تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال هجدهم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱
Volume 18, No. 3, Fall 2022 (IR-WRR)
۱۱۱-۱۳۰

# اثر پذیرش الگوی کم‌آبیاری در سطح مزارع دشت اردلان با تأکید بر مدیریت پایدار منابع آب

ابوذر پرهیزکاری[۱*]

## چکیده

استفاده صحیح از روش کم‌آبیاری نیاز به درک کاملی از پاسخ عملکرد به آب (حساسیت محصول به تنش خشکی) و تأثیر اقتصادی کاهش در عملکرد محصول دارد. در مناطقی که منابع آب محدود هستند، این روش می‌تواند برای کشاورزان جهت حداکثرسازی بهره‌وری آب کشاورزی به جای حداکثرسازی برداشت محصول در هر واحد زمین سودمند باشد. بدین منظور، در مطالعه حاضر اثر پذیرش راهبرد کم‌آبیاری در سطح مزارع دشت اردلان با تأکید بر مدیریت پایدار منابع آب ارزیابی شد. این کار با بهره‌گیری از مدل برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی در سطح تجمیعی- فضایی (SI-PMP) و داده‌های پرسشنامه‌ای مربوط به سال زراعی ۱۳۹۹-۱۳۹۸ انجام شد. پس از واسنجی سیستم مدل‌سازی پیشنهادی در محیط نرم‌افزاری GAMS، اثرات کم‌آبیاری به روش کلارک در سطوح ۵ و ۱۰ درصد بر الگوی بهینه کشت، منابع آب مصرفی و بازده ناخالص کشاورزان ارزیابی شد. نتایج حاکی از آن است که تفاوت فاحشی بین آب‌بهای پرداختی کشاورزان (۵۴۷ ریال) و ارزش اقتصادی آب آبیاری (۱۳۴۸ ریال) در دشت اردلان وجود دارد و این امر منجر به رایگان تلقی شدن نهاده آب و استفاده بی‌رویه آن در سطح اراضی زراعی شده است. همچنین، اعمال روش کم‌آبیاری علی‌رغم ایجاد کاهش در عملکرد محصولات منتخب (از ۰/۸۸ تا ۵/۷۲ درصد) و بازده ناخالص کشاورزان (از ۳/۱۵ تا ۷/۰۷ درصد)، منجر به صرفه‌جویی ۵/۰۱ تا ۹/۷۸ درصد در مصرف آب آبیاری می‌شود. کشش‌پذیری بیشتر تقاضای نهاده آب در سطح مزرعه کوچک ($e_{water}$=۰/۵۷۳) و افزایش ارزش اقتصادی آب آبیاری به میزان ۳/۰۹ تا ۸/۲۱ درصد نسبت به شرایط سال پایه از دیگر پیامدهای اعمال کم‌آبیاری در الگوهای مزارع نماینده است. در پایان، به‌کارگیری روش کم‌آبیاری در سطوح پایین (۵ و ۱۰ درصد) به‌ویژه در سطح مزارع بزرگ، اعمال برنامه سیاستی ملاحظه برابری (در راستای کاهش شکاف قیمتی یا ارزشی آب‌بها و ارزش اقتصادی آب)، اصلاح نظام قیمت‌گذاری و تفکیک‌سازی قیمت آب برای بهره‌برداران کوچک، متوسط و بزرگ جهت مدیریت پایدار منابع آب در دشت اردلان توصیه می‌شود.

***کلمات کلیدی:*** کم‌آبیاری، الگوی کلارک، ارزش اقتصادی آب، مدل‌سازی تجمیعی- فضایی، دشت اردلان.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱/۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۸/۱۸

# The Effect of Adoption of Deficit Irrigation Pattern in Farm Level in Ardalan Plain with Emphasis on Water Resources Management

*A. Parhizkari* [1*]

## Abstract

The correct application of deficit irrigation requires thorough understanding of the yield response to water (crop sensitivity to drought stress) and the economic impact of reductions in yield of products. In regions where water resources are restrictive, it can be more profitable for farmers to maximize crop water productivity instead of maximizing the harvest per unit land. Therefore, in the present study the effect of adoption of Clarke's deficit irrigation was evaluated in farms-level in Ardalan plain with emphasis on water resources management. This case were applied using a spatial-aggregation positive mathematical programming (SA-PMP) model and the questionnaire data related to year 2019-2020. After calibration of proposed modeling system in GAMS software, the effects of Clarke deficit irrigation in 5 and 10 percent levels on optimum cropping pattern, consumable water resources and farmers' gross margin were evaluated. The results showed that there is a significant difference between farmers' paid water charges (547 Rials) and economic value of irrigation water (1348 Rials) in Ardalan plain which leads farmers to consider water as a free input and its over-consumption in crop lands. Also, applying the deficit irrigation method leads to a saving of 5.01 to 9.78 percent in irrigation water for only a slight decrease in yield of selected products (from 0.88 to 5.72 percent) and in farmers' gross margin (from 3.15 to 7.07 percent). More stretchability of water demand in small farm ($e_{water}$= 0.573) and increasing the economic value of water from 3.9 to 8.9 percent compared to the base year condition are another consequence of application of deficit irrigation in representative farms pattern. Finally, for a sustainable management of water resources in Ardalan plain it is recommended to use deficit irrigation method at low levels (5 and 10 percent) especially in large farms, to apply the policy program of equality consideration (in order to reduce the gap between the water price and the economic value of water), to modify the pricing system to differentiate the price of water for small, medium and large farms.

***Keywords:*** Deficit Irrigation, Clarke's Pattern, Economic Value of Water, Spatial-Aggregation Modelling, Ardalan Plain.

Received: March 29, 2022
Accepted: November 9, 2022

۱- دکتری اقتصاد کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.
*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۴۰۱ امکانپذیر است.

1- Ph.D. in Agricultural Economics, Payam Noor University, Tehran, Iran.
Email: Abozar.parhizkari@yahoo.com
*- Corresponding Author
Dor: 20.1001.1.17352347.1401.18.3.8.0

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

## ۱- مقدمه

بخش کشاورزی در ایران بزرگ‌ترین مصرف‌کننده منابع آب محسوب شده و بیش از ۹۰ درصد مصارف آبی کشور را به خود اختصاص داده است (Shirvanian et al., 2015; Parhizkari et al., 2020). از این‌رو، پایداری منابع آب در ایران بیش از هر چیز تحت تأثیر بهره‌برداری از منابع آب کشاورزی قرار می‌گیرد (Barikani et al., 2011). یکی از علل اصلی بروز تنش‌های آبی در کشور، عدم استفاده بهینه از آب‌های استحصالی است؛ به طوری که از کل مصارف آبی در بخش کشاورزی (در بخش زراعت)، تنها حدود ۳۰ درصد به مصرف واقعی رسیده و در حدود ۷۰ درصد دیگر بدون بهره‌وری مناسب تلف می‌گردد (Shirvanian et al., 2015). از طرف دیگر، وقوع خشکسالی‌های اخیر در ایران محدودیت عرضه آب را افزایش داده و با گذر زمان، افزایش جمعیت موجب افزایش تقاضا برای تولیدات زراعی و در ادامه، موجب افزایش تقاضا برای مصرف آب کشاورزی شده است. موارد فوق، این منبع را به عنوان محدودکننده‌ترین عامل تولید و توسعه بخش کشاورزی مطرح نموده و توجه ویژه فعالان این بخش را به خود معطوف نموده است (Shirvanian et al., 2015; Parhizkari and Badie Barzin, 2016). در راستای استفاده بهینه از این نهاده کمیاب، توجه به راهکارهای اساسی صرفه‌جویی مصرف آب ضروری به نظر می‌رسد. از جمله راهکارهای مورد استفاده در این زمینه، روش کم‌آبیاری[1] (DI) است که در نقاط مختلفی از جهان نظیر کلمبیا، آمریکا، هند، آفریقا و سایر نواحی کم‌آب دنیا رایج است (Ferers and Soriano, 2007; Karrou and Oweis, 2012; Shirvanian et al., 2015).

دشت اردلان که منطقه مطالعه‌شده در تحقیق حاضر است، با مساحت ۶۲۷۵۱ هکتار یکی از دشت‌های مستعد استان قزوین برای تولید محصولات زراعی است (شکل ۱). این دشت با مختصات جغرافیایی ۴۹ درجه و ۲۳ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه عرض شمالی و با فاصله ۱۴۰ کیلومتر از مرکز استان قزوین، بین شهرستان آوج و استان همدان واقع شده است (Agricultural and Natural Resources Research Center of Qazvin Province, 2014; Parhizkari, 2015; Mozaffari, 2016).

میانگین بارش سالانه در محدوده دشت اردلان حدود ۲۳۵ میلی‌متر است. ماه‌های مرداد و شهریور کم‌باران‌ترین و ماه‌های فروردین و اردیبهشت پرباران‌ترین ماه‌های سال در این منطقه هستند. این دشت به لحاظ وضعیت منابع آبی دارای دو حوضه اصلی ($A_2$ و $A_6$) و چهار زیر حوضه فرعی ($A_1$، $A_3$، $A_4$ و $A_5$) است که حوضه‌های اصلی، محدوده مرزی این دشت را نشان می‌دهند (Qazvin Province Regional Water Company, 2020). طی سال‌های اخیر، به دلیل توسعه سطح سبز محصولات زراعی به خصوص گندم آبی، جو آبی، یونجه، هندوانه و گوجه‌فرنگی در این دشت، بهره‌برداری از منابع آب در آن افزایش یافته است؛ به طوری که اغلب کشاورزان در فصول گرم

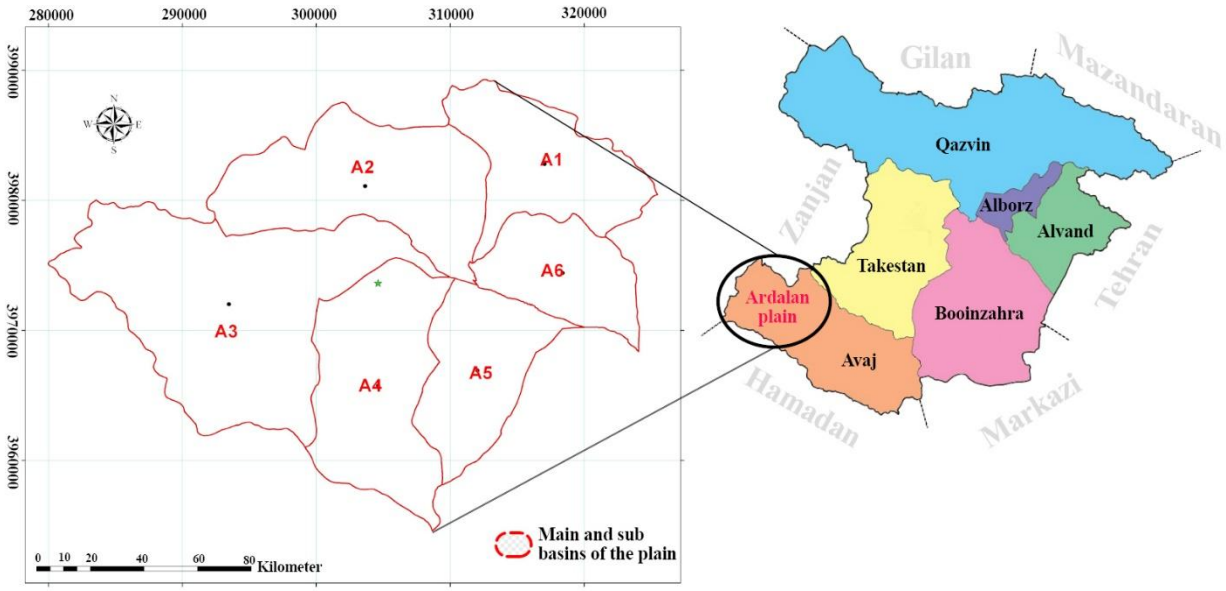


**Fig. 1- Location of the study area and water basins**

**شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و زیرحوضه‌های آبی در آن**

سال و همزمان با دوره رشد محصولات منتخب زراعی افزون بر استفاده از منابع آب سطحی، مبادرت به بهره‌برداری از سفره‌های آب زیرزمینی دارند. این امر منجر به افت سطح ایستابی منابع آب زیرزمینی شده و تأمین آب آبیاری موردنیاز اراضی زیرکشت را با مشکلات عدیده مواجه نموده است (Water Engineering Consultants and Sustainable Development, 2020). از این رو، مدیریت جامع منابع آب در دشت اردلان نیازمند برنامه‌ریزی مناسبی برای جلوگیری از مشکلات آتی مانند کم‌آبی، رخداد دوره‌های خشکی و خشکسالی، بیکار شدن کشاورزان و مهاجرت آن‌ها به مناطق شهری همجوار است. این امر کاربرد روش کم‌آبیاری را به عنوان راهکاری مدیریتی در زمینه پایداری منابع آب در دشت اردلان ایجاب می‌کند؛ اما لازم است تا قبل از اتخاذ این روش، اثرات بالقوه آن در بخش‌های کشاورزی و مدیریت منابع آب دشت مذکور ارزیابی شوند. به همین منظور، تحقیق حاضر به مدل‌سازی پذیرش کم‌آبیاری در سطح اراضی زراعی دشت اردلان با تأکید بر پایداری و صیانت از منابع آب می‌پردازد.

