



## Evaluation of the Potential Effects of Hydrological Drought on Agricultural Situation, Farmers' Revenue and Water Consumptions in Tehran Province

A. Parhizkari<sup>1\*</sup>, GH. Yavari<sup>2</sup>, A. Mahmoodi<sup>2</sup>, and  
GH. Bakhshi Khaniki<sup>3</sup>

### Abstract

Hydrological drought is a phenomenon that occurs due to the reduction of surface water and groundwater resources supply. Because of the dependence of the agricultural sector to soil moisture storage, it primarily affects this sector. Therefore, the analysis of the effects of this phenomenon is important for the better management and planning of water resources available in the agricultural sector. In this study, the effects of hydrological drought arising from reducing the supply of water resources on agricultural situation, water consumptions and farmers' gross profit in Tehran province were evaluated. For this purpose from Multi Period Positive Mathematical Programming (MP-PMP) and statistical information related to period 2013-2018 were used. The results showed that the current cropping pattern in Tehran province is not optimal and with occurrence of hydrological drought, farmers' tend decreases for the water-full crops such as watermelon, tomato and sunflower. In addition, the results showed that in the hydrological drought conditions, about 9.13 percent of agricultural water demand in Tehran province will not provided. This will change the pattern of cultivation in the region. Reduction in the farmers' gross margin amount 7.28 percent and increase in the economic value of irrigation water amount 38.2 percent compared to the base period are other consequences the occurrence of hydrological drought in Tehran province. Overall, the results indicate that with the occurrence of drought, the cropping pattern toward products with lower water requirements and higher profits, but for tomato and corn products (despite the high water requirement) due to integrated farming in region reducing acreage is less visible. Finally, suggestions to deal with consequences of hydrological drought in study region were presented.

**Keywords:** Hydrological Drought, Agricultural Water Supply, Income Status, Multi-Period PMP Model, Tehran.

Received: January 12, 2020

Accepted: July 9, 2020

## ارزیابی آثار بالقوه خشکسالی هیدرولوژیکی بر وضعیت کشاورزی، بازده درآمدی و مصارف آبی کشاورزان استان تهران

ابوذر پرهیزکاری<sup>۱\*</sup>، غلامرضا یآوری<sup>۲</sup>، ابوالفضل محمودی<sup>۲</sup> و  
غلامرضا بخش‌بخش‌خانیکی<sup>۳</sup>

### چکیده

خشکسالی هیدرولوژیکی پدیده‌ای است که در اثر کاهش عرضه منابع آب سطحی و زیرزمینی رخ می‌دهد و به دلیل وابستگی بخش کشاورزی به ذخیره رطوبتی خاک، قبل از هر چیز این بخش را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. بنابراین، تحلیل اثرات این پدیده برای مدیریت و برنامه‌ریزی بهتر منابع آب موجود در بخش کشاورزی حائز اهمیت است. در این مطالعه برای تحلیل اقتصادی اثرات بالقوه خشکسالی هیدرولوژیکی ناشی از کاهش عرضه منابع آب بر وضعیت کشاورزی، بازده درآمدی و مصارف آبی کشاورزان استان تهران از الگوی برنامه‌ریزی ریاضی مثبت دوره‌ای (MP-PMP) و اطلاعات آماری مربوط به دوره پنج‌ساله ۱۳۹۷-۱۳۹۲ استفاده شد. نتایج نشان داد که الگوی فعلی کشت در استان تهران بهینه نیست و با رخداد خشکسالی، تمایل کشاورزان برای توسعه سطح زیرکشت محصولات پرآب هندوانه و آفتابگردان کاهش می‌یابد. همچنین، نتایج نشان داد که در شرایط رخداد خشکسالی هیدرولوژیکی حدود ۹/۱۳ درصد تقاضای آب بخش کشاورزی استان تهران بدون پاسخ مانده و تأمین نخواهد شد که این امر موجبات تغییر الگوی کشت در منطقه را فراهم می‌کند. کاهش ۷/۲۸ درصدی بازده درآمدی کشاورزان و افزایش ۳۸/۲ درصدی ارزش اقتصادی آب آبیاری نسبت به دوره مبنای دیگر پیامدهای وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی در استان تهران است. به طور کلی، نتایج گویای آن است که با وقوع خشکسالی الگوی کشت زراعی به نفع محصولات با نیاز آبی پایین‌تر و سود بالاتر تغییر می‌کند، ولی در مورد محصولات گوجه‌فرنگی و ذرت دانه‌ای علی‌رغم نیاز آبی بالا به دلیل وجود کشاورزی تلفیقی در منطقه، کاهش سطح زیرکشت کمتری مشاهده می‌گردد. در پایان پیشنهاداتی برای مقابله با پیامدهای خشکسالی هیدرولوژیکی در محدوده مطالعاتی ارائه شد.

**کلمات کلیدی:** خشکسالی هیدرولوژیکی، عرضه آب کشاورزی، وضعیت

درآمدی، مدل PMP دوره‌ای، تهران.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۱۰/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۴/۱۹

1- Ph.D. Student of Agricultural Economics, Payam Noor University, Tehran, Iran. Email: Abozar.parhizkari@yahoo.com

2- Associate Professor of Agricultural Economics, Payam Noor, Tehran, Iran.

3- Professor of Agricultural Science (Biotechnology) Payam Noor University, Tehran, Iran.

\*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری اقتصاد کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

۲- دانشیار اقتصاد کشاورزی دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

۳- استاد علوم کشاورزی (بیوتکنولوژی) دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

\*- نویسنده مسئول  
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پائیز ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

## ۱- مقدمه

خشکسالی هواشناسی معمولاً براساس درجه خشکی (در مقایسه با مقادیر نرمال یا میانگین) و طول دوره خشکی تعریف می‌شود. تعاریف خشکسالی هواشناسی بایستی به صورت موردی برای هر منطقه خاص در نظر گرفته شود؛ چرا که شرایط جوی از منطقه‌ای به منطقه دیگر تغییر می‌کند. تعریف مناسب از خشکسالی کشاورزی آن است که بتواند حساسیت آبی محصولات زراعی را طی مراحل رشد آن‌ها لحاظ نماید. کمبود رطوبت در لایه‌های فوقانی خاک به هنگام کاشت می‌تواند باعث تأخیر جوانه‌زنی شود که موجب کاهش تراکم بوته در هکتار و نقصان عملکرد نهایی می‌گردد. خشکسالی اقتصادی- اجتماعی تلفیقی از عرضه و تقاضای برخی کالاهای اقتصادی با اجزاء خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیکی و کشاورزی است. این مورد با سایر انواع پیش گفته، از آن جهت تفاوت دارد که وقوع آن بستگی به فرایندهای زمانی و مکانی عرضه و تقاضا برای تعریف یا تشخیص خشکسالی‌ها دارد. عرضه بسیاری از کالاهای اقتصادی مانند آب، علوفه، غلات و نیروی برق آبی بستگی به وضعیت جوی دارد (Angelidis et al., 2012). خشکسالی هیدرولوژیکی که به مفهوم کمبود جریان آب نسبت به مقدار نرمال آن تعریف می‌شود، از رویدادهای طبیعی و تکرارپذیر در هر اقلیمی است (Khosravi et al., 2001). تغییر الگوی بارش، افزایش دما، اضافه برداشت از آبخوان‌های آبرفتی، افت سطح آب‌های زیرزمینی، کاهش دبی جریان‌های سطحی و در نهایت دخل و تصرف عوامل انسانی در حوضه‌های آبریز از طریق تبدیل مراتع به دیم‌زارها و باغات و کاربری اراضی مهم‌ترین عواملی هستند که منجر به ایجاد شرایط خشکسالی هیدرولوژیکی می‌شوند (Zhiyong et al., 2016; Rezaee et al., 2016). از آنجایی که مناطق مختلف بوسیله سیستم‌های هیدرولوژیکی به هم مرتبط هستند، تأثیر خشکسالی هیدرولوژیکی به مرزهایی فراتر از منطقه کمبود بارش گسترش می‌یابد. لذا، اثرات خشکسالی هیدرولوژیکی بر روی مراتع و الگوهای کشت به مراتب بیشتر از خشکسالی هواشناسی است (Araghinejad, 2011; Myronidis et al., 2012).

