خالص خود را در طول زمان به حداکثر برسانند؛ از این‌رو، سعی در بهره‌برداری بیشتر از منابع آب زیرزمینی دارند تا با کشت محصول و فروش آن، به هدف خود برسند. از سوی دیگر، با استخراج بیش از حد آب زیرزمینی، سطح آبخوان در منطقه مورد نظر کاهش یافته و هزینه‌های پمپاژ آب برای کشاورز افزایش می‌یابد. بنابراین، تفاوت این درآمد از هزینه مطابق روش برنامه‌ریزی ریاضی مثبت (PMP) به‌عنوان هدف

اقتصادی کشاورزان در سناریوهای مختلف به‌شرح زیر محاسبه می‌شود؛ به‌طور کلی، یک مدل برنامه‌ریزی مثبت در سه مرحله به‌شرح زیر انجام می‌شود (۲۲):

مرحلهٔ اول: تبیین یک مدل برنامه‌ریزی خطی معمولی[10] با تابع هدف حداکثرسازی سود کشاورزان منطقه و محدودیت‌های منابع به‌همراه محدودیت‌های کالیبراسیون[11].

تابع هدف تحقیق حاضر براساس مدل برنامه‌ریزی خطی معمولی که حداکثرسازی درآمد خالص کل کشاورزان دشت بوده و بیانگر هدف بهره‌برداران مبنی بر حداکثرسازی کل بازده برنامه‌ای آنهاست، به‌صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$Max\ NB = \sum_1 \left[A_c \left(P_c Y_c + SI_c - \left(\left(\frac{eh_t}{E_P}\right) P_e + Cr_c\right) WU_c - TC_c\right)\right] \quad (۶)$$

$$\sum_{j=1}^{n} a_C A_C \leq b_i \qquad [\lambda] \quad (۷)$$

$$A_c \leq CA_c(1+\varepsilon_1) \qquad [P] \quad (۸)$$

در رابطه (۶)، NB درآمد خالص کشاورز، A_c سطح زیر کشت محصول cام بر حسب هکتار، P_c قیمت محصول cام بر حسب ده ریال به‌ازای هر کیلوگرم، Y_c عملکرد محصول cام بر حسب کیلوگرم در هر هکتار، SI_c درآمد فرعی محصول بر حسب ده ریال در هر هکتار، e انرژی لازم برای بالاآوردن یک مترمکعب آب به اندازه یک متر بر حسب کیلووات- ساعت بر مترمکعب، h_t متوسط ارتفاع پمپاژ آب بر حسب متر، E_P راندمان پمپ آب، P_e قیمت انرژی بر حسب ده ریال بر کیلووات- ساعت، Cr_c هزینه تعمیر و نگهداری پمپ به‌ازای یک مترمکعب بر حسب ده ریال، WU_c آب مصرفی محصول cام بر حسب مترمکعب در هکتار و TC_c کل هزینه متغیر تولید محصول cام به‌جز هزینه آب بر حسب ده ریال در هر هکتار است. رابطه (۷) بیانگر محدودیت‌های اعمال‌شده در مدل همچون زمین، آب، نیروی کار، سم، کودهای شیمیایی، حیوانی و ماشین‌آلات است که در آن، A_C سطح زیر کشت محصولات، a_C ضرایب فنی مربوط به میزان مصرف نهاده‌های آب، نیروی کار، سم، کود شیمیایی و

10. linear programming (LP)

۱۱. محدودیت‌هایی که سطح فعالیت‌های مدل را به سطح زیر کشت فعلی منطقه محدود می‌کند.

ماشین‌آلات و b_i میزان موجودی هر کدام از محدودیت‌ها در منطقه بوده و λ ارزش سایه‌ای محدودیت‌های موجود در مدل است. همچنین، رابطه (۸) نشان‌دهندهٔ محدودیت‌های کالیبراسیون است. محدودیت‌های کالیبراسیون به مجموعه محدودیت‌های منابعِ یک مدل برنامه ریزی خطی اضافه می‌شوند. این محدودیت‌ها سطح فعالیت‌ها را به سطوح مشاهده‌شدهٔ دوره پایه مقید می‌کنند. در این رابطه، CAc سطح زیر کشت فعلی محصول cام، ε_1 عدد مثبت بسیار کوچکی است که برای جلوگیری از همبستگی خطی و عدم ظهور قیمت سایه‌ای صفر در مدل لحاظ می‌شود، و P ارزش سایه‌ای محدودیت کالیبراسیون است. بر این اساس، در مدل برنامه‌ریزی خطی معمولی (LP)، تابع هدف رابطه (۶) با توجه به محدودیت‌های یادشده در روابط (۷) و (۸) حداکثر شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در تابع هدف، هزینه متغیر نهاده‌ها به دو صورت نشان داده شده است: یکی، TC_c که کل هزینه متغیر تولید محصول cام به‌جز هزینه آب است و دیگری، عبارت $\left(\frac{eh_t}{E_P}\right)P_e + Cr_c$ به‌عنوان هزینه متغیر نهاده آب در مدل لحاظ شده است. برای محاسبه هزینه متغیر نهاده آب محصولcام، همان‌گونه که در تابع هدف نشان داده شده است، هزینه پمپاژ و تعمیر و نگهداری پمپ به‌ازای استحصال هر مترمکعب آب در میزان آب مصرفی آن محصول ضرب می‌شود. برای برآورد هزینه پمپاز آب از رابطهٔ زیراستفاده شده است (۶):

$$C_P = \left(\frac{\alpha.h}{E_P}\right)Pe + C_r \qquad (۹)$$

ضرایب تابع هدف نظیر قیمت محصولات، درآمد فرعی محصولات و کل هزینه‌های متغیر هر کدام از محصولات نیز براساس اطلاعات پرسشنامه‌ای سال زراعی ۹۵-۱۳۹۴ محاسبه شده است. محصولات زراعی و باغی لحاظ‌شده در مدل عبارت‌اند از گندم، جو، ذرت، خیار، گوجه‌فرنگی، پیاز، سیب‌زمینی، خیار گلخانه‌ای، یونجه، پرتقال و خرما.

مرحلهٔ دوم: برآورد ضرایب تابع هدف غیرخطی با استفاده از قیمت‌های سایه‌ای مدل LP مرحله قبل و اطلاعات الگوی کشت موجود منطقه.

در مرحله دوم، مقادیر دوگان به‌دست آمده از مرحله اول برای تخمین پارامترهای تابع

هدف غیرخطی مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ به دیگر سخن، این مقادیر برای کالیبره کردن پارامترهای تابع هدف غیرخطی به‌کار می‌روند. برای تدوین مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی، می‌توان هم از توابع هزینه غیرخطی و هم از توابع تولید غیرخطی در تابع هدف استفاده کرد. با توجه به خصوصیات مطلوب تابع هزینه درجه دوم همچون تابع هزینه نهایی صعودی برای هر فعالیت و ساده‌تر بودن کار با این توابع، این فرم تابع به سایر فرم‌ها ترجیح داده می‌شود(۴). فرم کلی تابع هزینه غیرخطی ملحوظ در تحقیق حاضر نیز به‌صورت زیر است:

$$VC_c(A_c) = \alpha_c A_c + \frac{1}{2}\beta_c A_c^2 \qquad (۱۰)$$

که در آن، α_c پارامترهای جزء خطی تابع هزینه محصول cام و β_c پارامترهای جزء درجه دوم تابع هزینه محصول cام است. روش‌های متفاوتی برای تخمین پارامترهای تابع هزینه غیرخطی متغیر یاشده وجود دارد که در تحقیق حاضر، از روش حداکثر آنتروپی[۱۲] که پاریس و هاویت در سال ۱۹۹۸ ارائه کردند، استفاده شد. بر این اساس، پارامترهای تابع هزینه غیرخطی ملحوظ در مدل‌های ریاضی اثباتی به‌صورت زیر برآورد می‌شوند:

$$\alpha_c = C_c \qquad (۱۱)$$

$$\beta_c = \frac{C_c + P}{CA_c} \qquad (۱۲)$$

که در این روابط، C_c هزینه تولید محاسبه‌شدهٔ محصول cام، P متغیرهای دوگان مربوط به محدودیت‌های کالیبراسیون و CA_c سطح زیر کشت فعلی محصول cام است.