روش کم‌آبیاری بر این موضوع تأکید دارد که در صورت محدودیت منابع آب، سطح بهینه اقتصادی آبیاری می‌تواند کمتر از مقدار آبیاری باشد که برای تولید حداکثر محصول موردنیاز است (Keykhaee and Ganji Khoramdel, 2017; Zapata-Sierra and Manzano-Agugliaro, 2017). بر این اساس، در اکثریت مواقع، به ویژه در سال‌هایی که میزان بارندگی زیاد است می‌توان با به‌کارگیری این روش، آب اضافی را به عنوان پشتوانه سال‌های کم‌باران ذخیره نمود و نسبت به ایجاد بانک آب[۲] (WB) مبادرت ورزید. بدین ترتیب، با استفاده از تکنیک کم‌آبیاری امکان مصرف بهینه و اقتصادی آب در کشاورزی به‌وجود آمده و از این رهگذر می‌توان کمک شایان توجهی به اقتصاد این بخش از جامعه نمود (Mosavi and Tavakoli, 2008). در این زمینه، English and Raja (1997) تحقیقی را در زمینه ارزیابی سودمندی بالقوه و خطرات کم‌آبیاری سه محصول گندم، پنبـه و ذرت در کالیفرنیا انجام دادند. نتایج نشان داد که اعمال کم‌آبیاری با توجه بـه شرایط محیطی کالیفرنیا از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر بوده و می‌تواند در راستای افزایش سود فعالیت‌های زراعی مورد استفاده قرار گیرد. Sepaskhah et al. (2006) در زمینه بررسی اثرات کم‌آبیاری، آبیاری جویچه‌ها به صورت یک در میان ثابت، یک در میان متغیر و آبیاری معمول را در کشت گندم زمستانه مورد توجه قرار دادند. نتایج نشان داد که در روش‌های کم‌آبیاری یک در میان ثابت و یک در میان متغیر به‌ترتیب ۲۰ و ۲۷ درصد نسبت به روش معمولی آبیاری، آب کمتری مصرف می‌شود. Patane et al. (2011) مدیریت روش کم‌آبیاری را برای محصول گوجه‌فرنگی در نقاط خشک و نیمه‌خشک کشور ایتالیا مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که آبیاری گوجه‌فرنگی به اندازه ۵۰ درصد تبخیر و تعرق، باعث حصول بیشترین میزان کیفیت این محصول و صرفه‌جویی مصرف آب در تولید آن می‌شود، ضمن این‌که کاهش محصول کمی (ضریب عملکرد Ky 1 >) در این شرایط مشاهده می‌گردد. Zapata-Sierra and Manzano-Agugliaro (2017) در پژوهشی آثار بالقوه روش‌های کم‌آبیاری کنترل‌شده را برای درختان نارنج در کشورهای مدیترانه‌ای ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که استراتژی‌های کنترل، کم هزینه بوده و مزایای خاصی را برای مدیریت محصول به ارمغان می‌آورند. این استراتژی‌ها جایگزین مناسبی در راستای کاهش میزان ورودی آب به سطح مزارع (با اعمال روش کم‌آبیاری) و حداقل نمودن اثرات آن بر میزان و کیفیت تولید محصول می‌باشند و در نتیجه به پایداری تولید محصول کمک می‌کنند. در ایران نیز، Keshavarz and Sadeghzade (2010) در تحقیقی بیان داشتند در شرایطی که محدودیت منابع آب قابل استحصال عامل اصلی محدودکننده توسعه کشاورزی در ایران است، یکی از راهکارهای کلیدی و اولویت‌دار بهینه‌سازی مصرف آب، استفاده از کم‌آبیاری و تجزیه و تحلیل اقتصادی این شیوه از مدیریت آبیاری است. Shirvanian et al. (2015) در مطالعه‌ای به تعیین آستانه اقتصادی کم‌آبیاری پنبه در شهرستان داراب پرداختند. این کار با انجام یک آزمایش اسپلیت پلات در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی در چهار تکرار به مدت دو سال در ایستگاه تحقیقات بختاجرد این شهرستان صورت گرفت. نتایج نشان داد که سطح آستانه اقتصادی کم‌آبیاری پنبه ۸۸۶۹ مترمکعب آب آبیاری در هکتار است که نسبت به میزان آب مصرفی در سطح آبیاری کامل موجب صرفه‌جویی ۳۰/۹۶ درصد (۳۹۷۷ مترمکعب در هکتار) در آب آبیاری می‌گردد. Parhizkari et al. (2015) در تحقیقی جهت پایداری و صیانت از منابع آب موجود در دشت قزوین، به بررسی اثرات روش کم‌آبیاری توأم با کاهش منابع آب دردسترس کشاورزان پرداختند (در شرایط اعمال سیاست‌های طرف عرضه منابع آب که منجر به کاهش منابع آب دردسترس کشاورزان می‌شوند). برای این منظور از روش‌های حداقل مربعات معمولی[۳] (OLS) و برنامه‌ریزی ریاضی غیرخطی[۴] (NLP) استفاده شد. نتایج حاصل از تخمین توابع تولید نشان داد که کم‌آبیاری پنج درصد سبب کاهش ناچیز عملکرد محصولات می‌شود، اما کم‌آبیاری ۱۰ درصد بر عملکرد اغلب محصولات الگو اثر منفی می‌گذارد. نتایج حاصل از مدل برنامه‌ریزی غیرخطی نیز نشان داد که به‌کارگیری کم‌آبیاری پنج درصد توأم با سیاست کاهش آب آبیاری دردسترس اگرچه منجر به کاهش اندکی

در سود ناخالص کشاورزان می‌شود، اما بـه حفظ و پایـداری منابع آب سطحی و زیرزمینی دشت قزوین کمک شایانی می‌کند. Shahrokhnia and Rahimi (2017) با انجام تحقیقی در یکی از مزارع شهرستان مرودشت به بررسی اقتصادی کم‌آبیاری (در سطوح) ارقام گوجه‌فرنگی در کشت نشایی پرداختند. آن‌ها مقادیر ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد نیاز آبی گوجه فرنگی را بر اساس روش پنمن مانتیث محاسبه و به مزرعه دادند. همچنین، یک تیمار آبیاری با مدیریت کشاورز نیز اضافه نمودند. در انتها، با توجه به هزینه‌ها و درآمدهای مزرعه، نسبت سود به هزینه و تفاوت درآمد و هزینه را برآورد و بررسی‌های اقتصادی را انجام دادند. نتایج نشان داد که با افزایش میزان آب آبیاری میزان عملکرد افزایش و کارایی مصرف آب کاهش می‌یابد که این تغییرات فقط بین تیمارهای ۶۰ و ۱۲۰ درصد نیاز آبی از نظر آماری معنی‌دار گردید. بررسی‌های اقتصادی در سطوح معنی‌دار فوق نیز نشان داد که تولید محصول گوجه‌فرنگی در شرایط مزرعه مورد آزمایش، با قیمت فروش محصول ۲۵۰۰ ریال و ارزش آب صفر تا ۶۰۰۰ ریال، به ترتیب دارای نسبت درآمد به هزینه ۰/۷۸ و ۰/۶۸ بوده که اقتصادی نیست. Asaadi et al. (2018) در تحقیقی به ارزیابی اثر سناریوهای مختلف کم‌آبیاری بر بهینه‌سازی مصرف آب و الگوی کشت غالب (گندم، جو، چغندرقند، ذرت دانه‌ای، ذرت علوفه‌ای و یونجه) در شبکه آبیاری دشت قزوین پرداختند. نتایج نشان داد که با اعمال سناریوی کم‌آبیاری پنج درصد، افزون بر صرفه‌جویی در مجموع آب مصرفی به میزان ۵/۲ درصد نسبت به شرایط سال پایه (کاهش از ۳۴۱۸۰۰ به ۳۲۴۰۶۲ هزار مترمکعب)، امکان افزایش درآمد مزرعه به میزان ۰/۴ درصد (افزایش از ۱۴۴۱۵۰۴ به ۱۴۴۷۳۷۵ میلیون ریال) وجود دارد. از طرفی دیگر، بسته به‌شدت بحران و مقدار کمبود آب، تصمیم‌گیری برای تعیین راهبرد کم‌آبیاری و الگوی کشت منطقه متفاوت است.

مطالعات بررسی شده نشان می‌دهند که استفاده از روش کم‌آبیاری سبب افزایش راندمان آب در سطح مزارع شده و از سوی دیگر، در مواقع وجود محدودیت نهاده آب در بخش کشاورزی راهکار مناسب و قابل اجرایی جهت حفظ و صیانت از منابع آب دردسترس کشاورزان است. با توجه به اهمیت این موضوع، در مطالعه حاضر با بهره‌مندی از یک سیستم مدل‌سازی تجمیعی- فضایی به بررسی اثرات پذیرش کم‌آبیاری در اراضی زراعی دشت اردلان پرداخته شد و پیامدهای این استراتژی با تأکید بر مدیریت منابع آب در سطوح مختلف کاربردی بر الگوی بهینه کشت، میزان آب مصرفی در الگو، تقاضای آب، ارزش اقتصادی آب و بازده ناخالص کشاورزان ارزیابی شد. نوآوری مطالعه حاضر در ارائه یک سیستم مدل‌سازی تجمیعی- فضایی است که قابلیت بررسی اثرات کم‌آبیاری را بر مجموعه‌ای از متغیرهای اقتصادی در زیربخش کشاورزی دشت اردلان دارا است؛ این در حالی است که اغلب تحقیقات پیشین اثرات کم‌آبیاری را پیرامون یک متغیر و آن هم الگوی کشت، مورد بررسی قرار داده‌اند.

## ۲- روش انجام تحقیق

در تحقیق حاضر به منظور بررسی اثرات پذیرش راهبرد کم‌آبیاری در اراضی زراعی دشت اردلان از یک سیستم مدل‌سازی مشتمل بر مدل برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی[۵] (PMP) و الگوی کم‌آبیاری کلارک[۶] (CDIP) استفاده شد. برای تحقق این امر، ابتدا الگوی برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی در سطح تجمیعی- فضایی[۷] (SA-PMP) طی سه مرحله در محیط نرم‌افزاری GAMS واسنجی گردید. سپس، با کمک داده‌ها و اطلاعات مربوط به محصولات منتخب زراعی دشت اردلان طی سال پایه ۱۳۹۹-۱۳۹۸ و لحاظ نمودن خروجی الگوی کم‌آبیاری کلارک (شامل تغییرات عملکردی مربوط به محصولات منتخب زراعی) در مدل نهایی واسنجی شده، اثرات پذیرش کم‌آبیاری تحت سناریوهای کاربردی بر مجموعه متغیرهای اقتصادی (شامل الگوی بهینه کشت، سود ناخالص کشاورزان، ارزش اقتصادی آب و تقاضای آب آبیاری) بررسی شد. هر یک از مراحل فوق در ادامه به صورت کامل تشریح شده‌اند.

### ۲-۱- مدل برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی در سطح تجمیعی- فضایی (SA-PMP)

در زمینه کاربرد مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی، می‌توان به این نکته اشاره کرد که این مدل‌ها در دو دسته یا گروه مختلف برنامه‌ریزی ریاضی هنجاری یا دستوری[۸] (NMP) و برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی (PMP) تقسیم‌بندی می‌شوند. در مدل‌های هنجاری هیچ‌گونه تضمینی برای رسیدن به شرایط موجود در سال پایه یا مبنا وجود ندارد و محقق با وارد کردن محدودیت‌های منابع اقدام به حداکثرسازی و یا حداقل‌سازی تابع هدف می‌کند. این در حالی است که در مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی فرض می‌شود که کشاورزان در شرایط موجود به صورت بهینه عمل می‌کنند و لذا، تأثیر برنامه یا سیاست موردنظر بر وضعیت فعلی مورد بررسی قرار می‌گیرد (Howitt et al., 2012; Parhizkari et al., 2016). عموماً انجام مطالعات در سطح منطقه‌ای و یا در سطح زیر حوضه‌ها، با این مسئله مواجه است که استفاده از مدل PMP استاندارد باعث درنظر گرفتن یک تابع هزینه با ضرایب ثابت در تمامی بخش‌های مرتبط با زیرحوضه موردنظر

می‌شود. این در حالی است که در دنیای واقعی، چنین رفتار یکسانی مشاهده نمی‌شود. از جمله الگویی که با زیربنای مدل اقتصادی اقدام به حل این مسأله می‌کند، مدل برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی در سطح تجمیعی- فضایی (SA-PMP) است که از زیربنای اصلی آن در مطالعات مربوط به مدل تولید کشاورزی منطقه‌ای (SWAP) نیز استفاده می‌شود. در مدل مذکور، توابع تولید محصولات کشاورزی برای هر منطقه یا زیرحوضه در یک الگوی تجمیع فضایی یا مکانی توسط مدل برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی به کار گرفته می‌شوند. از این رو، این مدل را اصطلاحاً مدل برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی در سطح تجمیعی- فضایی (SA-PMP) می‌نامند (Medellan-Azuara et al., 2011; Parhizkari et al., 2014; Rafiee Darani et al., 2016). تعیین سطح تجمیع فضایی یا مکانی برای تعریف دامنه کاری مدلPMP در تجزیه و تحلیل سیاست‌های کشاورزی حائز اهمیت است. در واقع، تعیین این سطح به جای تحلیل سیاست‌ها در یک بعد وسیع، ترکیبی از ویژگی‌های محلی یا منطقه‌ای را با مجموعه داده‌های کوچک‌تر لحاظ نموده و سیاست‌های مورد نظر را در سطح مناطق تعیین شده مورد بررسی قرار می‌دهد. ورود توابع تولید محصولات کشاورزی منطقه‌ای و تأثیرات تجمیع فضایی در مدل PMP مزایای زیر را به همراه دارد:

۱- مدل تجمیعی- فضایی ارائه شده با لحاظ نمودن توابع تولید منطقه‌ای ناتوانی‌هایی را که در مدل‌های پیشین خود داشته رفع می‌نماید و به کمک یک تابع درجه دوم به تحلیل سیاست‌ها می‌پردازد.
۲- پس از در نظرگرفتن توابع تولید منطقه‌ای محصولات کشاورزی، مدل تجمیعی- فضایی شامل کشش‌های جانشینی ثابت (CES) می‌باشد. این قابلیت به مدل کمک می‌کند تا جانشینی بین نهاده‌ها را محدود نماید.
۳- وجود تأثیرات تجمیع فضایی سبب ارتقاء مدل SA-PMP شده و این توانایی را در مدل ایجاد می‌کند که با جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات به صورت خرد یا جزیی از سطح مناطق مورد مطالعه، به پیش‌بینی تأثیر سیاست‌های کشاورزی بپردازد (Medellan-Azuara et al., 2011; Parhizkari et al., 2014). در ادامه مراحل واسنجی مدل SA-PMP مطابق با شکل ۲، ارائه شده‌اند.

