



Evaluation of anthropogenic factors influencing groundwater level: Application of spatial modeling

Soorena Naderi¹ | Ali Moridi²

1. Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: Sourena.naderi94@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Water, Wastewater and Environmental Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: a_moridi@sbu.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 22 November 2023

Received in revised form

24 December 2023

Accepted 16 February 2024

Published online 14 March 2024

Keywords:

Groundwater crisis

Irrigated farming

Moran's test

Spatial econometrics

ABSTRACT

In this study, different spatial models for panel data have been estimated in order to evaluate the effects of anthropogenic factors on the depth of groundwater resources, which includes all the provinces of Iran between the years 2008 and 2019. The investigated anthropogenic factors are the population, the area under irrigated orchard farming, the area under irrigated crop farming, per capita industrial value-added, per capita services value-added and the level of non-dependency on ground water resources. The results of the spatial modeling illustrate that the first three factors, i.e., the population and the area under irrigated orchard and crop farming, are the main factors influencing the depth of groundwater resources, so that one percent increase in each of them bring about an increase in the depth of aquifers by 0.196, 0.089, and 0.062 percent, respectively. Furthermore, the current distribution of the population and irrigated agriculture activities throughout the country are not compatible with the groundwaters' conditions and the level of dependency on these resources, and the continuity of this situation will only lead to the persistence of the depletion of groundwater resources. In addition, the modeling results reveal that industrial development has a negligible contribution to the depth of aquifers, and the development of the service sector, unlike other economic activities can even help restoring groundwater resources. The level of non-dependency on groundwater resources can also help to restore these resources by reducing the pressure on groundwater resources.

Cite this article: Naderi, S., & Moridi, A. (2024). Evaluation of anthropogenic factors influencing groundwater level: Application of spatial modeling. *Journal of Water and Irrigation Management*, 14 (1), 91-109.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.368514.1117>



© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.368514.1117>



ارزیابی اثرات عوامل انسانی بر سطح آب‌های زیرزمینی: کاربرد الگوسازی فضایی

سورنا نادری^۱ | علی مریدی^۲

۱. گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: sourena.naderi94@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، فاضلاب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: a_moridi@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۰/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۲/۲۴

کلیدواژه‌ها:

اقتصادسنجی فضایی

آزمون موران

بحران آب زیرزمینی

کشاورزی آبی

در این مطالعه به منظور ارزیابی اثرات ناشی از عوامل انسانی بر عمق منابع آب زیرزمینی از برآورد الگوهای آمار فضایی پانل استفاده شده است که تمامی استان‌های ایران را در حد فاصل سال‌های ۱۳۸۷ الی ۱۳۹۸ در بر می‌گیرند. عوامل انسانی موردبررسی عبارتند از جمعیت، سطح باغات آبی، سطح زیرکشت زراعی آبی، سرانه ارزش افزوده صنعتی، سرانه ارزش افزوده خدمات و میزان عدم وابستگی به منابع آب زیرزمینی. نتایج حاصل از الگوسازی فضایی نشان می‌دهد که سه عامل اول یعنی جمعیت و سطح باغی و زراعی آبی اصلی‌ترین عوامل اثرگذار بر عمق منابع آب زیرزمینی به حساب می‌آیند، به طوری که یک درصد افزایش در هر یک از آن‌ها به ترتیب به اندازه ۰/۱۹۶، ۰/۰۸۹ و ۰/۰۶۲ درصد به افزایش عمق آبخوان‌ها منتهی می‌شود. همچنین جانمایی فعلی جمعیتی و فعالیت‌های کشاورزی آبی در اقصی نقاط کشور نیز به گونه‌ای است که با شرایط آب‌های زیرزمینی و میزان وابستگی به این منابع همخوانی ندارد و تداوم این وضعیت تنها به تداوم هرچه بیشتر تخلیه‌شدگی منابع آب زیرزمینی منتهی می‌شود. علاوه بر این نتایج الگوسازی نشان می‌دهد که توسعه صنعتی سهمی ناچیز بر عمق آبخوان‌ها دارد و توسعه بخش خدمات نیز برخلاف سایر فعالیت‌های اقتصادی می‌تواند زمینه‌ساز احیای منابع آب زیرزمینی شود. میزان عدم وابستگی به منابع آب زیرزمینی نیز با کاهش فشار بر منابع آب زیرزمینی می‌تواند به احیای این منابع کمک نماید.

استناد: نادری، سورنا و مریدی، علی (۱۴۰۳). ارزیابی اثرات عوامل انسانی بر سطح آب‌های زیرزمینی: کاربرد الگوسازی فضایی. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۴ (۱)، ۹۱-۱۰۹. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.368514.1117>



۱. مقدمه

کشور ایران به واسطه مختصات جغرافیایی‌اش در منطقه‌ای واقع شده که بیش از ۸۵ درصد آن را اقلیم‌های خشک یا نیمه‌خشک تشکیل داده‌اند و در چنین بستری هر تغییر قابل‌ملاحظه‌ای در حجم منابع آب می‌تواند به بروز مشکلات اقتصادی و اجتماعی متعددی منتهی شود (Madani, 2014). از آنجایی که در ایران بخش اعظم تقاضای آب از محل برداشت از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود (Saatsaz, 2020). بنابراین، نابودی آبخوان‌ها می‌تواند چالش بزرگی برای امنیت آبی، غذایی، اقتصادی و اجتماعی ایران به حساب بیاید. با این حال، با وجود اهمیت بالایی که منابع آب زیرزمینی در ایران دارند برداشت از آن‌ها در طول زمان به هیچ عنوان به‌طور پایدار انجام نشده و این موضوع طیف وسیعی از آبخوان‌های ایران را با سطوح بالایی از تخلیه‌شدگی مواجه کرده است (Ashraf et al., 2021). بدیهی است که در چنین شرایطی مدیریت پایدار این منابع و حل چالش‌های متعدد مرتبط به آن مستلزم داشتن درکی جامع در خصوص سهم عوامل مختلف در بروز وضع موجود است.