مسئله کم شدن اثرات نامطلوب خشکسالی نیاز به شناخت منابع و بررسی خشکسالی، جهت تعیین سطح بحران و تعیین استراتژی‌های مناسب جهت مقابله با آن در زمان کنونی و سال‌های آتی دارد. بر این اساس، هر پنج سال یک بار دوره خشکسالی دو یا سه ساله را در کشور ایران شاهد هستیم (Water and Sustainable Consulting Engineers Company, 2017). در این راستا، استان تهران که با مساحتی معادل ۱۲۹۸۱ کیلومتر مربع، بین ۵۱' ۶° تا ۵۱' ۳۸° طول شرقی و ۳۴' ۳۵° تا ۳۵' ۵۱° عرض شمالی قرار دارد، یکی از مناطق با نوسانات شدید بارشی در بخش مرکزی تا شمالی کشور محسوب

بخش کشاورزی در ایران بزرگ‌ترین مصرف‌کننده منابع آب محسوب شده و بیش از ۹۰ درصد مصارف آبی کشور را به خود اختصاص داده است. از این رو، پایداری منابع آب کشور بیش از هر چیز تحت تأثیر بهره‌برداری از منابع آب کشاورزی قرار می‌گیرد (Barikani et al., 2008). استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی میزان دسترسی به آب آبیاری را در زمان بروز خشکسالی افزایش می‌دهد (Montaseri et al., 2018). با کاهش منابع آب سطحی، مازاد تقاضا برای آب از طریق پمپاژ آب‌های زیرزمینی جبران می‌شود. اگر میزان برداشت از سفره‌های آب زیرزمینی در هر دوره بهره‌برداری بیشتر از میزان تغذیه آن‌ها باشد، موجب برهم خوردن توازن سیستم، کاهش ذخیره سفره‌های آب زیرزمینی، عدم پایداری در عرضه و تقاضای آب و وقوع پدیده خشکسالی هیدرولوژیکی می‌شود و در نهایت، توسعه پایدار کشاورزی را ناممکن می‌سازد. لذا، برای دستیابی به فرآیند توسعه پایدار کشاورزی، توازن میان تغذیه و برداشت منابع آب زیرزمینی اهمیت بسیاری دارد و از این رو به‌کارگیری سیستم استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی، به‌خصوص در شرایط وقوع دوره‌های خشکسالی در بخش کشاورزی ایران ضروری است (Parhizkari et al., 2017).

خشکسالی به عنوان یکی از مهم‌ترین بلایای طبیعی، سالانه میلیون‌ها دلار خسارت به جوامع کشاورزی در سراسر دنیا وارد می‌کند. طی دهه‌های اخیر در بین حوادث طبیعی که جمعیت‌های انسانی را تحت تأثیر قرار داده‌اند، تعداد فراوانی وقوع خشکسالی بیشتر از سایر بلایای طبیعی بوده است. از مهم‌ترین پیامدهای خشکسالی ایجاد محدودیت در عرضه آب و در نهایت کمبود آب برای مصارف مختلف از جمله کشاورزی است (Mohammadi et al., 2018). پدیده خشکسالی اغلب به علت افزایش دمای سطح زمین، افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای، ایجاد نوسانات در چرخه آبی، افت سطح ایستابی سفره‌های زیرزمینی، کاهش رطوبت خاک و اتمسفر، افزایش تبخیر و کاهش منابع آب در دسترس در بخش‌های کشاورزی و صنعت به وجود می‌آید و در صورت طولانی بودن فقر و نابسامانی اقتصادی و اجتماعی را به دنبال خواهد داشت (Eslamian and Kiaheyрати, 2008). هر خشکسالی با سه خصوصیت شدت، طول دوره و پهنای تأثیر شناخته می‌شود. خشکسالی‌ها عموماً انواع مختلفی دارند و به صورت خشکسالی هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیکی و اقتصادی- اجتماعی تعریف می‌شوند (Shakiba et al., 2010; Angelidis et al., 2012).



بهره‌وری مصرف آب در سال پایه و در سناریوی دوم ارتقاء بهره‌وری معادل با اهداف برنامه لحاظ شد. از نظر مصرف آب، نتایج هر دو سناریو بیانگر آن است که بخش کشاورزی سقف آب در اختیار را مصرف نموده، ولی به اهداف تولیدی خود دست نیافته است. دستیابی به اهداف برنامه در این بخش جز با بهره‌وری بالاتر در مصرف آب امکان‌پذیر نخواهد بود.

مطالعات بررسی شده نشان می‌دهند که وقوع خشکسالی منابع آب و تولیدات بخش کشاورزی را دستخوش تغییر قرار می‌دهد و این تغییرات بسته به شرایط اقلیمی هر منطقه متفاوت می‌باشند. با توجه به اهمیت این موضوع در مطالعه حاضر به بررسی اثرات خشکسالی هیدرولوژیکی ناشی از کاهش عرضه آب آبیاری بر وضعیت کشاورزی و بازده درآمدی کشاورزان استان تهران پرداخته شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل برنامه‌ریزی ریاضی مثبت چند دوره‌ای (MP-PMP)  
پایه و اساس مدل برنامه‌ریزی ریاضی مثبت<sup>۲</sup> (PMP) اولین بار توسط پروفیسور هاویت<sup>۳</sup> (۱۹۹۵) و جهت رفع کاستی‌ها و مشکلات موجود در مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی هنجاری<sup>۴</sup> (NMP) مطرح گردید و در زمینه سیاست‌گذاری‌های بخش کشاورزی و مدیریت منابع آب به کار گرفته شد. این مدل به طور معمول مستلزم تغییر تابع هدف با استفاده از مقادیر دوگان محدودیت‌های واسنجی است، به طوری که فعالیت‌های مشاهده شده دقیقاً داده‌های سال پایه را به دست دهد (Howitt et al., 2012; Parhizkari et al., 2016). ایده کلی در مدل‌های PMP استفاده از اطلاعات موجود در متغیرهای دوگان محدودیت‌های واسنجی است که جواب مسأله برنامه‌ریزی خطی را به سطح فعالیت‌های موجود محدود می‌کنند. مقادیر دوگان برای تصریح تابع هدف غیرخطی‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند که سطح فعالیت‌های مشاهده شده را مجدداً از طریق جواب بهینه مسأله برنامه‌ریزی جدیدی که فاقد محدودیت‌های واسنجی است، بازسازی می‌کند (Petsakos and Rozakis, 2015). رویه کار در این مدل بدین شکل است که ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی خطی جهت تعیین قیمت‌های سایه‌ای حل می‌شود. در مرحله دوم، یک تابع هزینه غیرخطی به همراه تابع تولید تخمین زده می‌شود و در مرحله سوم با دخیل نمودن توابع برآورد شده فوق، مدل غیرخطی نهایی واسنجی می‌شود؛ بدین ترتیب که مدل نهایی قادر به بازسازی داده‌ها و اطلاعات مشاهده شده در سال پایه می‌باشد (Howitt et al., 2012; Parhizkari et al., 2016).

نتایج نشان داد که همبستگی مناسبی بین شاخص‌های مذکور وجود دارد و خشکسالی هواشناسی یک تا سه ماه پیش از خشکسالی هیدرولوژیکی رخ می‌دهد. در ایران نیز (Mohammadi et al., 2010) با استفاده از شاخص‌های بارندگی و سیستم اطلاعات جغرافیایی به پهنه‌بندی خشکسالی در استان سیستان و بلوچستان پرداختند. نتایج، خشکسالی متوسط را در نواحی جنوبی ایستگاه زاهدان، خشکسالی شدید را در نواحی مرکزی و خشکسالی بسیار شدید را در نواحی شمالی این استان نشان داد. (Alipour et al., 2013) به بررسی اثرات خشکسالی بر وضعیت اقتصادی کشاورزان شهرستان نهبندان در استان خراسان پرداختند. نتایج نشان داد که وقوع خشکسالی در این منطقه پیامدهای ناگواری مانند کاهش توان اقتصادی کشاورزان، افزایش هزینه‌های تولید، خروج از بخش کشاورزی، بروز اختلافات اجتماعی و ایجاد فقر در جامعه منجر می‌شود. (Talebi et al., 2014) با استفاده از شاخص SPI به بررسی اثرات خشکسالی بر کیفیت منابع آب دشت بهاباد یزد پرداختند. نتایج نشان داد که میزان املاح موجود در منابع آب این دشت در زمان وقوع خشکسالی بیشتر از سال‌های مرطوب است و این موضوع منابع آب موجود را در مواقع خشکسالی برای استفاده در بخش کشاورزی و شرب نامطلوب می‌سازد. (Rezaee et al., 2016) اثرات خشکسالی هواشناسی را بر وضعیت کشاورزی در شرق حوضه رودخانه زاینده‌رود ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که تحت شرایط خشکسالی سطح زیرکشت محصولات گندم، برنج و کلزا که وابستگی بالایی به منابع آب رودخانه دارند، کاهش می‌یابد و بازده درآمدی کشاورزان تحت این شرایط ۶۱۰۳۰ میلیون ریال کاهش پیدا می‌کند. (Khalili et al., 2018) ریسک خشکسالی کشاورزی را بر اساس مخاطره خشکسالی و آسیب‌پذیری نسبت به خشکسالی در مراحل مختلف رشد محصول گندم دیم ارزیابی نمودند. برای اجرای چارچوب توسعه داده شده، از داده‌های ایستگاه تحقیقات دیم سیسب واقع در خراسان شمالی استفاده شد. مقدار آسیب‌پذیری در منطقه با روش فازی، برابر با ۰/۶۱۶۳ (بدون بعد) به دست آمد و در نهایت، مقدار ریسک خشکسالی گندم دیم در ایستگاه مورد مطالعه برابر با ۰/۳۶۸۴ تن بر هکتار حاصل شد. (Mohammadi et al., 2018) به بررسی تغییرات زمانی و اثر خشکسالی هواشناسی بر منابع آب زیرزمینی دشت کرمان پرداختند. نتایج حاصل از مدل رگرسیونی نشان داد که حداکثر ۷۵ درصد تغییرات شاخص منبع آب زیرزمینی (۴۸ ماهه) توسط شاخص بارش استاندارد قابل تبیین و توجیه است. نقشه هم‌افت سطح آب زیرزمینی نیز نشان داد که افت سطح آب زیرزمینی در دشت مذکور تحت شرایط رخداد خشکسالی به طور متوسط ۲۰ متر می‌باشد. (Dehghanizade et al., 2020) نقش محدودیت منابع آب بر اهداف تولید را در بخش کشاورزی و منابع آب استان یزد بررسی کردند. برای این منظور دو سناریو مدنظر قرار گرفت. در سناریوی اول ثبات