### ۲-۱-۱- مرحله اول: طرح مدل برنامه‌ریزی خطی و برآورد قیمت‌های سایه‌ای در سطح تجمیعی- فضایی

این مرحله شامل حل یک مدل برنامه‌ریزی خطی جهت حداکثرنمودن سود کشاورزان با توجه به مجموعه محدودیت‌های منابع و واسنجی است. در این مرحله پس از حل مدل برنامه‌ریزی خطی کمکی در سطح تجمیعی- فضایی، مقادیر قیمت‌های سایه‌ای برای محدودیت‌های منابع و واسنجی به دست می‌آیند (Medellan-Azuara et al., 2011; Howitt et al., 2012; Parhizkari and Badie Barzin, 2016). شکل ریاضی این مرحله از واسنجی مدل SA-PMP را می‌توان برای منطقه مورد مطالعه به صورت روابط (۱) تا (۴) نشان داد:

$$\text{Max}\ \pi = \sum_{i=1}^{6}\sum_{L=1}^{3}\sum_{m=1}^{3} P_{ilm} Y_{ilm} x_{ilm} - \sum_{i=1}^{6}\sum_{l=1}^{3}\sum_{m=1}^{3}\sum_{j=1}^{5} C_{ilmj}\, q_{ilmj}\, x_{ilm} \quad (۱)$$

Subject To:

$$\sum_{i=1}^{6} a_{ilmj}\, x_{ilmj} \le b_{lmj} \qquad \forall j,l,m \qquad [\gamma] \quad (۲)$$

$$x_{ilm} \le \tilde{x}_{ilm} + \varepsilon \qquad \forall i,l,m \qquad [\mu] \quad (۳)$$

$$x_{ilm} \ge 0 \qquad \forall i,l,m \quad (۴)$$

رابطه ۱، به عنوان تابع هدف مدل برنامه‌ریزی خطی، شامل حداکثرکردن مجموع سود منطقه‌ای کشاورزان است. در این رابطه $\pi$ بیانگر سود کشاورزان، $i$ بیانگر محصولات منتخب زراعی (گندم آبی، جو آبی، یونجه، گوجه‌فرنگی، هندوانه و آفتابگردان)، $j$ بیانگر نهاده‌ها یا عوامل تولید (زمین، آب، نیروی‌کار، سرمایه و ماشین‌آلات)، $m$بیانگر مزرعه نماینده گروه‌های بهره‌بردار (کوچک، متوسط و بزرگ)، $l$ بیانگر نوع روش آبیاری مورد استفاده در سطح اراضی (روش جوی و پشته‌ای، غرقابی و کرتی) است. $P_{ilm}$، $Y_{ilm}$، $C_{ilmj}$، $x_{ilm}$، و $q_{ilmj}$ نیز به ترتیب قیمت، عملکرد، هزینه، سطح زیرکشت و مقدار مصرف نهاده‌ها را برای تولید محصول $i$ در گروه بهره‌برداری $m$ با روش آبیاری $l$ نشان می‌دهد. $a_{ilmj}$ بیانگر ضرایب لئونتیف است که نسبت استفاده‌ی هر عامل تولید به زمین را نشان می‌دهد و از رابطه ($a_{ilmj=\tilde{x}_{ilm}/\tilde{x}_{ilm,\ land}}$) به دست می‌آید. در واقع، $a_{ilmj}$ بیانگر ضرایب فنی منابع مورد استفاده در هر یک از گروه‌های بهره‌برداری است (هاویت و همکاران، ۲۰۱۲؛ مدلین آزورا و همکاران، ۲۰۱۱؛ پرهیزکاری و بدیع برزین، ۱۳۹۵). رابطه ۲، محدودیت منابع را در هر منطقه نشان می‌دهد و برای نهاده‌های آب، زمین، سرمایه (شامل بذر، کود و مواد شیمیایی)، نیروی کار و ماشین‌آلات تعریف می‌شود. در این رابطه $b_{lmj}$ کل منابع دردسترس نهاده $j$ در سطح مزرعه نماینده گروه $m$را نشان می‌دهد. رابطه ۳، محدودیت واسنجی مدل را نشان می‌دهد که در آن $\tilde{x}_{ilm}$ مقدار مشاهده شده فعالیت مورد استفاده در سال پایه و $\varepsilon$ مقدار مثبت کوچکی را نشان می‌دهد که جهت جلوگیری از ایجاد هم‌خطی در مدل استفاده می‌شود. باید توجه داشت که به ازای هر محصول یک محدودیت واسنجی به مدل اضافه می‌شود. اضافه‌کردن محدودیت واسنجی به مدل باعث می‌شود که جواب بهینه برنامه‌ریزی خطی دقیقاً سطح فعالیت‌های مشاهده شده در سال پایه را به دست

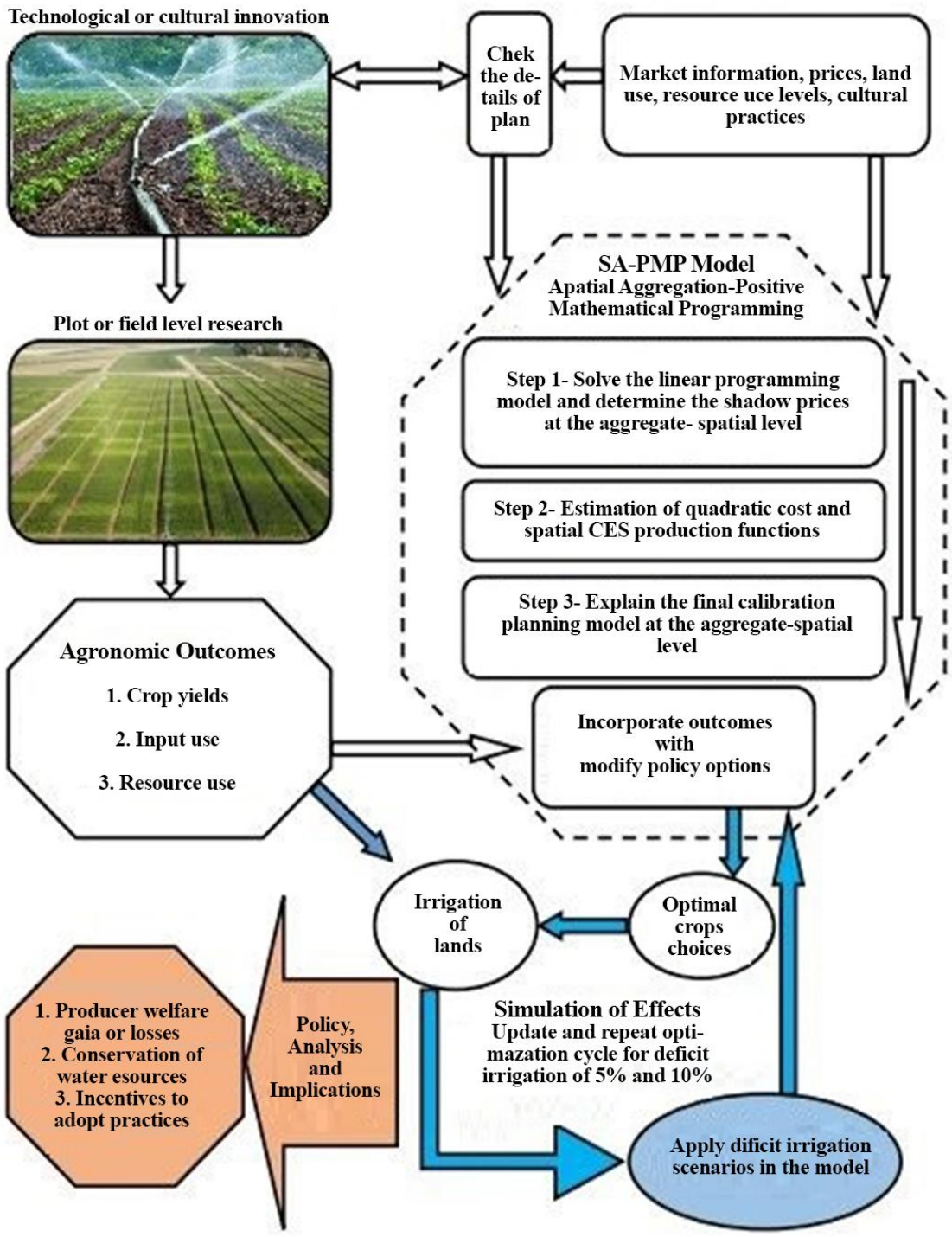


**Fig. 2- Calibration steps for the SA-PMP model**

**شکل ۲- مراحل واسنجی مدل SA-PMP**

دهد. پارامترهای نو ($\gamma$) و مو ($\mu$) در روابط ۲ و ۳، قیمت سایه‌ای یا مقادیر دوگان محدودیت‌های سیستمی و واسنجی را نشان می‌دهند. رابطه ۴، نیز بیانگر محدودیت غیرمنفی بودن سطح فعالیت‌ها است. بدین معنی که سطح فعالیت‌های زراعی هیچ‌گاه نمی‌تواند مقادیر منفی را شامل شود و همواره مقادیر مثبتی را دارا می‌باشد. این محدودیت حاکی از آن است که مدل برنامه‌ریزی ارائه شده قابلیت اجرا در منطقه مورد مطالعه را دارد (Medellan-Azuara et al., 2011; Howitt et al., 2012; Parhizkari and Badie Barzin, 2016).

### ۲-۱-۲- تخمین تابع هزینه کوادراتیک و تابع تولید CES فضایی یا منطقه‌ای

در این مرحله، مدل SA-PMP مقادیر دوگان به دست آمده از مرحله اول را برای واسنجی تابع هزینه غیرخطی و برآورد ضرایب آن در بر می‌گیرد. پس از برآورد ضرایب تابع هزینه، تابع تولید منطقه‌ای محصولات کشاورزی با توجه به ثابت بودن کشش جانشینی بین نهاده‌ها تخمین زده می‌شود. تابع هزینه درجه دو به صورت زیر قابل ارائه است (Medellan-Azuara et al., 2011; Parhizkari et al., 2016; Nakashima and Ishikawa, 2017):

$$TC_{ilmj} = \alpha_{ilmj}\, x_{ilmj} + \frac{1}{2}\,\gamma_{ilmj}\alpha_{ilmj}^{2} \qquad \forall i, l, m, j \quad (۵)$$

در رابطه بالا $TC_{ilmj}$ هزینه تولید محصول $i$ با روش آبیاری $l$ در مزرعه نماینده گروه بهره‌برداری $m$، $\alpha_{ilmj}$ پارامتری برای نشان‌دادن هزینه متوسط (پارامتر رهگیری) و $\gamma_{ilmj}$ پارامتر تابع ارزش‌های دوگان یا قیمت‌های سایه‌ای محدودیت‌های واسنجی (پارامتر مو یا $\mu$) است. هر یک از این پارامترهای فوق به کمک روابط زیر قابل محاسبه هستند (Medellan-Azuara et al., 2011; Parhizkari et al., 2016; Nakashima and Ishikawa, 2017):

$$\alpha_{il} = \sum_{j=1}^{5} C_{jrilm} q_{jrilm} \qquad \forall r, i, l, m \qquad (۶)$$

$$\gamma_{ilmj} = \frac{\mu_{ilmj}}{\bar{x}_{ilm}} \qquad \forall j, i, l, m \qquad (۷)$$

تابع تولید CES این امکان را ایجاد می‌کند که یک نرخ جانشینی ثابت بین نهاده‌های تولید و ضرایب لئونتیف (با نسبتی ثابت) و ضرایب تابع کاب داگلاس (با جایگزینی واحد) به وجود آید. این تابع به کمک روش توسعه یافته Howitt et al. (2012)، Parhizkari et al. (2016) و Paul et al. (2017) برای هر منطقه و محصول به صورت رابطه (۸) قابل تخمین است. مراحل تخمین برای تمام محصولات در منطقه مورد مطالعه قابل تعمیم است.

$$Y_{ilm} = \tau_{ilm}[\beta_{ilm1}\, w_{ilm1}^{\rho_i} + \beta_{ilm2}\, w_{ilm2}^{\rho_i} + \cdots + \beta_{ilmj}\, w_{ilmj}^{\rho_i}]^{\frac{\vartheta}{\rho_i}} \qquad (۸)$$

در رابطه بالا، $Y_{ilm}$ میزان تولید محصول $i$ با روش آبیاری $m$ در سطح مزرعه نماینده گروه بهره‌برداری $l$، $w_{ilm}$ عامل $j$ برای تولید محصول $i$ با روش آبیاری $l$ در سطح مزرعه نماینده گروه بهره‌برداری $m$ است. $\tau_{ilm}$ پارامتر مقیاس است و به کمک رابطه (۱۳)، محاسبه می‌شود. $\beta_{ilm}$ پارامتر تولید است که نسبت استفاده از عوامل تولید را نشان می‌دهد. $\vartheta$ ضریب بازده ثابت نسبت به مقیاس می‌باشد و تابع تولید CES مستلزم آن است که این ضریب برابر با یک شود. $\rho_i$ متغیری است که بر حسب کشش جانشینی محصولات ($\sigma_i$) تعریف و برای محاسبه آن از رابطه $\rho_i = (\sigma_i - 1)/\sigma_i$ استفاده می‌شود (Howitt et al., 2012; Parhizkari et al., 2016; Paul et al., 2017). پس از تخمین تابع تولید و گرفتن مشتق اول از آن، پارامترهای $\beta_{ilmj}$ به صورت زیر قابل محاسبه هستند:

$$\sum_{j=1}^{5} \beta_j = 1 \qquad (۹)$$

$$\beta_1 = \frac{1}{1+\frac{w_1^{(-1/\sigma)}}{c_1}\left(\sum_l \frac{c_l}{w_l^{(-1/\sigma)}}\right)} \qquad (۱۰)$$

$$\beta_L = \frac{1}{1+\frac{w_1^{(-1/\sigma)}}{c_1}\left(\sum_l \frac{c_l}{w_l^{(-1/\sigma)}}\right)} * \frac{c_l\, w_1^{(-1/\sigma)}}{c_1\, w_l^{(-1/\sigma)}} \qquad (۱۱)$$

$$\beta_L = \beta_1 * \frac{c_l\, w_1^{(-1/\sigma)}}{c_1\, w_l^{(-1/\sigma)}} \qquad (۱۲)$$

در روابط بالا، $w_L$ میزان نهاده یا عامل تولید$l$ ام و $C_L$ هزینه نهاده یا عامل تولید $l$ ام است. با استفاده از تعریف تابع تولید CES، می‌توان پارامتر مقیاس را برای هر منطقه و محصول محاسبه و هر یک را در سطح پایه ارزیابی نمود. برای این منظور از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\tau_{ilm} = \frac{\left(\frac{q_i}{x_i}\right) * \bar{x}_i}{[\sum_{j=1}^{5} \beta_j w_j^{\rho}]^{\frac{\vartheta}{\rho_i}}} \qquad \forall i, l, m \qquad (۱۳)$$

با توجه به قابلیت بالای مدل واسنجی شده SA-PMP در مقایسه با مدل PMP استاندارد، مراحل تخمین بالا برای تمام محصولات قابل تعمیم است. لذا، در این تحقیق روند تخمین پارامترها با توجه به انعطاف‌پذیری مدل SA-PMP برای تمام محصولات به صورت خودکار انجام شد (Howitt et al., 2012; Parhizkari et al., 2016; Paul et al., 2017).