تا به حال مطالعات زیادی تلاش کرده‌اند تا جوانب مختلف مربوط به تغییرات سطح آب‌های زیرزمینی را موردسنجش و ارزیابی قرار بدهند. دو مطالعه Tabari et al. (2022) و Delbari et al. (2013) به اثر تغییرات وضعیت جوی بر نوسانات عمق آب زیرزمینی در استان مازندران و استان فارس پرداخته‌اند. در پژوهش دیگری توسط Bayat Varkeshi et al. (2018) اثرات خشکسالی هواشناسی بر نوسانات عمق آب زیرزمینی آبخوان کمیجان بررسی شده است. در مطالعه Zamani et al. (2018) عوامل انسانی و طبیعی مؤثر بر عمق آب‌های زیرزمینی در دشت مهران موردبررسی قرار گرفته و نشان داده شده که عوامل انسانی نقش محوری در افزایش عمق منابع آب زیرزمینی این دشت دارند. مطالعه انجام‌شده توسط Jeihouni et al. (2019) نوسانات آب زیرزمینی دشت شبستر در پی تغییر پارامترهای اقلیمی را از طریق شبکه‌های عصبی شبیه‌سازی کرده است. نتایج این مطالعه نیز همانند بسیاری دیگر از مطالعات نشان داده که نوسانات عمق منابع آب زیرزمینی تا حد زیادی ناشی از عوامل انسانی می‌باشد، اگرچه تلاشی به‌منظور شناسایی این عوامل انسانی و ارزیابی آن‌ها توسط این مطالعه به‌عمل نیامده است. در پژوهشی دیگر Babae et al. (2020) به فرونشست زمین در دشت قزوین پرداخته و افزایش چشم‌گیر عمق آب زیرزمینی در این دشت را ناشی از بهره‌برداری بیش از حد از منابع زیرزمینی دانسته است. پژوهش Ghazi et al. (2021) نیز با استفاده از چندین الگوی یادگیری ماشین نوسانات عمق منابع آب زیرزمینی را در دشت تسوج بررسی کرده است. در یکی از آخرین مطالعات انجام‌شده در این زمینه توسط Gholami et al. (2023)، از طریق الگوهای یادگیری ماشین به پیش‌بینی سطح آب‌های زیرزمینی و ارزیابی نقش عوامل انسانی و طبیعی بر آن در دشت مازندران پرداخته است. این مطالعه یکی از معدود مطالعاتی است که به‌طور کمی به ارزیابی نقش عوامل انسانی بر عمق منابع آب زیرزمینی پرداخته، اما با این حال آنچه در این مطالعه به‌عنوان عوامل انسانی موردسنجش قرار گرفته شده تنها شامل نرخ برداشت از منابع آب زیرزمینی و نزدیکی به مراکز صنعتی می‌باشد.

علاوه بر مطالعات فوق و مطالعات مشابه با آن‌ها که در مقیاس حوضه آبریز یا دشت انجام شده‌اند برخی مطالعات نیز در مقیاس ملی به وضعیت منابع آب زیرزمینی اشاره کرده‌اند. مطالعه Noori et al. (2021) به بررسی عوامل انسانی مؤثر بر افزایش عمق منابع آب زیرزمینی پرداخته و علاوه بر افزایش تعداد چاه‌های آب به عواملی نظیر احداث سدهای مخزنی (به‌واسطه پیشگیری از ورود آب به درون زمین) و سهم بالای آب زیرزمینی در تأمین تقاضای آب نیز اشاره کرده است. این مطالعه اگرچه برخی از عوامل انسانی مؤثر بر افزایش عمق منابع آب زیرزمینی را برشمرده، اما تلاشی به‌منظور کمی‌سازی اثرات آن‌ها نکرده و تنها به نام‌بردن عوامل مختلف اکتفا کرده است. مطالعه Ashraf et al. (2021) یکی دیگر از معدود مطالعاتی است که تلاش کرده تا عوامل انسانی و طبیعی اثرگذار بر منابع آب زیرزمینی را به‌طور کمی در

سطح تمامی حوضه‌های آبریز درجه دو در ایران مورد اندازه‌گیری قرار بدهد. نتایج این مطالعه به‌طور واضحی نشان می‌دهد که در مقیاس حوضه‌های آبریز عوامل طبیعی نظیر بارش و خشکسالی تنها به‌عنوان محرک‌های مقطعی می‌توانند اثرات محدودی بر شرایط کمی منابع آب زیرزمینی ایران داشته باشند و این تنها عوامل انسانی هستند که باعث روند فعلی تخلیه‌شدگی و نابودی آبخوان‌های ایران شده‌اند. با این حال، این مطالعه عوامل انسانی را تنها از طریق بررسی حجم برداشت از منابع آب زیرزمینی مورد ارزیابی قرار داده و هیچ تفکیک خاصی در تقاضاهای مختلف آب و طیف وسیع فعالیت‌های انسانی که مصرف‌کننده آب به‌حساب می‌آیند قائل نشده است. پژوهش انجام‌شده توسط Saemian *et al.* (2022) نیز به نقش توسعه کشاورزی آبی و افزایش تدریجی سهم آن در برداشت از منابع آب زیرزمینی در طول زمان به‌عنوان عوامل مؤثر بر افزایش عمق منابع آب زیرزمینی اشاره کرده اما همانند سایر مطالعات به اندازه‌گیری اثر هریک از این عوامل نپرداخته است. مطالعه دیگری نیز توسط Nouri *et al.* (2023) به بررسی حکمرانی آب در ایران پرداخته و در خصوص حکمرانی آب‌های زیرزمینی، توسعه کشاورزی آبی را اصلی‌ترین علت بیش‌برداشت منابع آب زیرزمینی معرفی کرده است. مطالعات دیگری نیز به‌طور عمده با اتکا به روش‌های کتابخانه‌ای مجموعه‌ای از عوامل انسانی و طبیعی دخیل در بحران فعلی آب در ایران را برشمرده‌اند که از میان این عوامل انسانی آن‌هایی که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم به منابع آب زیرزمینی مرتبط‌اند عبارتند از رشد جمعیت، وابستگی بالا به منابع آب زیرزمینی، کشاورزی غیرکارا، دنبال کردن هدف خودکفایی غذا و سدسازی (Madani, 2014; Madani *et al.*, 2016; Moridi, 2017; Shahi, 2019). مطالعات انجام‌شده در سایر نقاط جهان نیز مشابه با مطالعات انجام‌شده در ایران عموماً نقش عوامل انسانی نظیر فعالیت‌های کشاورزی، تأمین آب شرب و حتی استخراج نفت شیل را به‌عنوان علل اصلی نوسانات عمق منابع آب زیرزمینی در کنار عوامل طبیعی و اقلیمی موردشناسایی قرار داده‌اند (Cotterman *et al.*, 2018; He *et al.*, 2023; Jain *et al.*, 2021; Jia *et al.*, 2019; Kalu *et al.*, 2022; Panda *et al.*, 2021). نقش چشم‌گیر فعالیت‌های کشاورزی آبی به‌عنوان عامل محوری در وارد آوردن فشار بر منابع آب زیرزمینی نیز تنها محدود به ایران نیست و مطالعات مختلفی نظیر Devineni *et al.* (2022) و Kovacs and West (2016) نیز به نتایج مشابهی در خصوص فعالیت‌های کشاورزی در هند و آمریکا دست یافته‌اند.

اگرچه طیفی از عوامل انسانی مختلف که به‌طور عمده در ارتباط با کشاورزی و رشد جمعیت می‌باشند به‌عنوان عوامل انسانی مؤثر بر منابع آب زیرزمینی توسط مطالعات مختلف داخلی و خارجی مورد اشاره قرار گرفته شده‌اند، اما تا به حال کم‌تر مطالعه‌ای به نقش بالقوه فعالیت‌های خدماتی بر منابع آب زیرزمینی در ایران اشاره کرده است. این درحالی است که مطابق با یافته‌های Kovanda and Weinzettel (2017) بخش خدمات ذاتاً از شدت مصرف نهاده پایینی برخوردار است و افزایش سهم آن در اقتصاد کشورها می‌تواند به پیامدهای زیست‌محیطی مثبتی منتهی بشود و با برداشتن فشار بر منابع تولید زمینه‌ساز جداسازی رشد اقتصادی از مصرف نهاده‌های تولید نظیر آب شود (Dombi, 2019; Steger and Bleischwitz, 2011).