مرحلهٔ سوم: تبیین یک مدل برنامه‌ریزی درجه دوم[۱۳] یا مدل غیرخطی از طریق قرار دادن ضرایب برآوردی تابع هزینه در تابع هدف مدل LP بدون محدودیت‌های کالیبراسیون.

حال، تابع هزینه غیرخطی رابطه (۱۰) جایگزین تابع هزینه خطی TC_c در رابطه (۶) یا تابع هدف شده و این تابع هدف مشروط بر محدودیت‌های یادشده، بدون در نظر گرفتن محدودیت کالیبراسیون، حداکثر می‌شود. مدل نهایی PMP به‌شرح زیر است:

12. maxzimom antropi (MA)
13. quadratic programming (QP)

$$Max\ NB = \sum_1 \left[A_c \left(P_c Y_c + SI_c - \left(\left(\frac{eh_t}{E_P}\right) P_e + Cr_c\right) WU_c - VC_c\right)\right] \quad (۱۳)$$

$$\sum_{j=1}^{n} a_C A_C \leq b_i \qquad [\lambda] \quad (۱۴)$$

که در این روابط، VC_c هزینه غیرخطی متغیر محصول cام و تابعی از سطح زیر کشت است؛ و رابطه (۱۴)، در واقع، همان محدودیت‌های منابع بوده و محدودیت کالیبراسیون از مدل حذف شده است. سایر متغیرهای رابطه یادشده نیز قبلاً توضیح داده شده است. اکنون، مدل برای اجرای سناریوهای مختلف برداشت آب از منابع زیرزمینی و تحلیل حساسیت آماده می‌شود. بدین منظور، مدل برنامه‌ریزی ریاضی مثبت در نرم‌افزار GAMS براساس مراحل پیش‌گفته کدنویسی شده است.

تبیین هدف زیست‌محیطی

براساس ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه و خطرهای زیست‌محیطی مناطق مختلف در مطالعات گذشته، اهداف زیست‌محیطی گوناگون در برابر هدف اقتصادی «حداکثرسازی سود کشاورزان» قرار گرفته است. در برخی از مطالعات، صرفاً از ضریب برداشت بیش از حد از سفره برای اهمیت دادن به میزان تخلیه سفره آب زیرزمینی استفاده شده است (۲۳، ۲۵، ۲۷). در مطالعهٔ حاضر نیز به‌لحاظ افت شدید سطح آب زیرزمینی دشت جیرفت و از بین رفتن چاه‌های آرتزین در این دشت، شاخص ضریب برداشت بیش از حد از سفره با اعمال وزن بالا به‌عنوان مهم‌ترین شاخص و میزان مصرف کود و سموم شیمیایی و موازنه نیتروژن به‌عنوان شاخص‌های تکمیلی برای پایداری کشاورزی مد نظر قرار گرفته اند.

ضریب برداشت بیش از حد از سفره

برای محاسبهٔ اثر زیست‌محیطی، به‌ازای هر راه حل برداشت، از ضریب برداشت بیش از حد که از تقسیم میزان برداشت به تغذیه به‌دست می‌آید، استفاده خواهد شد (۱۵). بدیهی است که چنانچه میزان تخلیه از سفره برابر با میزان تغذیه باشد، ضریب برداشت معادل یک بوده و

تعادل سفره آب زیرزمینی حفظ خواهد شد. برای تعیین ضریب استخراج بیش از حد آب زیرزمینی، به کمترین سناریوی تخلیه آب زیرزمینی که برابر با کمترین میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی در دشت طی سال‌های گذشته نیز می‌باشد، مقدار یک اختصاص داده شده و از تفاوت هر کدام از سناریوهای تخلیه آب زیرزمینی با کمترین سناریو و تقسیم بر آن، ضریب استخراج بیش از حد آب زیرزمینی برای هر کدام از سناریوها تعیین خواهد شد.

شاخص پایداری نهاده کود و سم

بحث پایداری در کشاورزی مفاهیم مختلفی را دربرمی‌گیرد و ابعاد گوناگون را پوشش می‌دهد. کشاورزی پایدار شامل نقش مثبت تولید محصولات کشاورزی در رشد اقتصادی به‌همراه کاهش فقر، حفظ منابع طبیعی و حمایت از محیط زیست است. به‌طور کلی، در کشاورزی پایدار، دو هدف اساسی تداوم تولید محصولات کشاورزی و کاهش آثار زیانبار زیست‌محیطی در بخش کشاورزی وجود دارد (۱۴).

با استفاده از میزان کود و سم مصرفی در واحد سطح، می‌توان به بررسی پایداری کشاورزی پرداخت. هرچه نسبت مصرف کود و سم در واحد سطح در یک دوره زمانی در اثر اعمال یک سیاست مشخص کاهش یابد، بهره‌برداران در راستای پایداری بیشتر عمل می‌کنند. بر همین اساس، شاخص یادشده به‌صورت زیر تعریف می‌شود (۲۴):

$$\text{شاخص پایداری کود و سم} = \frac{\text{میزان مصرف کود و سم}(\text{کیلوگرم})}{\text{سطح زیر کشت}(\text{هکتار})} \qquad (۱۵)$$

هرچه شاخص یادشده کوچک‌تر باشد، آلودگی زیست‌محیطی کمتر و پایداری بخش کشاورزی بیشتر خوهد بود. میزان مصرف کود و سم مصرفی هر هکتار محصولات از اطلاعات پرسشنامه هزینه تولید محصولات زراعی و باغی محاسبه شده و سپس، این شاخص با توجه به میزان مصرف کود و سم در هر سناریوی برداشت آب از سفره آب زیرزمینی برآورد شده است.

شاخص موازنه نیتروژن

شاخص موازنه نیتروژن[۱۴] بیانگر اختلاف فیزیکی بین مقدار کل نیتروژن ورودی به خاک و مقدار کل نیتروژن خروجی از خاک براساس چرخه نیتروژن در یک نظام کشاورزی در هر هکتار است. از آنجا که فراهم‌سازی مقدارمناسب مواد مغذی در خاک، به‌ویژه نیتروژن، برای رشد محصول ضروری و اما مصرف میزان اضافی از این نهاده برای محیط زیست مضر است، از میزان تعادل نیتروژن به‌عنوان یک شاخص زیست‌محیطی استفاده می‌شود، شاخصی که اختلاف فیزیکی بین مقدار کل نیتروژن ورودی به خاک از طریق مصرف نهاده‌ها و مقدار کل نیتروژن خروجی از خاک از طریق تولید محصول را محاسبه می‌کند؛ هرچه این میزان به صفر نزدیک‌تر باشد، به‌لحاظ شاخص‌های زیست‌محیطی، سازگاری بیشتری با پایداری خاک دارد و هرچه این شاخص به سمت مقادیر مثبت حرکت کند، به معنی ورود نیتروژن بیشتر به خاک و آلودگی نیتروژن بوده و در صورت منفی شدن، به معنی خروج نیتروژن از خاک و کمبود نیتروژن در خاک محسوب می‌شود. شاخص موازنه نیتروژن از طریق موازنه نیتروژن سطح خاک که به‌عنوان مقدار کل ورودی‌ها و خروجی‌های نیتروژن در طول یک سال زراعی است (جدول ۲)، محاسبه می‌شود (۲۱).