### ۲-۱-۳- مرحله سوم: تبیین مدل برنامه‌ریزی نهایی واسنجی شده در سطح تجمیعی- فضایی

در مرحله سوم سیستم مدل‌سازی تجمیعی- فضایی SA-PMP، با استفاده از توابع تولید و هزینه غیرخطی واسنجی شده و مجموعه محدودیت‌های منابع، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی به‌صورت روابط زیر ساخته می‌شود:

$$\text{Max } \pi = \sum_{i=1}^{6}\sum_{L=1}^{3} \sum_{m=1}^{3}\sum_{j=1}^{5} P_{ilm}\tau_{ilm}\left[\beta_{ilm1}\, w_{ilm1}^{\rho_i} + \beta_{ilm2}\, w_{ilm2}^{\rho_i} + \cdots + \beta_{ilmj}\, w_{ilmj}^{\rho_i}\right]^{\frac{\vartheta}{\rho_i}} x_{ilm} - \sum_{i=1}^{6}\sum_{m=1}^{3}\sum_{l=1}^{3}\sum_{j=1}^{5} c_{ilmj} q_{ilmj} x_{ilmj} - \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{6}\sum_{m=1}^{3}\sum_{l=1}^{3}\sum_{j=1}^{5} \gamma_{ilmj} x_{ilmj}^2 \quad (۱۴)$$

Subject to:

$$\sum_{i=1}^{6} t_{ilm}.x_{ilm} \qquad \forall i,l,m \quad (۱۵)$$

$$\sum_{i=1}^{6}\sum_{m=1}^{3} x_{ilm} \le \sum_{m=1}^{3} \overline{R}_{ilm} \qquad \forall i,l,m \quad (۱۶)$$

$$\sum_{i=1}^{6}\sum_{m=1}^{3} ETx_{ilm}.x_{ilm} \le \overline{R}_{water} \qquad \forall i,l,m \quad (۱۷)$$

$$\sum_{i=1}^{6}\sum_{m=1}^{3} SW_{ilm}.x_{ilm} \le RS_{water} \qquad \forall i,l,m \quad (۱۸)$$

$$\sum_{i=1}^{6}\sum_{m=1}^{3} GW_{ilm}.x_{ilm} \le RG_{water} \qquad \forall i,l,m \quad (۱۹)$$

$$SW_{ilm} + GW_{ilm} \le \overline{R}_{water} \qquad \forall i,l,m \quad (۲۰)$$

$$RS_{water} + RG_{water} = \overline{R}_{water} \qquad \forall i,l,m \quad (۲۱)$$

$$\sum_{i=1}^{6}\sum_{m=1}^{3} GW_{ilm}.x_{ilm} \le AWR_{water} \qquad \forall i,l,m \quad (۲۲)$$

$$x_{ilm}, GW_{ilm}, SW_{ilm} \ge 0 \qquad \forall i,l,m \quad (۲۳)$$

رابطه ۱۴، تابع هدف غیرخطی مدل SA-PMP و رابطه ۱۵، محدودیت نهاده‌های تولید (زمین، نیروی‌کار، سرمایه و ماشین‌آلات) را نشان می‌دهد. در این رابطه، $\overline{R}_{ilm}$ بیانگر مجموع منابع دردسترس نهاده‌ها و $t_{ilm}$ ضریب فنی هر نهاده در تولید محصول i با روش آبیاری m در سطح مزرعه نماینده l است. رابطه ۱۶، محدودیت مربوط به اراضی آبیاری شده با روش‌های مختلف آبیاری است و نشان می‌دهد که سطح زیرکشت محصولاتی ($x_{ilm}$) که با روش‌های متنوع (جوی و پشته‌ای، کرتی و غلام گردشی) آبیاری می‌شوند، از مجموع اراضی دردسترس و قابل آبیاری تجاوز نمی‌کند. رابطه ۱۷، محدودیت مربوط به میزان تلفات آب به صورت تبخیر و تعرق در هر یک از روش‌های آبیاری است. در این رابطه، $ETx_{ilm}$ بیانگر میزان تبخیر و تعرق اراضی آبیاری شده با روش‌های نامبرده و $\overline{R}_{water}$ میزان کل آب قابل دسترس است. رابطه ۱۸، محدودیت منابع آب و رابطه ۱۹، محدودیت منابع آب زیرزمینی را نشان می‌دهد. $SW_{ilm}$ و $GW_{ilm}$ در این روابط به ترتیب بیانگر حجم منابع آب سطحی و زیرزمینی مورد استفاده برای تولید محصولات منتخب زراعی در گروه‌های مختلف بهره‌برداری است. این محدودیت‌ها بازگو می‌کنند که میزان آب سطحی و زیرزمینی مورد استفاده در تولید محصولات منتخب زراعی از کل حجم آب سطحی ($RS_{water}$) و زیرزمینی ($RG_{water}$) دردسترس و قابل استحصال بیشتر نیست. روابط ۲۰ و ۲۱ نیز مربوط به محدودیت منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی است. این روابط نشان می‌دهند که مجموع میزان آب سطحی و زیرزمینی استفاده شده در سطح اراضی زیرکشت محصولات منتخب زراعی مساوی و یا کمتر از کل منابع آب دردسترس منطقه مورد مطالعه است. رابطه ۲۲، محدودیت برداشت از منابع آب زیرزمینی را در سطحی کمتر یا مساوی با حق‌آبه مجاز تعریف شده برای بهره‌برداران زراعی در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. $AWR_{water}$ در این رابطه بیانگر کل حقابه مجاز به برداشت از منابع آب زیرزمینی یا کل حجم آب قابل استحصال مجاز توسط کشاورزان در منطقه مورد مطالعه است. این محدودیت بیانگر آن است که کشاورزان دشت اردلان مجاز به برداشت منابع آب زیرزمینی در سطحی بیشتر از حقابه‌ی مجاز تعریف شده نیستند و به اندازه این میزان می‌توانند از منابع آب زیرزمینی برای تولید محصولات در سطح اراضی زراعی بهره‌مند شوند. رابطه ۲۲ نیز محدودیت غیرمنفی بودن سطح فعالیت‌ها یا اراضی زیرکشت و حجم منابع آب سطحی و زیرزمینی را نشان می‌دهد و تضمین می‌کند که مدل پیشنهادی فوق، قابلیت اجرا شدن در منطقه مورد مطالعه را دارد.

## ۲-۲- کاربرد راهبرد کم‌آبیاری و برآورد تابع تقاضای آب کشاورزی

هدف اصلی از به کارگیری روش کم‌آبیاری در سطح اراضی، افزایش کارایی مصرف آب از طریق کاهش میزان مصرف آب محصولات در اثر اعمال تنش‌های آبی (سناریوهای کم‌آبیاری) است که بدون شک در اغلب موارد بر روی میزان عملکرد محصولات اثرگذار می‌باشد (Zapata-Sierra and Manzano-Agugliaro, 2017). در سال‌های اخیر، مدل‌های متعددی جهت بررسی مدیریت آبیاری تحت شرایط کم‌آبی در سطح مزارع زراعی توسعه یافته‌اند. در این راستا، الگوی پیشنهادی کلارک که توسط بخش توسعه آب و خاک فائو[۱۱] (FAO) توسعه یافته و امروزه به عنوان مدل پیش‌فرض در نرم‌افزار کروپوات[۱۲] (CropWat) لحاظ شده است، یکی از روش‌های کاربردی می‌باشد که امکان محاسبه کاهش عملکرد را بر پایه روش‌های مدرن برآورد تبخیر و تعرق و عکس‌العمل محصولات به تنش آبی میسر می‌سازد. به همین منظور، در مطالعه حاضر جهت برآورد تغییرات عملکردی محصولات منتخب زراعی تحت شرایط اعمال تنش‌های آبی از الگوی فوق بهره گرفته شد (Clarke et al., 1998; Steduto et al., 2012; Graveline, N. and Merel, 2014). این الگو به کمک روابط زیر قابل تعریف است:

$$ET_{water} = KC * ET_0 \quad (۲۴)$$

در رابطه بالا، $ET_0$ میزان تبخیر و تعرق بالقوه سطوح گیاهی مرجع و KC ضریب گیاهی است. برای محاسبات انجام شده در اعمال الگوی کم آبیاری در این مطالعه، به صورت پیش‌فرض و استاندارد از ضرایب ارائه شده توسط FAO استفاده شد (Richard et al., 1998). بدین

ترتیب، تأثیر کاهش آب بر روی عملکرد محصولات براساس تابع تولید زیر محاسبه می‌شود:

$$\left[1-\frac{Y_a}{Y_m}\right]=K_y\left[1-\frac{ET_a}{ET_m}\right] \quad (۲۵)$$

در رابطه بالا، $Y_a$ عملکرد واقعی، $Y_m$ عملکرد پتانسیل، $ET_a$ تبخیر و تعرق واقعی، $ET_m$ تبخیر و تعرق پتانسیل و $K_y$ ضریب حساسیت گیاه به تنش آبی یا عامل ارتباط بین تبخیر و تعرق و عملکرد محصول است (Clarke et al., 1998; Steduto et al., 2012; Graveline, N. and Merel, 2014).

در این مطالعه، جهت برآورد مقادیر تبخیر و تعرق بالقوه سطح گیاهی مرجع و ضریب گیاهی به صورت پیش‌فرض از ضرایب ارائه شده توسط FAO بهره گرفته شد. برای دسترسی به اطلاعات آماری مربوط به میزان عملکرد پتانسیل، تبخیر و تعرق پتانسیل نیز از پروژه تحقیقاتی اجرا شده در محدوده مطالعاتی دشت اردلان توسط واحد آبخیزداری مرکز تحقیقات کشاورزی استان قزوین در سال ۱۳۹۳ بهره گرفته شد. مقادیر عملکرد واقعی و تبخیر و تعرق واقعی نیز برای سال پایه براساس آمار موجود در گزارشات سالنامه‌های اداری سازمان جهاد کشاورزی و سازمان هواشناسی استان قزوین برآورد شد (gricultural and Natural Resources Research Center of Qazvin Province, 2014). بر این اساس، ابتدا با در اختیار داشتن مقادیر تبخیر و تعرق بالقوه سطوح گیاهی مرجع و ضریب گیاهی برای محصولات منتخب (براساس آمار استاندارد FAO)، میزان تبخیر و تعرق واقعی محاسبه و برآورد شد. در ادامه با در اختیار داشتن مقادیر عملکرد پتانسیل از پروژه تحقیقاتی اجرا شده در منطقه، عملکرد واقعی از سال پایه یا مبنا برای محصولات منتخب، تبخیر و تعرق واقعی محاسبه شده و تبخیر و تعرق پتانسیل از گزارشات استاندارد و مرجع FAO، مقدار ضریب حساسیت گیاه به تنش آبی ($K_y$) برای کلیه محصولات منتخب محاسبه و برآورد شد. این ضریب برای محصولات غله‌ای گندم و جو آبی به ترتیب ۰/۰۶۹ و ۰/۰۵۶، برای محصول علوفه‌ای یونجه ۱/۰۷، برای محصولات صیفی گوجه‌فرنگی، هندوانه و آفتابگردان به ترتیب ۰/۹۴، ۰/۸۹ و ۰/۴۷ برآورد شد. در ادامه به منظور برآورد اثرات تنش آبی بر عملکرد محصولات، مقادیر سناریوهای کم آبیاری ۵ و ۱۰ درصد براساس واحد میلی‌متر محاسبه شدند (از طریق حاصلضرب مقادیر درصدی سناریوها در میزان نیاز آبی خالص محصولات و ضریب حساسیت به تنش آبی) و در نرم‌افزار کروپوات وارد شدند (در بخش Deficit). در ادامه با لحاظ نمودن مقادیر برآورد شده تنش آبی و دخیل نمودن آن براساس واحد میلی‌متر در نرم‌افزار و در اختیار داشتن مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل، تبخیر و تعرق واقعی و عملکرد واقعی، مقادیر عملکرد پتانسیل محاسبه شدند. اختلاف بین مقدار عملکرد پتانسیل محاسبه شده (که ناشی از اعمال تنش آبی بر روزن ضریب حساسیت به تنش می‌باشد) با مقادیر عملکرد واقعی محصولات در سال پایه به عنوان میزان تغییرات عملکرد محصولات منتخب در اثر اعمال سناریوهای ۵ و ۱۰ درصد کم‌آبیاری لحاظ شد (که در جدول ۵ آورده شده است). پس از ارزیابی اثرات پذیرش راهبرد کم‌آبیاری تحت شدت‌های مختلف (۵ و ۱۰ درصد) بر تغییرات الگوی کشت، میزان آب مصرفی و ارزش اقتصادی آب آبیاری، تابع تقاضای آب برای هر گروه نماینده (کوچک، متوسط و بزرگ) به کمک رابطه ریاضی زیر برآورد شد (Howitt et al., 2009; Parhizkari, 2015):

$$P_{water}=-a+bX_{water} \quad (۲۶)$$

رابطه بالا بیانگر ارتباط قیمتی- مقداری نهاده آب کشاورزی است که در آن، $P_{water}$ بیانگر قیمت واقعی یا ارزش اقتصادی نهاده آب و $X_{water}$ بیانگر مقدار یا حجم آب مصرفی توسط کشاورزان در سطح اراضی زراعی است. پارامتر a عرض از مبدا تابع تقاضا و پارامتر b شیب این تابع را نشان می‌دهد. به کمک رابطه (۲۶) می‌توان کشش قیمتی تقاضای آب ($E_{p.water}$) را که بیانگر درصد تغییرپذیری مقدار تقاضای آب ($\Delta X_{water}$) به تغییرات سطح قیمت ($\Delta P_{water}$) آن است، به صورت زیر برآورد نمود (Howitt et al., 2009; Parhizkari, 2015):

$$E_{p.water}=-\frac{\Delta X_{water}}{\Delta P_{water}}*\frac{P_{1,water}}{P_{2,water}} \quad (۲۷)$$