همان‌طور که مشاهده شد طیف وسیعی از مطالعات به این واقعیت که عمق آب‌های زیرزمینی در ایران بیش از هر چیز تابعی از فعالیت‌های انسانی می‌باشد اشاره کرده‌اند و اکثر آن‌ها نیز عواملی نظیر فعالیت‌های کشاورزی آبی و تأمین تقاضای شرب را به‌عنوان اصلی‌ترین عوامل انسانی نام برده‌اند. با این وجود، تا به حال هیچ مطالعه‌ای تلاش نکرده تا این عوامل انسانی را به‌طور کمی مورد ارزیابی و بررسی قرار بدهد و تمامی مطالعات تنها به نام‌بردن از این عوامل انسانی اکتفا کرده‌اند. مطالعاتی نظیر Ashraf *et al.* (2021) یا Gholami *et al.* (2023) نیز اگرچه رویکردی کمی در این خصوص اتخاذ کرده‌اند، اما عوامل انسانی را به متغیرهایی نظیر نرخ برداشت از منابع آب زیرزمینی تقلیل داده‌اند و تلاشی به‌منظور تفکیک کردن سهم عوامل انسانی مختلف نظیر فعالیت‌های زراعی، باغی، صنعتی، شرب، سدسازی و ... نکرده‌اند.

می‌توان حدس زد که عدم همپوشانی میان مقیاس انجام مطالعات منابع آب با مقیاس داده‌های اقتصادی و اجتماعی علت اصلی این موضوع باشد، زیرا مطالعات منابع آب اتکایشان به اطلاعات مرتبط با حوضه آبریز یا دشت می‌باشد. درحالی‌که اطلاعات اقتصادی و اجتماعی در سطح ملی یا استانی منتشر می‌شوند که هیچ ارتباط و همپوشانی مشخصی با محدوده‌های حوضه آبریز و یا دشت ندارد. این وضعیت باعث شده تا عملاً درک واضحی در خصوص نقش عوامل انسانی مختلف در وقوع شرایط وخیم فعلی منابع آب زیرزمینی ایران وجود نداشته باشد و در نتیجه سیاست‌گذاری‌های مقتضی به‌منظور احیای این منابع نیز با ابهامات متعددی روبه‌رو باشد. به‌منظور پرکردن این خلأ در این مطالعه تلاش می‌شود تا برای اولین بار با استفاده از الگوهای آماری به شناسایی عوامل انسانی مختلف و ارزیابی اثرگذاری هر یک از آن‌ها بر عمق منابع آب زیرزمینی پرداخته بشود. در همین راستا به‌منظور فائق‌آمدن بر مشکل عدم همپوشانی مرزهای حوضه آبریز با مرزهای استانی که پیش‌تر به آن اشاره شد در این مطالعه به‌جای استفاده از الگوهای آماری مرسوم از الگوهای آمار فضایی استفاده می‌شود تا بتوان به کمک آن‌ها برهمکنش منابع آب زیرزمینی در مقیاس حوضه آبریز را در شرایطی که تمامی داده‌های اقتصادی و اجتماعی در مقیاس استانی هستند در الگوسازی دخیل کرد و اثرات عوامل انسانی مختلف را با حداقل اریب ناشی از عدم همپوشانی مرزهای حوضه آبریز با مرزهای استانی تخمین زد. همچنین در این مطالعه تلاش خواهد شد تا به‌عنوان یکی از اولین مطالعات اقدام به ارزیابی نقش بخش خدمات در احیای منابع آب زیرزمینی بشود.

۲. مواد و روش‌ها

در این بخش ابتدا به مبانی و مراحل برآورد انواع الگوهای فضایی پرداخته می‌شود و سپس متغیرهای به‌کار گرفته شده در این الگوها، توضیحات مرتبط به آن‌ها و تصریح الگوهای آماری مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند.

۲.۱. الگوسازی فضایی

به‌منظور برازش الگوهای رگرسیون فضایی ابتدا لازم است تا چگونگی ارتباط میان نقاط مختلف فضایی (در این مطالعه نقاط فضایی همان استان‌ها هستند) با یکدیگر از طریق تشکیل ماتریس وزن فضایی تعیین شود. پس از تشکیل شدن این ماتریس وجود و یا عدم وجود رابطه همبستگی فضایی از طریق آزمون I موران^۱ بررسی می‌شود و در صورتی که وجود همبستگی فضایی توسط این آزمون تأیید شود آنگاه می‌توان اقدام به برآورد الگوهای رگرسیون فضایی کرد.

۲.۱.۱. ماتریس وزن فضایی

ماتریس وزن فضایی ماتریسی مربعی با قطر صفر است که سطر و ستون‌های آن بیانگر استان‌های مختلف می‌باشند و تلاقی این سطر و ستون‌ها وضعیت همبستگی فضایی میان دو استان موجود در سطر و ستون را نشان می‌دهد. از آنجایی که تخمین اثرات فضایی در این مطالعه در راستای حذف اریب ناشی از الگوسازی در مقیاسی غیر از مقیاس حوضه آبریز انجام می‌شود، بنابراین ماتریس وزن فضایی می‌باید به گونه‌ای ساخته شود که برهمکنش سطح آب زیرزمینی استان‌ها را با توجه به محدوده حوضه‌های آبریز مشخص نماید. به این منظور ماتریس وزن فضایی با توجه به دو فرض زیر ساخته خواهد شد:

۱. همبستگی فضایی تنها در میان استان‌هایی وجود دارد که بر روی حوضه‌های آبریز مشترکی قرار گرفته‌اند.

۲. در میان استان‌هایی که بر روی حوضه‌های آبریز مشترکی واقع شده‌اند تنها آن استان‌هایی با یکدیگر همبستگی فضایی دارند که با یکدیگر دارای مرز مشترک هستند.

