

Journal of Water and Wastewater, Vol. 30, No.4, pp: 16-32

Study of the Status of Resources and Water Consumption in Iran and Improving the Situation

H. Marzban¹, A. Sadraei Javaheri¹, M. Zibaei², S. M. J. Nazemosadat³, L. Karimi⁴

1. Assoc. Prof., Dept. of Economics, College of Economic, Management and Social Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran
2. Prof., Dept. of Agricultural Economics, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran
3. Prof., Dept. of Water Engineering, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran
4. PhD Student of Economics, College of Economic, Management and Social Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran
(Corresponding Author) Lkarimi57@yahoo.com

(Received Apr. 10, 2018 Accepted Nov. 16, 2018)

To cite this article :

Marzban, H., Sadraei Javaheri, A., Zibaei, M., Nazemosadat, S. M. J., Karimi, L., 2019, "Study of the status of resources and water consumption in iran and improving the situation." Journal of Water and Wastewater, 30(4), 16-32. Doi: 10.22093/wwj.2018.126649.2663. (In Persian)

Abstract

In recent years, due to excessive consumption and unbalance between water consumption and water resources, Iran has led to a severe shortage of renewable water sources. Therefore, in this situation, analyzing the status and presenting appropriate strategies is the main priority for policymakers. For this purpose, by designing a dynamic stochastic general equilibrium model, status of consumption of water resources has been studied in the household, agriculture and industry sectors. The existence and definite status of the stable situation, both parametric and numerically, has been investigated according to estimated values for Iran's economic parameters. According to the results of the research, it should be noted that at present, per capita water consumption is 1000 cubic meters per year. In other words, with current domestic consumption per capita, water per capita is less than that on the optimal Path. It is expected to achieve sustainable equilibrium in a long-term horizons by reforming consumption and providing policy solutions. Also, based on the simulation, from different policies, Establishing a 8-year limit on agricultural products with high water consumption is the most important policy for achieving the above equilibrium.

Keywords: Water Resources, Dynamic Stochastic General Equilibrium Pattern, Water Crisis, Stable Balance.

مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۰، شماره ۴، صفحه: ۳۲-۱۶

بررسی وضعیت منابع و مصارف آب در ایران و راهکارهای بهبود وضعیت

حسین مرزبان^۱، احمد صدراپی جواهری^۱، منصور زیبایی^۲، سید محمد جعفر ناظم السادات^۳، لیلیا کریمی^۴

۱- دانشیار، گروه اقتصاد، دانشکده اقتصاد، مدیریت و علوم اجتماعی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۲- استاد، گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۳- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۴- دانشجوی دکتری اقتصاد انرژی، دانشکده اقتصاد، مدیریت و علوم اجتماعی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
Lkarimi57@yahoo.com (نویسنده مسئول)

پذیرش ۹۷/۸/۲۵

دریافت ۹۷/۱/۲۱

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

مرزبان، ح.، صدراپی جواهری، ا.، زیبایی، م.، ناظم السادات، س. م. ج.، کریمی، ل.، ۱۳۹۸، "بررسی وضعیت منابع و مصارف آب در ایران و راهکارهای بهبود وضعیت" مجله آب و فاضلاب، ۳۰ (۴)، ۳۲-۱۶. Doi: 10.22093/wwj.2018.126649.2663

چکیده

در سال‌های اخیر به علت برداشت و مصرف بی‌رویه و عدم توازن میان مصرف و منابع آب، کشور ایران به سمت کمبود شدید منابع آب تجدیدپذیر رفته است. لذا در این شرایط تحلیل وضعیت موجود و ارائه راهکارهای مناسب از اولویت اصلی سیاست‌گذاران محسوب می‌شود. برای این منظور با طراحی یک الگوی تعادل عمومی پویای تصادفی، وضعیت مصرف منابع آب در بخش‌های خانگی، کشاورزی و صنعت مورد بررسی قرار گرفت. همچنین وجود و معلوم بودن وضعیت پایدار، به صورت پارامتریک عددی و با توجه به مقادیر برآورد شده برای پارامترهای اقتصادی ایران، بررسی شد. با توجه به نتایج حاصل از پژوهش، سرانه مصرف آب ۱۰۰۰ مترمکعب در سال است؛ در حالی که میزان منابع آب تجدیدپذیر سرانه در وضعیت پایدار باید ۱۸۵۰ مترمکعب باشد، در حال حاضر سرانه منابع تجدیدپذیر برابر ۱۳۰۰ مترمکعب است. به عبارت دیگر با سرانه مصرف خانگی فعلی، سرانه آب کمتر از حالت بهینه است. انتظار می‌رود با اصلاح مصرف و ارائه راهکارهای سیاستی، در یک افق بلندمدت بتوان به تعادل پایدار دست یافت. همچنین بر اساس شبیه‌سازی صورت گرفته، از میان سیاست‌های مختلف، ایجاد محدودیت ۸ ساله بر محصولات کشاورزی با مصرف زیاد آب، مهم‌ترین سیاست برای رسیدن به این تعادل است.

واژه‌های کلیدی: منابع آب، الگوی تعادل عمومی پویای تصادفی، بحران آب، وضعیت تعادلی پایدار

۱- مقدمه

۱-۱- وضعیت منطقه‌ای مصرف آب ایران

نشان می‌دهد بخش کشاورزی بیشترین سهم آب مصرفی را به خود اختصاص می‌دهد. سهم برداشت آب مصرفی در بخش کشاورزی در دنیا ۶۹ درصد، در خاورمیانه ۸۴ درصد و در ایران ۹۲ درصد است. میزان وابستگی زمین‌های کشاورزی تجهیز شده برای آبیاری به منابع آب زیرزمینی به‌طور متوسط در دنیا ۳۷/۸ درصد، در خاورمیانه ۴۶/۲ درصد و در ایران ۶۲/۱ درصد است. بازده آبیاری در بخش کشاورزی بین ۳۰ تا ۳۵ درصد است و بهره‌وری

کشور ایران به دلیل قرار گرفتن در کمربند خشک و نیمه خشک جهان در زمره کشورهای با محدودیت منابع آب قلمداد می‌شود. سهم ایران از منابع آب شیرین جهان نسبت به مناطق دیگر در سطح پایین تری قرار دارد. در حالی که یک درصد از جمعیت جهان به ایران اختصاص دارد، سهم آن از منابع آب شیرین تنها ۰/۳ درصد است. ایران، بارشی کمتر از یک سوم متوسط بارندگی جهان و تبخیری سه برابر میانگین دنیا دارد. بررسی وضعیت مصرف آب

بهنگام مدیریت منابع آب در هر دو بعد عرضه و تقاضا- تشدید شرایط نامطلوب منابع آبی کشور و تأثیرپذیری شاخص‌های امنیتی و اقتصادی امری اجتناب‌ناپذیر خواهد بود (Mohammadjani and Yazdani, 2014).

فرجزاده و همکاران بحران آب و مشکلات ناشی از آن را با استفاده از روش GIS در منطقه نیشابور ایران مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که بحران آب با شدت زیاد کل منطقه را تهدید می‌کند که مهم‌ترین عامل آن، بهره‌برداری نامناسب در بخش کشاورزی است (Farajzadeh et al., 2007).

ویژگی نامطلوب الگوهای تک‌بخشی، عدم لحاظ تمامی بخش‌های مرتبط با عرضه و تقاضا است و لذا برخی مطالعات به دنبال بررسی عمومی این مسئله بوده‌اند. به‌عنوان مثال، ونگ در سال ۲۰۰۹ بر اساس یک الگوی داده- ستانده، تعدادی شاخص عددی مصرف آب به‌منظور تحلیل ارتباط ساختاری میان فعالیت‌های اقتصادی و مصارف آب ارائه کرده‌اند. این شاخص‌ها مصرف آب در هر بخش را مشخص کرده و بر اساس آن شدت کمبود در آینده را تعیین می‌کنند. بر اساس نتایج این پژوهش، کمبود آب در مناطق شمال شرقی چین در نتیجه ضعف بهره‌برداری آب و مدیریت ضعیف آن است (Wang, 2009).

لیو و همکاران در سال ۲۰۱۷ کمبود منابع آبی و اثرات جانبی حاصل از آن را در دوره پس از سال ۱۹۸۰ مورد بررسی قرار داده‌اند. به‌منظور شناسایی ویژگی‌های کمبود آب، از شاخص‌های متفاوتی شامل جمعیت و میزان دسترسی به آب استفاده شده است. در این پژوهش، مهم‌ترین عوامل تشدید کمبود آب، میزان دسترسی به آن و مدیریت استفاده از منابع آب بیان شده است (Liu et al., 2017).