## ۲-۳- جامعه آماری، روش جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل داده‌ها

پس از بررسی میزان تغییرات عملکرد محصولات منتخب زراعی دشت اردلان در گروه‌های مختلف بهره‌برداری با استفاده از الگوی پیشنهادی کلارک، تغییرات میزان عملکرد محصولات منتخب زراعی دشت اردلان در تابع هدف مدل برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی تجمیعی- فضایی (SA-PMP) لحاظ گردید و سپس اثرات آن بر الگوی کشت، میزان آب مصرفی، بازده ناخالص کشاورزان، ارزش اقتصادی آب و تابع تقاضای آب آبیاری ارزیابی شد. برای تحقق این هدف، داده‌های گردآوری شده طی سال پایه ۱۳۹۹-۱۳۹۸ براساس واسنجی سیستم مدل‌سازی ارائه شده در محیط نرم‌افزاری GAMS[9] ارزیابی و تحلیل شدند. ابزار گردآوری داده‌ها در این مطالعه پرسشنامه است که جهت تعیین روایی آن از روش پانل متخصصان که مبتنی بر نظرهای کارشناسی شده اساتید دانشگاهی و برخی از فعالان حوزه کشاورزی و مدیریت منابع آب در منطقه مورد مطالعه است، استفاده شد. پایایی پرسشنامه نیز با استفاده از روش ضریب آلفای کرونباخ سنجیده شد. میزان این ضریب به طور میانگین برای بخش‌های چهارگانه پرسشنامه

۰/۸۱ به دست آمد که حاکی از پایایی پرسشنامه است. جامعه آماری شامل کلیه کشاورزان دشت اردلان (۴۶۰ بهره‌بردار) است که در اراضی زراعی خود به کشت محصولات منتخبی چون گندم آبی، جو آبی، یونجه، هندوانه، گوجه‌فرنگی و آفتابگردان اشتغال دارند. با توجه به اینکه امکان گردآوری داده‌ها در این مطالعه از یکایک کشاورزان جامعه آماری فرآیندی زمان‌بر و عملاً ناممکن است، از روش نمونه‌گیری تصادفی طبقه‌بندی شده استفاده شد و حجم نمونه نیز به کمک جدول مورگان برآورد گردید. مزایای این شیوه نمونه‌گیری، اطمینان از انعکاس مناسب ویژگی‌های مختلف جامعه در گروه نمونه است. با کمک روش فوق، حجم نمونه در این مطالعه ۲۱۰ بهره‌بردار برآورد شد و سپس، بهره‌برداری‌ها براساس معیار "سطح زیرکشت" در طبقات همگن طبقه‌بندی شدند. برای هر طبقه نیز یک بهره‌بردار نماینده تعیین شد. بدین منظور، کشاورزان دشت اردلان براساس معیار سطح زیرکشت به سه دسته بهره‌برداران با مزارع کوچک (کمتر از ۷ هکتار)، متوسط (۷ تا ۱۴ هکتار) و بزرگ (بیشتر از ۱۴ هکتار) طبقه‌بندی شدند. این کار مطابق با مندرجات جدول ۱، با تحلیل داده‌های حاصل از پرسشنامه‌های تکمیلی در نرم‌افزار SPSS[۱۰] صورت گرفت.

## ۳- نتایج و بحث

پس از تعیین حجم نمونه و توزیع افراد در گروه‌های مختلف بهره‌برداری (کوچک، متوسط و بزرگ)، اطلاعات استخراج شده از پرسشنامه‌های تکمیلی ارزیابی و تحلیل شدند. نتایج این ارزیابی در جدول ۲ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که اغلب بهره‌برداران زراعی در دشت اردلان دارای سنی بالا (در رده سنی بیش از ۴۷ سال) و تحصیلاتی پایین (کم‌سواد و یا دارای سواد ابتدایی و راهنمایی) هستند. به لحاظ تجربه کاری نیز، ملاحظه می‌شود که اغلب بهره‌برداران دارای سابقه کار بیش از ۱۵ سال هستند و به طور متوسط تنها حدود ۳۰ درصد از کشاورزان دشت اردلان سابقه‌ای کمتر از ۸ سال را در زمینه انجام فعالیت‌های زراعی دارند.

جدول ۳ درصد استفاده از روش‌های مختلف آبیاری کامل (کرتی، جوی و پشته‌ای و غرقابی) و کم‌آبیاری (سنتی با تنش آبی ۵ درصد به کمک روش‌های ایجاد تنش آبی در طول دوره رشد گیاهان و مدرن با تنش آبی ۱۰ درصد به کمک روش‌های آبیاری بر روی نوارهای پلاستیکی با سیستم‌های آبیاری زیرسطحی قطره‌ای و آبیاری بارانی) را در سطح مزارع دشت اردلان توسط گروه‌های مختلف بهره‌برداری نشان می‌دهد.

**Table 1- Sample distribution, number of farmers in each group and the acrage of representative farmer in Ardalan plain**

**جدول ۱- نحوه توزیع نمونه، تعداد کشاورزان در هر گروه و سطح زیرکشت بهره‌بردار نماینده**

| Components under consideration | Farmers' scale | | | Total |
|---|---|---|---|---|
| | Small | Medium | Large | |
| Percentage of total farmers | 49/05 | 36/19 | 14/76 | 100 |
| Number of samples in each group | 103/0 | 76/0 | 13/0 | 210 |
| Farms size of sample farmer (ha) | 4/56 | 10/8 | 17/2 | - |

**Table 2- Characteristics of exploiting farmers in the studied samples in Ardalan plain**

**جدول ۲- ویژگی‌های زارعین بهره‌بردار در نمونه‌های مورد بررسی**

| Examined variables | Survey level | Farmers' scale | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Small | Medium | Large |
| Age (Percentage) | Less than 30 years | 24/0 | 28/2 | 25/3 |
| | To 47 years 30 | 35/3 | 30/7 | 32/2 |
| | More than 47 years | 40/7 | 41/1 | 42/5 |
| Work experience (Percentage) | Less than 8 years | 29/5 | 32/7 | 28/2 |
| | To 8 years 15 | 23/3 | 23/4 | 24/2 |
| | More than 15 years | 47/2 | 43/9 | 47/6 |
| Education level (Percentage) | Illiterate | 32/4 | 27/9 | 33/4 |
| | Elementary | 27/2 | 30/3 | 25/2 |
| | Primary School | 21/6 | 26/8 | 22/5 |
| | High School Diploma | 11/3 | 8/60 | 10/2 |
| | Higher Education | 7/50 | 6/40 | 8/70 |

**Table 3- Percentage of using conventional full and dificit irrigation methods in Ardalan plain**
**جدول ۳- درصد به‌کارگیری روش‌های آبیاری کامل و کم‌آبیاری در سطح اراضی زراعی دشت اردلان**

| irrigation method | Conventional methods of deficit irrigation | Farmers' scale | | | Avarage |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Small | Medium | Large | |
| Full irrigation | Traditional flooding method | 53/2 | 57/6 | 50/9 | 53/9 |
| | Water and stack method | 30/9 | 24/8 | 28/1 | 28/0 |
| | Traditional Cretan method | 12/1 | 10/2 | 8/06 | 10/1 |
| Dificit irrigation | Traditional deficit irrigation method | 3/80 | 5/23 | 8/20 | 5/74 |
| | Modern deficit irrigation method | 0/00 | 2/17 | 4/74 | 2/30 |

نتایج جدول ۳، گویای آن است که اغلب کشاورزان دشت اردلان (حدود ۸۲ درصد) از روش‌های سنتی (غرقابی و جوی و پشته‌ای) جهت آبیاری اراضی استفاده می‌کند. استفاده از روش کرتی نیز با توجه به وجود جریانات سطحی در دوره ابتدایی رشد محصولات زراعی (نیمه اول فصل بهار) در محدوده مطالعاتی دشت اردلان مرسوم است، اما سهم کمی را در مقایسه با دیگر روش‌های سنتی آبیاری به خود اختصاص داده است. افزون بر این، نتایج جدول ۳ گویای آن است که روش کم‌آبیاری در سطوح مختلف ۵ و ۱۰ درصد تنها در سطح اراضی متوسط و بزرگ و آن هم بوسیله برخی از کشاورزان پیشرو مورد استفاده قرار می‌گیرد. کشاورزان خرده‌پا به دلیل کوچک بودن مزارع خود این روش کاربردی را مورد استفاده قرار نمی‌دهند. با این وجود ملاحظه می‌شود که به طور میانگین تنها حدود ۲/۳ درصد از کشاورزان دشت اردلان از روش کم‌آبیاری برای بهینه‌سازی مصرف آب در سطح اراضی خود استفاده می‌کنند (این روش در زمان رشد طولی گیاهان در ماه‌های اردیبهشت و خرداد در سطح اراضی زراعی به ویژه محصولات جالیزی اعمال می‌گردد) و این‌گونه به نظر می‌رسد که رویکردی ناشناخته و کم کاربرد در الگوهای زراعی محدوده مطالعاتی دشت اردلان است.

پس از حل مرحله اول سیستم مدل‌سازی ارائه‌شده در این تحقیق، مقادیر دوگان یا قیمت‌های سایه‌ای برای مجموعه محدودیت‌های منابع و واسنجی برآورد شد. قیمت سایه‌ای نهاده‌ها یا عوامل تولید بیانگر ارزش واقعی آخرین واحد مصرفی از آن‌ها طی فرآیند تولید محصولات منتخب زراعی است. جدول ۴ این میزان را برای هر یک از گروه‌های مختلف بهره‌برداری (کوچک، متوسط و بزرگ) در مقایسه با آب‌بهای پرداختی آن‌ها نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج جدول ۴، ملاحظه می‌شود که ارزش اقتصادی هر مترمکعب آب آبیاری برای گروه‌های بهره‌برداری نماینده کوچک، متوسط و بزرگ به ترتیب معادل با ۱۰۷۴، ۱۳۲۹ و ۱۶۴۳ ریال برآورد شد. این در حالی است که بهره‌برداران نمونه در سطح مزارع کوچک، متوسط و بزرگ به ترتیب ۴۸۵، ۵۴۰ و ۶۱۵ ریال را به عنوان نرخ آب‌بها پرداخت می‌کنند. نتایج گویای آن است که کشاورزان خرده‌پا (با اراضی کمتر از هفت هکتار) حدود ۴۵/۱ درصد از کل ارزش اقتصادی آب آبیاری را پرداخت می‌کند. این در حالی است که کشاورزان با اراضی وسیع‌تر (بیش از ۱۴ هکتار) در حدود ۴۰/۵ درصد از ارزش اقتصادی آب آبیاری را می‌پردازند. کشاورزان با سطح اراضی متوسط (بین ۷ تا ۱۴ هکتار) نیز در حدود ۴۰/۶ درصد از ارزش واقعی نهاده آب آبیاری را پرداخت می‌کنند. بدین ترتیب، هر یک از گروه‌های نماینده مذکور مابه التفاوت آب‌بهای پرداختی و ارزش اقتصادی آب آبیاری را به صورت رایگان و بدون پرداخت ارزش ریالی تقبل می‌کنند. این امر، می‌تواند تا حد زیادی در نگرش کشاورزان دشت اردلان نسبت به مصارف آب‌های سطحی و زیرزمینی دخیل باشد و منجر به رایگان تلقی شدن نهاده آب در بلندمدت شود (با این تفکر که مصرف آب بیشتر و با دورهای آبیاری نزدیک‌تر منجر به عملکرد بالاتر و حصول سود بیشتر می‌شود).