جدول ۲. مؤلفه‌های نیتروژن ورودی و خروجی

ورودی‌های نیتروژن	خروجی‌های نیتروژن
مقدار کل نیتروژن واردشده بر اثر مصرف کودهای شیمیایی (کیلوگرم)	
مقدار کل نیتروژن واردشده بر اثر مصرف کودهای دامی (کیلوگرم)	میزان نیتروژن جذب‌شده در
مقدار نیتروژن تثبیت‌شده از طریق جذب اتمسفری و زیست‌شناختی (کیلوگرم)	محصولات تولیدی (کیلوگرم)
جمع کل نیتروژن ورودی	جمع کل نیتروژن خروجی

مأخذ: یافته‌های تحقیق

بر این اساس، شاخص موازنه نیتروژن به‌صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود:

14. nitrogen balance index

$$\text{شاخص موازنه نیتروژن}(kg/ha) = \frac{\text{نیتروژن ورودی به خاک}(kg) - \text{نیتروژن خروجی از خاک}(kg)}{\text{سطح زیر کشت}(ha)} \quad (۱۶)$$

شایان یادآوری است که در پژوهش حاضر، ضرایب یادشده در روابط بالا از محاسبات سازمان همکاری اقتصادی و توسعه (OECD) (۲۱) اخذ شده است. با توجه به سطح زیر کشت محصولات لحاظ‌شده در الگوی کشت متناسب با هر سطح برداشت آب، میزان برداشت محصولات و ضرایب مربوط به مؤلفه‌های ورود و خروج نیتروژن، میزان نیتروژن ورودی و خروجی خاک با استفاده از نرم‌افزار GAMS در سناریوهای مختلف برداشت آب محاسبه شد. محدوده مطالعاتی دشت جیرفت بخشی از حوضه غربی جازموریان است و در جنوب شرق ایران قرار دارد. وسعت محدوده مطالعاتی جیرفت ۵۰۵۷ کیلومتر مربع شامل ۲۱۰۶ کیلومتر مربع دشت جیرفت و ۳۹۴۴ کیلومتر مربع ارتفاعات آن است. ارتفاع دشت از سطح دریا بین ۸۰۰-۵۰۰ متر متغیر است. شیب کلی این محدوده از سمت شمال به جنوب و متوسط بارندگی سالانه آن ۱۷۰ میلی‌متر است. در دشت جیرفت چندین رودخانه دائمی‌و فصلی جریان دارند که مهم‌ترین آنها رودخانه هلیل‌رود است (۱۳). بخشی از اطلاعات مورد نیاز مانند عملکرد، قیمت و هزینه های تولید محصولات مختلف و هزینه‌های استحصال آب از چاه از اطلاعات ۲۲۵ نمونه تصادفی از ۶۰۷۱ بهره‌بردار چاه‌های آب دشت جیرفت شامل شهرستان‌های جیرفت و عنبرآباد به‌دست آمده و بخش دیگر اطلاعات از وزارت نیرو، شرکت مدیریت منابع آب ایران، سازمان آب منطقه‌ای جیرفت و استان کرمان و سازمان جهاد کشاورزی جیرفت و کهنوج جمع‌آوری شده است. تجزیه و تحلیل اطلاعات نیز با استفاده از نرم‌افزارهای Eviews, Excel و GAMS انجام گرفته است. به‌دلیل حفاری‌های بسیار زیاد و ناموزون چاه‌های بهره‌برداری در آبخوان‌های سطحی و عمقی، فشار آرتزین کاهش بسیار زیادی یافته، به‌گونه‌ای که تخلیه سالانه چاه‌های آرتزین به صفر رسیده است و جداسازی آنها براساس نقشه‌های عمق و تراز آب زیرزمینی میسر نیست و سفره یکپارچه در نظر گرفته می‌شود (۸). بنابراین، در مطالعهٔ حاضر، دشت جیرفت همگن در نظر گرفته شده است و حجم نمونه متناسب با روش نمونه‌گیری تصادفی ساده به‌شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$n = \frac{\frac{z^2 pq}{d^2}}{1+\frac{1}{N}\left[\frac{z^2 pq}{d^2}-1\right]} = 225 \qquad (۱۷)$$

که در آن، N حجم جامعه شامل مجموعه کشاورزان صاحب چاه آب کشاورزی در محدوده مطالعاتی دشت جیرفت به تعداد ۶۰۷۱ چاه، Z مقدار متغیر نرمال استاندارد (برابر با ۱/۹۶ در سطح اطمینان ۹۵ درصد)، P مقدار نسبت صفت موجود در جامعه (الکتریکی بودن پمپ مورد بهره‌برداری شامل ۸۱ درصد نمونه‌ها) و q درصد نمونه‌های فاقد آن صفت (دیزلی بودن پمپ آب شامل نوزده درصد نمونه‌ها) $(q = 1 - p)$ و d میزان اشتباه مجاز (در تحقیق حاضر، پنج درصد) است.

نتایج و بحث

تفاوت درآمد از هزینه مطابق روش برنامه‌ریزی ریاضی مثبت (PMP) به‌عنوان هدف اقتصادی کشاورزان در سناریوهای مختلف به‌شرح جدول ۳ به‌دست آمد. درآمد خالص متناسب با الگوی کشت بهینه هر سناریوی برداشت آب است.