همانطور که اشاره شد، بررسی وضعیت آب در کشور نیازمند تحلیل همزمان مصرف در تمامی بخش‌ها و میزان عرضه آب است تا تصویری جامع از وضعیت تعادلی حاصل شود. بر این اساس وجه تمایز پژوهش حاضر با سایر پژوهش‌ها در این است که با استفاده از یک الگوی تعادل عمومی پویا، عرضه و تقاضای کل برای منابع آب به‌طور همزمان مورد بررسی قرار گرفته است که در بخش تقاضا، مصرف آب در بخش‌های مختلف بررسی شده و سپس با استخراج مسیر پویا در وضعیت بلندمدت، اختلاف وضع موجود از

آب به تولید در این حوزه حدود ۲/۷ دلار تولید ناخالص داخلی به ازای هر مترمکعب آب مصرفی است؛ مقدار این شاخص بین ۳۹/۱ دلار تولید ناخالص داخلی به ازای هر مترمکعب آب مصرفی در کشورهای با درآمد زیاد تا ۲/۱ دلار تولید ناخالص داخلی به ازای هر متر مکعب آب مصرفی در کشورهای با درآمد کم در نوسان است (Mohammadjani and Yazdani, 2014). نقصان این شاخص‌ها از نارسایی‌هایی در مدیریت و بهره‌برداری منابع آب کشور و نواقصی در فرایند حکمرانی سرزمین حکایت دارد.

۲-۱- سوال پژوهش

با توجه به موارد اشاره شده، در کنار وابستگی حیات انسان به منابع آبی، بررسی وضعیت آبی کشور و ارائه راهکارهای سیاستی امری اجتناب‌ناپذیر است. پژوهش‌های مختلف داخلی نیز این موضوع را نشان داده‌اند. بعضی الگوها، با استفاده از سیستم‌های بهینه تک بخشی این موضوع را بررسی کرده‌اند. به‌عنوان مثال، حسین‌زاد و همکاران در سال ۲۰۱۱ با اجرای مدل کنترل بهینه در منطقه عجب‌شیر استان آذربایجان شرقی، مسیر بهینه استخراج آب از منبع زیرزمینی را تعیین کردند. نتایج نشان داد که حدود ۳۶ سال طول می‌کشد تا ارتفاع آب در سفره زیرزمینی بالا آمده و در سطح ایستایی بهینه خود قرار گیرد (Hosseinzadeh et al., 2011).

حبیبی داویجانی و همکاران در سال ۲۰۱۳ با استفاده از الگوریتم تلفیقی ژنتیک- هوش مصنوعی^۱ نشان داده‌اند که استفاده از الگوهای کم آبیاری، تغییر الگوی کشت، حذف سطح زیرکشت بعضی از محصولات و استفاده از منابع آبی بیشتر در حوضه صنعت می‌تواند در بالا بردن درآمدهای حاصله تأثیرگذار باشد و می‌توان درآمدها را در منطقه کویر مرکزی ایران تا ۵۶ درصد نسبت به وضعیت فعلی بهبود بخشید (Habibi Davijani et al., 2013).

بعضی پژوهش‌ها با تمرکز بر شاخص‌های عددی، مسئله بحران آب را بررسی کرده‌اند. محمدجانی و یزدانیان در سال ۲۰۱۴ با بررسی دو شاخص سرانه آب تجدیدپذیر و شدت تنش آبی نشان داده‌اند که ایران در وضعیت بحران شدید آب قرار دارد و با توجه به ثابت بودن منابع آبی، افزایش جمعیت و عدم توجه کافی به مدیریت منابع آب- در صورت اتخاذ نشدن سیاست‌های مناسب و

¹ Genetic Algorithm- Particle Swarm Optimiaztion (GAPSO)

میزان مصرف آب در بخش کشاورزی به چه میزان بوده و تابع چه عواملی است. بنابراین اولین بخش از تقاضای کل مصرف آب، معادله ۴ است.

۲-۱-۲- بخش صنعت

بخش صنعت نیز با استفاده از عوامل تولید نیروی کار، سرمایه و آب به تولید کالا مشغول است که تابع تولید آن به صورت زیر فرض می شود. همانند بخش کشاورزی، تابع تولید بخش صنعتی نیز به صورت تابع کاب داگلاس با بازدهی ثابت است که حاکی از رشد تولید معادل با رشد عوامل تولید دارد

$$Y_t^I = F^I(K_t, W_t^I, A_t^I L_t^I) = (K_t)^{\alpha_1} (W_t^I)^{\alpha_2} (A_t^I L_t^I)^{-\alpha_1 - \alpha_2} \quad (6)$$

که در آن

Y_t^I تولید بخش صنعت، F^I تابع تولید بخش صنعت، W_t^I میزان مصرف آب در بخش صنعت، A_t^I فناوری (بهره‌وری) نیروی کار بخش صنعت، L_t^I نیروی کار بخش صنعت، K_t^I سرمایه بخش صنعت، α_1 سهم سرمایه در تولید محصولات صنعت و α_2 سهم نیروی کار آب در تولید محصولات صنعت است؛ به طوری که $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ و همچنین فرض می شود بهره‌وری بخش صنعت از فرایندی به صورت زیر تبعیت می کند

$$A_t^I = A_0 e^{g_t^I} \quad (7)$$

که g_t^I نرخ رشد بهره‌وری بخش صنعت است. همانند بخش کشاورزی، به منظور استخراج میزان تقاضای صنعت برای مصرف آب، لازم است تابع تقاضای آن برای آب مشخص شود که این تابع از حداکثرسازی تابع سود آن مشخص می شود.

لذا هدف تولیدکننده بخش صنعت حداکثرسازی تابع سود به صورت زیر است

(۸)

$$\text{Max } \pi_t^I = P_t^I (K_t)^{\alpha_1} (W_t^I)^{\alpha_2} (A_t^I L_t^I)^{-\alpha_1 - \alpha_2} - r_t K_t - P_{W,t}^I W_t^I - W_t^I L_t^I$$

شرایط مرتبه اول این مسئله به صورت زیر است

$$Y_t^A = F^A(W_t^A, A_t^A, L_t^A) = (W_t^A)^\alpha (A_t^A, L_t^A)^\beta \quad (1)$$

که در آن

Y_t^A تولید بخش کشاورزی، F^A تابع تولید بخش کشاورزی، W_t^A میزان مصرف آب در بخش کشاورزی، A_t^A فناوری (بهره‌وری) نیروی کار بخش کشاورزی، L_t^A نیروی کار بخش کشاورزی، α سهم منابع آب در تولید محصولات کشاورزی و β سهم نیروی کار مؤثر در تولید محصولات کشاورزی است، به طوری که $\alpha + \beta = 1$ و $\alpha, \beta \in (0,1)$. همچنین فرض می شود بهره‌وری بخش کشاورزی از فرایندی به صورت زیر تبعیت می کند

$$A_t^A = A_0^A e^{g_t^A} \quad (2)$$

که در این معادله

g_t^A نرخ رشد بهره‌وری بخش کشاورزی است. نحوه فعالیت بنگاه به این صورت است که عوامل تولید را تا نقطه‌ای انتخاب کند که بیشترین سود حاصل از فعالیت را کسب نماید که یکی از این عوامل تولید، میزان مصرف آب است. بنابراین اگر این مسئله بنگاه حل شود، آنگاه می توان تابع تقاضا و بنابراین میزان آب مصرفی در بخش کشاورزی را به دست آورد.

بر این اساس، مسئله حداکثرسازی سود بنگاه تولیدکننده کشاورزی به صورت زیر است

$$\pi_t^A = P_t^A (W_t^A)^\alpha (A_t^A, L_t^A)^\beta - P_{W,t}^A W_t^A - W_t^A L_t^A \quad (3)$$

که در آن

P_t^A قیمت کالای کشاورزی، $P_{W,t}^A$ قیمت هر واحد آب در بخش کشاورزی و W_t^A دستمزد نیروی کار است. از شرایط بهینه‌سازی مرتبه اول به صورت زیر، توابع تقاضای بهینه برای هر یک از عوامل تولید مشخص می شود

$$\frac{\partial \pi_t^A}{\partial W_t^A} = 0 \Rightarrow W_t^A = \alpha \frac{P_t^A}{P_{W,t}^A} Y_t^A \quad (4)$$

$$\frac{\partial \pi_t^A}{\partial L_t^A} = 0 \Rightarrow L_t^A = \beta A_t^A \cdot \frac{P_t^A}{W_t^A} Y_t^A \quad (5)$$

معادلات نشان دهنده توابع تقاضای بهینه برای نیروی کار و آب در بخش کشاورزی است. به عبارت دیگر، معادله ۴ نشان می دهد

بنابراین در این قسمت باید تابع تقاضای خانوار برای آب مصرفی را استخراج کرد و سپس با توابع تقاضای دو بخش دیگر جمع زد تا تقاضای کل برای مصرف آب مشخص شود. بر اساس مبانی اقتصاد خرد، تقاضای خانوار برای هر کالا از جمله آب، از حداکثرسازی تابع مطلوبیت آن نسبت به قیود مقابل آن حاصل می‌شود.