**Table 4- Comparison of water economic value with farmers' paid water price in Ardalan plain (Rials/m$^3$)**
**جدول ۴- مقایسه ارزش اقتصادی آب و آب‌بهای پرداختی کشاورزان دشت اردلان در سال پایه (ریال در مترمکعب)**

| Exploiters or farmers group | Farmers' paid water price | Water economic value | Percentage of payment |
|---|---|---|---|
| Small scale farms representative | 485 | 1074 | 45/1 |
| Medium scale farms representative | 540 | 1329 | 40/6 |
| Large scale farms representative | 615 | 1643 | 37/4 |
| Average of representative groups | 547 | 1348 | 40/5 |

براساس دیدگاه اقتصادی مادامی که نهاده تولیدی رایگان تلقی گردد، کشاورزان در انتهای ناحیه دوم تولید قرار می‌گیرند. یعنی در جایی که ارزش تولید نهایی صفر شده، اما تولید کل ماکزیمم می‌شود. این ناحیه در واقع همان ناحیه اقتصادی یا مطلوب تولید می‌باشد. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که رایگان تلقی شدن نهاده آب آبیاری توسط کشاورزان با اراضی وسیع‌تر (که در شرایط فعلی درصد کمتری از ارزش واقعی نهاده آب را پرداخت می‌کنند) محسوس‌تر بوده و احتمال مصرف بی‌رویه آب و مدیریت ضعیف‌تر این نهاده در سطح اراضی بزرگ را در مقایسه با مزارع متوسط و کوچک افزایش می‌دهد. بنابراین، کشاورزان مزارع کوچک با توجه به پرداختی بیشتری که از کل ارزش اقتصادی آب آبیاری دارند، در زمینه افزایش کارایی مصرف آب موفق‌تر عمل می‌کنند. به طور کلی، نتایج جدول ۴ حاکی از آن است که کشاورزان دشت اردلان، تنها حدود نیمی (۴۰/۵ درصد) از ارزش اقتصادی آب را در قالب هزینه‌های استحصال و انتقال آب پرداخت می‌کنند و از این رو، تفاوت فاحشی بین ارزش اقتصادی آب و نرخ آب‌بهای پرداختی کشاورزان وجود دارد.

جدول ۵ تغییرات میزان عملکرد محصولات منتخب را پس از اعمال کم‌آبیاری در سطوح ۵ و ۱۰ درصد نشان می‌دهد. شرایط آبیاری کامل در این جدول بیانگر وضعیت سال پایه است که بهره‌برداران نماینده گروه‌های مختلف از روش آبیاری کامل جهت انجام آبیاری مزارع خود بهره می‌برند. با توجه به نتایج جدول ۵، ملاحظه می‌شود که اعمال کم‌آبیاری در سطوح مختلف ۵ و ۱۰ درصد منجر به کاهش عملکرد کلیه محصولات منتخب زراعی دشت اردلان می‌شود. البته این نکته شایان ذکر است که تغییرات کاهشی عملکرد محصولات منتخب در سطح کم‌آبیاری پنج درصد به صورت جزیی، ولی در سطح آبیاری ۱۰ درصد محسوس‌تر است. نتایج جدول ۵، گویای آن است که میزان تغییرات به وجود آمده در عملکرد محصولات منتخب زراعی در سطح مزرعه نماینده گروه بزرگ بیشتر از مزارع نماینده گروه‌های متوسط و کوچک است. بیشترین تأثیر کم‌آبیاری نیز به خصوص در سطح ۱۰ درصد مختص محصولات هندوانه و گوجه‌فرنگی است که حساسیت بالاتری را نسبت به سایر محصولات الگو در شرایط اعمال تنش‌های آبی دارند. در این راستا، محصولات غله‌ای گندم و جو آبی کمترین تغییرات کاهشی را به خود اختصاص داده‌اند، لذا از حیث اثرگذاری روش کم‌آبیاری جزء محصولات غیرحساس در الگوی کشت محسوب می‌شوند. محصول علوفه‌ای یونجه نیز در مقایسه با سایر محصولات منتخب الگوی کشت، در شرایط اعمال کم‌آبیاری ۵ و ۱۰ درصد دامنه تغییرات ۲/۳۶- تا ۴/۳۹- درصد را نسبت به شرایط اعمال روش آبیاری کامل شامل می‌شود. این نتیجه حساسیت محصول یونجه را در شرایط اعمال روش کم‌آبیاری در سطوح مختلف بازگو می‌کند.

**Table 5- Changes in selected products yield in Ardalan plain under dificit irrigation**

**جدول ۵- تغییرات عملکرد محصولات منتخب دشت اردلان در شرایط اعمال کم‌آبیاری**

| Operation levels | Irrigation scenario | Changes | Yield of selected products (kg/ha) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Wheat | Barley | Alfalfa | Tomato | Melon | Sunflower |
| Small scale farms representative | Full irrigation | Amount | 4345 | 4092 | 11448 | 37419 | 41870 | 2087 |
| | 5% dificit irrigation | Amount | 4298 | 4053 | 11178 | 36278 | 40673 | 2043 |
| | | Percent | -1/08 | -0/95 | -2/36 | -3/04 | -2/85 | -2/10 |
| | 10% dificit irrigation | Amount | 4255 | 4037 | 10978 | 35278 | 40023 | 2008 |
| | | Percent | -2/07 | -1/34 | -4/11 | -5/72 | -4/41 | -3/78 |
| Medium scale farms representative | Full irrigation | Amount | 4350 | 4087 | 11460 | 37820 | 42550 | 2125 |
| | 5% dificit irrigation | Amount | 4240 | 4043 | 11157 | 36884 | 41238 | 2078 |
| | | Percent | -1/15 | -0/88 | -2/64 | -2/47 | -3/08 | -2/21 |
| | 10% dificit irrigation | Amount | 4257 | 4038 | 10970 | 36219 | 40272 | 2038 |
| | | Percent | -2/13 | -1/19 | -4/28 | -4/23 | -5/35 | -4/09 |
| Large scale farms representative | Full irrigation | Amount | 4382 | 4108 | 11412 | 38140 | 42531 | 2281 |
| | 5% dificit irrigation | Amount | 4320 | 4063 | 11100 | 37120 | 41271 | 2225 |
| | | Percent | -1/41 | -1/09 | -2/73 | -2/67 | -2/96 | -2/46 |
| | 10% dificit irrigation | Amount | 4280 | 4039 | 10910 | 36320 | 40384 | 2188 |
| | | Percent | -2/33 | -1/67 | -4/39 | -4/77 | -5/04 | -4/07 |

جدول ۶، مقدار و درصد تغییرات سطح زیرکشت محصولات منتخب زراعی دشت اردلان را برای گروه‌های مختلف بهره‌برداری (کوچک، متوسط و بزرگ) نشان می‌دهد. مقادیر بیان شده در شرایط اعمال آبیاری کامل، بیانگر مقادیر موجود برای سطح زیرکشت در شرایط سال پایه یا مبنا است. با توجه به نتایج این جدول، ملاحظه می‌شود که در شرایط اعمال کم‌آبیاری علاوه بر تغییرات به وجود آمده در عملکرد محصولات منتخب زراعی، میزان سطح زیرکشت محصولات نیز دستخوش تغییر قرار می‌گیرد. با توجه به نتایج به دست آمده، سطح زیرکشت کلیه محصولات منتخب زراعی دشت اردلان با اعمال کم‌آبیاری در سطوح مختلف نسبت به شرایط اعمال آبیاری کامل (سال پایه) کاهش می‌یابد. میزان تغییرات کاهشی سطح زیرکشت محصولات منتخب زراعی در شرایط اعمال سناریوی کم‌آبیاری ۱۰ درصد نسبت به سناریوی پنج درصد محسوس‌تر می‌باشد. تغییرات سطح زیرکشت محصولات منتخب زراعی در شرایط اعمال کم‌آبیاری، در مزرعه نماینده گروه بزرگ نسبت به مزارع نماینده متوسط و کوچک بیشتر است؛ به طوری که محصولات گوجه‌فرنگی و هندوانه به ترتیب با کاهش سطح زیرکشت ۵/۲۳ تا ۹/۴۲ درصد و ۴/۰۸ تا ۸/۵۴ درصد، بیشترین میزان تغییرات سطح زیرکشت را به خود اختصاص داده‌اند. این امر می‌تواند به دلیل بالاتر بودن ضرایب حساسیت به تنش آبی محصولاتی مانند هندوانه و گوجه‌فرنگی نسبت به غلات گندم و جو آبی باشد. نیاز آبی بالاتر این محصولات (گوجه‌فرنگی و هندوانه) نیز نسبت به غلات گندم و جو آبی نیز سبب می‌شود تا کشاورزان در اراضی وسیع‌تر کشت (گروه نماینده بزرگ) عکس‌العمل و یا حساسیت بیشتری را نسبت به اعمال روش کم‌آبیاری داشته باشند. این نتیجه در الگوهای کشت مزارع نماینده متوسط و کوچک نیز دیده می‌شود. این در حالی است که، محصولات غله‌ای گندم و جو آبی با توجه به تغییرات عملکردی که تحت شرایط اعمال کم‌آبیاری در سطوح مختلف دارند، کمترین میزان تغییر کشت را در الگوهای کشت مزارع نماینده کوچک، متوسط و بزرگ به خود اختصاص داده‌اند. برای محصول آفتابگردان نیز با اعمال شرایط کم‌آبیاری در الگوی کشت، کاهش سطحی معادل با ۳/۷ تا ۶/۳۳ درصد در مزرعه نماینده گروه بزرگ حاصل می‌شود. به طور کلی، نتایج جدول ۶ گویای آن است که اعمال شرایط کم‌آبیاری در سطح ۵ درصد تغییرات جزیی و در سطح ۱۰ درصد تغییرات محسوسی را در الگوهای زراعی مزارع نماینده به وجود می‌آورد که این امر بیش از هر چیز ناشی از تغییرات کاهشی به وجود آمده در میزان عملکرد محصولات منتخب در شرایط اعمال کم‌آبیاری به جای آبیاری کامل در سطح مزارع نماینده گروه‌های مختلف بهره‌برداری است.

با ایجاد تغییرات کاهشی در سطح زیرکشت محصولات منتخب زراعی، به مراتب مقادیر آب مصرفی، بازده ناخالص کشاورزان و ارزش اقتصادی آب آبیاری در مزارع نماینده کوچک، متوسط و بزرگ دستخوش تغییر قرار می‌گیرد. جدول ۷، تغییرات به وجود آمده را تحت شرایط اعمال کم‌آبیاری ۵ و ۱۰ درصد در سطح مزارع نماینده نشان می‌دهد.

**Table 6- Changes in the acrage of selected products in Ardalan plain under dificit irrigation**

**جدول ۶- تغییرات سطح زیرکشت محصولات منتخب زراعی دشت اردلان در شرایط اعمال کم‌آبیاری**

| Operation levels | Irrigation scenario | Changes | Acrage of selected products (ha) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Wheat | Barley | Alfalfa | Tomato | Melon | Sunflower |
| Small scale farms representative | Full irrigation | Amount | 1/74 | 0/96 | 0/71 | 0/50 | 0/43 | 0/22 |
| | 5% dificit irrigation | Amount | 1/69 | 0/942 | 0/681 | 0/474 | 0/412 | 0/213 |
| | | Percent | -2/37 | -1/84 | -4/07 | -5/12 | -4/18 | -3/19 |
| | 10% Dificit irrigation | Amount | 1/65 | 0/926 | 0/654 | 0/454 | 0/392 | 0/207 |
| | | Percent | -5/19 | -3/564 | -7/55 | -9/14 | -8/73 | -5/81 |
| Medium scale farms representative | Full irrigation | Amount | 3/46 | 2/15 | 1/74 | 1/31 | 1/22 | 0/92 |
| | 5% dificit irrigation | Amount | 3/38 | 2/11 | 1/66 | 1/25 | 1/17 | 0/89 |
| | | Percent | -2/20 | -1/66 | -4/37 | -4/88 | -4/33 | -3/46 |
| | 10% dificit irrigation | Amount | 3/29 | 2/08 | 1/60 | 1/19 | 1/12 | 0/86 |
| | | Percent | -4/96 | -3/28 | -7/68 | -8/95 | -8/61 | -6/03 |
| Large scale farms representative | Full irrigation | Amount | 6/37 | 3/92 | 2/80 | 1/53 | 1/38 | 1/20 |
| | 5% dificit irrigation | Amount | 6/20 | 3/84 | 2/67 | 1/45 | 1/32 | 1/16 |
| | | Percent | -2/52 | -2/03 | -4/813 | -5/23 | -4/08 | -3/70 |
| | 10% dificit irrigation | Amount | 6/02 | 3/75 | 2/57 | 1/38 | 1/26 | 1/12 |
| | | Percent | -5/40 | -4/11 | -8/09 | -9/42 | -8/54 | -6/33 |

نتایج این جدول گویای آن است که پس از اعمال شرایط کم‌آبیاری تحت سناریوهای مختلف (۵ و ۱۰ درصد)، میزان منابع آب مصرفی در الگوهای مزارع نماینده کوچک، متوسط و بزرگ نسبت به شرایط سال پایه کاهش می‌یابد. این امر ناشی از کاهش سطح زیرکشت محصولات منتخب زراعی پس از اعمال کم‌آبیاری است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که کاهش میزان آب مصرفی تحت شرایط اعمال کم‌آبیاری در سطح مزرعه نمونه کوچک بیشتر از مزارع نمونه متوسط و بزرگ است. با اعمال شرایط کم‌آبیاری بهره‌بردار نمونه گروه کوچک سطح بیشتری از اراضی زیرکشت خود را کاهش داده و میزان آب تخصیصی جهت فعالیت‌های زراعی در الگوی این مزرعه به میزان کمتری نسبت به شرایط سال پایه خواهد بود، لذا این امر کاهش بیشتر آب مصرفی (منفی بودن مقادیر یا درصد تغییرات در جدول ۷) را در الگوی مزرعه کوچک به دنبال دارد. افزون بر این، نتایج نشان می‌دهد که با کاهش میزان مصرف آب در سطح اراضی، تقاضای بهره‌بردار برای نهاده آب آبیاری کاهش می‌یابد و ارزش اقتصادی هر مترمکعب آب آبیاری نسبت به شرایط سال پایه (شرایط اعمال آبیاری کامل) افزایش پیدا می‌کند. بدین ترتیب تغییرات ارزش اقتصادی هر مترمکعب آب آبیاری در سطح مزرعه نماینده گروه کوچک که میزان آب مصرفی در آن بیشترین تغییرات کاهشی را دارد، بیش از تغییرات ارزش اقتصادی نهاده آب در سطح مزارع متوسط و بزرگ است.