جدول ۳. درآمد خالص و سطح زیر کشت بهینه به‌ازای سناریوهای مختلف

ردیف	برداشت آب زیرزمینی *	سطح زیر کشت (هکتار)	درآمد خالص کشاورزان (میلیون تومان)	سطح زیر کشت محصولات در سناریوهای مختلف برداشت آب (هکتار)										
				گندم	جو	ذرت	پیاز	سیب زمینی	خیار	گوجه	هندوانه	خیار گلخانه	یونجه	پرتقال	خرما
۱	۵۷۳/۳	۲۶۰۹۶	۳۹۰۴۵۶	–	–	–	۱۵۳	۳۸	–	–	–	۷۲۸	۲۹۴۰	۱۳۸۰۸	۸۴۲۹
۲	۵۹۴/۹	۲۷۶۱۸	۴۳۳۶۹۶	–	–	–	۵۷۴	۶۲۱	۲۲۲	۲۵۹	–	۷۶۵	۲۹۴۰	۱۳۸۰۸	۸۴۲۹
۳	۶۱۶/۷	۲۹۰۲۰	۴۶۹۲۳۶	–	–	–	۸۲۰	۹۲۰	۷۰۴	۶۰۷	–	۷۹۲	۲۹۴۰	۱۳۸۰۸	۸۴۲۹
۴	۶۳۸/۶	۳۰۷۱۲	۵۰۷۸۸۲	–	–	–	۱۱۱۷	۱۲۸۰	۱۲۸۵	۱۰۲۷	–	۸۲۶	۲۹۴۰	۱۳۸۰۸	۸۴۲۹
۵	۶۶۰/۴	۳۲۲۵۶	۵۳۹۰۷۷	–	–	–	۱۳۸۸	۱۶۰۹	۱۸۱۵	۱۴۱۰	–	۸۵۷	۲۹۴۰	۱۳۸۰۸	۸۴۲۹
۶	۶۸۲/۳	۳۳۸۱۸	۵۶۶۶۳۰	–	–	۱۶۷	۱۶۴۰	۱۹۰۹	۲۲۸۸	۱۷۵۱	–	۸۸۶	۲۹۴۰	۱۳۸۰۸	۸۴۲۹
۷	۷۰۴/۱	۳۵۳۸۲	۵۹۰۸۲۸	–	–	۴۶۵	۱۸۷۵	۲۱۸۵	۲۷۱۱	۲۰۵۴	–	۹۱۴	۲۹۴۰	۱۳۸۰۸	۸۴۲۹
۸	۷۲۶	۳۷۲۹۰	۶۱۲۵۵۷	۷۹۱	–	۶۶۷	۲۰۹۴	۲۴۰۵	۲۹۴۹	۲۲۰۹	۵۷	۹۴۲	۲۹۴۰	۱۳۸۰۸	۸۴۲۹
۹	۷۴۷/۸	۳۹۱۲۰	۶۳۱۴۷۵	۱۴۰۶	–	۹۱۰	۲۳۰۶	۲۶۳۱	۳۲۳۷	۲۴۰۳	۸۷	۹۶۲	۲۹۴۰	۱۳۸۰۸	۸۴۲۹
۱۰	۷۶۹/۷	۴۰۹۸۶	۶۴۷۸۵۰	۱۹۵۰	۱۲۱	۱۱۳۸	۲۵۲۰	۲۸۵۹	۳۵۲۲	۲۵۹۶	۱۱۸	۹۸۶	۲۹۴۰	۱۳۸۰۸	۸۴۲۹
۱۱	۷۹۱/۵	۴۲۸۵۶	۶۶۱۶۱۳	۲۴۸۸	۲۶۷	۱۳۶۳	۲۷۳۲	۳۰۸۴	۳۸۰۳	۲۷۸۶	۱۴۷	۱۰۱۰	۲۹۴۰	۱۳۸۰۸	۸۴۲۹
۱۲	۸۱۳/۴	۴۴۷۳۴	۶۷۲۸۹۳	۳۰۲۸	۴۱۵	۱۵۸۸	۲۹۴۵	۳۳۱۰	۴۰۸۵	۲۹۷۶	۱۷۶	۱۰۳۴	۲۹۴۰	۱۳۸۰۸	۸۴۲۹
۱۳	۸۳۵/۲	۴۶۲۱۲	۶۸۲۴۱۵	۳۳۲۳	۴۷۳	۱۶۸۴	۳۰۲۴	۳۴۰۴	۴۲۱۳	۳۰۶۳	۱۸۷	۱۰۵۰	۲۹۴۰	۱۴۴۲۳	۸۴۲۹
۱۴	۸۵۷	۴۷۶۸۹	۶۹۱۰۶۶	۳۶۱۸	۵۳۱	۱۷۸۰	۳۱۰۴	۳۴۹۸	۴۳۳۸	۳۱۴۹	۱۹۸	۱۰۶۶	۲۹۴۰	۱۵۰۳۸	۸۴۲۹

* واحد: میلیون مترمکعب مأخذ: یافته‌های تحقیق

در سناریوی اول که متناسب با کمترین حجم برداشت از منبع آب زیرزمینی است، از محصولات زراعی سالانه تنها پیاز، سیب‌زمینی و خیار گلخانه‌ای وارد مدل شده‌اند و سطح زیر کشت محصولات باغی نیز در همان سطح حداقل موجود حفظ شده است. محصولات ذرت تا سناریوی پنجم، گندم تا سناریوی هفتم، جو تا سناریوی نهم و هندوانه نیز تا سناریوی هفتم در ترکیب الگوی کشت بهینه جایی ندارند. البته حداقل سطح زیر کشت محصولات باغی و دائمی در تمامی مدل‌ها لحاظ شده است، اما افزایش سطح زیر کشت باغ‌ها و محصول چندسالهٔ یونجه در الگوهای کشت بهینه توصیه نمی‌شود و صرفاً سطح زیر کشت محصول پرتقال از سناریوی سیزدهم به بعد افزایش نشان می‌دهد. قابل توجه است که سطح زیر کشت یونجه و خرما در مقایسه با سایر محصولات با توجه به میزان آب مصرفی بیشترو درآمد نسبی کمتر در سناریوی با بیشترین حجم برداشت آب از منابع آب زیرزمینی نیز افزایش نداشت. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش برداشت آب از سفره آب زیرزمینی، سطح زیر کشت افزایش یافته و درآمد خالص کشاورزان به‌عنوان هدف اقتصادی مدل نیز افزایش می‌یابد. جدول ۴ اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی متناسب با هر سناریو را با هم نشان می‌دهد. همان‌گونه که انتظار می‌رود، با افزایش میزان برداشت آب زیرزمینی، کل سطح زیر کشت افزایش و بدین ترتیب، درآمد خالص کشاورزان نیز افزایش می‌یابد؛ در مقابل، اثرهای زیست‌محیطی زیان‌بارتری با برداشت بیش از حد از ذخایر زیرزمینی نصیب جامعه خواهد شد. ضرایب α، β و k در رابطه (۵)، با توجه به نتایج نظرسنجی از بهره‌برداران و البته وزن‌دهی بیشتر به نظرات خبرگان و کارشناسان و بررسی مطالعات مشابه از جمله سالازار و همکاران (۲۶)، به‌ترتیب، برابر با ۰/۵، ۰/۳ و ۰/۲ منظور شد. شاخص‌های متفاوت هدف زیست‌محیطی نرمال‌سازی‌شده و تابع عایدی گروه جامعه از ترکیب شاخص‌های زیست‌محیطی نرمال‌شده با ضرایبی که قبلاً توضیح داده شد، به‌دست آمد.

جدول ۴. ماتریس تاوان اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی متناسب هر سناریو