هدف بنگاه حداکثر کردن تابع مطلوبیت نسبت به قیود مقابل خود است. خانوار مقید به دو قید است، یکی قید بودجه که نشان می‌دهد مخارج خانوار نمی‌تواند بیشتر از منابع مالی آن باشد؛ مخارج خانوار شامل مصرف کالای نهایی و سرمایه‌گذاری است و منابع درآمدی آن شامل اجاره حاصل از سرمایه و درآمد حاصل از عرضه نیروی کار. لذا قید بودجه خانوار به صورت معادله ۱۳ بیان می‌شود

$$K_t^* + c_t L_t = r_t k_t + W_t L_t \quad (13)$$

از طرفی میزان آب در دسترس برای تأمین آب شرب قابل مصرف، به عنوان قید دوم وارد مسئله بهینه‌سازی می‌شود (Li and Swain, 2016).

میزان مصرف آب خانوار محدود به منابع آبی در دسترس با رعایت سطح پایداری آب است که منظور از سطح پایداری آب، نسبتی از منابع آب است که میزان مصرف بیشتر از آن منجر به فشار بر منابع آبی و کمبود آن می‌شود. بر این اساس محدودیت مربوط به مصرف آب به صورت زیر بیان می‌شود

$$\dot{W}_t^T = M_t - W_t^A - W_t^I - W_t^h \quad (14)$$

که در این معادله W_t^T سطح منابع آب مانده بر سطح پایداری، W_t^I میزان تغییر در منابع آب و M_t میزان بارش سالانه است. باید توجه داشت که در معادله ۱۴ مقدار W_t^A از بخش کشاورزی و W_t^I از بخش صنعت مشخص می‌شود زیرا به ترتیب نشان دهنده تابع تقاضا برای مصرف آب در این دو بخش است. لذا تنها جزئی که باید شناسایی شود، تصریح تابع برای میزان بارش (M) است که یک متغیر کاملاً تصادفی است.

$$\frac{\partial \pi_t^1}{\partial K_t} = 0 \Rightarrow K_t = \alpha_1 \frac{P_t^1}{r_t} Y_t^1 \quad (9)$$

$$\frac{\partial \pi_t^1}{\partial W_t^1} = 0 \Rightarrow W_t^1 = \alpha_2 \frac{P_t^1}{P_{w,t}^1} Y_t^1 \quad (10)$$

$$\frac{\partial \pi_t^1}{\partial L_t^1} = 0 \Rightarrow L_t^1 = (1 - \alpha_1 - \alpha_2) \frac{P_t^1}{W_t^1} Y_t^1 \quad (11)$$

سه معادله بالا توابع تقاضای بهینه برای سرمایه، آب و نیروی کار در بخش صنعت را نشان می‌دهد. معادله ۱۰ تابع تقاضای بخش صنعت برای آب و میزان مصرف آن را نشان می‌دهد. این معادله دومین بخش از تقاضای کل برای آب مصرفی است.

۲-۲- خانوار

در الگوی حاضر فرض می‌شود تعداد زیادی مصرف کننده با طول عمر نامحدود وجود دارند. رفاه مصرف کننده تحت تأثیر مطلوبیت ناشی از مصرف کالای نهایی (C) و آب (W_t^h) است (Li and Swain, 2016) و از یک تابع مطلوبیت جدایی پذیر به صورت زیر پیروی می‌کند. این تابع در واقع نشان می‌دهد چگونه در طول زمان خانوار از مصرف آب و سایر کالاها کسب مطلوبیت دارد

$$\text{Max } U_0 = \int_0^{\infty} u(c_t, w_t^h) e^{-(\rho-n)t} dt = \int_0^{\infty} \left[\frac{(c_t)^{1-\sigma}}{1-\sigma} + \frac{(w_t^h)^{1-\theta}}{1-\theta} \right] e^{-(\rho-n)t} dt \quad (12)$$

بر این اساس مصرف کننده نمونه ارزش فعلی مطلوبیت طول عمر خود را حداکثر می‌سازد. تابع مطلوبیت بالا از ویژگی ریسک‌گریزی نسبی ثابت^۱ برخوردار است که در آن ρ نرخ ترجیحات زمانی، n نرخ رشد جمعیت، σ عکس کشش جانشینی بین دوره‌ای مصرف کالای نهایی و θ عکس کشش جانشینی بین دوره‌ای مصرف آب است. خانوار، همانند بخش کشاورزی و صنعتی، متقاضی مصرف آب بوده و لذا سومین و آخرین بخش از تقاضای کل آب مصرفی از قسمت خانوار مشخص می‌شود.

¹ Constant Relative Risk Aversion (CRRA)

تابع در یک نمودار می‌تواند وضعیت تعادلی آبی در ایران را مشخص سازد.
اگر L_t کل جمعیت الگو را نشان دهد آنگاه سرانه قید (معادله ۱۳) به صورت زیر است

$$\frac{\dot{K}}{L} = r_t k_t - w_t - c_t \quad (17)$$

که حروف کوچک نشان‌دهنده مقادیر سرانه است. با توجه به تعریف سرمایه سرانه، سمت چپ معادله ۱۷ را می‌توان به صورت زیر نوشت

$$k_t = \frac{K_t}{L_t} \Rightarrow \dot{k}_t = \frac{\dot{K}L - \dot{L}K}{L^2} = \frac{\dot{K}}{L} - nk \Rightarrow \frac{\dot{K}}{L} = \dot{k} + nk \quad (18)$$

با جای‌گذاری معادله ۱۸ در معادله ۱۷، معادله انباشت سرمایه سرانه حاصل می‌شود

$$\dot{k} = (r - n)k_t + w_t - c_t \quad (19)$$

همچنین با توجه به معادله ۱۶، معادله انباشت سرانه آب به صورت زیر است

$$\frac{\dot{W}_t^T}{L_t} = \frac{m W_t^T \left(1 - \frac{W_t^T}{W_t^{T,max}}\right)}{L_t} - \frac{W_t^A}{L_t} - \frac{W_t^I}{L_t} - \frac{W_t^h}{L_t} + \varepsilon_t$$

$$w_t^T = \frac{W_t^T}{L_t} \Rightarrow \dot{w}_t^T = \frac{\dot{W}_t^T L_t - \dot{L}_t W_t^T}{L_t^2} \Rightarrow \frac{\dot{W}_t^T}{L_t} = \dot{w}_t^T + n w_t^T$$

با جای‌گذاری معادله ۲۰ در مقدار سرانه شده معادله ۱۶، معادله انباشت منابع آب سرانه حاصل می‌شود

$$\dot{w}_t^T = m w_t^T \left(1 - \frac{w_t^T}{w_t^{T,max}}\right) - w_t^A - w_t^I - w_t^h + \varepsilon_t \quad (21)$$

به منظور حل مسئله خانوار از روش کنترل بهینه^۲ و تابع هامیلتون جاری^۱ استفاده می‌شود. بر این اساس تابع همیلتون مسئله

میزان بارش سالانه، رشد منابع آبی را مشخص می‌سازد. در این پژوهش تابع مربوط به بارش سالانه به صورت لجستیک^۱ و به فرم زیر فرض می‌شود

$$M_t = G(W_t^T) = m W_t^T \left(1 - \frac{W_t^T}{W_t^{T,max}}\right) \quad (15)$$

که در آن $m > 0$ و $W_t^{T,max}$ حداکثر مقداری است که منابع آبی می‌تواند در یک زمان معین داشته باشد، لذا اگر در یک زمان معین مقدار منابع موجود در حداکثر مقدار خود باشد، آنگاه مابقی بارش به صورت دیگر خارج شده و جذب منابع آبی نمی‌شود. بر این اساس معادله ۱۴ را می‌توان به صورت زیر نوشت

$$\dot{W}_t^T = m W_t^T \left(1 - \frac{W_t^T}{W_t^{T,max}}\right) - W_t^A - W_t^I - W_t^h + \varepsilon_t \quad (16)$$

که ε_t شوک بارش است.

به منظور حل مسئله خانوارها، ابتدا یک خانوار نوعی در نظر گرفته شد و سپس مسئله برای آن حل شد و جواب نهایی برای کلیه خانوارها تعمیم داده شد. بنابراین تمرکز بر رفتار یک خانوار مبین آن است که متغیرها به صورت سرانه باید وارد مدل‌سازی شوند زیرا صرفاً رفتار یک خانوار لحاظ می‌شود.

بر این اساس متغیرهای w_t^T و c_t در تابع مطلوبیت به صورت سرانه هستند و برای حفظ هماهنگی نمادها و حل مسئله لازم است قیود ۱۳ و ۱۶ نیز به فرم سرانه نوشته شوند.