ذرت دانه‌ای، گوجه‌فرنگی، هندوانه، آفتابگردان و کلزا) و ز نهاده‌ها یا عوامل تولید (زمین، آب، نیروی کار، سرمایه و ماشین‌آلات) و  $t$  شرایط اقلیمی مربوط به وقوع خشکسالی (خشکسالی خفیف، ملایم، متوسط، نسبتاً شدید و شدید) است.  $Price_{it}$  و  $Yield_{it}$  به ترتیب قیمت بازاری و عملکرد محصول  $i$  تحت شرایط اعمال سناریوی  $t$ ،  $Coct_{jit}$  هزینه نهاده  $z$  برای تولید محصول  $i$  تحت شرایط اعمال سناریوی  $t$  و  $Area_{it}$  سطح زیرکشت محصول  $i$  تحت شرایط اعمال سناریوی  $t$  است (با فرض ثبات سایر شرایط به جز اعمال سناریوی خشکسالی تحت شدت‌های متفاوت که منجر به کاهش منابع آب در دسترس کشاورزان از ۱۰ تا ۵۰ درصد نسبت به شرایط سال پایه یا مبنا می‌شوند).  $a_{jit}$  بیانگر ضرایب لئونتیف است که نسبت استفاده هر عامل تولید به زمین را نشان می‌دهد و از رابطه ریاضی  $a_{jit} = \bar{Area}_{ijt} / Area_{it}$  Land دست می‌آید.

رابطه (۲)، محدودیت منابع یا نهاده‌ها را نشان می‌دهد که در آن،  $Total Resources_{jt}$  کل منابع در دسترس برای تولید محصولات منتخب در منطقه مورد مطالعه است. رابطه (۳)، محدودیت واسنجی را نشان می‌دهد که در آن،  $\bar{Area}_{it}$  مقدار مشاهده شده فعالیت  $i$  تحت شرایط اقلیمی  $t$  در سال پایه و  $\varepsilon$  مقدار مثبت کوچکی می‌باشد (Howitt et al., 2012; Qureshi et al., 2014). اضافه کردن محدودیت واسنجی به مدل باعث می‌شود که جواب بهینه برنامه‌ریزی خطی دقیقاً سطح فعالیت‌های مشاهده شده در سال پایه را به دست دهد.  $\mu_{it}^j$  در رابطه (۲) قیمت سایه‌ای محدودیت سیستمی و  $\mu_{it}^j$  در رابطه (۳) قیمت سایه‌ای محدودیت واسنجی را نشان می‌دهد. رابطه (۴) نیز محدودیت غیرمنفی بودن سطح فعالیت‌ها است (Medellan-Azuara et al., 2011; Parhizkari, 2018).

### ۲-۱-۲- مرحله دوم: برآورد تابع تولید CES و تابع هزینه غیرخطی با درجه دو

در این مرحله، تابع تولید با کشش جانشینی ثابت  $^{\varepsilon}$  (CES) و تابع هزینه غیرخطی از درجه دو<sup>۷</sup> که جهت واسنجی در مرحله سوم مورد نیاز هستند، تخمین زده می‌شوند. فرم کلی تابع تولید غیرخطی CES را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$Yield_{it} = SP_{it} \left[ \sum_i \sum_t PF_{ijt} * H_{ijt}^{p_{it}} \right]^{\frac{1}{p_{it}}} \quad \forall i \quad (5)$$

در رابطه بالا،  $Yield_{it}$  میزان تولید محصول  $i$  تحت شرایط اقلیمی  $t$ ،  $SP_{it}$  عامل تولید  $z$  برای تولید محصول  $i$  تحت شرایط اقلیمی  $t$ ،  $H_{ijt}$  پارامتر مقیاس و  $PF_{ijt}$  پارامتر تولید است که سهم نهاده  $z$  را برای تولید محصول  $i$  تحت شرایط اقلیمی  $t$  نشان می‌دهد.  $U$  ضریب بازده

برنامه‌ریزی ریاضی مثبت چند دوره‌ای<sup>۵</sup> (MP-PMP) جهت واسنجی مدل‌های اقتصادی و بیوفیزیکی با مجموعه‌ای از داده‌ها و اطلاعات مربوط به میزان تولید، هزینه، سود و قیمت محصولات زراعی و همچنین، میزان مقادیر آب مصرفی، مقادیر آب تخصیص داده شده و میزان مصارف دیگر نهاده‌ها (به جز آب) در سطح اراضی به کار گرفته می‌شود. این سیستم مدل‌سازی، رهیافتی نوین برای حل مسائل پیچیده با ویژگی‌های خاص (با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی خطی کمکی و یک تابع هدف غیرخطی) در بخش کشاورزی است که پس از واسنجی به‌خودی‌خود یک توازن یا تعادل در حداکثرسازی بازده درآمدی زارعین را بر اساس دوره مرجع یا پایه نتیجه می‌دهد (Qureshi et al., 2014; Gravelin, 2016). برنامه‌ریزی ریاضی مثبت چند دوره‌ای (MP-PMP) رویکردی است که به لحاظ روش کار منطبق بر مراحل سه‌گانه به کار گرفته شده در مدل برنامه‌ریزی ریاضی مثبت (PMP) می‌باشد، با این تفاوت که در این روش داده‌ها و اطلاعات بازسازی شده توسط مدل واسنجی نهایی به جای سال پایه، مربوط به یک دوره (دوره‌ای شامل چندین سال متوالی و پیاپی) است (Gravelin, 2016). به طور کلی، مدل برنامه‌ریزی مورد استفاده در این تحقیق با توجه به رویکرد فوق شامل سه مرحله به شرح زیر است:

### ۲-۱-۱- مرحله اول: حل مدل برنامه‌ریزی خطی کمکی جهت تعیین قیمت‌های سایه‌ای

این مرحله شامل حل یک مدل برنامه‌ریزی خطی کمکی جهت حداکثر نمودن بازده درآمدی کشاورزان با توجه به محدودیت‌های منابع و واسنجی است. پس از حل مدل برنامه‌ریزی، مقادیر دوگان یا قیمت‌های سایه‌ای برای محدودیت مدل به دست می‌آیند. شکل ریاضی این مرحله از واسنجی مدل PMP چند دوره‌ای برای منطقه مورد مطالعه به صورت زیر است:

$$\text{Max } \pi = \sum_{t=1}^5 \sum_{i=1}^7 \left( \text{Price}_{it} * \text{Yield}_{it} - \sum_{j=1}^4 a_{ijt} \text{Cost}_{ijt} \right) \text{Area}_{it} \quad (1)$$

Subject to:

$$\sum_{t=1}^5 \sum_{i=1}^7 a_{ijt} \text{Area}_{it} \leq \text{Total Resources}_{it} \quad [\mu_{it}^j] \quad (2)$$

$$\text{Area}_{it} \leq \bar{\text{Area}}_{it} + \varepsilon \quad \forall i, t \quad [\mu_{it}^{\varepsilon}] \quad (3)$$

$$\text{Area}_{it} \geq 0 \quad \forall i, t \quad (4)$$

رابطه (۱) به عنوان تابع هدف مدل برنامه‌ریزی خطی، شامل حداکثرکردن مجموع بازده درآمدی کشاورزان می‌باشد. در این رابطه،  $\Pi$  بازده درآمدی کشاورزان،  $i$  محصولات منتخب (گندم آبی، جو آبی،

استفاده از شکل تبعی غیرخطی برای تابع هزینه در مدل برنامه‌ریزی ریاضی مثبت نسبت به شکل تبعی خطی، توان شبیه‌سازی رفتاری را تحت شرایط به کارگیری تکنیک‌های مختلف اقتصادی، سیاسی و اخیراً محیطی تقویت می‌کند. بر این اساس، با توجه به این که در برخی موارد داده‌ها و اطلاعات مناسب برای تصمیمات رفتاری پیچیده محدود است، استفاده از شکل غیرخطی تابع هزینه نسبت به فرم خطی آن امکان حل مسائل پیچیده را که حتی با روش‌های اقتصادسنجی نیز قابل حل نیستند به وجود می‌آورد. در واقع با افزایش داده‌های دردسترس، استفاده از تابع هزینه در حالت غیرخطی برنامه‌ریزان را قادر به حل مسائل تصمیم‌گیری و تحلیل برنامه‌های سیاستی در همه سطوح فعالیت‌ها می‌سازد. به طور کلی، عمومیت کاربرد تابع هزینه غیرخطی در مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی مثبت (PMP) علاوه بر ویژگی نسبتاً آسان تخمین پارامترهای آن، این است که برای هر سطح فعالیت جداگانه قابلیت محاسبه و برآورد را دارد. با توجه به توضیحات فوق، در این مطالعه نیز از تابع هزینه غیرخطی با درجه دو مطابق رابطه زیر استفاده شد (Howitt, 1995; Parhizkari, 2013).