سناریو	برداشت آب (میلیون مترمکعب)	سطح زیر کشت (هکتار)	هدف اقتصادی کشاورزان (میلیون تومان)	هدف زیست‌محیطی جامعه		
				ضریب برداشت بیش از حد از آبخوان	سم و کود شیمیایی مصرفی (تن)	موازنه نیتروژن (کیلوگرم در هکتار)
۱	۵۷۳/۳	۲۶۰۹۶	۳۹۰۴۵۶	۱	۲۵۱۲۵	۶۱/۸۴
۲	۵۹۴/۹	۲۷۶۱۸	۴۳۳۶۹۶	۱/۰۳۸	۲۶۶۶۵	۶۲/۰۵
۳	۶۱۶/۷	۲۹۰۲۰	۴۶۹۲۳۶	۱/۰۷۲	۲۷۹۹۷	۶۲/۲۴
۴	۶۳۸/۶	۳۰۷۱۲	۵۰۷۸۸۲	۱/۱۱۴	۲۹۶۰۶	۶۲/۴۵
۵	۶۶۰/۴	۳۲۲۵۶	۵۳۹۰۷۷	۱/۱۵۲	۳۱۰۷۳	۶۲/۶۲
۶	۶۸۲/۳	۳۳۸۱۸	۵۶۶۶۳۰	۱/۱۹۰	۳۲۴۹۰	۶۲/۹۳
۷	۷۰۴/۱	۳۵۳۸۲	۵۹۰۸۲۸	۱/۲۲۸	۳۳۸۵۶	۶۳/۳۱
۸	۷۲۶	۳۷۲۹۰	۶۱۲۵۵۷	۱/۲۶۶	۳۵۳۳۶	۶۵/۲۹
۹	۷۴۷/۸	۳۹۱۲۰	۶۳۱۴۷۵	۱/۳۰۴	۳۶۷۸۲	۶۷/۰۳
۱۰	۷۶۹/۷	۴۰۹۸۶	۶۴۷۸۵۰	۱/۳۴۳	۳۸۲۳۹	۶۸/۴۷
۱۱	۷۹۱/۵	۴۲۸۵۶	۶۶۱۶۱۳	۱/۳۸۱	۳۹۶۹۱	۶۹/۸۱
۱۲	۸۱۳پ۴	۴۴۷۳۴	۶۷۲۸۹۳	۱/۴۱۹	۴۱۱۴۹	۷۱/۰۴
۱۳	۸۳۵/۲	۴۶۲۱۲	۶۸۲۴۱۵	۱/۴۵۷	۴۲۶۱۴	۷۲/۱
۱۴	۸۵۷	۴۷۶۸۹	۶۹۱۰۶۶	۱/۴۹۵	۴۴۰۸۰	۷۳/۱

مأخذ: یافته‌های تحقیق

در جدول ۵، می‌توان مقادیر عایدی نرمال‌شده[۱۵] هر کدام از بازیگران را در نتیجهٔ سناریوهای مختلف مشاهده کرد و در واقع، این جدول نیز نشان‌دهندهٔ ماتریس تاوان اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی نرمال‌شده متناظر با هر راه حل برداشت از آب‌های زیرزمینی است.

۱۵. برای نرمال‌سازی داده‌ها از رابطهٔ $X_n = \frac{X-X_{min}}{X_{max}-X_{min}}$ و $X_n = 1 - \frac{X-X_{min}}{X_{max}-X_{min}}$ استفاده شده است.

جدول ۵. مقادیر عایدی نرمال‌شدهٔ جامعه و کشاورزان در سناریوهای مختلف

سناریو	برداشت آب (میلیون مترمکعب)	سطح زیر کشت (هکتار)	هدف اقتصادی کشاورزان*	شاخص‌های زیست‌محیطی			هدف زیست‌محیطی جامعه* ۰/۲ NE + ۰/۳ F + ۰/۵ AI
				ضریب برداشت بیش از حد از آبخوان (AI)*	سم و کود شیمیایی مصرفی (F)*	موازنه نیتروژن (NE)*	
۱	۵۷۳/۳	۲۶۰۹۶	۰	۱	۱	۱	۱
۲	۵۹۴/۹	۲۷۶۱۸	۰/۱۴۴	۰/۹۲۴	۰/۹۱۹	۰/۹۸۱	۰/۹۳۴
۳	۶۱۶/۷	۲۹۰۲۰	۰/۲۶۲	۰/۸۵۴	۰/۸۴۸	۰/۹۶۴	۰/۸۷۴
۴	۶۳۸/۶	۳۰۷۱۲	۰/۳۹۱	۰/۷۷۰	۰/۷۶۴	۰/۹۴۶	۰/۸۰۳
۵	۶۶۰/۴	۳۲۲۵۶	۰/۴۹۴	۰/۶۹۳	۰/۶۸۶	۰/۹۳۱	۰/۷۳۸
۶	۶۸۱/۳	۳۳۸۱۸	۰/۵۸۶	۰/۶۱۶	۰/۶۱۱	۰/۹۰۳	۰/۶۷۲
۷	۷۰۴/۱	۳۵۳۸۲	۰/۶۶۷	۰/۵۳۹	۰/۵۳۹	۰/۸۶۹	۰/۶۰۵
۸	۷۲۶	۳۷۲۹۰	۰/۷۳۹	۰/۴۶۲	۰/۴۶۱	۰/۶۹۳	۰/۵۰۸
۹	۷۴۷/۸	۳۹۱۲۰	۰/۸۰۲	۰/۳۸۵	۰/۳۸۵	۰/۵۳۹	۰/۴۱۶
۱۰	۷۶۹/۷	۴۰۹۸۶	۰/۸۵۶	۰/۳۰۸	۰/۳۰۸	۰/۴۱۱	۰/۳۲۸
۱۱	۷۹۱/۵	۴۲۸۵۶	۰/۹۰۲	۰/۲۳۱	۰/۲۳۲	۰/۲۹۲	۰/۲۴۳
۱۲	۸۱۳/۴	۴۴۷۳۴	۰/۹۷۱	۰/۱۵۴	۰/۱۵۵	۰/۱۸۳	۰/۱۶۰
۱۳	۸۳۵/۲	۴۶۲۱۲	۰/۹۷۱	۰/۰۷۷	۰/۰۷۷	۰/۰۸۹	۰/۰۷۹
۱۴	۸۵۷	۴۷۶۸۹	۱	۰	۰	۰	۰

* اعداد نرمال شده و بدون واحد هستند.

مأخذ: یافته‌های تحقیق

سناریوی چهاردهم مطلوب‌ترین حالت برای کشاورزان است، چراکه میزان عایدی آنها برابر با یک است (بیشترین مقدار)؛ از سوی دیگر، سناریوی اول دارای کمترین زیان برای جامعه است، به‌گونه‌ای که مقدار نرمال‌شدهٔ این زیان برای این گروه برابر با صفر است (کمترین مقدار). نتایج حاصل از تخمین مرز پارتو در جدول ۶ آمده است.

جدول ۶. تخمین منحنی پارتو برای گروه‌های جامعه و کشاورزان

ضریب	ضریب	مقدار t
عرض از مبدأ	۰/۹۶۲۱	۱۰۷/۱۹***
هدف زیست‌محیطی	۰/۰۷۶۱	۱/۸۳ *
توان دوم هدف زیست‌محیطی	−۱/۰۲۲۴	−۲۵/۰۹***
DW		۱/۸۲
R^2		۰/۹۹

*** معنی‌داری در سطح یک درصد * معنی‌داری در سطح ده درصد

مأخذ: یافته‌های تحقیق

پس از استخراج مرز پارتو، از روش حل نامتقارن نش برای تعیین مقدار بهینهٔ برداشت از منابع آب زیرزمینی استفاده شد. نتایج حاصل از به‌کارگیری این روش در جدول ۷ آمده است.