در شکل (۱) نقشه همپوشانی استان‌ها با محدوده حوضه‌های آبریز درجه یک و دو آورده شده است. با توجه به این که حوضه‌های درجه دو در درون حوضه‌های درجه یک محاط هستند. بنابراین عملاً تفاوتی ندارد که حوضه‌های درجه یک و یا حوضه‌های درجه دو به‌عنوان ملاک ساخت ماتریس وزن فضایی در نظر گرفته شوند و نتیجه نهایی در هر دو حالت یکی خواهد بود. از شکل (۱) مشخص است که تقریباً تمامی مساحت برخی از استان‌ها تقریباً آنها در یک حوضه آبریز درجه یک قرار گرفته است. در چنین شرایطی این استان‌ها در ماتریس وزن فضایی با تمامی استان‌های هم‌جوارشان که در حوضه آبریز مشترکی قرار گرفته‌اند، همبستگی فضایی خواهند داشت. به‌عنوان مثال در ماتریس وزن فضایی، استان مازندران با دو استان گلستان و گیلان همبستگی فضایی دارد اما با استان سمنان همبستگی فضایی ندارد، زیرا اگرچه سمنان و مازندران دارای مرز مشترک هستند اما در حوضه آبریز مشترکی واقع نشده‌اند. از سوی دیگر برخی استان‌ها نظیر فارس بخش قابل‌توجهی از مساحتشان در محدوده بیش‌تر از یک حوضه آبریز درجه یک قرار گرفته است که در این موارد استان موردنظر میان تمامی آن حوضه‌های آبریز مشترک فرض شده است. به‌عنوان مثال در خصوص استان فارس که نیمی از آن در حوضه فلات مرکزی و نیم دیگر آن در حوضه دریای عمان قرار دارد، فرض شده که با تمام استان‌های مجاورش - چه در حوضه دریای عمان و چه در حوضه فلات مرکزی- ارتباط فضایی دارد. برخی دیگر از استان‌ها نظیر استان قزوین نیز وجود دارند که بخش عمده‌ای از آن‌ها در یک حوضه و بخش محدودی از آن‌ها نیز در حوضه دیگری قرار گرفته است. در خصوص این استان‌ها تمام حالت‌های ممکن برای ایجاد ماتریس وزن فضایی موردبررسی قرار خواهند گرفت و پس از تحلیل حساسیت در نهایت آن حالتی که در آن الگوی فضایی از بالاترین سطح معنی‌داری و انطباق با مبانی نظری برخوردار است به‌عنوان ماتریس نهایی انتخاب می‌شود.

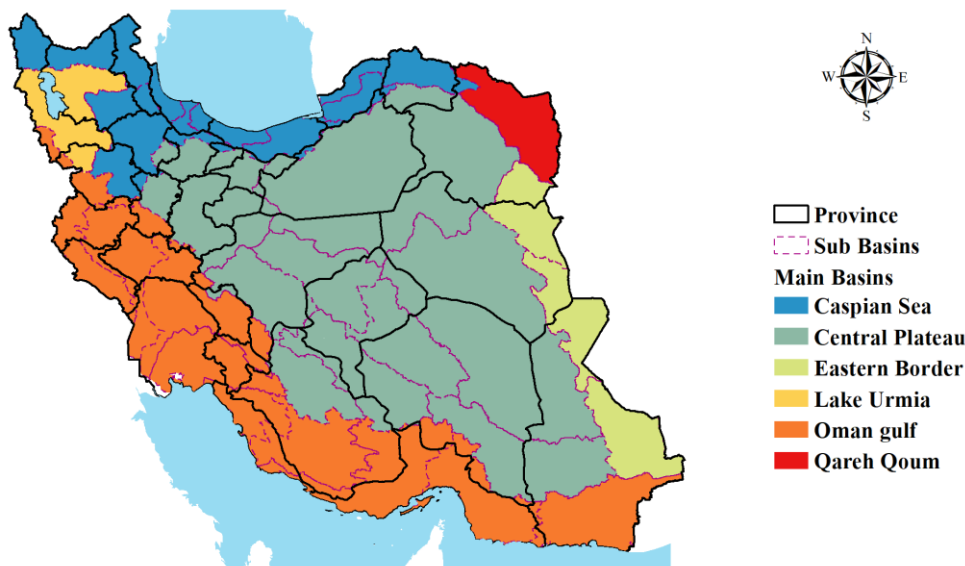


Figure 1. Map of Iran's main basins, sub basins and their overlap with provinces' borders

۲.۱.۲. آزمون همبستگی فضایی I موران

به‌منظور سنجش همبستگی میان متغیر x در نقطه i با متغیر x در نقطه j یکی از مرسوم‌ترین روش‌ها استفاده از آزمون I موران می‌باشد. با این فرض که دو نقطه i و j در ماتریس وزن فضایی دارای وزنی معادل w_{ij} می‌باشند و تعداد کل نقاط در فضا برابر با P است آماره آزمون موران از طریق رابطه (۱) قابل محاسبه می‌باشد (Liu and Song, 2020):

$$I = \frac{P \sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^P w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^P w_{ij} \sum_{i=1}^P (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

این آماره می‌تواند در دامنه $[-1, 1]$ نوسان کند و مقادیر مثبت، منفی و صفر آن به ترتیب بیانگر همبستگی فضایی مثبت، منفی و عدم وجود همبستگی فضایی می‌باشند (Liu and Song, 2020). لازم به ذکر است که آزمون همبستگی فضایی I موران نشان‌دهنده رابطه علیت نمی‌باشد و تنها حالت خاصی از رابطه همبستگی را نشان می‌دهد. در این آزمون فرض صفر بیانگر عدم وجود همبستگی فضایی می‌باشد و آماره Z به منظور آزمون معنی‌داری آن از طریق رابطه (۲) قابل محاسبه است (Liu and Song, 2020; Li et al., 2007). در این رابطه $E[I]$ و $\text{Var}[I]$ به ترتیب امید ریاضی و واریانس I می‌باشند:

$$Z_I = \frac{I - E[I]}{\sqrt{\text{Var}[I]}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

۳.۱.۲. الگوسازی فضایی

ماهیت داده‌ها در این مطالعه از نوع پانل است به این معنی که ساختار داده مشتمل بر تعدادی مقطع می‌باشد (هر مقطع یک استان است) که هرکدام دارای یک سری زمانی از متغیرهای مختلف هستند. یکی از الگوهای فضایی قابل پیاده‌سازی بر روی داده‌های پانل الگوی خودرگرسیون فضایی^۳ (SAR) است که در آن مقدار متغیر وابسته در هر نقطه از فضا تابعی از مقدار متغیر وابسته در نقاط دیگر موجود در فضا است. فرم کلی الگوی SAR در رابطه (۳) آورده شده است (Elhorst, 2014):

$$Y = WY\rho + \alpha + X\beta + \delta^{(i)} + \varepsilon \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در این رابطه، W ماتریس وزن فضایی، Y بردار متغیر وابسته، X ماتریس متغیرهای توضیحی، ρ یا ρ ضریب اثر فضایی Y بر سایر نقاط فضایی براساس ارتباطات تعریف شده در ماتریس وزن فضایی، β بردار ضرایب متغیرهای مستقل و کنترلی، α برداری متشکل از عدد یک، α ضریب عرض از مبدأ و ε جزء خطای تصادفی می‌باشد. $\delta^{(i)}$ نیز اثرات ثابت مقطعی است که در الگوهای داده‌های تابلویی وظیفه کنترل کردن ناهمگنی‌های غیرقابل مشاهده موجود در بین مقاطع را بر عهده دارد و در ادامه توضیحات پیش‌تری در خصوص آن داده خواهد شد.