$$TC_{it}(\text{Area}_{it,\text{land}}) = \alpha_{it} \text{Area}_{it,\text{land}} - \frac{1}{2} \gamma_{it} \text{Area}_{it,\text{land}}^2 \quad (12)$$

در رابطه فوق،  $TC_{it}$  هزینه متغیر کل نهاده زمین برای تولید محصول  $i$  در تحت شرایط اقلیمی  $t$ ، پارامتر رهگیری یا عرض از مبدأ<sup>۸</sup> است که از حاصل جمع هزینه نهاده زمین، قیمت سایه‌ای این نهاده و حاصل ضرب شیب تابع هزینه در سطح فعالیت‌ها برآورد می‌شود.  $\gamma_{it}$  نیز شیب تابع هزینه غیرخطی واسنجی شده است. برای محاسبه و برآورد ضرایب تابع هزینه درجه دوم فوق از روابط زیر استفاده می‌شود (Medellan-Azuara et al., 2011; Helming and Peerlings, 2014):

$$\gamma_{it} = \frac{\text{Price}_{it} * \text{Yield}_{it}}{\varepsilon_{it} * \text{Area}_{it,\text{land}}} \quad (13)$$

$$\alpha_{it} = \omega_{it,\text{land}} + \mu_{it,\text{land}}^c + (\gamma_{it} * \tilde{\text{Area}}_{it,\text{land}}) \quad (14)$$

در روابط بالا،  $\varepsilon_{it}$  کشش عرضه محصول  $i$  تحت شرایط اقلیمی  $t$ ،  $\omega_{it,\text{land}}$  هزینه نهاده زمین برای تولید محصول  $i$  تحت شرایط اقلیمی  $t$  و  $\mu_{it,\text{land}}^c$  قیمت سایه‌ای یا ارزش دوگان نهاده زمین در مرحله اول مدل PMP چند دوره‌ای است. سایر پارامترها نیز در بالا تعریف شده‌اند (Medellan-Azuara et al., 2011; Helming and Peerlings, 2014).

## ۲-۱-۳- مرحله سوم: ساختن مدل برنامه‌ریزی نهایی و تبیین مدل PMP چند دوره‌ای واسنجی شده

در این مرحله که مرحله نهایی واسنجی مدل PMP چند دوره‌ای است،

ثابت نسبت به مقیاس است و تابع تولید CES مستلزم آن است که این ضریب برابر با یک شود.  $\rho_i$  تغییری بر حسب کشش جانشینی بین نهاده‌ها ( $\sigma$ ) است که برای محاسبه آن از رابطه  $\rho_i = (\sigma - 1)/\sigma$  استفاده می‌شود (Gravelin, 2016; Parhizkari, 2018). تابع تولید CES در مطالعه حاضر، با توجه به پنج نهاده یا عامل تولید به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Yield}_{it} = SP_{it} [PF_{it1} H_{it1}^{\rho_{it}} + PF_{it2} H_{it2}^{\rho_{it}} + PF_{it3} H_{it3}^{\rho_{it}} + PF_{it4} H_{it4}^{\rho_{it}} + PF_{it5} H_{it5}^{\rho_{it}}]^{\frac{1}{\rho_{it}}} \quad \forall i \quad (6)$$

پس از تخمین تابع تولید فوق و گرفتن مشتق اول از آن، پارامترهای PF به صورت زیر قابل محاسبه هستند:

$$\sum_j^5 PF_j = 1 \quad (7)$$

$$PF_1 = \left[ 1 + \frac{h_1 \left(\frac{-1}{\sigma}\right)}{C_1} \left( \sum_1 \frac{C_1}{h_1 \left(\frac{-1}{\sigma}\right)} \right) \right] \quad (8)$$

در رابطه فوق،  $h_1$  عامل تولید  $L$  و  $C_1$  هزینه عامل تولید  $L$  است. پس از محاسبه اولین پارامتر تابع تولید، برای تخمین سایر پارامترهای این تابع می‌توان از روابط زیر استفاده کرد:

$$PF_1 = \left( C_1 h_1 \left(\frac{-1}{\sigma}\right) \right) * \left( C_1 h_1 \left(\frac{-1}{\sigma}\right) \right)^{-1} * \left[ 1 + \frac{h_1 \left(\frac{-1}{\sigma}\right)}{C_1} \left( \sum_1 \frac{C_1}{h_1 \left(\frac{-1}{\sigma}\right)} \right) \right] \quad (9)$$

$$PF_1 = \left( C_1 h_1 \left(\frac{-1}{\sigma}\right) \right) * \left( C_1 h_1 \left(\frac{-1}{\sigma}\right) \right)^{-1} * PF_1 \quad (10)$$

پس از محاسبه و برآورد پارامترهای  $PF_1$  الی  $PF_5$ ، با استفاده از تعریف تابع تولید CES می‌توان پارامتر مقیاس را برای هر محصول به کمک رابطه زیر محاسبه کرد:

$$SP_{it} = \frac{\left( \frac{\text{Yield}_{it}}{\text{Area}_{it}} \right) * \text{Area}_{it}}{\left[ \sum_i \sum_t PF_{ijt} * H_{itj}^{\rho_{it}} \right]^{\frac{1}{\rho_{it}}}} \quad (11)$$

افزون بر تخمین تابع تولید CES و برآورد ضرایب آن، در مرحله دوم PMP مقادیر متغیرهای دوگان برای به دست آوردن یک تابع هزینه متغیر غیرخطی مربوط به نهاده زمین مورد استفاده قرار می‌گیرند (Gravelin, 2016; Parhizkari, 2018). علت استفاده از شکل تبعی غیرخطی تابع هزینه در این مرحله آن است که نتایج به دست آمده از این مدل با تابع هزینه غیرخطی انعطاف‌پذیری رفتاری و شبیه‌سازی واقعی‌تری را نسبت به مدل برنامه‌ریزی ریاضی مثبت با تابع هزینه خطی فراهم می‌کند و این موضوع از ایجاد ناپیوستگی ناگهانی و غیرمتمثل در رهیافت‌های شبیه‌سازی جلوگیری می‌کند. همچنین،

منطقه‌ای استان تهران گردآوری شده است. رابطه (۱۹) محدودیت سرمایه است که در آن،  $C_{it}$  ضریب فنی هزینه در واحد سطح محصول  $i$  تحت شرایط اقلیمی  $t$  و  $Total\ Capital$  کل سرمایه در دسترس است. در واقع، سمت چپ این محدودیت نیاز فعالیت‌های تولیدی به سرمایه را بازگو می‌کند که معادل هزینه‌های متغیر برای تولید محصول در هر هکتار است. سمت راست این محدودیت نیز مجموع میزان کل سرمایه قابل تخصیص در بین فعالیت‌های زراعی موجود است. رابطه (۲۰)، محدودیت نیروی کار را نشان می‌دهد که در آن،  $La_{it}$  نیروی کار مورد نیاز در تولید محصول  $i$  تحت شرایط اقلیمی  $t$  و  $Total\ Labor$  کل نیروی کار قابل دسترس است. رابطه (۲۱) محدودیت ساعات کار ماشین‌آلات را نشان می‌دهد که در آن،  $Ma_{it}$  ساعات کار ماشین‌آلات برای تولید محصول  $i$  تحت شرایط اقلیمی  $t$  و  $Total\ Machine$  ساعات کار ماشین‌آلات در اراضی زراعی منطقه است. رابطه (۲۲) نیز بیانگر غیرمنفی بودن سطح فعالیت‌ها (مقادیر  $Area_{it}$ ) است. برای ارزیابی اثرات خشکسالی هیدرولوژیکی بر تولیدات زراعی و بازده ناخالص کشاورزان استان تهران، پس از واسنجی مدل PMP چند دوره‌ای و رساندن داده‌ها به داده‌های دوره مرجع، سناریوهای خشکسالی خفیف، ملایم، متوسط، نسبتاً شدید و شدید بر مبنای ایجاد محدودیت در عرضه آب آبیاری اعمال شدند و نتایج حاصل از اعمال هر سناریو تحلیل گردید. همان گونه که در قبل نیز اشاره شد، خشکسالی هیدرولوژیکی در درجه اول میزان عرضه منابع آب سطحی و زیرزمینی را دستخوش تغییر قرار می‌دهد. بر این اساس، در این مطالعه با فرض کاهش کل منابع آب در دسترس کشاورزان در استان تهران در اثر رخداد خشکسالی هیدرولوژیکی، سناریوهای خشکسالی از خفیف تا شدید تداعی شدند. برای اجرایی نمودن این دستور در محیط نرم‌افزاری GAMS نیاز است تا مقادیر کمی سناریوهای خفیف تا شدید بر حسب درصد تغییرات کل منابع آب در دسترس تغییر یابند و در هر مرحله از تغییر، اثرات و پیامدهای به وجود آمده در سایر بخش‌ها دیده شود. از این‌رو، سناریوهای کاربردی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد کاهش کل منابع آب در دسترس به عنوان سناریوهای خفیف، ملایم، متوسط، نسبتاً شدید و شدید در این مطالعه مدنظر واقع شدند. این کار در محیط نرم‌افزاری GAMS 24.7 با سناریوسازی سمت راست<sup>۹</sup> (RHS) محدودیت نهاده آب آبیاری (رابطه ۱۷) در سیستم مدل‌سازی) و اعمال سناریوهای خشکسالی با شدت‌های متفاوت (از خفیف تا شدید) محقق گردید و رفتار احتمالی کشاورزان تهرانی نسبت به شرایط رخداد خشکسالی هیدرولوژیکی شبیه‌سازی شد. داده‌های مورد نیاز به صورت میانگین دوره‌ای (سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۹۲) بوده که با مراجعه مستقیم به سازمان‌های ذیربط در استان تهران جمع‌آوری شدند. بخشی از داده‌ها نیز برگرفته از سالنامه‌های آماری و پایگاه اطلاع‌رسانی وزارت جهاد کشاورزی هستند که در محیط نرم‌افزاری