اما قبل از ادامه سایر مراحل ابتدا لازم است هدف از معادلاتی که در ادامه می‌آیند، مشخص شود. هدف، بررسی وضعیت آبی در کشور است و بنابراین لازم است پویایی‌های میزان مصرف کل آب و میزان عرضه کل مشخص شود. بنابراین دو تابع مورد نیاز است که یکی تغییرات مصرف کل و دیگری تغییرات عرضه کل آب را نشان می‌دهند. در جایی که تغییرات در عرضه کل برابر تغییرات در تقاضای کل باشد، آنگاه تعادل منابع آبی برقرار می‌شود و در سایر نقاط این تعادل مشاهده نمی‌شود. به همین دلیل نشان دادن این دو

¹ Logistic

² Optimal Control

همچنین با استفاده از معادله ۲۵

$$-\theta \dot{W}_t^h (W_t^h)^{-\theta-1} = \dot{\lambda}_{2t} \quad (29)$$

با جای‌گذاری معادله ۲۹ در معادله ۲۶

$$\frac{\dot{W}_t^h}{W_t^h} = \frac{1}{\theta} \left(\left(m W_t^T - \frac{g(W_t^T)^2}{W_t^{T,max}} \right) - n \right) \quad (30)$$

معادلات ۲۸ و ۳۰ نشان‌دهنده معادلات مصرف کالای نهایی و مصرف آب توسط خانوار است که بر اساس آن تصمیمات مصرفی خانوار تنظیم می‌شود. به عبارت دیگر، تابع تقاضای مصرف آب خانوار توسط معادله ۳۰ مشخص می‌شود. بنابراین سومین و آخرین بخش از تقاضا برای مصرف آب به این صورت مشخص می‌شود.

همانطور که در مباحث قبلی عنوان شد، بررسی تعادل نیازمند تحلیل پویایی عرضه و تقاضای کل آب است. در این تغییرات یک سیستم معادلات دیفرانسیلی و روش نموداری برای نشان دادن این سیستم استفاده می‌شود که به روش نمودار فازی^۵ معروف است. به منظور بررسی الگو در قالب یک سیستم معادلات دیفرانسیلی و سپس استفاده از نمودار فاز دیاگرام برای بررسی پویایی‌های متغیرها، ابتدا لازم است متغیرهای معادلات استخراج شده، بر حسب سرانه مؤثر عنوان شوند. منظور از سرانه مؤثر یک متغیر، تقسیم آن بر نیروی کار مؤثر (حاصل ضرب نیروی کار در بهره‌وری) است. با توجه به این که الگوی مورد بررسی در این پژوهش یک الگوی دویخشی است، لذا تغییرات در انباشت سرمایه را می‌توان به صورت زیر نوشت

$$\dot{K}_t = Y_t - C_t - \delta K_t \quad (31)$$

با تعریف سرمایه سرانه مؤثر به صورت $\tilde{K}_t = \frac{K_t}{A_t L_t}$

$$\frac{\dot{\tilde{K}}_t}{\tilde{K}_t} = \frac{\dot{K}_t}{K_t} - \frac{\dot{A}_t}{A_t} - \frac{\dot{L}_t}{L_t} \quad (32)$$

⁵ Phase Diagram

حداکثرسازی تابع مطلوبیت نسبت به قیود (۱۹) و (۲۱) به صورت زیر است (Groth, 2014, Diekert, 2010)

$$H = \left[\frac{(C_t)^{1-\sigma}}{1-\sigma} + \frac{(W_t^h)^{1-\theta}}{1-\theta} \right] + \lambda_{1t} [(r-n)k_t + w_t - c_t] + \lambda_{2t} \left[m W_t^T \left(1 - \frac{W_t^T}{W_t^{T,max}} \right) - W_t^A - W_t^I - W_t^h + \varepsilon_t \right] \quad (22)$$

مدل شامل دو متغیر وضعیت K و W_t^T ، دو متغیر تصمیم‌گیری^۳ (کنترل) C و W_t^h و متغیرهای هم وضعیت λ_{1t} و λ_{2t} است. با توجه به معادله ۲۲، شرایط بهینه مرتبه اول عبارت است از

$$H_c = 0 \Rightarrow u_c - \lambda_{1t} = 0 \Rightarrow c_t^{-\sigma} = \lambda_{1t} \quad (23)$$

$$\dot{\lambda}_{1t} = -H_K \Rightarrow \dot{\lambda}_{1t} = -[(r-n)\lambda_{1t}] \quad (24)$$

$$H_{W_t^h} = 0 \Rightarrow (W_t^h)^{-\theta} - \lambda_{2t} = 0 \Rightarrow (W_t^h)^{-\theta} = \lambda_{2t} \quad (25)$$

$$\dot{\lambda}_{2t} = -H_{W_t^T} \Rightarrow \dot{\lambda}_{2t} = - \left[\lambda_{2t} \left(m W_t^T - \frac{g(W_t^T)^2}{W_t^{T,max}} \right) \right] \quad (26)$$

با توجه معادله ۲۳

$$\dot{\lambda}_{1t} = -\sigma c_t^{-\sigma-1} \dot{c}_t \quad (27)$$

با جای‌گذاری معادله ۲۷ در معادله ۲۴ می‌توان به معادله اولر^۴ برای مصرف کالای نهایی بین دوره‌ای رسید

$$\frac{\dot{c}_t}{c_t} = \frac{1}{\sigma} (r-n) \quad (28)$$

¹ Current Hamiltonian Function

² State Variable

³ Decision Variable

⁴ Euler Equation

معادله ۳۲ را می توان به صورت زیر بازنویسی نمود

$$\frac{\dot{K}}{K} = \frac{\dot{\tilde{K}}_t}{\tilde{K}_t} + (g^I + n^I) \quad (33)$$

همچنین با توجه به معادله ۳۱

$$\frac{\dot{K}}{K} = \frac{Y - C - \delta K}{K} = \frac{Y - C}{K} - \delta \quad (34)$$

از آنجا که صرفاً بخش صنعت اقتصاد است که مولد انباشت سرمایه است، لذا در معادله ۳۴ به جای تولید (Y) از تابع تولید بخش صنعت استفاده می شود

$$\begin{aligned} \frac{\dot{\tilde{K}}}{\tilde{K}} &= \frac{F^I(K_t, W_t^I, A_t^I L_t^I) - C}{k} - \delta - n^I - g^I \Rightarrow \\ \frac{\dot{\tilde{K}}}{\tilde{K}} &= \frac{F\left(\frac{K}{A_t^I L_t^I}, \frac{W_t^I}{A_t^I L_t^I}, 1\right) - \frac{C}{A_t^I L_t^I}}{\frac{K}{A_t^I L_t^I}} - \delta - n^I - g^I \quad (35) \\ \Rightarrow \frac{\dot{\tilde{K}}}{\tilde{K}} &= \frac{f(\tilde{K}_t, \tilde{W}_t^I) - \tilde{C}}{\tilde{K}_t} - \delta - n^I - g^I \end{aligned}$$

بنابراین معادله مربوط به انباشت سرمایه سرانه مؤثر به صورت زیر حاصل می شود

$$\dot{\tilde{K}} = f(\tilde{k}_t, \tilde{w}_t^I) - \tilde{c}_t - (\delta + n^I + g^I) \tilde{k}_t \quad (36)$$

با تعریف سرانه مؤثر منابع آب به صورت $\tilde{W}_t^T = \frac{W_t^T}{A_t L_t}$ ، معادله ۳۷ تعریف می شود

$$\frac{\dot{\tilde{W}}_t^T}{\tilde{W}_t^T} = \frac{\dot{W}_t^T}{W_t^T} - \frac{\dot{A}_t}{A_t} - \frac{\dot{L}_t}{L_t} \Rightarrow \frac{\dot{\tilde{W}}_t^T}{\tilde{W}_t^T} = \frac{\dot{W}_t^T}{W_t^T} + (g + n) \quad (37)$$

با توجه به معادله ۱۶

$$\frac{\dot{\tilde{W}}_t^T}{\tilde{W}_t^T} = \frac{m W_t^T \left(1 - \frac{W_t^T}{W_t^{T, \max}}\right) - W_t^A - W_t^I - W_t^h}{W_t^T} \quad (38)$$

با جای گذاری معادله ۳۷ در معادله ۳۸، معادله مربوط به منابع آب سرانه مؤثر حاصل می شود

$$(39)$$

$$\frac{\dot{\tilde{W}}_t^T}{\tilde{W}_t^T} = \frac{m W_t^T \left(1 - \frac{W_t^T}{W_t^{T, \max}}\right) - W_t^A - W_t^I - W_t^h}{W_t^T} - (g + n)$$

$$\Rightarrow \frac{\dot{\tilde{W}}_t^T}{\tilde{W}_t^T} = \frac{m \tilde{W}_t^T \left(1 - \frac{\tilde{W}_t^T}{\tilde{W}_t^{T, \max}}\right) - \tilde{W}_t^A - \tilde{W}_t^I - \tilde{W}_t^h}{\tilde{W}_t^T} - (g + n)$$

$$\Rightarrow \frac{\dot{\tilde{W}}_t^T}{\tilde{W}_t^T} = \left(m \tilde{W}_t^T \left(1 - \frac{\tilde{W}_t^T}{\tilde{W}_t^{T, \max}}\right) - \tilde{W}_t^A - \tilde{W}_t^I - \tilde{W}_t^h \right) - (g + n) \tilde{W}_t^T$$

مصرف سرانه مؤثر خانوار به صورت $\tilde{c}_t = \frac{C_t}{A_t}$ تعریف می شود.