حال می‌توان SAR را تعمیم داد، به طوری که علاوه بر Y ، جملات خطا نیز دارای اثرات فضایی باشند. در این صورت الگوی SAR به الگوی خود همبسته فضایی^۴ (SAC)، تبدیل می‌شود که شکل کلی آن در رابطه (۴) آورده شده است و در آن u جملات خطا در سایر نقاط موجود در فضا و λ (یا λ) ضریب فضایی u می‌باشد (LeSage and Pace, 2009):

$$Y = WY\rho + \alpha + X\beta + \delta^{(i)} + e ; e = \lambda Wu + \varepsilon \quad \text{رابطه (۴)}$$

در نهایت اگر SAR را طوری تعمیم دهیم که در آن Y در هر نقطه هم تابعی از Y و هم تابعی از X در سایر نقاط فضایی باشد آنگاه الگوی دوربین فضایی^۵ (SDM) ایجاد می‌شود که شکل کلی آن در رابطه (۵) آورده شده است. در رابطه (۵)، θ بردار ضرایب فضایی X می‌باشد و بیانگر میزان تغییر در Y در پی یک واحد تغییر در X در سایر نقاط می‌باشد (Elhorst, 2014).

$$Y = WY\delta + \alpha + X\beta + WX\theta + \delta^{(i)} + \varepsilon \quad \text{رابطه (۵)}$$

با توجه به این که دو الگوی SDM و SAC هریک به نوعی حالت تعمیم‌یافته‌ای از SAR به حساب می‌آیند. برقراری

هر یک از دو فرض $\theta = 0$ یا $\lambda = 0$ الگوی SDM و SAC را به الگوی SAR تبدیل می‌کند که این یعنی دو الگوی SDM و SAC الگوهای آشیانه‌ای برای SAR به حساب می‌آیند (Elhorst, 2014) و با توجه به این موضوع یکی از روش‌های تشخیص الگوی برتر از میان این الگوها انجام آزمون نسبت راست‌نمایی^۵ با فرض صفر آشیانه‌ای بودن SDM و SAC برای SAR است. بدیهی است که در آزمون نسبت راست‌نمایی اگر فرض صفر پذیرفته شود عملاً الگوی SAR موضوعیت خود را به‌عنوان الگویی مستقل از دست می‌دهند و تنها یکی از دو الگوی SDM و SAC برای مقایسه باقی می‌مانند. در همین راستا در این مطالعه انتخاب الگوی برتر ابتدا با توجه به آزمون راست‌نمایی و سپس با توجه به انطباق نتایج هر الگو با مبانی نظری و وضعیت معیارهای آماری نظیر آماره‌های اطلاعات^۶ و تعداد ضرایب معنی‌دار انجام می‌شود (در این مطالعه آماره اطلاعات بیزین^۷ مورد استفاده قرار می‌گیرد که فارغ از جوانب آماری اش هرچه کوچک‌تر و یا منفی‌تر باشد بیانگر برتری الگو می‌باشد). همچنین لازم به ذکر است که در این مطالعه به‌منظور برآورد الگوهای فضایی از روش شبه حداکثر راست‌نمایی^۸ استفاده می‌شود که در آن به‌جای حداکثرسازی لگاریتم تابع راست‌نمایی اقدام به حداکثرسازی حالتی تقلیل یافته از آن می‌شود که برخلاف روش حداکثر راست‌نمایی مقید به نرمال بودن توزیع جملات خطا نیست (Elhorst, 2014). ماتریس واریانس-کواریانس ضرایب فضایی نیز به‌جای روش مرسوم از طریق روش مستحکم با خوشه‌بندی بر مبنای مقاطع استانی مورد برآورد قرار می‌گیرد تا بدین ترتیب از بروز هرگونه اریب در نتایج الگوهای رگرسیونی در پی احتمال وجود ناهمسانی واریانس در جملات خطا پیشگیری شود (Belotti *et al.*, 2017; Xu and Wang, 2017; Zhou *et al.*, 2023).

موضوع مهم دیگری که در برآورد الگوهای داده‌های پانل اغلب مورد توجه قرار می‌گیرد روش دخیل کردن ناهمگنی مقاطع در الگوسازی می‌باشد (منظور از ناهمگنی مقاطع تفاوت‌های بنیادینی است که استان‌ها با یکدیگر دارند؛ به‌عنوان مثال، می‌دانیم که دو استان اصفهان و گیلان تفاوت‌های ماهیتی زیادی با یکدیگر دارند و الزامیست تا این تفاوت‌ها یا ناهمگنی‌ها در الگوسازی دخیل شوند). در ادبیات الگوهای پانل اصلی‌ترین روش‌های این کار عبارتند از دو روش اثرات ثابت^۹ و اثرات تصادفی^{۱۰}. در روش اثرات ثابت فرض می‌شود که تفاوت میان مقاطع مختلف در طول زمان ثابت و ناشی از عوامل غیرقابل مشاهده‌ای است که با متغیرهای مستقل همبسته می‌باشند و اثر آن‌ها از طریق متغیرهای موهومی که هر یک از مقاطع را نمایندگی می‌کنند قابل کنترل شدن می‌باشد (منظور متغیرهای موهومی است که به تعداد مقاطع ساخته می‌شوند و برای هر مقطع خاص برابر با یک و برای سایر مقاطع برابر با صفر هستند) (Baltagi, 2021). در سوی دیگر روش اثرات تصادفی فرض می‌کند تفاوت‌های موجود در میان مقاطع غیرقابل مشاهده و غیرهمبسته با متغیرهای توضیحی است و در نتیجه نمی‌توان آن را از طریق متغیرهای موهومی کنترل کرد و دخیل شدن این ناهمگنی‌ها می‌باید از طریق اضافه کردن یک جزء تصادفی ثابت در زمان به جمله خطای الگوی رگرسیونی انجام شود (Baltagi, 2021). در این مطالعه چون تمامی استان‌های ایران مورد بررسی قرار می‌گیرند و عملاً نمونه تمامی جامعه را در برمی‌گیرد، بنابراین ماهیت ناهمگنی‌های میان استان‌ها از حالت تصادفی به حالت ثابت تبدیل می‌شود و در نتیجه الگوسازی ناهمگنی‌های میان استان‌ها می‌بایست از روش اثرات ثابت انجام شود (Anselin, 1988; Elhorst, 2014). در همین راستا، غیر از الگوی SAC که تنها می‌باید از طریق اثرات ثابت برآورد شود سایر الگوهای فضایی موجود در روابط (۳) تا (۵) نیز با فرض ارجح بودن الگوی اثرات ثابت ارائه شدند و جزء $\delta^{(i)}$ در روابط (۳) تا (۵) نیز بیانگر ماتریس متغیرهای موهومی اثرات ثابت استانی بوده است. با این حال، در اینجا به‌منظور کسب اطمینان از برتری روش اثرات ثابت بر روش اثرات تصادفی از آزمون هاسمن^{۱۱} با فرض صفر کارآبودن ضرایب اثرات تصادفی نیز استفاده خواهد شد که حالت تعمیم یافته آن به‌منظور پیاده‌سازی بر روی الگوهای فضایی توسط Belotti *et al.* (2017) ارائه شده است.