جدول ۷. میزان برداشت بهینه از منابع آب زیرزمینی دشت جیرفت راه حل نامتقارن نش

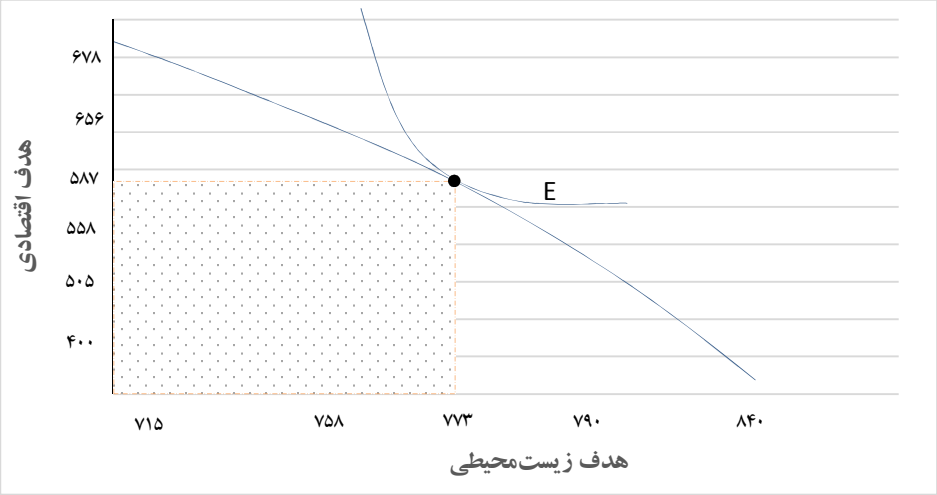
وزن هدف زیست‌محیطی	وزن هدف اقتصادی	راه‌حل نامتقارن نش			
		منافع زیست‌محیطی	منافع اقتصادی	درامد خالص کشاورزان*	میزان برداشت بهینه آب**
۱	۰	۱	۰/۰۳۶	۴۰۱۲۵۷	۷۱۵
۰/۹۷۵	۰/۰۲۵	۰/۹۹۳	۰/۰۴۹	۴۰۵۱۲۰	۷۱۵/۹
۰/۹۵	۰/۰۵	۰/۹۶۹	۰/۰۹۵	۴۱۹۰۵۷	۷۱۹/۴
۰/۹۲۵	۰/۰۷۵	۰/۹۴۵	۰/۱۳۹	۴۳۲۳۲۵	۷۲۲/۸
۰/۹	۰/۱	۰/۹۲۱	۰/۱۸۱	۴۴۴۹۶۵	۷۲۶/۲
۰/۸۷۵	۰/۱۲۵	۰/۸۹۸	۰/۲۲۱	۴۵۷۰۱۷	۷۲۹/۴
۰/۸۵	۰/۱۵	۰/۸۷۶	۰/۲۶۰	۴۶۸۵۲۸	۷۳۲/۶
۰/۸۲۵	۰/۱۷۵	۰/۸۵۴	۰/۲۹۶	۴۷۹۵۲۳	۷۳۵/۷
۰/۸	۰/۲	۰/۸۳۲	۰/۳۳۱	۴۹۰۰۵۱	۷۳۸/۸
۰/۷۷۵	۰/۲۲۵	۰/۸۱۱	۰/۳۶۵	۵۰۰۱۱۸	۷۴۱/۹
۰/۷۵	۰/۲۵	۰/۷۹۰	۰/۳۹۷	۴۰۹۷۶۶	۷۴۴/۸
۰/۷۲۵	۰/۲۷۵	۰/۷۶۹	۰/۴۲۸	۵۱۹۰۲۹	۷۴۷/۸
۰/۷	۰/۳	۰/۷۴۹	۰/۴۵۷	۵۲۷۹۰۳	۷۵۰/۷
۰/۶۷۵	۰/۳۲۵	۰/۷۲۹	۰/۴۸۶	۵۳۶۴۳۵	۷۵۳/۵

ادامهٔ جدول ۷.

وزن هدف زیست‌محیطی	وزن هدف اقتصادی	راه‌حل نامتقارن نش			
		منافع زیست‌محیطی	منافع اقتصادی	درامد خالص کشاورزان*	میزان برداشت بهینه آب**
۰/۶۵	۰/۳۵	۰/۷۰۹	۰/۵۱۳	۵۴۴۶۳۵	۷۵۶/۴
۰/۶۲۵	۰/۳۷۵	۰/۶۸۹	۰/۵۳۹	۵۵۲۵۱۳	۷۵۹/۲
۰/۶	۰/۴	۰/۶۶۹	۰/۵۶۴	۵۶۰۱۰۹	۷۶۲
۰/۵۷۵	۰/۴۲۵	۰/۶۵۰	۰/۵۸۹	۵۶۷۴۱۲	۷۶۴/۸
۰/۵۵	۰/۴۵	۰/۶۳۰	۰/۶۱۲	۵۷۴۴۵۸	۷۶۷/۵
۰/۵۲۵	۰/۴۷۵	۰/۶۱۱	۰/۶۳۵	۵۸۱۲۴۳	۷۷۰/۳
۰/۵	۰/۵	۰/۵۹۲	۰/۶۵۶	۵۸۷۷۹۵	۷۷۳
۰/۴۷۵	۰/۵۲۵	۰/۵۷۲	۰/۶۷۷	۵۹۴۱۱۹	۷۷۵/۷
۰/۴۵	۰/۵۵	۰/۵۵۳	۰/۶۹۸	۶۰۰۲۰۵	۷۷۸/۵
۰/۴۲۵	۰/۵۷۵	۰/۵۳۴	۰/۷۱۷	۶۰۶۱۰۶	۷۸۱/۲
۰/۴	۰/۶	۰/۵۱۴	۰/۷۳۶	۶۱۱۷۹۸	۷۸۴
۰/۳۷۵	۰/۶۲۵	۰/۴۹۵	۰/۷۵۵	۶۱۷۲۹۳	۷۸۶/۸
۰/۳۵	۰/۶۵	۰/۴۷۵	۰/۷۷۲	۶۲۲۶۲۵	۷۸۹/۶
۰/۳۲۵	۰/۶۷۵	۰/۴۵۵	۰/۷۸۹	۶۲۷۷۷۰	۷۹۲/۴
۰/۳	۰/۷	۰/۴۳۵	۰/۸۰۶	۶۳۲۷۴۲	۷۹۵/۳
۰/۲۷۵	۰/۷۲۵	۰/۴۱۴	۰/۸۲۲	۶۳۷۵۴۶	۷۹۸/۲
۰/۲۵	۰/۷۵	۰/۳۹۳	۰/۸۳۷	۶۴۲۲۱۱	۸۰۱/۲
۰/۲۲۵	۰/۷۷۵	۰/۳۷۱	۰/۵۸۳	۶۴۶۷۳۴	۸۰۴/۳
۰/۲	۰/۸	۰/۳۴۸	۰/۸۶۷	۶۵۱۰۹۹	۸۰۷/۵
۰/۱۷۵	۰/۸۲۵	۰/۳۲۵	۰/۸۸۱	۶۵۵۳۲۲	۸۱۰/۹
۰/۵۰۰	۰/۸۵	۰/۳۰۰	۰/۸۹۵	۶۵۹۴۰۳	۸۱۴/۴
۰/۱۲۵	۰/۸۷۵	۰/۲۷۴	۰/۹۰۸	۶۶۳۳۳۵	۸۱۸/۱
۰/۱	۰/۹	۰/۲۴۶	۰/۹۲۰	۶۶۷۱۳۲	۸۲۲/۱
۰/۰۷۵	۰/۹۲۵	۰/۲۱۴	۰/۹۳۳	۶۷۰۷۸۴	۸۲۶/۶
۰/۰۵	۰/۹۵	۰/۱۷۸	۰/۹۴۴	۶۷۴۲۶۳	۸۳۱/۸
۰/۰۲۵	۰/۹۷۵	۰/۱۳۱	۰/۹۵۵	۶۷۷۵۱۴	۸۳۸/۴
۰	۱	۰/۱۰۰	۰/۹۶۰	۶۷۸۹۷۰	۸۴۲/۸