با جایگزین نمودن تابع تولید با کشت جانمایی ثابت واسنجی شده در رابطه (۶) و تابع هزینه غیرخطی یا کوادراتیک (درجه دو) واسنجی شده در رابطه (۱۲) در تابع هدف مسأله برنامه‌ریزی و در نظر گرفتن محدودیت‌های منابع (زمین، آب، نیروی کار، سرمایه و ماشین‌آلات)، به استثنای محدودیت‌های واسنجی، یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی به صورت روابط زیر ساخته می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Max } \pi = & \sum_{t=1}^5 \sum_{i=1}^7 \text{Price}_{it} \left[ \text{SP}_{it} \left[ \text{PF}_{it1} H_{it1}^{\rho_{it}} \right. \right. \\ & + \text{PF}_{it2} H_{it2}^{\rho_{it}} + \text{PF}_{it3} H_{it3}^{\rho_{it}} \\ & \left. \left. + \text{PF}_{it4} H_{it4}^{\rho_{it}} + \text{PF}_{it5} H_{it5}^{\rho_{it}} \right] \right]^{\frac{1}{\rho_{it}}} \\ & - \sum_{i=1}^7 \sum_{t=1}^5 \left( \alpha_{it} \text{Area}_{it, \text{land}} - \frac{1}{2} \gamma_{it} \text{Area}_{it, \text{land}}^2 \right) \\ & - \sum_{i=1}^7 \sum_{t=1}^5 \sum_{j \neq \text{land}}^5 (\omega_{itj} \text{Area}_{itj}) \end{aligned} \quad (15)$$

Subject to:

$$\sum_{t=1}^5 \sum_{i=1}^7 \text{Area}_{it} \leq \text{Total Area}_{it} \quad (16)$$

$$\sum_{t=1}^5 \sum_{i=1}^7 w_{it} \text{Area}_{it} \leq \text{Total Water} \quad (17)$$

$$\text{Total Water} = (W_{\text{Ground}} + W_{\text{Surface}}) \quad (18)$$

$$\sum_{t=1}^5 \sum_{i=1}^7 C_{it} \cdot \text{Area}_{it} \leq \text{Total Capital} \quad (19)$$

$$\sum_{t=1}^5 \sum_{i=1}^7 La_{it} \cdot \text{Area}_{it} \leq \text{Total Labor} \quad (20)$$

$$\sum_{t=1}^5 \sum_{i=1}^7 Ma_{it} \cdot \text{Area}_{it} \leq \text{Total Machine} \quad (21)$$

$$\text{Area}_{it} \geq 0 \quad \forall i, t \quad (22)$$

رابطه (۱۵)، تابع هدف غیرخطی مدل PMP است که شامل توابع تولید و هزینه غیرخطی است.  $\omega_{ijt}$  در این رابطه قیمت نهاده  $j$  برای تولید محصول  $i$  تحت شرایط اقلیمی  $t$  است. رابطه (۱۶)، محدودیت سطح زیرکشت محصولات منتخب را نشان می‌دهد که در آن،  $Area_{it}$  سطح زیرکشت محصول  $i$  است. روابط (۱۷) و (۱۸) محدودیت‌های منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی را نشان می‌دهند که  $W_{it}$  نیاز آبی محصول  $i$   $Total\ Water$  کل منابع آب در دسترس،  $W_{\text{Surface}}$  منابع آب سطحی در دسترس و  $W_{\text{Ground}}$  منابع آب زیرزمینی قابل استحصال در منطقه است. نیاز آبی محصولات منتخب در این مطالعه براساس نرم‌افزار Netwat و کل منابع آب در دسترس منطقه براساس تجمیع منابع آب موجود در هر زیرحوزه برحسب آخرین گزارشات منتشره از شرکت سهامی آب

با توجه به نتایج مندرج در جدول ۲، ملاحظه می‌شود که نهاده زمین در مقایسه با سایر نهاده‌ها (آب آبیاری، سرمایه، نیروی کار و ماشین‌آلات) در تولید محصولات منتخب سهم بیشتری را به خود اختصاص داده و از اهمیت بیشتری برخوردار است. پس از نهاده زمین، آب بیشترین سهم را در تولید محصولات منتخب زراعی دارد. همچنین، نتایج بیشتر بودن مقدار پارامتر تخمینی بتا را برای نهاده آب در تخمین تابع تولید محصولات با نیاز آبی بالاتر (هندوانه، آفتابگردان، کلزا و گوجه‌فرنگی) نشان می‌دهد، در حالی که مقدار این پارامتر برای نهاده آب آبیاری در تولید محصولات کم‌آب‌تر گندم و جو آبی در سطح حداقل ممکن (به ترتیب ۰/۰۰۲ و ۰/۰۰۵) مشاهده می‌شود.

در مطالعه حاضر از فرم تابع هزینه غیرخطی (با درجه دو) برای نهاده زمین استفاده شد. این تابع در مقایسه با توابع هزینه خطی، برای ایجاد تناسب بین کشش‌های جانشینی از قابلیت بیشتری برخوردار است. تابع هزینه غیرخطی از درجه دو به کار گرفته شده در این مطالعه شامل پارامترهای گاما-شیب ( $\gamma_{it}$ ) و آلفا-عرض از مبدأ ( $\alpha_{it}$ ) است. همان‌گونه که در قبل نیز اشاره شد، پارامتر گاما از تقسیم نمودن حاصل‌ضرب قیمت در عملکرد محصولات منتخب زراعی بر حاصل‌ضرب مقدار اپسیلون در سطح فعالیت‌های مختلف زراعی محاسبه می‌شود. پارامتر آلفا نیز از حاصل جمع هزینه نهاده زمین، قیمت سایه‌ای این نهاده و حاصل‌ضرب شیب تابع هزینه در سطح فعالیت‌ها به دست می‌آید.

**Table 1- Statistical information on selected crops of Tehran province during reference period**  
جدول ۱- اطلاعات آماری مربوط به محصولات منتخب زراعی استان تهران طی دوره مرجع (۱۳۹۷-۱۳۹۲)

Products	Acreage (ha)	Yield (kg/ha)	Water.req (m <sup>3</sup> /ha)	Labor (w.hour)	Machinery (w.hour)	Capital (*)	Profit (**)
Wheat	56825	3847	4070	1488	780	12.670	14.510
Barley	32400	3730	4000	1713	720	11.300	12.868
Corn	9380	5400	6400	1865	250	12413	19.576
Tomato	8760	33470	7510	1862	976	16.480	19.574
Watermelon	1327	47630	7854	1120	1350	15.357	18.933
Sunflower	2920	4438	7562	1365	850	16.370	21.791
Rapeseed	3203	3150	6720	1850	800	12.853	19.907

\* and \*\*: million rial in hectare

Reference: Tehran Province Agricultural Jihad Organization, 2018

**Table 2- Inputs contribution of amount one in producing selected crops in Tehran after estimating function**  
جدول ۲- سهم نهاده‌های مصرفی (از مقدار واحد یا یک) در تولید محصولات منتخب زراعی استان تهران پس از تخمین تابع

Products/Inputs	CES				
	Land	Water	Capital	Labor	Machinery
Wheat	0.997	0.002	0.003	0.009	0.002
Barley	0.994	0.005	0.006	0.002	0.006
Corn	0.959	0.038	0.003	0.001	0.005
Tomato	0.944	0.050	0.004	0.001	0.003
Watermelon	0.492	0.464	0.037	0.006	0.002
Sunflower	0.785	0.194	0.016	0.003	0.001
Rapeseed	0.820	0.163	0.011	0.005	0.001