۲.۲. متغیرها و تصریح الگوی رگرسیونی

۲.۲.۱. متغیرهای توضیحی و وابسته

متغیرهای وابسته و توضیحی که در برآورد الگوهای فضایی مورد استفاده قرار گرفته شده‌اند به همراه توضیحات، واحد اندازه‌گیری و مأخذشان در جدول (۱) آورده شده‌اند. متغیر وابسته سطح آب‌های زیرزمینی (یا به اختصار GWLevel) می‌باشد که در واقع میانگین تمامی مشاهدات انجام‌شده از سطح آب زیرزمینی در محدوده هر یک از استان‌ها می‌باشد که در زمان‌های مختلف در طول هر سال توسط شرکت مدیریت منابع آب ایران ثبت و گزارش شده است. این متغیر وابسته بر روی مجموعه‌ای از متغیرهای توضیحی برازش می‌شود که در ادامه به بررسی و تشریح هر یک از آن‌ها پرداخته خواهد شد.

Table 1. Variables used in this article

Variable	Symbol	Description	Unit	Source ¹
Groundwater level	GWLevel	Annual average of groundwater level in each province	meter	WRMC
Population	POP	Total number of people	People	SCI
Area under irrigated crop farming	Crop	Total area under irrigated crop farming.	Acre	MAJ
Area under irrigated orchards	Orchard	Total area under irrigated orchards.	Acre	MAJ
Per capita industrial value added	IndPC	Per capita value added of industrial sector (constant 2011)	Rials	SCI
Per capita service value added	ServicePC	Total per capita value added minus per capita value added created by agriculture, industry and mining sector (Constant 2011)	Rials	SCI
Groundwater dependency	GWdep	Total volume of water which is discharged from dams to be used in agriculture, industry, domestic usages and environment (water which has been discharged for purpose of power generation and flood control is excluded) divided by total groundwater withdrawal. This variable is a proxy for groundwater dependency.	Unitless	SCI
Precipitation	Precip	Average precipitation height	mm	SCI

1. WRMC, SCI and MJ are Iran's Water Resources Management Company, Statistical Center of Iran and Ministry of Agriculture Jihad respectively.

۱- سطح زیرکشت اراضی زراعی آبی (Crop) و سطح باغات آبی (Orchard): با توجه به نقش محوری فعالیت‌های کشاورزی در برداشت از منابع آب زیرزمینی ایران سطح زیر کشت اراضی زراعی آبی و سطح باغات آبی با هدف ارزیابی آثار ناشی از توسعه این فعالیت‌ها در الگوهای رگرسیونی فضایی قرار خواهند گرفت.

۲- سرانه ارزش افزوده بخش‌های اقتصادی: علاوه بر فعالیت‌های کشاورزی سایر فعالیت‌های اقتصادی نیز ممکن است بر سطح منابع آب زیرزمینی اثرگذار باشند. به منظور سنجش این اثرات دو متغیر سرانه ارزش افزوده صنعت (IndPC) و سرانه ارزش افزوده خدمات (ServicePC) نیز وارد الگوهای رگرسیونی خواهند شد. لازم به ذکر است که متغیر سرانه ارزش افزوده خدمات از کم کردن کل سرانه ارزش افزوده از سرانه ارزش افزوده کشاورزی، صنعت و معدن به دست آمده است. هم‌چنین به منظور حذف اثر تورم از این دو متغیر از شاخص‌های قیمت استانی با سال پایه‌ی ۱۳۹۰ استفاده خواهد شد.

۳- جمعیت (POP): با توجه به نقش مهم جمعیت در خلق تقاضا برای آب متغیر جمعیت نیز به عنوان یکی دیگر از متغیرهای مستقل درون الگوی رگرسیونی قرار داده خواهد شد.

۴- میزان عدم وابستگی به منابع آب زیرزمینی (GWdep): از آنجایی که کاهش اتکا بر منابع آب زیرزمینی به منظور تأمین تقاضای آب می‌تواند یک عامل تأثیرگذار در کم کردن فشار وارده بر منابع آب زیرزمینی باشد، بنابراین متغیر GWdep به منظور ارزیابی این اثر در الگوی رگرسیونی قرار خواهد گرفت. این متغیر از تقسیم آب عرضه‌شده توسط سدهای مخزنی وزارت نیرو بر کل آب برداشت‌شده از منابع آب زیرزمینی مورد محاسبه قرار می‌گیرد. در اینجا منظور از آب عرضه‌شده توسط سدهای مخزنی تنها آن حجمی از آب است که با هدف مصرف در بخش کشاورزی، صنعت، شرب و یا محیط زیست از مخزن سدهای تحت کنترل وزارت نیرو رها می‌شود و سایر سرریزها و خروجی‌های این سدها که عموماً مربوط به نیروگاه‌های برقی و یا اهداف کنترل سیلاب می‌باشند در این متغیر لحاظ نمی‌شوند. سدهای تحت

مدیریت وزارت جهاد کشاورزی نیز به واسطه نبودن داده و سهم اندک‌شان در تأمین آب سطحی در این متغیر لحاظ نمی‌شوند. سایر منابع تأمین آب نظیر برداشت‌های آزاد از رودخانه‌ها و انهار، خطوط انتقال آب بین حوضه‌ای و آب‌های نامتعارف نیز به واسطه فقدان اطلاعات استانی با تواتر سالیانه در محاسبه این متغیر دخیل نمی‌شوند، اگرچه سهم این منابع تأمین آب نیز در برابر منابع آب زیرزمینی و سدهای مخزنی اندک و در اکثر موارد قابل چشم‌پوشی است. در استان‌هایی نظیر قزوین که فاقد سد مخزنی هستند مقدار این متغیر برابر با صفر در نظر گرفته شده است.

۷- ارتفاع بارش سالیانه (Precip): اگرچه هدف اصلی این مطالعه بررسی آثار عوامل انسانی بر عمق آب‌های زیرزمینی است، اما عدم توجه به عوامل طبیعی می‌تواند به اریب‌شدن نتایج رگرسیونی منتهی شود. در نتیجه با توجه به نقشی که نرولات جوئی می‌تواند بر نوسانات آب زیرزمینی ایفا کند این متغیر در الگو گنجانده شده تا اثرات ناشی از آن را کنترل نماید.

در این مطالعه تمامی ۳۱ استان ایران در طی سال‌های ۱۳۸۷-۱۳۹۸ مورد بررسی قرار خواهند گرفت، اما از آنجایی که استان البرز پس از سال ۱۳۹۰ تشکیل شده و با توجه به این که در الگوهای رگرسیون فضایی اطلاعات تمامی مقاطع (استان‌ها) می‌باید در بازه زمانی مشترکی وجود داشته باشند، بنابراین در این مطالعه در سراسر بازه مورد بررسی دو استان البرز و تهران به عنوان یک استان واحد به نام استان "تهران و البرز" با یکدیگر تلفیق شده‌اند. مجموعاً با احتساب ۳۰ استان و ۱۱ دوره زمانی تعداد کل مشاهدات به کار گرفته شده برابر با ۳۶۰ می‌باشد.