افزون بر این، نتایج جدول ۷ گویای آن است که با اعمال روش کم‌آبیاری ۵ و ۱۰ درصد در سطح مزرعه نماینده گروه کوچک ارزش اقتصادی هر مترمکعب آب آبیاری از ۱۰۷۴ ریال در سال پایه به ۱۱۳۱ و ۱۱۶۲ ریال می‌رسد که افزایشی معادل با ۵/۳ و ۸/۲۱ درصد را نسبت به شرایط سال پایه در پی دارد. کمترین میزان تغییرات ارزش اقتصادی نهاده آب در سطح مزرعه نماینده گروه بزرگ (افزایشی به میزان ۳/۰۹ تا ۵/۴۷ درصد نسبت به سال پایه) محقق شده است که این امر به دلیل تغییرات کمتر میزان آب مصرفی در سطح این مزرعه می‌باشد. بخش دیگری از نتایج جدول ۷، بیانگر تغییرات کاهشی یا منفی مجموع بازده ناخالص بهره‌برداران در سطح مزارع نماینده پس از اعمال شرایط کم‌آبیاری است. این میزان برای مزرعه نماینده گروه کوچک ۴/۱۹ تا ۷/۰۷ درصد، متوسط ۳/۴۲ تا ۶/۱۱ درصد و بزرگ ۳/۱۵ تا ۵/۸۳ درصد کاهش را نسبت به شرایط سال پایه (شرایط اعمال آبیاری کامل) نشان می‌دهد. بدین ترتیب، ملاحظه می‌شود که بهره‌بردار نمونه گروه کوچک به دلیل کاهش بیشتر سطح زیرکشت محصولات منتخب در الگوی مزرعه خود طی شرایط اعمال کم‌آبیاری، کاهش سود ناخالص بیشتری را تجربه می‌کند؛ این در حالی است که بهره‌بردار نماینده گروه بزرگ با توجه به تغییرات کاهشی کمتر در الگوی مزرعه خود تحت شرایط اعمال کم‌آبیاری، بازده ناخالص بیشتری را در مقایسه با بهره‌بردار نماینده کوچک و متوسط به دست می‌آورد.

**Table 7- Changes in water consumption, farmers' gross profit and economic value of water under deficit irrigation**

**جدول ۷- تغییرات میزان آب مصرفی، بازده ناخالص برای کشاورزان و ارزش اقتصادی آب پس از اعمال شرایط کم‌آبیاری**

| Operation levels | Components under consideration | Base year values* | Changes | Scenarios under consideration | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Dificit irrigation 5% | Dificit irrigation 10% |
| Small scale farms representative | Total water consumption in the pattern* | 24779 | Amount | 22354 | 22717 |
| | | | Percent | -9/78 | -8/32 |
| | Total gross return of the pattern** | 83/92 | Amount | 77/98 | 80/41 |
| | | | Percent | -7/07 | -4/19 |
| | Economic value of irrigation water*** | 1074 | Amount | 1162 | 1131 |
| | | | Percent | 8/21 | 5/30 |
| Medium scale farms representative | Total water consumption in the pattern | 60483 | Amount | 56676 | 57358 |
| | | | Percent | -6/29 | -5/17 |
| | Total gross return of the pattern | 204/3 | Amount | 191/9 | 197/3 |
| | | | Percent | -6/11 | -3/42 |
| | Economic value of irrigation water | 1329 | Amount | 1404 | 1372 |
| | | | Percent | 5/63 | 3/27 |
| Large scale farms representative | Total water consumption in the pattern | 92885 | Amount | 87228 | 88240 |
| | | | Percent | -6/09 | -5/01 |
| | Total gross return of the pattern | 313/8 | Amount | 295/4 | 303/9 |
| | | | Percent | -5/83 | -3/15 |
| | Economic value of irrigation water | 1643 | Amount | 1733 | 1694 |
| | | | Percent | 5/47 | 3/09 |

*, ** and ***: respectively in terms of cubic meters, million Rials and Rials per cubic meter

با توجه به مقادیر به دست آمده برای متغیرهای ارزش اقتصادی آب و میزان آب مصرفی، می‌توان تابع تقاضای آب را برای بهره‌برداران نماینده گروه‌های کوچک، متوسط و بزرگ استخراج نمود. برای این منظور، در مختصات ترسیمی قیمت- مقدار برای توابع تقاضای آب آبیاری، ارزش اقتصادی نهاده آب بر روی محور عمودی (قیمت) و مقادیر آب مصرفی بر روی محور افقی (مقدار) لحاظ گردید. کشش تقاضای نهاده آب آبیاری نیز برای هر یک از گروه‌های بهره‌برداری از نسبت مابه التفاوت مقادیر آب مصرفی در سطوح کم‌آبیاری ۵ و ۱۰ درصد به مابه‌التفات ارزش اقتصادی آب آبیاری در سطوح مذکور استفاده شد. جدول ۸، کشش قیمتی تقاضای نهاده آب آبیاری و شکل‌های ۳ تا ۵ توابع تقاضای آب برآورد شده برای نماینده گروه‌های مختلف بهره‌برداری را نشان می‌دهد.

نتایج جدول ۸، حاکی از آن است که مقدار کشش قیمتی تقاضای نهاده آب در سطح مزرعه کوچک (۰/۵۷۳) نسبت به مزارع متوسط و بزرگ (۰/۵۱۲ و ۰/۴۹۳) بیشتر برآورد شده است. بدین معنی که با افزایش جزئی در قیمت نهاده آب، تقاضای بهره‌بردار نماینده گروه کوچک برای آب به میزان بیشتری کاهش می‌یابد؛ لذا کشش‌پذیری نهاده آب در سطح مزرعه کوچک بیشتر از مزارع متوسط و بزرگ است. بدین ترتیب، قیمت‌گذاری نهاده آب در سطوح بالاتر از سال پایه تغییرات چشم‌گیری را در تقاضای کشاورزان مزارع کوچک به دنبال دارد، درحالی‌که کشاورزان مزارع متوسط و بزرگ حساسیت کمتری را نسبت به سناریوهای افزایش قیمت آب دارند.

**Table 8- Price elasticity of demand for irrigation water input at representative farms for different exploiting classes**

**جدول ۸- کشش قیمتی تقاضای نهاده آب آبیاری در سطح مزارع نماینده گروه‌های مختلف بهره‌برداری**

| Farm size | Water consumption difference (Δx) | Water value difference (Δx) | Ratio Δx to Δp (Δx / Δp) | Ratio p1 to x1 (p1 / x1) | Water demand elasticity (ew) |
|---|---|---|---|---|---|
| Small farm | 363 | -31 | 11/7 | 0/049 | 0/573 |
| Medium farm | 682 | -32 | 21/3 | 0/024 | 0/512 |
| Large farm | 1012 | -39 | 25/9 | 0/019 | 0/493 |

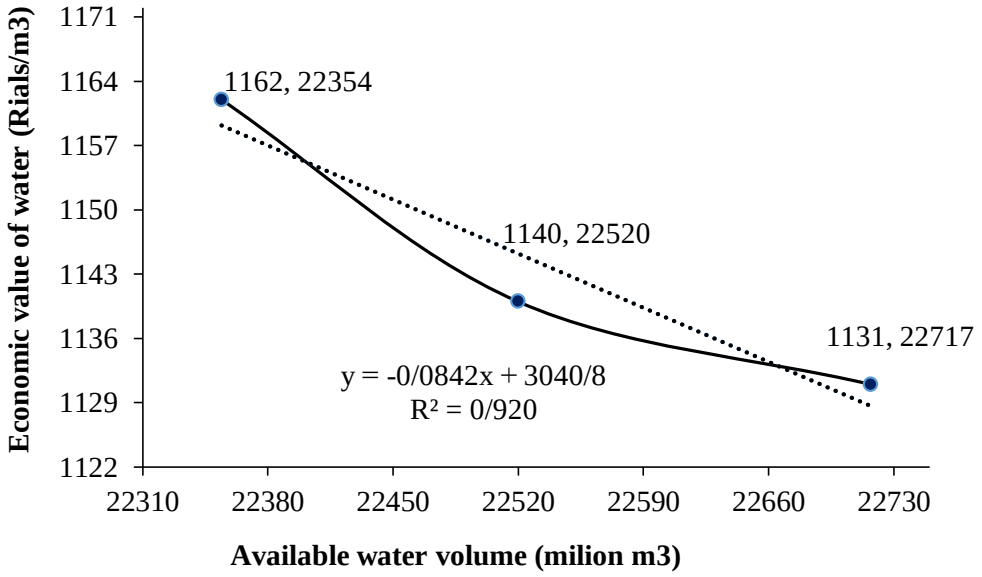


**Fig. 3- Irrigation water demand function of the small scale farms representative in Ardalan plain**

**شکل ۳- تابع تقاضای آب آبیاری بهره‌بردار نماینده گروه کوچک در دشت اردلان**

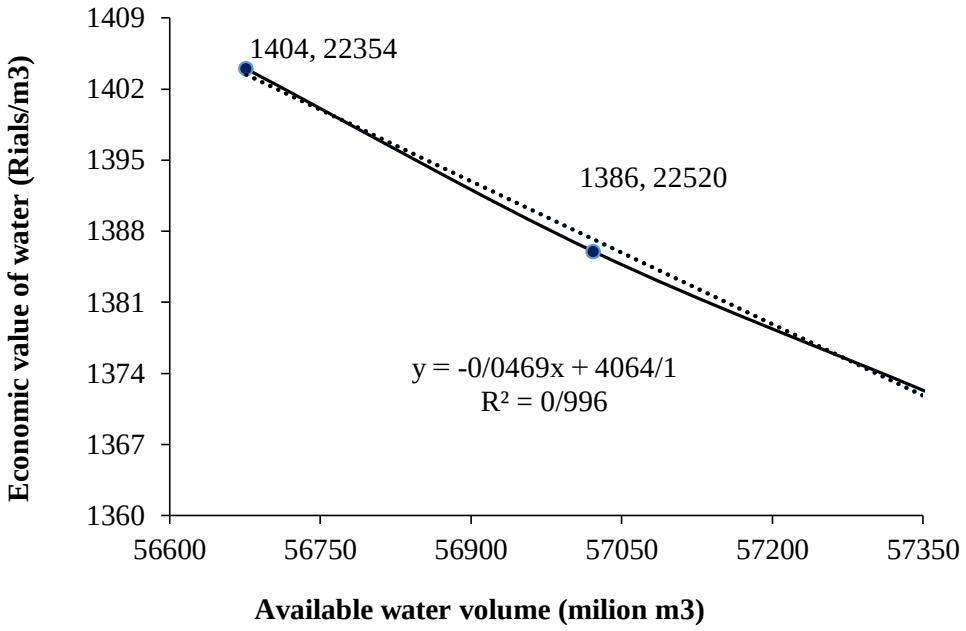


**Fig. 4- Irrigation water demand function of the medium scale farms representative in Ardalan plain**

**شکل ۴- تابع تقاضای آب آبیاری بهره‌بردار نماینده گروه متوسط در دشت اردلان**

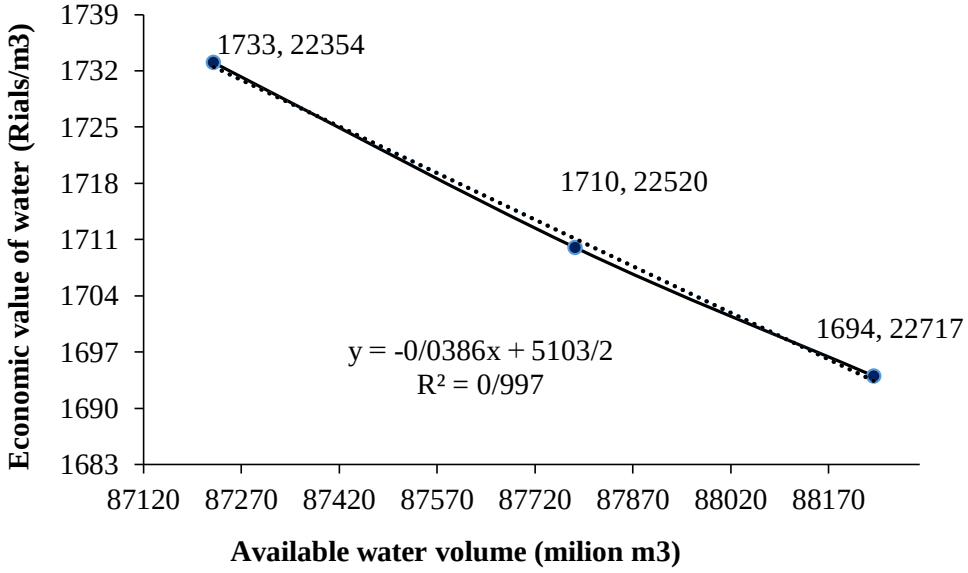


**Fig. 5- Irrigation water demand function of the large scale farms representative in Ardalan plain**

**شکل ۵- تابع تقاضای آب آبیاری بهره‌بردار نماینده گروه بزرگ در دشت اردلان**

به طور کلی، نتایج این تحقیق با یافته‌های تحقیقات Shirvanian et al. (2015)، Parhizkari et al. (2015) و Shahrokhnia and Rahimi (2017) در داخل کشور همسو است. آن‌ها در تحقیقات خود اثرات کم‌آبیاری را بر عملکرد محصولات و برخی از پارامترهای کشاورزی و منابع آب ارزیابی کردند. نتایج بیانگر آن بود که کاربرد روش کم‌آبیاری در سطوح متفاوت منجر به صرفه‌جویی در میزان مصرف آب کشاورزی شد. همچنین، نتایج این تحقیق با یافته‌های به دست آمده در تحقیقات English and Raja (1997)، Patane et al. (2011) و Graveline and Merel (2014) در خارج از کشور قرابت دارد. یافته‌های به دست آمده در تحقیقات فوق حاکی از آن است که استفاده از روش کم‌آبیاری به عنوان راه‌کاری برای بهینه‌سازی منابع آب مصرفی در بخش کشاورزی، اگرچه که منجر به کاهش ناچیزی در عملکرد محصولات می‌شود، اما افزایش کارایی نهاده آب را در سطح اراضی به دنبال دارد. افزون بر این یافته‌های تحقیقات خارجی مذکور نشان داد که به‌کارگیری روش کم‌آبیاری در سطح مزارع زراعی یکساله اگرچه که کاهش ناچیزی را در سود ناخالص کشاورزان به وجود می‌آورد، اما توجیه اقتصادی دارد و به عنوان یک راه‌کار اساسی جهت افزایش بازدهی نهاده آب در سطح مزارع مورد استفاده قرار می‌گیرد.

## ۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج تحقیق حاضر گویای آن است که تفاوت فاحشی بین آب‌بهای پرداختی کشاورزان دشت اردلان با ارزش اقتصادی آب آبیاری وجود دارد و این امر می‌تواند کم ارزش بودن و یا رایگان تلقی شدن نهاده آب و استفاده بی‌رویه از آن را در سطح اراضی زراعی در پی داشته باشد. همچنین، نتایج نشان داد که اعمال روش کم‌آبیاری در سطوح ۵ و ۱۰ درصد منجر به کاهش عملکرد کلیه محصولات منتخب دشت اردلان می‌شود، اما در این بین محصولات غله‌ای گندم و جو آبی کاهش عملکرد پایین‌تری را نسبت به دیگر محصولات الگوی کشت (یونجه، گوجه‌فرنگی، هندوانه و آفتابگردان) دارند. با کاهش عملکرد محصولات منتخب تحت تأثیر کم‌آبیاری ۵ و ۱۰ درصد، سطح زیرکشت آن‌ها نسبت به سال پایه (شرایطی که در آن از روش آبیاری کامل استفاده می‌شود) کاهش می‌یابد. این امر منجر به صرفه‌جویی در مصرف آب به میزان ۵/۰۱ تا ۹/۷۸ درصد (۲۲۳۵۴ تا ۸۸۲۴۰ مترمکعب)، کاهش بازده ناخالص کشاورزان به میزان ۳/۱۵ تا ۷/۰۷ درصد (۷۷/۹۸ تا ۳۰۳/۹ میلیون ریال) و افزایش ارزش اقتصادی آب به میزان ۳/۰۹ تا ۸/۲۱ درصد (۱۱۶۲ تا ۱۶۹۴ ریال در مترمکعب) در الگوهای بهره‌برداری دشت اردلان (مزارع کوچک، متوسط و بزرگ) نسبت به شرایط سال پایه می‌شود. تابع تقاضای آب آبیاری کشاورزان نیز در سطح مزارع کوچک نسبت به مزارع متوسط و بزرگ، کشش‌پذیرتر است، لذا کشاورزان خرده‌پا در شرایط قیمت‌گذاری منابع آب و افزایش بهای این نهاده از حساسیت بالاتری برخوردار هستند. به طور کلی، نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان داد که به‌کارگیری روش کم‌آبیاری در سطوح ۵ و ۱۰ درصد، علی‌رغم اثر کاهشی اندکی که در بازده ناخالص کشاورزان دشت اردلان دارد (مطابق با مقادیر فوق)، منجر به صرفه‌جویی حجم زیادی از منابع آب دردسترس منطقه (مطابق با مقادیر فوق) می‌شود. اعمال این روش با تأثیراتی که بر روی ارزش اقتصادی آب آبیاری دارد، مسیر مشخصی را در زمینه قیمت‌گذاری منابع آب طی دوره‌های آتی ایجاد می‌کند و با اصلاح نظام قیمت‌گذاری مانع از هدر رفت منابع آب در دشت اردلان می‌شود. در نهایت به‌کارگیری روش کم‌آبیاری در سطوح پایین با توجه به اثراتی که بر روی سطح زیرکشت محصولات و میزان آب مصرفی در دشت اردلان دارد، توجیه اقتصادی داشته و از این رو، می‌تواند به عنوان یک راه‌کار مناسب جهت پایداری و صیانت از منابع آب کشاورزی در محدوده مطالعاتی دشت اردلان به کار گرفته شود. لذا استفاده از این روش، در سطح اراضی زراعی منطقه مورد مطالعه بیش از پیش توصیه می‌شود. تدوین برنامه سیاستی ملاحظه برابری در خصوص ارزش اقتصادی آب آبیاری، منجر به کاهش فاصله یا اختلاف ایجاد شده بین آب‌بهای پرداختی و ارزش واقعی نهاده آب در دشت اردلان شده و از رایگان تلقی شدن این نهاده و مصرف بی‌مورد آن در سطح اراضی زراعی جلوگیری به عمل می‌آورد. اصلاح نظام قیمت‌گذاری و تدوین برنامه اساسی در این زمینه نیز جهت تفکیک‌سازی قیمت آب آبیاری و تخصیص مبلغ آب‌بهای مجزا برای بهره‌برداران کوچک، متوسط و بزرگ در دشت مذکور راهکار دیگری است که می‌تواند به مدیریت یکپارچه و جامع منابع آب کمک شایانی نماید. افزون بر موارد فوق، یافته‌های تحقیق حاضر نشان داد که آب آبیاری نهاده‌ای ضروری برای تولید محصولات منتخب کشاورزی در منطقه مطالعاتی دشت اردلان است و با اعمال سیاست‌گذاری‌های قیمتی در این راستا، می‌توان در مقدار مصرف آب تغییرات مثبت و مؤثری را ایجاد نمود که با این کار، مدیریت در کاهش شکاف قیمتی ایجاد شده بین مبالغی که کشاورزان بعنوان آب‌بهاء پرداخت می‌کنند و ارزش اقتصادی یا واقعی‌ای که هر مترمکعب آب آبیاری دارد، محقق گردد. همچنین، با توجه به اینکه سطح زیرکشت و عملکرد محصولات در اثر اعمال کم‌آبیاری کاهش می‌یابند، میزان عرضه محصولات منتخب نیز دچار تغییرات کاهشی خواهد شد که این موضوع می‌تواند سبب افزایش قیمت محصولات در بازار طی دوره‌های آتی شود و در

نهایت میزان واردات محصولات منتخب را از مناطق همجوار تحت تأثیر قرار دهد. از این رو، بررسی و تحلیل اثرات اعمال روش‌های کم‌آبیاری بر قیمت محصولات منتخب و در نهایت بر بازار داخلی محصولات و میزان واردات آن‌ها می‌تواند موضوعی نو و بدیع جهت تحقیقات آتی پژوهشگران در این عرصه باشد. افزون بر پیشنهادهای فوق، با توجه به اینکه در شرایط کنونی نه تنها در منطقه مطالعاتی دشت اردلان، بلکه در اقصی‌نقاط کشور ذخایر آبی از شرایط پایداری خارج شده و از منبعی تجدیدشونده به سوی منبعی پایان‌پذیر در حال تغییر است، ضرورت دارد که مفهوم قیمت سایه‌ای یا ارزش اقتصادی آب آبیاری بیش از گذشته مورد تأکید و مطالعه واقع گردد و به منظور تحقق نتایجی کاربردی‌تر در راستای بهره‌برداری کارآ از منابع آب، سیاست تبعیض قیمت برای بهره‌برداران مختلف اعمال شود تا بهترین و کارآترین استفاده و بهره‌برداری از نهاده آب در بخش کشاورزی صورت گیرد. پیشنهاد می‌شود در کنار به کارگیری سیاست تبعیض قیمت به عنوان یک رویکرد در بهینه‌سازی منابع آب بین گروه‌های مختلف بهره‌برداری، تبعات ناشی از آن (مثلاً خرد شدن بیشتر اراضی به دلیل اینکه آب برای اراضی مقیاس کوچک با قیمت کم فروخته شود) در مطالعات آتی توسط پژوهشگران مورد بررسی واقع گردند.

## پی‌نوشت‌ها

1- Deficit Irrigation
2- Water Bank
3- Ordinary Least Squares
4- Non-Liner Programming
5- Positive Mathemathical Programming
6- Clark's Deficit Irrigation Pattern
7- Spatial Aggregation-Positive Mathematical Programming
8- Normative Mathematical Programming
9- General Algebraic Modeling System
10- Statistical Package for the Social Science
11- Food and Agriculture Organization
12- CropWat

## ۵- مراجع


Agricultural and Natural Resources Research Center of Qazvin Province (2014) Ardalan Plain development and civil studies project. Prepared and edited by: Qazvin Province Agriculture and Natural Resources Research Center, Pages: 34-83

Asaadi MA, Khalilian S, Mousavi SH (2018) Management of irrigation water allocation and cropping pattern with emphasis on deficit irrigation strategy (Case study: Qazvin irrigation network). Iran-Water Resources Research 14(5):1-13 (In Persian)

Barikani A, Ahmadian M, Khalilian S (2011) Optimal sustainable use of groundwater in agricultural sector: Case Study Subsector in Qazvin Basin. Journal of Agricultural Economics & Development 25(2):253-262 (In Persian)

Clarke D, Smith M, EL-Askari K (1998) CROPWAT for windows: User Guide. University of Southampton, Pp: 200-246

English M, Raja SN (1997) Perspective on deficit irrigation. Agricultural Water Management 32(1):1-14

Ferers E, Soriano M.A (2007) Deficit irrigation for redusing agricultural water use. Journal of Experimental Botany 58(2):147-159

Graveline N, Merel P (2014) Intensive and extensive margin adjustments to water scarcity in France's Cereal Belt. European Review of Agricultural Economics 41(5):707-743

Howitt RE, Medellin-Azuara J, MacEwan D (2009) Estimating the economic impacts of agricultural yield related changes for California. Final Paper, a Paper from California Climate Change Center Pp: 29

Howitt RE, Medellin-Azuara J, MacEwan D, Lund JR (2012) Calibrating disaggregates economic models of agricultural production and water management. Environmental Modeling and Software 38:244-258

Karrou M, Oweis T (2012) Water and land productivities of wheat and food legumes with deficit supplemental irrigation in a Mediterranean environment. Journal of Agricultural Water Management 107:94-103

Keshavarz A, Sadeghzade K (2010) Optimal deficit irrigation and its economic and mathematical analysis. Journal of Engineering Technical Research 17(1):1-26 (In Persian)

Keykhaee F, Ganji Khoramdel N (2017) Effect of deficit irrigation in corrugation and border methods on yield and water use efficiency of wheat cv Hamoon. Journal Water Research in Agriculture 30(1):1-11 (In Persian)

Medellan-Azuara J, Harou JJ, Howitt RE (2011) Predicting farmer responses to water pricing, rationing and subsidies assuming profit maximizing investment in irrigation technology. Science of the Agricultural Water Management 108:73-82

Mosavi F, Tavakoli A.R (2008) Principles and application of dificit irrigation. Publications Of The National Irrigation And Drainage Committee Of Iran, Ministry Of Energy, 112 Pages (In Persian)

Mozaffari MM (2016) Irrigation water demand management in ardalan plain with emphasis on pricing policy. Journal of Soil and Water Resources Protection 5(4):47-67 (In Persian)

Nakashima T, Ishikawa S (2017) Linking life cycle assessment to bioeconomic modelling with positive mathematical. Programing: An alternative approach to calibration. Journal of Cleaner Production 2(1):1-35

Parhizkari A (2015) Evaluation of the effects of drought on the agricultural status in plains of Qazvin Province. The Project of National Elite Foundation Research, Agricultural and Natural Resources Research Center of Qazvin Province, Approved Number: 93111-30-30-2 Pp: 138

Parhizkari A, Badiee Barzin H (2016) Determination of the economic value of water and simulating farmers' behvior in Takestan region in response to reducing the agricultural water resources. Journal Water Research in Agriculture 31(1):105-118 (In Persian)

Parhizkari A, Khodadadi Hoseini M, Taghizade Ranjbari H, Mahmoodi A (2016) Determining the appropriate economic strategy to conserve groundwater resources in Qazvin plain. Journal of Rural Development Strategies 2(4):477-496 (In Persian)

Parhizkari A, Mahmoodi A, Shokatfadaee M (2015) Deficit irrigation simultaneously with reduced available water the solution to conservation of water resources in Qazvin plain. Journal of Water and Soil Resources Conservation 5(1):67-80 (In Persian)

Parhizkari A, Sabouhi M, Ahmadpoor M, Badie Barzin H (2014) Simulation of farmers' response to irrigation water pricing and rationing policies (Case study: Zabol city). Journal of Agricultural Economics & Development 28(2):164-176 (In Persian)

Patane C, Tringali S, Sortino O (2011) Effects of deficit irrigation on biomass, yield, water productivity and fruit quality of processing tomato under semi-arid

Mediterranean climate conditions. Scientia Horticulturae 129(4):590-596

Qazvin Province Regional Water Company (2021) Basic water resources studies group. Rainfall status and water resources in Ardalan plain, 34 pages (In Persian)

Rafee Darani H, Kohansal M, Ghorbani M, Sabouhi M (2016) Hydro-economic modeling in the analysis of water resources management strategies: Neyshabur plain. Journal of Agricultural Economic and Development 99(25):41-77 (In Persian)

Richard GA, Luis SP, Dirk R, Martin S (1998) FAO irrigation and drainage paper. No. 56, Crop Evapotranspiration (Guidelines for Computing Crop Water Requirements), No: 326

Sepaskhah AR, Azizian A, Tavakoli AR (2006) Optimal applied water and winter wheat under variableseasonal rainfall and planning scenarios for consequent crops in a semi-arid region. Journal of Agricultural Water Management 84(1-2):113-122

Shahrokhnia MA, Rahimi HA (2016) Economic analysis of deficit irrigation for transplanted Tomato cultivars. Journal Water Research in Agriculture 30(4):483-495 (In Persian)

Shirvanian A, Haghighatnia H, Mehrjo S (2015) Determination of economic threshold of deficit irrigation on cotton in Darab district. Journal of Agricultural Economics & Development 28(4):312-321 (In Persian)

Steduto P, Hsiao TC, Fereres E, Raes D (2012) Crop yield response to water. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Pp: 505

Water Engineering and Sustainable Development Consultants (2021) The effect of under-irrigation on groundwater resources in the plains of Qazvin province. Irrigation Summit, Qazvin Governor's Office, 29 pages (In Persian)

Zapata-Sierra A, Manzano-Agugliaro F (2017) Controlled deficit irrigation for orange trees in Mediterranean countries. Journal of Cleaner Production 162(20):130-140