افزایش پیدا می‌کند. بدین ترتیب که تحت سناریوهای خشکسالی خفیف تا شدید، سطح زیرکشت محصولات ذرت دانه‌ای ۰/۲۸ تا ۲/۰۸ درصد، گوجه‌فرنگی ۰/۴۲ تا ۳/۰۶ درصد، هندوانه ۱۰/۸ تا ۶۹/۵ درصد، آفتابگردان ۱/۶۹ تا ۱۱/۷ درصد و کلزا ۱/۵۴ تا ۱۰/۸ درصد نسبت به دوره مرجع کاهش و سطح زیرکشت گندم و جو آبی به ترتیب ۰/۳۲ تا ۲/۱۹ و ۰/۳۸ تا ۲/۵۶ درصد افزایش می‌یابد. یافته‌ها بیانگر آن است که هندوانه در بین کلیه محصولات منتخب، بیشترین تغییرات کاهشی را در شرایط رخداد خشکسالی هیدرولوژیکی دارد. حساسیت بالای این محصول نسبت به شرایط وقوع خشکسالی صحت و سقم نتایج به دست آمده از مدل برنامه‌ریزی خطی در مرحله اول مدل PMP دوره‌ای را بازگو و تأیید می‌کند (توضیح تکمیلی اینکه با حل مرحله اول مدل PMP که شامل یک برنامه‌ریزی خطی ساده است، ملاحظه می‌شود که سطح زیرکشت محصول هندوانه به دلیل نیاز آبی و هزینه تولید بالا نسبت به دیگر محصولات الگو، صفر می‌باشد و از الگوی بهینه حذف می‌گردد؛ این خروجی به دلیل در اولویت نبودن در اینجا آورده نشده است). به طور کلی، نتایج جدول ۴ حاکی از آن است که کاهش سطح زیرکشت محصولات با نیاز آبی بالا و افزایش تمایل کشاورزان برای کشت محصولات غله‌ای با نیاز آبی پایین از جمله مهم‌ترین پیامدهای وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی در استان تهران است. بدین معنی که کشاورزان با رخداد خشکسالی از سطح زیرکشت محصولات آب‌بر در الگوی کشت کاسته و تمایل خود را به سمت توسعه سطح زیرکشت محصولات غله‌ای گندم و جو آبی سوق می‌دهند.

جدول ۵، تغییرات مجموع منابع آب مصرفی، مجموع بازده برنامه‌های کشاورزان و ارزش اقتصادی آب آبیاری را تحت شرایط رخداد خشکسالی هیدرولوژیکی تحت سناریوهای خفیف تا شدید نشان می‌دهد. نتایج این جدول گویای آن است که پس از وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی تحت سناریوهای خفیف تا شدید، میزان منابع آب مصرفی کشاورزان در الگوهای ارائه شده نسبت به میانگین مقدار آب تخصیص داده شده در دوره مرجع ۱/۵۸ تا ۹/۱۳ درصد کاهش می‌یابد و از ۴۵۳/۴۷ به ۴۱۲/۰۵ میلیون مترمکعب می‌رسد. با کاهش منابع آب تخصیص داده شده در الگوهای بهره‌برداری، میزان مجموع بازده برنامه‌های کشاورزان از ۱۷۴۹۳۰ میلیون ریال در دوره مبنا یا مرجع به ۱۶۲۱۹۰ میلیون ریال تقلیل می‌یابد که کاهشی معادل با ۱/۳۴ تا ۷/۲۸ درصد را به همراه دارد. علت این میزان کاهش در مجموع بازده برنامه‌های کشاورزان، کاهش سطح زیرکشت محصولات با صرفه اقتصادی بالا (مانند ذرت دانه‌ای، گوجه‌فرنگی، هندوانه و آفتابگردان) در شرایط رخداد خشکسالی هیدرولوژیکی و جایگزینی این سطح با محصولات کم‌بازده‌تر گندم و جو آبی در الگوی کشت است.

جدول ۳، مقادیر محاسبه شده پارامترهای فوق را پس از تخمین تابع هزینه غیرخطی از درجه دوم نشان می‌دهد. با توجه به نتایج مندرج در این جدول، ملاحظه می‌شود که پارامتر تخمینی گاما برای محصولات آفتابگردان، کلزا و هندوانه از پارامتر گامای دیگر محصولات بیشتر است. این امر حاکی از آن است که با افزایش سطح زیرکشت محصولات فوق، هزینه نهایی تولید آن‌ها در مقایسه با دیگر محصولات به نسبت بیشتری افزایش می‌یابد. مطابق با نتایج برآورد شده برای پارامتر تخمینی آلفا نیز ملاحظه می‌شود که مقادیر منفی برآورد شده برای این ضریب در خصوص محصولات گندم و جو آبی در پایین‌ترین سطح ممکن است. این امر حاکی از آن است که محصولات غله‌ای گندم و جو آبی میزان حساسیت کمتری را برای تغییرات فزاینده سطح زیرکشت در استان تهران تحت شرایط خشکسالی نسبت به دیگر محصولات الگو دارند.

**Table 3- Estimation of land input quadratic cost function parameters for selected products**

**جدول ۳- محاسبه پارامترهای تابع هزینه غیرخطی (از درجه دوم) نهاده زمین برای محصولات منتخب زراعی**

Parameter / Products	Alpha ( $\alpha_{it}$ )	Gamma ( $\gamma_{it}$ )
Wheat	-32.838	17.19
Barley	-15.814	19.69
Corn	-72.387	19.71
Tomato	-65.126	20.64
Watermelon	-60.654	47.95
Sunflower	-70.647	63.46
Rapeseed	-59.188	49.62

پس از تخمین توابع تولید و هزینه ارائه شده در مرحله دوم مدل PMP دوره‌ای و لحاظ نمودن توابع تخمینی و مقادیر برآورد شده برای پارامترهای هر یک در تابع هدف غیرخطی مرحله سوم این مدل، تحلیل سیاست به منظور بررسی اثرات بالقوه خشکسالی بر الگوی کشت و بازده ناخالص کشاورزان استان تهران تحت سناریوهای مختلف (خشکسالی خفیف، ملایم، متوسط، نسبتاً شدید و شدید) صورت گرفت. جدول ۴ میزان و درصد تغییرات سطح زیرکشت محصولات منتخب زراعی را پس از اعمال خشکسالی هیدرولوژیکی ناشی از محدودیت عرضه آب آبیاری در مقایسه با دوره مبنا یا مرجع نشان می‌دهد. با توجه به نتایج این جدول، ملاحظه می‌شود که با وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی تحت شدت‌های متفاوت (سناریوهای خفیف تا شدید) سطح زیرکشت محصولات با نیاز آبی بالا مانند ذرت دانه‌ای، هندوانه، گوجه‌فرنگی، آفتابگردان و کلزا نسبت به شرایط دوره مرجع کاهش می‌یابد، در حالی که سطح زیرکشت محصولات غله‌ای گندم و جو آبی که نیاز آبی کمتری در واحد سطح دارند، نسبت به دوره مرجع

**Table 4- Effects of the hydrological drought on acreage of selected products and cropping pattern**

جدول ۴- اثرات خشکسالی هیدرولوژیکی بر سطح زیر کشت محصولات منتخب زراعی و الگوی کشت

Products	Acreage (ha)	The changes	Applied drought scenario in planning model				
			Mild	Slight	Medium	Rel.Severe	Severe
Wheat	56825	Amount	57008	57215	57453	57733	58070
		Percent	0.32	0.68	1.10	1.59	2.19
Barley	32400	Amount	32524	32663	32822	33008	32203
		Percent	0.38	0.81	1.30	1.87	2.56
Corn	9380	Amount	9353	9322	9286	9241	9185
		Percent	-0.28	-0.61	-1.01	-1.48	-2.07
Tomato	8760	Amount	8723	8680	8629	8568	8492
		Percent	-0.42	-0.91	-1.49	-2.18	-3.06
Watermelon	1327	Amount	1184	1024	845	641	405
		Percent	-10.8	-22.8	-36.3	-51.6	-69.5
Sunflower	2920	Amount	2871	2814	2749	2672	2578
		Percent	-1.69	-3.62	-5.86	-8.50	-11.7
Rapeseed	3203	Amount	3153	3097	3031	2952	2857
		Percent	-1.54	-3.32	-5.38	-7.82	-10.8

بر اساس شکل ۲، کاهش شیب منحنی تقاضای آب برآورد شده در قسمت سمت راست و پایین این منحنی و شیب تندتر آن در قسمت سمت چپ و بالای منحنی بیانگر آن است که در سطوح قیمتی پایین تر آب آبیاری (ارزش برآورد شده کمتر)، میزان تقاضای کشاورزان برای نهاده آب افزایش می‌یابد، در حالی که در سطوح قیمتی بالاتر (ارزش برآورده شده بیشتر) کشاورزان با ایجاد تغییرات کاهشی در سطح زیر کشت محصولات منتخب از تقاضای خود برای نهاده آب آبیاری می‌کاهند و یا این که با ثابت نگه داشتن میزان تقاضای خود برای نهاده آب در جهت حفظ محصولات کم‌آب‌تر مانند گندم و جو آبی (و گاهی افزایش سطح زیر کشت این محصولات) و کاهش سطح زیر کشت محصولات آب‌بری چون هندوانه، گوجه‌فرنگی و ذرت دانه‌ای متمایل می‌شوند.