علاوه بر متغیرهای توضیحی ذکر شده، سه متغیر کنترلی نیز در الگوهای رگرسیونی قرار داده خواهند شد. متغیرهای کنترلی متغیرهایی هستند که سنجش اثراتشان جزو اهداف پژوهش نمی‌باشد و ضرایب برآوردی‌شان نیز ممکن است تفسیر ویژه‌ای نداشته باشد. با این حال، در الگوی رگرسیونی قرار می‌گیرند تا اثرات ناشی از وقوع برخی عوامل اثرگذار بر متغیر وابسته را کنترل نمایند زیرا در صورت کنترل‌نشدن این اثرات احتمال اریب‌شدن نتایج وجود دارد. در این مطالعه تمامی متغیرهای کنترلی ماهیت متغیر موهومی^{۱۱} دارند. اولین متغیر کنترلی مربوط به وقوع خشکسالی فراگیر در سال آبی ۱۳۸۷-۱۳۸۶ می‌باشد. دومین متغیر کنترلی مربوط به تشکیل استان البرز در سال‌های پس از ۱۳۹۰ است که برای مقطع "تهران و البرز" کنترل شده است. شکست ساختاری شدیدی نیز در آمار مصرف آب زیرزمینی استان لرستان در سال‌های پس از ۱۳۹۱ وجود دارد از طریق یک متغیر موهومی کنترل شده است و در صورت کنترل‌نشدن می‌تواند به طور مستقیم از طریق متغیر GWdep به منحرف‌شدن الگوی رگرسیونی منتهی می‌شود.

۲.۲.۲. تصریح الگوی رگرسیونی

در این مطالعه به منظور داشتن درک بهتر از اثر متغیرهای توضیحی بر متغیر وابسته، تمامی متغیرها به شکل لگاریتمی در الگو قرار خواهند گرفت و تنها متغیر GWdep به شکل غیرلگاریتمی وارد الگو می‌شود که علت غیرلگاریتمی بودن آن وجود مقادیر صفر در این متغیر است. شکل کلی الگوی مورد برآورد بدون متغیرهای کنترلی به صورت رابطه (۶) می‌باشد:

$$\ln \text{GWLevel} = \alpha + \beta_1 \times \ln \text{Pop} + \beta_2 \times \ln \text{Crop} + \beta_3 \times \ln \text{Orchard} + \beta_4 \times \ln \text{Ind} + \beta_5 \times \ln \text{Service} + \beta_6 \times \text{GWdep} + \beta_7 \times \ln \text{Precip} + \varepsilon \quad (\text{رابطه } ۶)$$

در رابطه (۶)، علامت \ln نشان‌دهنده لگاریتم طبیعی، β ضرایب رگرسیونی و ε جزء خطای تصادفی است. هم‌چنین تمامی متغیرهای توضیحی که ماهیت لگاریتمی دارند ضریب‌شان مفهوم کشش را منتقل می‌کند به این معنی اگر متغیر توضیحی یک درصد تغییر نماید، با فرض ثابت بودن تمامی عوامل متغیر وابسته به اندازه β درصد تغییر می‌کند و جهت این تغییر با توجه به علامت β مشخص می‌شود. در خصوص متغیر غیرلگاریتمی GWdep نیز ضریب رگرسیون نشان‌دهنده این است که با فرض ثبات تمام عوامل به‌زای یک واحد تغییر در GWdep مقدار متغیر وابسته به اندازه β درصد تغییر می‌کند.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. مروری بر داده‌ها و وضع موجود

اطلاعات آمار توصیفی متغیرهای به‌کارگرفته‌شده در الگوهای رگرسیون فضایی در جدول (۲) آورده شده‌اند و روند تغییرات هر یک از این متغیرها در مقیاس ملی در شکل (۲) آورده شده است. از نمودار A در شکل (۲) می‌توان مشاهده کرد که عمق منابع آب زیرزمینی در بازه ۱۳۹۸-۱۳۸۶ از نزدیک به ۲۸ متر به حدود ۳۳ متر رسیده است. مطابق با نمودار H از شکل (۲) در همین بازه زمانی جمعیت با شیب تقریباً ثابتی از نزدیک به ۷۲ میلیون نفر به بالغ بر ۸۲ میلیون نفر افزایش پیدا کرده است. نکته مهم دیگری که از بررسی نمودارها C و D در شکل (۲) مشخص است افزایش کل سطح زیر کشت آبی از کمی بیش‌تر از هشت میلیون هکتار به بالغ بر هشت میلیون و هفتصد هزار هکتار می‌باشد که این افزایش سطح زیرکشت با جانشین شدن تدریجی فعالیت‌های زراعی توسط فعالیت‌های باغی همراه بوده است، زیرا سطح زیر کشت زراعت آبی از سال ۱۳۹۱ روندی نزولی را طی کرده و تنها هنگام ترسالی سال ۱۳۹۸ با افزایش روبه‌رو شده، اما در عوض سطح باغات آبی به‌طور تقریباً پیوسته‌ای از سال ۱۳۸۷ رو به افزایش بوده است. مطابق نمودار G از شکل (۲) میزان عدم وابستگی به منابع آب زیرزمینی نیز تقریباً به شکل پیوسته روندی صعودی را طی کرده که احتمالاً ناشی از توسعه طرح‌های ملی سدسازی و خشک‌شدن چاه‌های آب زیرزمینی به‌طور هم‌زمان بوده است. براساس نمودار E از شکل (۲) سرانه ارزش افزوده در بخش صنعت روندی نسبتاً صعودی را در بازه زمانی موردبررسی طی کرده است که این روند صعودی با نوسانات ناشی از ادوار تجاری و مسائل سیاسی همراه بوده است. با این حال، نوسانات سرانه ارزش افزوده‌ی صنعتی در برابر نوسانات نسبتاً شدید موجود در سرانه ارزش افزوده بخش خدمات که در نمودار F آورده شده است ناچیز به حساب می‌آید و بخش خدمات واکنش‌های به مراتب شدیدتری به تحولات سیاسی و اقتصادی نشان داده است.

Table 2. Descriptive statistics of variables

Variable	Average	SD	Min	Max	CV
GWLevel	30.34	16.688	2.54	64.07	1.818
Pop	2,561,689	2,696,335.812	544,816	16,672,000	0.950
Crop	207,258	177324.6.587	27,675	966,673	1.168
Orchard	76,564	76,802.196	4407	394,718	0.996
IndPC	11,974,757	12,552,141	1,148,738	89,216,193	1.05
ServicePC	44,204,212	34,033,006	9,945,670	312,196,890	0.77
GWdep	0.594	1.959	0.00	13.98	0.030
Precip	297.93	196.088	23.70	1231.13	1.519

پهنه‌بندی مقادیر متوسط متغیرهای وابسته و توضیحی در میان استان‌های ایران در شکل (۳) آورده شده‌اند. با توجه به نقشه A در شکل (۳) و بدون انجام آزمون موران نیز می‌توان سطوحی از همبستگی فضایی در میان استان‌ها را مشاهده کرد به‌طوری‌که استان‌های واقع در فلات مرکزی از بیش‌ترین عمق منابع آب زیرزمینی برخوردار هستند و پس از آن استان‌های واقع در حوضه آبریز دریای عمان - بالادست استان‌های موجود در مرز غربی - قرار دارند. استان‌های موجود در حوضه آبریز دریای خزر نیز از کم‌ترین عمق آب‌های زیرزمینی برخوردار هستند.