* میلیون تومان ** میلیون مترمکعب مأخذ: یافته‌های تحقیق

جدول ۷، در واقع، نشان‌دهندهٔ تغییرات درآمد کشاورزان و مقدار برداشت از آب زیرزمینی در نتیجهٔ وزن‌های متفاوتی است که در پژوهش حاضر، برای هر کدام از اهداف زیست‌محیطی و اقتصادی در نظر گرفته شده است. با افزایش در وزن منافع زیست‌محیطی، مقدار برداشت از آب زیرزمینی کاهش می‌یابد؛ همچنین، با افزایش در وزن منافع اقتصادی، مقدار برداشت از آب زیرزمینی و در نتیجه، درآمد کشاورزان افزایش می‌یابد. ماکزیمم مقدار منحنی بهینه پارتو در حالت تساوی وزن اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی حاصل شد. بنابراین، میزان برداشت بهینه از آب زیرزمینی زمانی که وزن اهداف زیست‌محیطی و اقتصادی یکسان باشد (مقدار ۵۰-۵۰)، برابر با ۷۷۳ میلیون مترمکعب در سال خواهد بود (جدول ۷). در واقع، این همان نقطه‌ای است که از حل مدل چانه‌زنی نش به‌دست آمده است و در همین نقطه، شیب منحنی پارتو با شیب منحنی بی‌تفاوتی با هم مماس شده‌اند. از این‌رو، جواب مدل چانه‌زنی نش همین نقطه است. این نقطهٔ بهینهٔ جواب حل مسئله است و در آن، طرفین به توافق می‌رسند. از آنجا که بهترین حالت در وزن‌دهی مساوی به هر کدام از طرفین به‌دست آمده، در نتیجه، این نقطه تقریباً در وسط منحنی پارتو قرار دارد. این وضعیت در نمودار ۲ نشان داده شده است.



نمودار ۲. تعیین مقادیر بهینه بر روی مرز پارتو

از مقایسهٔ میان جواب بهینهٔ حاصل از حل تعارض و چهارده راه حل اولیهٔ مورد بررسی چنین برمی‌آید که این میزان به دهمین راه حل «برداشت از آب زیرزمینی» نزدیک‌تراست. حال، با توجه به میزان برداشت آب زیرزمینی به میزان ۷۷۳ میلیون مترمکعب، می‌توان با مراجعه به الگوی پایه، الگوی کشت بهینه در دشت جیرفت را مشخص کرد.

جدول ۸. الگوی کشت موجود و الگوی کشت بهینه بعد از حل تعارض

محصول	سطح زیر کشت (هکتار)		وضعیت تغییرات نسبت به شرایط موجود
	شرایط موجود	الگوی بهینهٔ روش حل تعارض	
گندم	۳۹۸۲	۲۰۳۱	کاهش
جو	۷۵۱	۱۴۳	کاهش
ذرت	۲۲۰۹	۱۱۷۲	کاهش
پیاز	۳۳۶۵	۲۵۵۲	کاهش
سیب‌زمینی	۳۷۱۶	۲۸۹۳	کاهش
خیار	۴۵۹۴	۳۵۶۴	کاهش
گوجه	۳۳۹۰	۲۶۲۴	کاهش
هندوانه	۲۴۷	۱۲۲	کاهش
خیار گلخانه‌ای	۱۰۷۸	۹۹۰	کاهش
یونجه	۲۹۴۰	۲۹۴۰	بدون تغییر
پرتقال	۱۳۸۰۸	۱۳۸۰۸	بدون تغییر
خرما	۸۴۲۹	۸۴۲۹	بدون تغییر
مجموع سطح زیرکشت	۴۸۵۰۹	۴۱۲۷۰	کاهش
درآمد خالص کشاورزان (میلیون تومان)	۶۹۱۰۶۶	۶۵۰۰۹۶	کاهش
مقدار متوسط آب زیرزمینی مصرف‌شده (میلیون مترمکعب)	۸۵۷	۷۷۳	کاهش

مأخذ: یافته‌های تحقیق

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در الگوی کشت بهینه، سطح زیر کشت تمامی محصولات زراعی سالانه نسبت به شرایط موجود با کاهش مواجه شده و در مجموع، سطح زیر کشت بهینه نسبت به شرایط فعلی ۷۲۳۹ هکتار (۱۴/۹ درصد) کاهش یافته است. سطح زیر کشت محصولات باغی و چندساله حداقل سطح زیر کشت موجود خود را حفظ کرده و در این سطح از برداشت آب افزایشی هم نداشته است. درآمد خالص کشاورزان نیز در الگوی کشت بهینه نسبت به شرایط موجود ۵/۹ درصد کاهش یافته است؛ اما این کاهش درآمد در کوتاه‌مدت، منافع درازمدت تعادل سفره آب زیرزمینی و تداوم فعالیت کشاورزی دشت و جلوگیری از تخریب کلی سفره آب زیرزمینی را به‌دنبال دارد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در الگوی کشت بهینه نسبت به الگوی کشت موجود، میزان برداشت آب زیرزمینی ۸۴ میلیون مترمکعب (۹/۸ درصد) کاهش یافته که در نتیجهٔ این کاهش برداشت آب، سطح زیر کشت موجود حدود پانزده درصد و درآمد خالص کشاورزان ۵/۹ درصد در سال کاهش یافته است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در تحقیق حاضر، برای تعیین میزان برداشت بهینه از منابع آب زیرزمینی دشت جیرفت، از نظریه بازی‌ها استفاده شد. به‌منظور یافتن تعادل بهینه میان دو هدف متعارض حداکثرسازی سود و کاهش مخاطرات زیست‌محیطی که ترکیبی از شاخص‌های ضریب برداشت بیش از حد از سفره، میزان مصرف کود و سم در هکتار و شاخص موازنه نیتروژن است، از الگوی برنامه‌ریزی ریاضی مثبت (PMP) استفاده شد. متناسب با چهارده سناریوی برداشت آب از منابع آب زیرزمینی، محاسبهٔ اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی با استفاده از نرم‌افزار GAMS صورت گرفت و مرز پارتو یا منحنی مبادله با استفاده ازداده‌های نرمال اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی تخمین زده شد. در ادامه، با بهره‌گیری از راه حل نامتقارن نش و اعمال وزن‌های متفاوت به اهداف متعارض، میزان بهینه برداشت از آب‌های زیرزمینی تعیین شد. بر پایهٔ نتایج به‌دست آمده، در صورتی که برای اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی وزن یکسان در نظر گرفته شود،

میزان برداشت بهینه آب ازمنابع آب زیرزمینی در سال زراعی ۹۵-۱۳۹۴ برابر با ۷۷۳ میلیون مترمکعب است. در الگوی کشت بهینه، میزان برداشت آب زیرزمینی ۸۴ میلیون مترمکعب نسبت به الگوی کشت موجود (معادل ۹/۸ درصد) کاهش یافته و در نتیجه، سطح زیر کشت موجود حدود پانزده درصد و درآمد خالص کشاورزان ۵/۹ درصد در سال کاهش یافته است. این کاهش درآمد در کوتاه‌مدت منافع درازمدت تعادل سفره آب زیرزمینی و تداوم فعالیت کشاورزی دشت و جلوگیری از تخریب کلی سفره آب زیرزمینی را به‌دنبال دارد. مطالعات گذشته در خصوص وضعیت سفره‌آب زیرزمینی دشت جیرفت نیز نشان داده که پمپاژ بیش از حد از سفره آب زیرزمینی پیامدهای زیست‌محیطی فراوان همچون تغییر کیفیت آب زیرزمینی، افزایش مصرف انرژی استحصال آب زیرزمینی، افزایش آسیب‌پذیری دشت نسبت به خشکسالی، نشست زمین و ایجاد شکاف در سطح زمین و ابنیه را به‌دنبال داشته است. بنابراین، باید همکاری‌ها در راستای کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی تقویت شود.