بنابراین

$$\frac{\dot{\tilde{c}}_t}{\tilde{c}_t} = \frac{\dot{C}_t}{C_t} - g_t \quad (40)$$

با جای گذاری معادله ۴۰ در معادله ۲۸

$$\frac{\dot{\tilde{c}}_t}{\tilde{c}_t} = \frac{1}{\sigma} (r - n) - g_t \quad (41)$$

با توجه به مصرف آب سرانه مؤثر خانوار به صورت $\tilde{W}_t^h = \frac{W_t^h}{A_t}$ ، با جای گذاری در معادله ۳۰ مصرف بین دوره های آن در طول زمان به صورت زیر است

$$\frac{\dot{\tilde{W}}_t^h}{\tilde{W}_t^h} = \frac{1}{\theta} \left(m \tilde{W}_t^T \left(1 - \frac{\tilde{W}_t^T}{\tilde{W}_t^{T, \max}}\right) - n \right) - g_t \quad (42)$$

معادله ۴۲ پویایی های عرضه کل آب و یک نمودار فازی مورد نیاز را نشان می دهد.

۳- برآورد و شبیه سازی الگو

نمودار فاز دیگرام مصرف و منابع آبی بر اساس روند پویای مصرف آب توسط بخش خانوار و منابع آب رسم می شود. به این منظور معادلات ۳۹ و ۴۲ تشکیل سیستم معادلات دیفرانسیلی نمودار

مربوطه در مورد تفاضل مرتبه اول آن‌ها انجام شد که نتایج آن به شرح جدول ۲ است.

همانطور که از جدول ۲ مشخص است، بر اساس نتایج حاصله تفاضل مرتبه اول متغیرها در سطح مرتبه معنی‌داری ۵ درصد همگی ساکن و فاقد ریشه واحد هستند.

با توجه به نتایج جدول ۲ و معادلات ۱ و ۶ پارامترهای مربوطه در قالب سیستم تفاضلی زیر برآورد می‌شوند

$$\begin{aligned} \Delta \text{Ln}(\tilde{y}_t^I) &= \alpha_1 \Delta \text{Ln}(\tilde{k}_t) + \alpha_2 \Delta \text{Ln}(\tilde{w}_t^I) \\ \Delta \text{Ln}(\tilde{y}_t^A) &= \alpha \Delta \text{Ln}(\tilde{w}_t^A) \end{aligned} \quad (46)$$

با استفاده از داده‌های سالانه مصرف آب، میزان حجم منابع آبی، حجم سرمایه، نیروی کار و میزان تولید مربوط به دوره ۱۳۹۵-۱۳۴۱ پارامترهای برآورد شده به صورت جدول ۳ می‌باشند. با توجه به مانایی متغیرها، از روش حداقل مربعات معمولی برای برآورد استفاده شد. مطابق با نتایج تخمین، سهم آب در بخش کشاورزی بسیار زیاد و برابر ۹۵ درصد بوده و با واقعیت‌های بخش کشاورزی ایران تطابق دارد. سهم سرمایه و آب در تولید صنعتی به ترتیب برابر ۷۱ درصد و ۴ درصد بوده و لذا سهم نیروی کار برابر ۲۵ درصد است.

با استفاده از معادله ۴۴، نسبت بارش به منابع آبی در حدود ۸۲ درصد به دست آمد که با توجه به کاهش بارندگی در سال‌های اخیر، نشان دهنده آن است که فشار بر منابع آبی بسیار زیاد بوده و فاصله زیادی با سطح پایداری آب وجود دارد.

با توجه به مقادیر متوسط پارامترها در جدول ۴، ریشه مثبت معادله ۴۴ برابر $\tilde{w}^T = 3.2$ است که این نشان دهنده مقدار منابع آبی در وضعیت پایدار با توجه به وضعیت کنونی است.

از طرفی بر اساس معادله ۴۵

$$\frac{\partial \tilde{w}_t^h}{\partial \tilde{w}_t^T} = 0 \Rightarrow \left(m - \frac{2m \tilde{w}_t^T}{\tilde{w}_t^T} \right) \left(\tilde{w}_t^T \right)^* = \frac{1}{2} \tilde{w}_t^{T, \max} \quad (47)$$

با توجه به مشتق مرتبه اول در معادله فوق، در نقطه $\frac{1}{2} \tilde{w}_t^{T, \max}$ مقدار تابع ۴۵ به حداکثر خود می‌رسد، بنابراین تا قبل از نقطه

فوق را می‌دهند. با توجه به اینکه منحنی‌های نمودار فازدیگرام بر اساس تعادل وضعیت پایدار رسم می‌شوند، لذا تغییرات مقادیر سرانه مؤثر برابر صفر است. بر اساس معادله ۴۲، در صورتی که رشد سرانه مؤثر مصرف آب خانوار برابر صفر باشد آنگاه سمت چپ معادله ۴۲، برابر صفر شده و بنابراین معادله زیر حاصل می‌شود

$$m \tilde{w}^T \left(1 - \frac{\tilde{w}^T}{\tilde{w}^{T, \max}} \right) = \theta g + n \quad (43)$$

از معادله ۴۳ می‌توان نتیجه گرفت

$$\begin{aligned} \tilde{w}^T &= \frac{m \pm \sqrt{\Delta}}{-2m / \tilde{w}^{T, \max}} \\ \Delta &= (m)^2 - 4 \frac{m(\theta g + n)}{\tilde{w}^{T, \max}} \end{aligned} \quad (44)$$

همچنین با توجه به معادله ۳۹، شرط $\dot{\tilde{w}}_t^T = 0$ مبین آن است که

$$\tilde{w}_t^h = \left(m \tilde{w}_t^T \left(1 - \frac{\tilde{w}_t^T}{\tilde{w}_t^{T, \max}} \right) - \tilde{w}_t^A - \tilde{w}_t^I \right) - (g + n) \tilde{w}_t^T \quad (45)$$

بنابراین معادلات ۴۴ و ۴۵ نمودارهای فازدیگرام مصرف و منابع آب را ترسیم می‌کنند. به منظور رسم نمودارهای معادلات ۴۴ و ۴۵ ابتدا لازم است پارامترهای الگو مشخص شوند که پارامترهای مشخص کننده وضعیت نمودارهای فازدیگرام از معادلات ۱ و ۶ مشخص می‌شوند. بنابراین لازم است پارامترهای این سه معادله برآورد شوند. قبل از برآورد این معادلات ابتدا ضروری است مانایی متغیرهای معادلات مورد بررسی قرار گیرد. جدول‌های ۱ و ۲ آماره‌های آزمون دیکی-فولر تعمیم یافته^۱ و فیلپس-پرون^۲ به ترتیب بر مقادیر سطح و تفاضل مرتبه اول متغیرها را نشان می‌دهد.

بر اساس نتایج حاصل از جدول ۱، تمامی متغیرهای الگو در سطح ۵ درصد بر اساس آزمون‌های مورد استفاده ناماننا بوده و دارای ریشه واحد هستند. به منظور بررسی مانایی تفاضل مرتبه اول متغیرهای فوق، ابتدا لگاریتم آنها محاسبه و سپس آزمون‌های

¹ Augmented Dicky Fuller

² Philips- Perron



جدول ۱- نتایج آزمون دیکی - فولر تعمیم یافته و فیلیپس - پرون بر مقدار سطح متغیرها

Table 1. The results of the generalized Dickey-Fuller test and the Phillips-Perron test on the values of the level of variables

Test	Augmented Dickey-Fuller (ADF)		Phillips - Perron		
	Variable	T computed	Table t statistics at 5% level	T computed	Table t statistics at 5% level
Capital per capita sector of the industry		-0.69	-1.95	0.98	-1.94
Per capita water consumption in the industrial sector		0.3	-1.94	-0.07	-1.94
Per capita production of the industrial sector		1.55	-1.94	1.56	-1.94
Water consumption per capita agricultural sector		0	-1.94	0.29	-1.94
Per capita agricultural sector production		-2.5	-3.5	-3.2	-3.5

Source: Research calculations

جدول ۲- نتایج آزمون دیکی - فولر تعمیم یافته و فیلیپس - پرون بر مقادیر تفاضل مرتبه اول لگاریتمی متغیرها

Table 2. The results of the Dickey-Fuler test generalized and Phillips-Perron on the first-order difference of logarithmic variables

Test	Augmented Dickey-Fuller (ADF)		Phillips - Perron		
	Variable	T computed	Table t statistics at 5% level	T computed	Table t statistics at 5% level
Logarithmic difference of capital per capita in industry		-4.28	-1.95	-4.24	-1.95
Logarithmic difference in per capita consumption of water in the industrial sector		-4.8	-1.94	-4.75	-1.94
Logarithmic difference per capita in manufacturing sector		-12	-1.94	-35	-1.94
Logarithmic Difference Per capita Water Use in Agriculture		-5.3	-1.94	-5.3	-1.94
Logarithmic difference per capita in the agricultural sector		-5.35	-1.94	-5.35	-1.94