پس از تخمین تابع تقاضای آب کشاورزان طبق شکل ۲، مقدار آماره F آزمون معادل با ۶۱۵/۳ برآورد شد که در سطح معناداری ۵ درصد بیانگر معناداری کل آزمون (تخمین با برازش مناسب) می‌باشد. مقدار محاسبه شده ۰/۹۴ برای آماره ضریب تعیین ( $R^2$ ) نیز برازش مناسب رگرسیون صورت گرفته را نشان می‌دهد که حاکی از آن است با تخمین

افزون بر یافته‌های فوق، نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که ارزش اقتصادی هر مترمکعب آب آبیاری در شرایط دوره پایه معادل با ۱۱۵۲ ریال است، در حالی که با رخداد خشکسالی هیدرولوژیکی تحت سناریوهای خفیف تا شدید، این میزان به ۱۲۴۵ تا ۱۵۹۲ ریال می‌رسد که افزایشی معادل با ۸/۰۷ تا ۳۸/۲ درصد را به همراه دارد. علت این امر کاهش منابع آب در دسترس کشاورزان پس از رخداد خشکسالی تحت شدت‌های متفاوت است که ارزش واقعی منابع آب باقی‌مانده (حجم آب مصرفی - حجم آب در دسترس = حجم آب باقی‌مانده) را افزایش می‌دهد. با رخداد خشکسالی و ایجاد محدودیت در عرضه آب، کشاورزان ناگزیرند هر مترمکعب آب را با ارزش بالاتری خریداری نمایند. بنابراین، افزایش ارزش واقعی آب یکی دیگر از پیامدهای رخداد خشکسالی هیدرولوژیکی است که توجه به حفظ و پایداری منابع آب موجود در منطقه و مقابله با اثرات احتمالی خشکسالی را در آن مسأله‌ای حائز اهمیت می‌سازد. با رویداد خشکسالی تحت شدت‌های متفاوت، ارزش اقتصادی آب نسبت به دوره مبنا افزایش می‌یابد. این مفهوم اقتصادی (رابطه معکوس بین حجم آب تقاضا شده و ارزش اقتصادی آب) مطابق شکل ۲، تابع تقاضای آب کشاورزان را بازگو می‌کند.

**Table 5- Effects of hydrological drought on total water consumption, gross profit and water economic value**

جدول ۵- اثرات رخداد خشکسالی هیدرولوژیکی بر مجموع مصارف آبی، بازده برنامه‌ای و ارزش اقتصادی آب آبیاری

Desired variables	Base values	The changes	Applied drought scenario in planning model				
			Mild	Slight	Medium	Rel.Severe	Severe
Total water consumption in Pattern*	453.47	Amount	446.29	439.81	429.76	420.43	412.05
		Percent	-1.58	-3.01	-5.23	-7.29	-9.13
Total gross profit in Pattern**	1749.3	Amount	1725.6	1698.3	1674.1	1657.7	1621.9
		Percent	-1.34	-2.91	-4.29	-5.23	-7.28
Water economic value in Pattern***	1152	Amount	1245	1334	1409	1516	1592
		Percent	8.07	15.8	22.3	31.6	38.2

\*, \*\* and \*\*\*: respectively million m<sup>3</sup>, 100 million rial and rial/m<sup>3</sup>

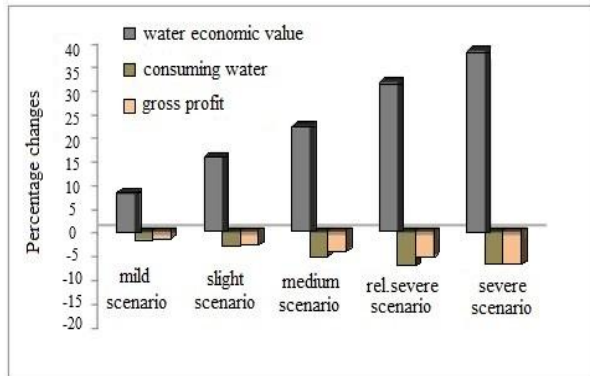


Fig. 3- Changes in total water consumption, gross profit and water economic value under drought conditions

شکل ۳- تغییرات مجموع آب مصرفی، بازده درآمدی و ارزش اقتصادی آب تحت شرایط خشکسالی

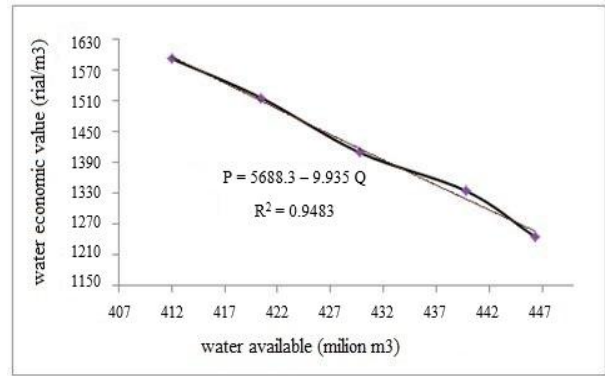


Fig. 2- Extraction of irrigation water demand function for farmers in under hydrological drought Event

شکل ۲- استخراج تابع تقاضای آب آبیاری کشاورزان در شرایط رخداد خشکسالی هیدرولوژیکی

#### ۴- نتیجه گیری

یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که با وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی ناشی از محدودیت عرضه آب آبیاری، علاوه بر ایجاد تغییرات در سطح زیرکشت محصولات منتخب زراعی، میزان بازده برنامه‌های کشاورزان استان تهران نیز تغییر می‌کند؛ به طوری که برای محصولات با نیاز آبی بالاتر و هزینه تولید بیشتر (مانند هندوانه، گوجه‌فرنگی و ذرت دانه‌ای) میزان تغییرات بازده برنامه‌های محسوس‌تر می‌باشد، اما برای محصولات با نیاز آبی پایین‌تر و هزینه تولید کمتر (گندم و جو آبی) تغییرات بازده برنامه‌های تحت سناریوهای مختلف ناچیز است. همچنین نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که بیشترین میزان تغییرات بازده برنامه‌های کشاورزان در واحد سطح و در شرایط رخداد خشکسالی، مربوط به محصول هندوانه بوده است. کلزا نیز کمترین میزان تغییرات بازده برنامه‌های کشاورزان استان تهران را در واحد سطح به خود اختصاص داده است. با وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی، حدود ۹/۱۳ درصد از تقاضای آب بخش کشاورزی استان تهران بدون پاسخ مانده و تأمین نخواهد شد که این امر موجبات تغییر الگوی کشت در منطقه را فراهم می‌کند. به علت تغییرات ایجاد شده در سطح زیرکشت محصولات منتخب زراعی، میزان مجموع بازده درآمدی کشاورزان تا ۷/۲۸ درصد نسبت به دوره مینا کاهش می‌یابد. افزایش ۳۸ درصدی ارزش اقتصادی آب آبیاری و کاهش مصارف آبی کشاورزان در سطوح قیمتی بالاتر از ۱۱۵۲ ریال به عنوان دیگر پیامدهای وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی در استان تهران به شمار می‌روند.

با توجه به نتایج به دست آمده در این تحقیق، جهت مقابله با آثار بالقوه

این رابطه، متغیر مستقل مقادیر آب در دسترس در حدود ۹۴ درصد از تغییرات متغیر وابسته ارزش اقتصادی آب آبیاری را توضیح می‌دهد. مقدار برآورد شده برای ضریب متغیر منابع آب در دسترس (Q) که بیانگر شیب تابع تقاضا است، ۹/۹۳۵- برآورد شد که این ضریب با آماره t به مقدار ۲۴/۸- در سطح ۵ درصد (با ارزش احتمال ۰/۰۰۰۱۴) معنادار شد. شکل ۳ درصد تغییرات مجموع آب مصرفی، مجموع بازده درآمدی کشاورزان و ارزش اقتصادی آب آبیاری را در شرایط رخداد خشکسالی نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۳، ملاحظه می‌شود که در شرایط وقوع خشکسالی با شدت‌های بالاتر، درصد تغییرات کاهشدهنده مجموع آب مصرفی و مجموع بازده درآمدی حاصل از الگوی کشت بیشتر است، لذا کاهش منابع آب مصرفی و کاهش بازده برنامه‌های کشاورزان از دیگر پیامدهای رخداد خشکسالی هیدرولوژیکی در محدوده مطالعاتی استان تهران هستند. به طور کلی، نتایج به دست آمده در این تحقیق با یافته‌های تحقیقات Alipour et al. (2013), Parhizkari et al (2016), Rezaee et al (2016) و Montaseri et al (2018) در داخل کشور هم‌سو است. آن‌ها در تحقیقات خود اثرات خشکسالی را بر پارامترهای کشاورزی و منابع آب ارزیابی کردند. نتایج این تحقیقات بیانگر پیامدهای خشکسالی شامل کاهش بازده درآمدی کشاورزان، محدودیت در تخصیص منابع آب و کاهش تولید محصولات کشاورزی است. همچنین، نتایج این تحقیق با یافته‌های تحقیقات WenJiang et al (2008), Howitt et al (2012) و Qureshi et al (2014) در خارج از کشور قرابت دارد. یافته‌های تحقیقات فوق، حاکی از آن است که رخداد خشکسالی بر میزان تولیدات کشاورزی و منابع آب در دسترس کشاورزان اثرات منفی می‌گذارد.