در پایان، براساس نتایج پژوهش حاضر، پیشنهادهایی به‌شرح زیر ارائه می‌شود:

- با رعایت ملاحظات زیست‌محیطی و منافع درازمدت جامعه، اتخاذ اقداماتی از سوی سیاست‌گذاران در راستای اصلاح الگوی کشت موجود و کاهش حجم برداشت آب از منابع آب زیرزمینی دشت جیرفت، پیش از آنکه منفعت کوتاه‌مدت کشاورزان در حداکثرسازی سودشان سفرهٔ آب زیرزمینی این دشت را با تهدید جدی مواجه سازد؛
- با توجه به نتایج روش‌های حل تعارض، تعیین حد مجاز ۷۷۳ میلیون مترمکعب برای برداشت آب توسط کشاورزان؛
- به‌منظور تداوم تولید، حفظ پایداری و تعادل‌بخشی به منابع آب زیرزمینی در دشت جیرفت، پیگیری اقدامات لازم در راستای کاهش برداشت ۸۴ میلیون مترمکعب آب از طریق نصب کنتورهای حجمی، کاهش دبی چاه‌ها و سیاست‌های تشویقی، ترویجی و تعرفه‌ای برای افزایش ساعات خاموشی چاه‌های آب؛
- انجام فعالیت‌های آموزشی و ترویجی برای آشنایی کشاورزان با اهداف زیست‌محیطی در

تعیین میزان برداشت از آب زیرزمینی و در نتیجه، بهبود وضعیت آبخوان؛ و

- از آنجا که طرح تعادل‌بخشی به سفره‌های آب زیرزمینی در دشت‌های کشور مورد توجه است، می‌توان از روش‌هایی نظیر آنچه در پژوهش حاضر، با توجه ویژه به کاهش مخاطرات زیست‌محیطی در دشت جیرفت به‌کار رفته است، برای اجرای طرح‌های مشابه در تمام دشت‌های کشور سود جست.

منابع:

1. Abdoli, Gh. (2013). Game theory and its applications (static and dynamic games with full information). Tehran: Tehran University Press. (Persian)
2. Arfini, F., Donati, M. and Paris, Q. (2003). A national PMP model for policy evaluation in agriculture using micro data and administrative information. Paper Presented at the International Conference on Agricultural Policy Reform and the WTO: Where are we heading? Cari, Italy.
3. Asgharpour, M,J. (2003). Group decision making and game theory with the attitude of research in action. Tehran: Tehran University Press. (Persian)
4. Cortignani, R. and Severini, S. (2009). Modeling farm-level adoption of deficit irrigation using Positive Mathematical Programming. *Agricultural Water Management*, 96: 1785-1791.
5. Dinar, A. (1995). Conflict, cooperation and institutions in international water management: an economic analysis. Edward Elgar Publishing, 2007.
6. Ellise, E.M. (1998). Agricultural groundwater conservation program in the phoenix active management area. MSc Thesis, University of Arizona, Tucson, AZ.
7. Esteban, E. and Dinar, A. (2011). Collective action and the commons: are cooperative groundwater institutions stable in the presence of environmental externalities. Presented at the AERE Conference, Seattle, June 2011.
8. First Consulting Engineers (2000). Environmental research project on resources and expenditures in the west of Jazmourian with a systematic and comprehensive approach. *Groundwater Studies*, 3(5): 89-117. (Persian)

9. Harsanyi, J.C. and Selten, R. (1972). A generalized Nash solution for two-person bargaining games with incomplete information. *Management Science*, 18: 80-106.
10. Howitt, R. (1995). A calibration method for agricultural economics production models. *American Journal of Agricaltural Economics*, 46(2): 147-159.
11. Howitt, R.E. (1995). Positive Mathematical Programming. *American Journal of Agricultural Economics*, 77: 329-342.
12. Kerman Regional Water Authority (2008). Province water profile. Published by Basic Studies Department of Water Resources. (Persian)
13. Kerman Regional Water Authority (2015). Report on the extension of the ban on underground water resources in the Jiroft study area. Published by Basic studies, Department of Water Resources. (Persian)
14. Khatoonabadi, A. and Amini, M. (1996). Sustainable agricultural principles and natural resources management based on optimal energy productivity. Fourth Congress of Agronomy and Plant Breeding, Isfahan. (Persian)
15. Kloezen, W.H. and Garcés-Restrepo, C. (1998). Assessing irrigation performance with comparative indicators: the case of the Alto Rio Lerma Irrigation District, Mexico. Research Report 22. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute.
16. Madani, K. (2010), Game theory and water resources. *Journal of Hydrology*, 381: 225-238.
17. Madani, K. and Dinar, A. (2012). Non-cooperative institutions for sustainable common pool resource management: application to groundwater. *Ecological Economics*, 74: 34-45.
18. Madani, K. and Hipel, W. (2011). Non-cooperative stability definitions for strategic analysis of generic water resources conflicts. *Water Resources Management*, 25(8): 1949.
19. Najafi Almdarloo, H. (2013). Application of game theory in economic and environmental assessment: use of groundwater resources in Varamin cropping pattern. PhD Thesis.Tarbiat Modares University, Tehran. (Persian)
20. Nakao, M., Wichelns, D. and Montgomery, J. (2002). Game theory analysis of competition for groundwater involving El Paso, Texas and Ciudad Juarez, Mexico. To Be Presented at "Moving with the Speed of Change", the 2002 Annual Meeting of the American Agricultural Economics Association in Long Beach, California, July 28-31, 2002.

21. OECD/EUROSTAT. (2007). Gross nitrogen balances handbook. Available at http://www.oecd.org/tad/env/indicators. Retrived: Oct. 23.
22. Paris, Q. and Howitt, R.E. (1998). An analysis of ill-posed production problems using maximum entropy. *American Journal of Agricultural Economics*, 80: 124-138.
23. Pourzand, F. and Zibaei, M. (2011). Application of game theory to determine the optimal extraction of groundwater Firouzabad Plain aquifers. *Agricultural Economics*, 5(4): 1-24. (Persian)
24. Riesgo, L. and Gomez-Limo, J.A. (2006). Multi-criteria policy scenario analysis for public regulation of irrigated agriculture. *Agricultural System*, 91: 1-28.
25. Sabouhi, M. and Mojarrad, A. (2000). Application of game theory in the management of groundwater resources in Atrak Basin. *Economic and Agricultural Development*. 24(1): 1-12. (Persian)
26. Salazar, R., Szidarovszky, F., Coppola, E. and Rajano, A. (2007). Application of game theory for a groundwater conflict in Mexico. *Journal of Environmental Management*, 54: 560-571.
27. Salehi, F., Daneshvar-Kakhki, M., Shahnoushi, N. and Rajabi, M. (2000). Application of game theory to determine the optimal extraction of groundwater aquifers in Taibad Plain. *Agricultural Economics*, 4(3): 65-89 (Persian)
28. Shahidasht, A.R. and Abbasnejad, A. (2011). Evaluation of the environmental impacts of aquifer depletion in Jiroft Plain and prediction of the future status. *Iran-Water Resources Research*, 7(1):77-81. (Persian)