Source: Research calculations

جدول ۳- نتایج برآورد پارامترهای الگو

Table 3. Model estimation parameters results

Parameter	Amount	Statistics t	Probability value
α	0.95	27	0
α_1	0.71	12	0
α_2	0.04	6	0

فوق تابع صعودی و بعد از آن نزولی است تا اینکه در نقطه $\tilde{W}_t^{T,max}$ به صفر می‌رسد. همچنین مشتق دوم این عبارت به صورت زیر است

$$\frac{\partial^2 \tilde{W}_t^h}{\partial \tilde{W}_t^{T^2}} = \left(-\frac{2m}{\tilde{W}_t^{T,max}} \right) < 0 \quad (۴۸)$$

جدول ۴- مقدار متوسط متغیرها
Table 4. Average values of variables

Variable	The average value (%)
Average water withdrawal from renewable resources	58.4
The share of domestic consumption of water withdrawal	6.4
Share of agricultural and industrial sectors from water withdrawal	52
Level of sustainability in terms of renewable resources	30
Average population growth rate	2.2
Average growth of technology industry sector	0.3
Average per capita rainfall	2/62 THOUSAND CUBIC METERS

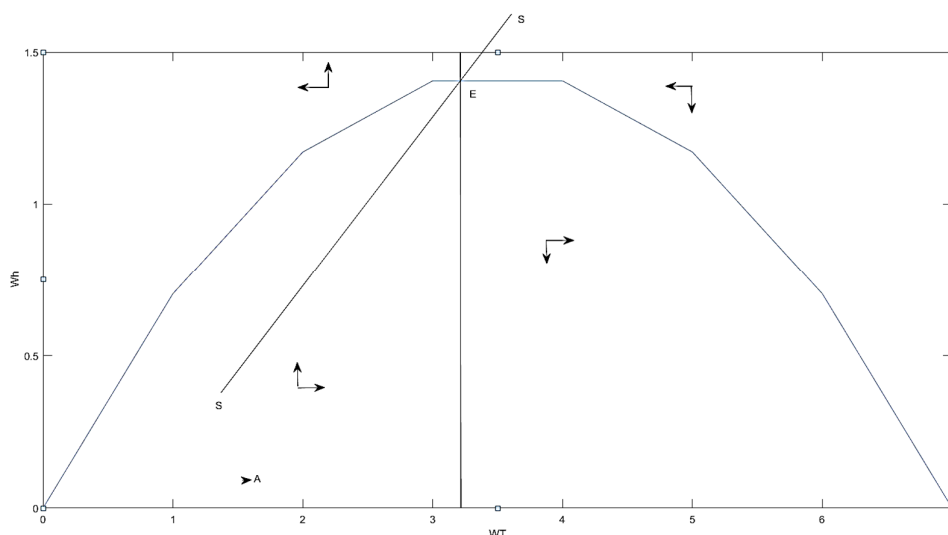


Fig. 1. Phase diagram of water resources and household water consumption

شکل ۱- نمودار فازدیگرام منابع آب و مصرف آب خانگی

می یابد. در قسمت بالایی منحنی، $\dot{W}_t^T < 0$ و در نتیجه \ddot{W}_t^T کاهش می یابد. لذا در نواحی اول و سوم، همگرایی الگو و در نواحی دوم و چهارم، واگرایی الگو مشاهده می شود.

نقطه تعادل فضای فازدیگرام به صورت نقطه E است و با توجه به نواحی همگرایی، مسیر زینی^۱ به صورت خط SS است. البته لازم به ذکر است که تمامی نقاط واقع بر نواحی اول و سوم منجر به قرار گرفتن بر مسیر زینی و رسیدن به نقطه تعادلی نمی شود و تنها آن دسته از نقاط تعادلی منجر به تعادل و قرار گرفتن بر مسیر تعادلی می شود که نقاط مربوطه به اندازه کافی به مسیر زینی SS نزدیک باشند.

لذا تقعر تابع به سمت پایین بوده و معادله ۴۵ شکلی مقعر دارد. بر این اساس نمودار فازدیگرام به صورت شکل ۱ است.

مطابق با شکل ۱، خط عمودی مبین مکان هندسی

$(\dot{W}_t^h = \frac{\partial \tilde{W}_t^h}{\partial t} = 0)$ و منحنی مقعر مبین مکان هندسی

$(\dot{W}_t^T = \frac{\partial \tilde{W}_t^T}{\partial t} = 0)$ است. لذا فضای دو بعدی شکل ۱ به چهار

ناحیه قابل تقسیم است. در سمت راست خط عمودی، با توجه به

معادله ۴۲، مقدار m کاهش یافته و لذا $\dot{W}_t^h < 0$ و در نتیجه \ddot{W}_t^h

کاهش می یابد. در سمت چپ، مقدار m افزایش یافته و لذا

$\dot{W}_t^h > 0$ و در نتیجه \ddot{W}_t^h افزایش می یابد. همچنین با توجه به معادله

۳۹، در فضای پایین منحنی، $\dot{W}_t^T > 0$ و در نتیجه \ddot{W}_t^T افزایش

¹ Saddle Path

حال حاضر میزان مصرف آب سرانه در آن در حدود ۰/۹۱ هزار مترمکعب است. این نقطه مبین آن است که فشار بر منابع آبی در بخش کشاورزی حادثتر از بخش مصرف خانوار است و رسیدن به وضعیت بی آبی در بخش کشاورزی مورد انتظار است. کاهش شدید حجم فعالیت کشاورزی در بسیاری از مناطق کشاورزی، خود مؤید نتیجه این است.

از معادله ۱۰، معادله ۵۰ حاصل می شود

$$W_t^I = \alpha_2 \frac{P_t^I}{P_{w,t}^I} Y_t^I \quad (50)$$

که سرانه مؤثر آن به صورت $\tilde{W}_t^I = \alpha_2 \frac{P_t^I}{P_{w,t}^I} \tilde{Y}_t^I$ است. از طرفی در حال حاضر سرانه مصرف مؤثر آب در بخش صنعت تقریباً برابر ۲ درصد منابع تجدیدپذیر است و بر این اساس نمودار فازدیاگرام آن به صورت شکل ۳ قابل رسم است.

نقطه C وضعیت بخش صنعتی در مصرف آب را نشان می دهد. در حال حاضر متوسط مصرف آب در بخش صنعتی در حدود ۰/۰۳ هزار مترمکعب است که باعث می شود تا مکان هندسی آن در نمودار فازدیاگرام همانند بخش خانوار باشد. لازم به ذکر است در این بخش نیز به دلیل عدم سازگاری میان منابع آبی موجود و مصرف کل، وضعیت پایداری قابل قبولی وجود ندارد.

با توجه به اینکه سطح پایداری و مسیر تعادلی مصرف آب متأثر از بارش های سالانه است، بنابراین بخش تقاضا و الگوی مصرفی آب نیز می تواند اثر قابل توجهی بر حفظ پایداری آب و ذخیره منابع موجود داشته باشد. لذا می توان با شبیه سازی اثرات مختلف سیاست های اقتصادی، این بررسی را انجام داد که تحت چه سیاست هایی می توان مصرف آب را به صورت بهینه هدایت کرد و علی رغم تصادفی بودن بارش های سالانه، پایداری آب را به همراه داشت.

۳-۱- شبیه سازی اثرات مختلف سیاست های کشاورزی و صنعت

توابع تقاضای بهینه آب در بخش های صنعت و کشاورزی در معادلات ۴ و ۱۰ آمد، که با محاسبه مقادیر سرانه مؤثر آن ها و جای گذاری در معادله ۳۹، معادله ۵۱ حاصل می شود

همانطور که از شکل ۱ مشخص است، تا نقطه ای مشخص، ارتباط میان منابع و مصرف خانوار معکوس است و این بدان معناست که به منظور حفظ منابع، کاهش مصرف سرانه ضروری است و هرچه مصرف سرانه بیشتر شود، آنگاه منابع موجود کمتر می شود. اما از نقطه ای به بعد که منابع به حد کفایت رسید، با افزایش منابع امکان مصرف بیشتر برای خانوار فراهم می شود.

قرار گرفتن در نقطه A که در ناحیه سوم قرار دارد، چند نتیجه مهم به همراه دارد. اول اینکه به دلیل فاصله داشتن نقطه مذکور از مسیر تعادلی، با الگوی مصرف موجود و همچنین با روند موجود تغییرات در منابع آبی، در طی سال های آتی کاهش بیشتر در منابع آبی و در نتیجه مصرف کمتر خانوارها مورد انتظار است، زیرا در نتیجه کاهش میزان دسترسی به منابع آبی، به تدریج ساکنان مناطق مختلف، مصرف کمتر و به صورت جیره بندی خواهند داشت و لذا سرانه آنها نیز کاهش می یابد.