- 7- Quadratic
- 8- Intercept
- 9- Right Hand Site

## ۵- مراجع

- Alipour H, Cheharsoghi A, Qarib A (2013) Investigation of the effects of drought on socio-economic status of farmers, Case study: Wheat farmers in Nehbandan. Watershed Management Research (Construction and Research) 26(2):113-125 (In Persian)
- Angelidis P, Maris F, Kotsovinos N, Hrissanthou V (2012) Computation of drought index SPI with alternative distribution functions. Journal of Water Resources Management 26(9):2453-2473
- Araghinejad S (2011) An approach for probabilistic hydrological drought forecasting. Water Resources Management 25(1):191-200
- Barikani A, Ahmadian M, Khalilian S (2008) Sustainable optimal exploitation of groundwater resources in agriculture: A case study of Qazvin plain agriculture. Journal of Agricultural Economics and Development 25(2):253-262 (In Persian)
- Dehghanizade M, Bakhtiari S, Daei Karimzadeh S (2020) The role of water resources constraints on production and employment at different economic sectors: A case study of the Yazd province. Iran-Water Resources Research 16(1):426-433 (In Persian)
- Eslamian S, Kiaheyrati H (2008) The role of climate and land diversity in desertification. First National Conference on Water Pollution Measurement and Drought Management, University of Tehran, November 2008 (In Persian)
- Funk C, Budd M E (2009) Phenologically tuned MODIS NDVI-based production anomaly estimates for Zimbabwe. Remote Sensing of Environment, NO: 113
- Graveline N (2016) Economic calibrated models for water allocation in agricultural production: A review. Environmental Modelling and Software 81:12-25
- Helming J, Peerlings J (2014) Economic and environmental effects of a flat rate for Dutch agriculture. NJAS- Wageningen Journal of Life Sciences 68:53-60
- Howitt R E (1995) Positive mathematical programming. American Journal of Agricultural Economic 77:329-342
- Howitt R E, Medellin-Azuara J, MacEwan D, Lund J R (2012) Calibrating disaggregate economic models of agricultural production and water management. Environmental Modeling & Software 38:244-258

ناشی از رخداد پدیده خشکسالی هیدرولوژیکی از یکسو و پایداری و سیانت از منابع آب موجود در استان تهران از سوی دیگر، توصیه می شود که محصولات با نیاز آبی کمتر و بازده اقتصادی بیشتر مانند کلزا در الگوی کشت جایگزین محصولات آب بر و با هزینه تولید بالا مانند هندوانه، آفتابگردان و گوجه فرنگی شوند. با توجه به این که رخداد پدیده خشکسالی منجر به کاهش بازده درآمدی کشاورزان استان تهران می شود (به میزان یک تا هفت درصد منفی)، پیشنهاد می گردد که طی رخداد دوره های خشکسالی، مکانیزم حمایتی لازم از کشاورزان خسارت دیده صورت گیرد تا پس از پایان دوره خشکسالی فرآیند تولید محصولات به صورت پایدار و مداوم صورت گیرد. با توجه به رایگان تلقی شدن نسبی نهاده آب کشاورزی در استان تهران، به کارگیری برنامه های سیاستی قابل اجرا در بخش تقاضای آب کشاورزی در جهت بهبود و تغییر رو به رشد نرخ آب بهای پرداختی کشاورزان به ویژه در شرایط بروز خشکسالی، از راهکارهای مدیریتی دیگری است که منجر به کاهش مصرف آب در سطح مزارع شده و از هدررفت منابع محدود آب جلوگیری می نماید. این گونه برنامه های سیاستی (یعنی افزایش نرخ آب بها به صورت موقت تا زمان اتمام دوره خشکسالی بر اساس روند تغییرات ارزش واقعی یا اقتصادی نهاده آب از ۱۳۴۵ تا ۱۵۹۲ ریال در مترمکعب) برای کشاورزان مقبولیت بیشتری داشته و قابل درک است، چرا که فقط در شرایط اضطراری اعمال می شود و ترس از ادامه افزایش نرخ آب بها را برای جبران کاهش درآمد عرضه کنندگان آب در دوران خشکسالی، پس از رفع و اتمام آن از بین می برد. به طور کلی، کاهش میزان مصرف آب آبیاری به ویژه در شرایط وقوع خشکسالی را نمی توان جز با درخواست داوطلبانه کشاورزان تحقق بخشید. اگرچه که راهکارهای پیشنهادی فوق جهت مدیریت مصرف آب طی دوره های وقوع خشکسالی در استان تهران ارائه شدند و منجر به کاهش هدررفت آب آبیاری در سطح مزارع می شوند، اما تحقق آنها قبل از هر چیز مستلزم صرفه جویی داوطلبانه کشاورزان در مصرف نهاده کمیاب آب می باشد. بدیهی است که بدون همکاری کشاورزان، امکان مدیریت دوره خشکسالی در مناطق با کشاورزی آبی استان تهران (با وسعتی بیش از ۱۲۰ هزار هکتار) تقریباً ناممکن بوده و در صورت امکان هزینه های جانبی بیشتری را نسبت به پدیده خشکسالی در پی خواهد داشت.

## پی نوشت ها

- 1- Standardized Precipitation Index
- 2- Positive Mathematical Programming
- 3- Howitt
- 4- Normative Mathematical Programming
- 5- Multi-Period Positive Mathematical Programming
- 6- Constant Elasticity of Substitution

- Parhizkari A, Mahmoodi A, Shokat fadaee M (2017) Assessing the impacts of climate change on available water resources and crop production in the Shahroud Watershed. *Journal of Agricultural Economics Research* 33(9):23-50 (In Persian)
- Petsakos A, Rozakis S (2015) Calibration of agricultural risk programming models. *European Journal of Operational Research* 242(1):536-545
- Qureshi M E, Mobin-ud-Din A, Stuart M W, Mac K (2014) A multi-period positive mathematical programming approach for assessing economic impact of drought in the Murray-Darling Basin, Australia. *Economic Modelling* 39(1):293-304
- Rezaee A, Mortazavi A, Peykani Q (2016) Analysis of the economic situation of farmers in east of Zayandehrood river basin under drought conditions. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research* 47(2):335-342 (In Persian)
- Shakiba A, Mirbagheri B, Kheyri A (2010) Drought and its impact on groundwater resources in eastern Kermanshah province using SPI index. *Geographical Society of Iran* 25(8):83-96 (In Persian)
- Talebi A, Pourmohammadi S, Moradi N (2014) Investigating the effects of drought on water quality in arid regions, case study: Behbad plain of Yazd province. *International Journal of Water Resources and Development* 2(3):112-124 (In Persian)
- Tehran Meteorological Organization (2017) Summary of weather in Tehran Province. Pages 13-8 (In Persian)
- Vicente-Serrano SM, Cuadrat-Prats J M, Romo A (2006) Early prediction of crop production using drought indices at different time-scales and remote sensing data: application in the Ebro valley (North-East Spain). *International Journal of Remotr Sensing* 27(3):43-59
- Water and Sustainable Consulting Engineers Company (2017) The effect of drought on groundwater resources in Shahrekord plain. Drought summit, Chahar Mahal Bakhtiari (In Persian)
- WenJiang Z, QiFeng L, ZhiQiang G, Jian P (2008) Response of remotely sensed ormalized difference water deviation Index to the 2006 drought of eastern Sichuan Basin. *Science in China Series D: Earth Sciences* 51(5):109-122
- Zhiyong W, Yun M, Xiaoyan L, Guihua L, Qingxia L, Huating X (2016) Exploring spatiotemporal relationships among meteorological, agricultural, and hydrological droughts in Southwest China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 30(3):1033-1044
- Khalili N, Rezaee Pazhand H, Derakhshan H, Davary K (2018) Developing a framework for agricultural drought risk assessment for rainfed wheat. *Iran-Water Resources Research* 14(4):59-70 (In Persian)
- Khosravi M, Niagharaee S, Javedani N, Javanmard S, Khazanedari L (2001) Investigation of drought assessment indices and feasibility of applying Palmer drought severity indices in Iran. *International Conference on Drought Solutions*, Kerman Bahonar Shahid University
- Medellan-Azuara J, Harou J J, Howitt R E (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
- Mohammadi M, Bordi Sheykh M, Ahmadi H (2010) Drought intensity zoning in Sistan and Baluchestan province with SPI index using GIS. *Geomatics Conference*, Iran Mapping Organization (In Persian)
- Mohammadi S, Naseri F, Nazaripour H (2018) Investigation of temporal variations and the effect of meteorological drought on groundwater resources of Kerman plain using standard precipitation indices and groundwater resources. *Journal of Ecohydrology* 5(1):11-22 (In Persian)
- Montaseri M, Norjo A, Behmanesh J, Akbari M (2018) Wetland and meteorological drought in the southern basins of Lake Urmia (Case study: Zarinehroud and Siminroud catchment basins). *Iranian Journal of Ecohydrology* 5(1):189-202 (In Persian)
- Myronidis D, Stathis D, Ioannou K, Fotakis D (2012) An integration of statistics temporal methods to track the effect of drought in a shallow mediterranean lake. *Water Resources Management* 26(15):4587-4605
- Parhizkari A (2013) Determination economic value of irrigation water and farmer's response to price and non-price policies in Qazvin province. The thesis submitted for the degree of M.Sc. in the Field of Agricultural Economics, University of Zabol, Iran (In Persian)
- Parhizkari A (2018) Economic analysis of the impacts of alamut farmers' participation on rice selection project. *Journal of Agricultural Economics Research* 34(9):57-92 (In Persian)
- Parhizkari A, Khodadadi Hoseyni M, Taghizade Ranjbari H, Mahmoodi A (2016) Determination of appropriate economic strategy for protection of groundwater resources in Qazvin plain. *Journal of Rural Development Strategies* 4(2):477-496 (In Persian)