با توجه به روند فوق و قرار داشتن در نقطه A، به تدریج روند پویای مصرف سرانه مؤثر خانوار و منابع سرانه مؤثر به داخل ناحیه اول کشیده می شود. در این ناحیه به تدریج با توجه به منابع آبی باقیمانده، تمامی آن صرف مصرف سرانه مؤثر خانوار شده و به تدریج حرکت مجانبی به سمت محور عمودی مشاهده می شود. در این حالت تمامی مصارف خانوار صرفاً از منابع باقیمانده تأمین شده و با توجه به روند بارش مشاهده شده، نمی توان انتظار افزایش منابع تجدیدپذیر در طول زمان را داشت. این حالت می تواند در برگزیده شرایط بی آبی و خشکسالی باشد.

می توان نمودار فازدیاگرام بالا را برای بخش صنعت و کشاورزی نیز رسم نمود؛ به طوری که محور عمودی مصرف آب در بخش کشاورزی و صنعت و محور افقی منابع باشد. از معادله ۴۹، معادله ۴۹ حاصل می شود

$$W_t^A = \alpha \frac{P_t^A}{P_{w,t}^A} Y_t^A \quad (49)$$

که سرانه مؤثر آن به صورت $\tilde{W}_t^A = \alpha \frac{P_t^A}{P_{w,t}^A} \tilde{Y}_t^A$ است؛ از طرفی در حال حاضر سرانه مصرف مؤثر آب در بخش کشاورزی تقریباً برابر ۵۰ درصد منابع تجدیدپذیر بوده و بر این اساس نمودار فازدیاگرام آن به صورت شکل ۲ قابل رسم است.

نقطه B وضعیت فعلی بخش کشاورزی در ایران است که در

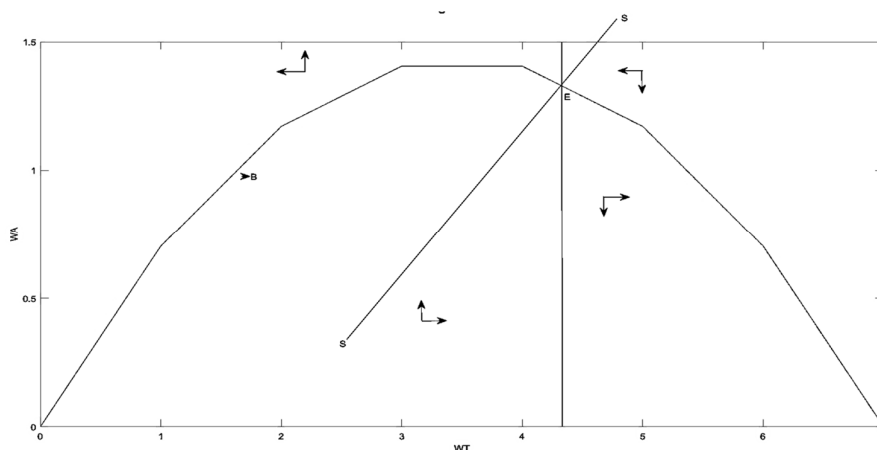


Fig. 2. Phase diagram of water resources and agricultural water consumption
 شکل ۲- نمودار فازدیگرام منابع آب و مصرف آب کشاورزی

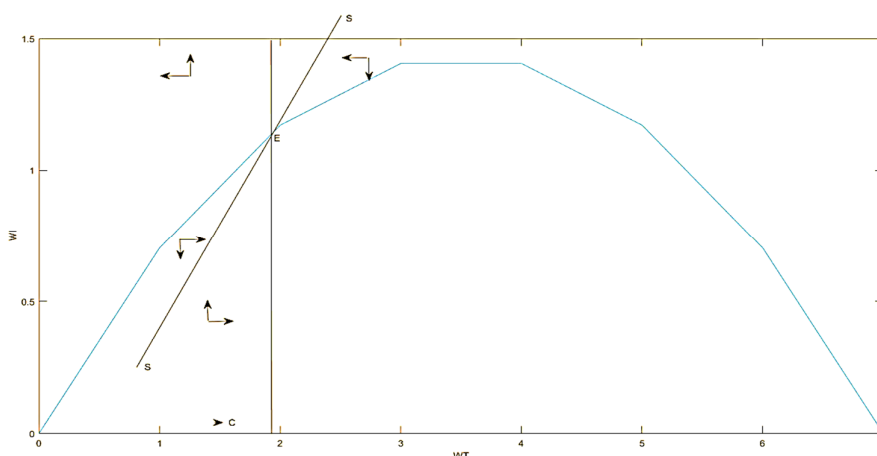


Fig. 3. Phased diagram of water resources and industrial water consumption
 شکل ۳- نمودار فازدیگرام منابع آب و مصرف آب صنعتی

تعادلی سبب می‌شود تا نه تنها در مصرف آب صرفه‌جویی شود، بلکه سطح پایداری منابع آبی نیز افزایش یابد؛ به نحوی که در این حالت نقطه وضعیت موجود A به مسیر تعادلی نزدیک‌تر شده و لذا رسیدن به نقطه تعادلی سطح پایدار امکان‌پذیرتر است. با ثابت ماندن سایر عوامل، اثر کاهش تولید محصولات کشاورزی بر بهبود وضعیت منابع آبی را می‌توان به صورت زیر نشان داد

$$\Delta \tilde{W}_t^T = -0.95 \frac{P_t^A}{P_{W,t}^A} \Delta \tilde{y}_t^A \quad (52)$$

با توجه به معادله ۵۲ به ازای هر ۱۰ درصد کاهش در

(۵۱)

$$\dot{\tilde{W}}_t^T = \left(m \tilde{W}_t^T \left(1 - \frac{\tilde{W}_t^T}{W_{t,max}^T} \right) - \alpha \frac{P_t^A}{P_{W,t}^A} \tilde{y}_t^A - \alpha_2 \frac{P_t^I}{P_{W,t}^I} \tilde{y}_t^I - \tilde{W}_t^h \right) - (g + n) \tilde{W}_t^T$$

همانطور که این معادله نشان می‌دهد، میزان تولید بخش کشاورزی و صنعتی نقش قابل توجهی در مصرف آب کشور دارند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با کنترل کاشت محصولات کشاورزی با مصرف زیاد آب، در همان سطح فناوری موجود، در نمودار فازدیگرام، شیفت به سمت راست منحنی و انتقال به چپ مسیر

کاهش یافته و افزایش منابع را به همراه دارد. اما باید این نکته را در نظر گرفت که به دلیل فاصله میان سطح قیمت کارا و سطح قیمت موجود، هر افزایش قیمتی نمی تواند منجر به کاهش مصرف و افزایش سطح منابع آب شود. در واقع سیاست گذاری مبتنی بر قیمت، احتمالاً کارایی کمتری نسبت به دو سیاست دیگر دارد زیرا علاوه بر کارایی پایین، می تواند هزینه تولید سایر محصولات کشاورزی را افزایش دهد و حتی در صورت کارآمد بودن فرایند تولیدی، هزینه های اضافی داشته باشد.

به طور مشابه، سیاست گذاری بخش صنعت به منظور کاهش مصرف آب می تواند به همین صورت باشد و همانند دو حالت بالا بر روند پویای متغیرها اثر بگذارد.

۳-۲- شبیه سازی اثرات بهبود فناوری بر مصرف سرانه آب خانوار

بر اساس معادله ۴۵، ارتباط میان مصرف سرانه مؤثر آب خانوار و سطح فناوری به صورت معکوس است. به عبارت دیگر با بهبود وضع بهره وری، مصرف سرانه مؤثر خانوار کاهش یافته و در نتیجه این تغییر، هر دو شکل ۱ و ۲ تغییر می یابد.

با افزایش بهره وری که منجر به کاهش مصرف آب سرانه مؤثر خانوار شود، در ابتدا خط عمودی به سمت راست شیفت می کند زیرا در این حالت منابع آب سرانه افزایش می یابد. با بهبود بهره وری، بر اساس معادله ۴۵ منحنی نیز به سمت بالا شیفت می کند. در این حالت، فضای ناحیه دوم که شامل مسیر تعادلی است افزایش یافته و بنابراین همسایگی های بیشتری از مسیر تعادلی را شامل می شود.

از طرفی با کاهش در مصرف سرانه مؤثر خانوار، انتظار می رود سطح منابع افزایش یافته و لذا وضعیت از نقطه A به نقطه ای تغییر می یابد که همراه با مصرف کمتر و حجم بیشتر منابع آبی است. بنابراین اگرچه مسیر تعادلی به سمت پایین انتقال یافته است، اما نقطه وضعیت موجود نیز انتقال می یابد. اینکه تا چه میزان نقطه جدید به مسیر تعادلی جدید نزدیک شود بستگی به این دارد که تفاضل حاصل از مصارف و منابع تحت سناریو جدید تا چه میزان است. قدر مسلم اگر بهبود بهره وری موجود بتواند بر مصرف سایر بخش ها اثر مثبت داشته باشد، وضعیت جدید بهتر از وضعیت قبلی بوده و به مسیر تعادلی نزدیک تر است.

محصولات کشاورزی، به میزان ۹ درصد در منابع آبی تجدیدپذیر صرفه جویی می شود.

به عبارت دیگر، در حال حاضر سرانه منابع آب تجدیدپذیر برابر ۱/۳ هزار مترمکعب است، در حالی که در وضعیت پایدار باید برابر ۳/۲ هزار متر مکعب باشد، لذا فاصله ۱/۹ هزار مترمکعبی تا وضعیت پایدار وجود دارد. بنابراین در صورتی که وضعیت منابع رو به بهبود باشد و مصرف سایر بخش های خانوار و صنعتی ثابت باقی بماند و از طرفی هدر رفت آب در تمامی بخش ها تغییری نکند به نحوی که الگوی مصرف آب ثابت باقی بماند، آنگاه حداقل به مدت ۸ سال باید سیاست محدودسازی فعالیت کشاورزی ادامه یابد تا وضعیت منابع با توجه به متوسط بارش موجود، به سمت وضعیت پایدار حرکت کند.

پارامتر α نشان دهنده سهم آب در تولید کالاهای کشاورزی است. هرچه فناوری تولید محصولات کشاورزی کارآمدتر باشد، سهم آب در تولید آنها کاهش می یابد. در حال حاضر سهم آب در تولید محصولات کشاورزی در حدود ۰/۹۵ است که رقم زیادی محسوب می شود. این عدد به طور عمده به دلیل روش های آبیاری سنتی و هدر رفت آب در طول فرایند کشاورزی است. با بهبود فناوری آبیاری و استفاده بهینه از منابع آبی، می توان انتظار افزایش پایداری منابع آبی و کاهش نرخ مصرف آب را داشت.

در حالت بهبود فناوری آبیاری، مسیر تعادلی به سمت چپ تغییر یافته و در این حالت وضعیت موجود A به مسیر تعادلی نزدیک تر می شود. از طرفی سطح پایداری آب نیز افزایش می یابد که این نشان دهنده امکان افزایش سطح مصرف سرانه مؤثر آب خانوار نیز می باشد. به عنوان مثال در صورت کاهش ۵ درصد سهم آب در بخش کشاورزی، میزان صرفه جویی در منابع آبی برابر $\tilde{y}_t^A = 0.05 \frac{P_t^A}{P_{W,t}^A}$ است و لذا در صورت برابری قیمت ها، به ازای هر واحد تولید کشاورزی، میزان افزایش منابع برابر ۰/۰۵ هزار متر مکعب است. در این حالت حدود ۱۶ سال طول می کشد تا پایداری منابع حاصل شود.

عامل دیگری که به طور مستقیم با افزایش منابع آبی ارتباط دارد، سطح قیمت عرضه آب به بخش کشاورزی است که در معادله ۴۸ ارتباط آن مشخص شده است. بر این اساس با افزایش سطح قیمت هر مترمکعب آب مصرفی بخش کشاورزی، میزان مصرف آن

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر از یک الگوی تعادل عمومی پویا، برای بررسی وضعیت مصرف و منابع آبی استفاده شد. بر این اساس الگوی حاضر شامل سه بخش خانوار، بنگاه تولیدی کشاورزی و بنگاه تولیدی صنعتی است که رفتار هر یک بر اساس مبانی اقتصاد خرد و بهینه‌سازی واحدهای اقتصادی استخراج و بررسی شد. در بخش کشاورزی عوامل تولید شامل نیروی کار و منابع آبی و در بخش صنعتی عوامل تولید شامل نیروی کار، سرمایه و آب می‌شود. بر اساس اصل حداکثرسازی سود، میزان توابع تقاضای بهینه برای هر یک از عوامل تولید از جمله آب استخراج شد. در مرحله دوم، بر اساس تابع مطلوبیت بین دوره‌ای و استفاده از روش برنامه‌ریزی پویا، توابع تقاضای بهینه خانوار برای کالاهای مصرفی نهایی و آب استخراج شد. بنابراین تقاضای برای آب از مجموع تقاضای سه بخش خانوار، صنعتی و کشاورزی تعیین می‌شود.

با مشخص شدن بخش تقاضا، لازم است عرضه سرمایه و انباشت منابع آبی نیز مشخص شود. با توجه به اینکه الگوی مورد مطالعه یک الگوی دو بخشی شامل مصرف و سرمایه‌گذاری است، لذا عرضه سرمایه از طریق معادله انباشت سرمایه تعیین می‌شود. با مشخص شدن این معادله، و با توجه به اینکه بخش صنعتی عامل تشکیل سرمایه در کشور است، روند پویایی سرمایه مشخص می‌شود. با مشخص شدن این رابطه و همچنین با در نظر گرفتن معادله اولر، مصرف بین دوره‌ای خانوار، سیستم معادلات دیفرانسیلی مصرف و سرمایه اقتصاد مشخص می‌شود. تقاضای کل آب از مجموع تقاضای مصرفی آب برای خانوار،

تولیدی و کشاورزی حاصل می‌شود و انباشت منابع آب مازاد بر سطح پایدار، از تفاضل میزان بارش سالانه و میزان برداشت توسط واحدهای اقتصادی مشخص می‌شود. لذا با در نظر گرفتن رابطه مصرفی بین دوره‌ای آب در بخش خانوار، سیستم معادلات دیفرانسیلی برای رسم نمودار فازدیگرام مشخص می‌شود. با بررسی و رسم این دو منحنی در نمودار فازدیگرام، نواحی شامل وضعیت پایدار و در نتیجه مسیر زینی تعیین شد. همچنین با در نظر گرفتن وضعیت مصرفی و منابعی آب، نقطه وضعیت فعلی بر روی منحنی تعیین و مشخص شد که در حال حاضر فاصله زیادی میان وضعیت فعلی و مسیر تعادلی وجود دارد به نحوی که در طول زمان، افزایش مصرف و کاهش منابع آبی مشاهده می‌شود.

با شبیه‌سازی سناریوهای مختلف، مشخص شد که در حال حاضر به صفر رساندن تولید محصولات آب در بخش کشاورزی، بهترین راهکار برای صرفه‌جویی منابع آب و افزایش قیمت عرضه آب به بخش کشاورزی احتمالاً کم اثرترین راه برای کنترل مصرف آب و حصول تعادل است. لازم به ذکر است که در این پژوهش به دلیل معرفی توابع نماینده برای بخش‌های مختلف اقتصادی، این محدودیت وجود داشت که مقدار دقیق میزان مصرف آب در تمامی صنایع اقتصادی به صورت جزئی در دسترس نبود و لذا تعمیم نتایج به وضعیت فعلی کشور همراه با درصدی خطا است.

۵- قدردانی

از داوران مقاله به خاطر بیان نقطه نظرات ارزشمند اصلاحی که باعث ارتقای کیفی مقاله شده است، قدردانی می‌شود.

References

- Diekert, F. K. 2010. *Lecture note on renewable resources*, ECON4925 Resource Economics, University of Oslo, Norway.
- Farajzadeh, M., Hoseiny, A. B. & Amiri, R. 2007. Water crisis analysis using GIS; case study: Neyshabour plain, Iran. *Asian Journal of Plant Science*, 6, 884-891.
- Groth, C. 2014. *Lecture notes in economic growth*, <mienmo.com>
- Habibi Davijani, M., Banihabib, M. E. & Hashemi, S. R. 2013. Optimization model for water resources allocation in agricultural, industry and services sectors using GAPS0 algorithm. *Water and Soil Journal (Agricultural Sciences and Technology)*, 27, 680-691. (In Persian).



- Hosseinzad, J., Javadi, A., Hayati, B., Pishbahar, E. & Dashti, G. 2011. Application of optimal control model for water recovery from underground resources (case study: Ajabshir plain). *Water and Agricultural Development (Agricultural Science and Technology)*, 25, 212-218. (In Persian).
- Li, C. Z. & Swain, R. B. 2016. Growth, water resilience, and sustainability: a DSGE model applied to south africa. *Water Economics and Policy*, 2, 1650022. doi: 10.1142/S2382624x16500223.
- Liu, J., Yang, H., Gosling, S. N., Kumm, M., Flörke, M., Pfister, S. et al. 2017. Water scarcity assessments in the past, present, and future. *Earth's Future*, 5, 545-559.
- Mohammadjani, E. & Yazdani, N. 2014. Analysis of the state of the water crisis in the country and its management requirements. *Quarterly Trend*, 21, 117-144. (In Persian).
- Perman, R., Ma, Y., Mcgilvray, J. & Common, M. 2003. *Natural resource and environmental economics*, Pearson Education Ltd., Edinburgh Gate, Harlow.
- Wang, Y. D. 2009. Integrated policy and planning for water and energy. *Journal of Contemporary Water Research and Education*, 142, 46-51.