همان‌طور که از نقشه‌های A، B، C و H در شکل (۳) مشخص است، غیر از استان خوزستان سایر استان‌های دارای بالاترین سطوح زیرکشت آبی که عبارتند از فارس، کرمان و خراسان رضوی همگی دارای منابع آب زیرزمینی نسبتاً عمیق‌تری نسبت به سایر استان‌ها هستند و جزو استان‌های با بارش متوسط و متوسط رو به پایین به حساب می‌آیند و این بیانگر جانمایی اشتباه در توسعه بخشیدن به فعالیت‌های کشاورزی آبی در ایران می‌باشد. هم‌چنین مطابق با نقشه D در شکل (۳) می‌توان دید که غیر از استان خوزستان سایر استان‌های قطب زراعی و باغی آبی همگی از وابستگی نسبتاً بالایی به منابع آب زیرزمینی

برخوردارند و در نتیجه می‌توان انتظار داشت که در این استان‌ها فشار فعالیت‌های وسیع کشاورزی آبی تا حد بسیار زیادی به منابع آب زیرزمینی وارد شود. این موضوع در خصوص جمعیت نیز صدق می‌کند و با توجه به نقشه G مراکز اصلی جمعیتی ایران نیز به‌طور عمده اتکای بالایی به منابع آب زیرزمینی دارند.

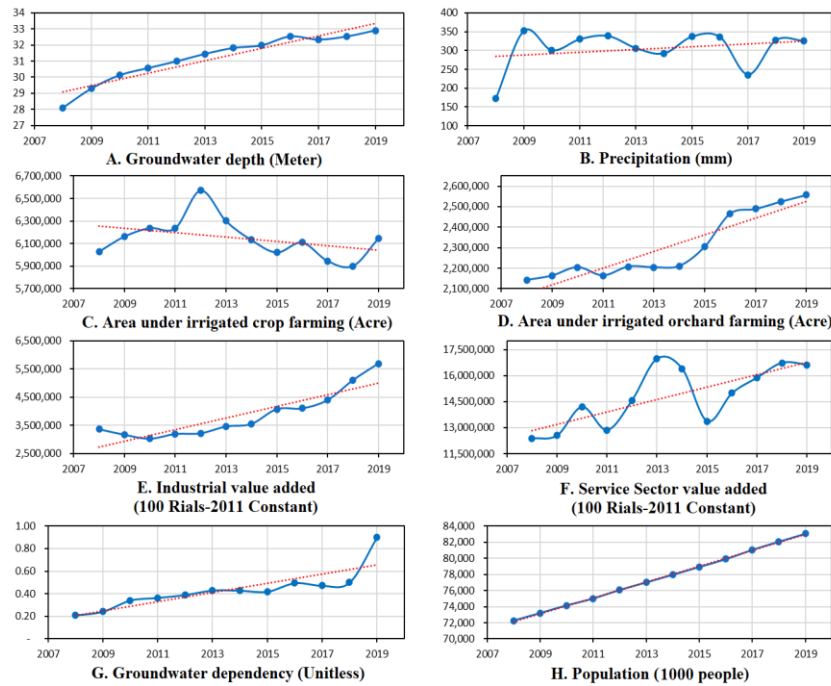


Figure 2. Dependent and independent variables in 2008-2019 period (Countrywide statistics in charts A, B, G and H are averages of all provincial statistics and in charts C, D, E and F are sums of all provincial statistics)

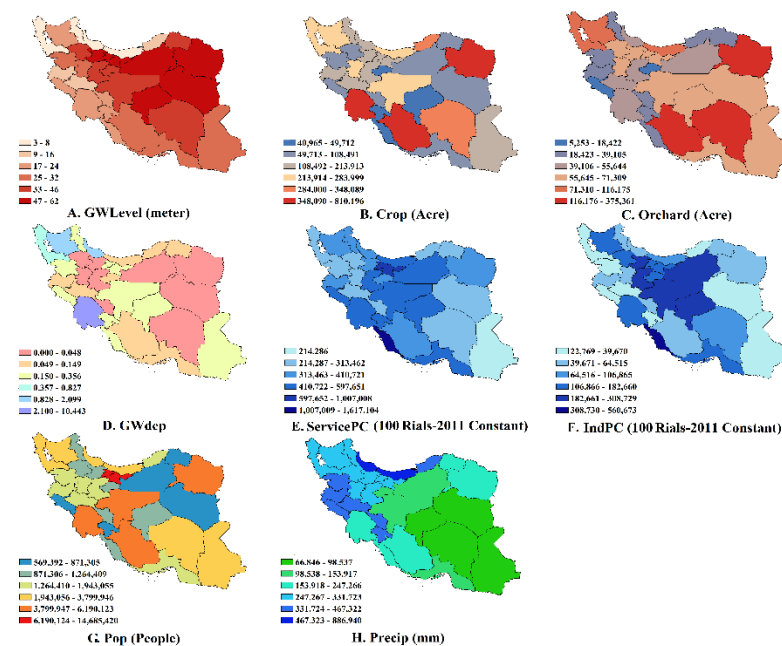


Figure 3. Average of dependent and independent variables throughout Iran's provinces

در خصوص سرانه ارزش افزوده صنعتی که در نقشه F در شکل (۳) آورده شده است نیز مشاهده می‌شود که غیر از دو استان بوشهر و خوزستان سایر قطب‌های صنعتی ایران عموماً به دور از آب دریا و در قسمت میانی فلات مرکزی واقع شده‌اند که با توجه به وابستگی نسبتاً بالای این نواحی به آب زیرزمینی می‌تواند زمینه‌ساز واردآمدن فشار بر این منابع باشد. از نظر سرانه ارزش افزوده خدماتی که در نقشه E در شکل (۳) نشان داده شده نیز مشخص است که اکثر نواحی ایران وضعیت نسبتاً همگنی دارند، اگرچه همچنان استان‌های خوزستان و بوشهر و استان‌های میانی فلات مرکزی از وضعیت بالاتری نسبت به سایر استان‌ها برخوردار هستند.

۲.۳. برآورد الگوهای فضایی

پس از تشکیل شدن ماتریس وزن فضایی می‌توان اقدام به انجام آزمون I موران نمود. نتایج این آزمون در جدول (۳) آورده شده و همان‌طور که مشخص است در تمامی سال‌های موردبررسی آماره آزمون I موران مثبت و در سطح یک درصد معنی‌دار است به این معنی که تغییرات سطح آب زیرزمینی در هر استان با تغییرات سطح آب زیرزمینی در استان‌های مجاور همبستگی فضایی مثبت دارد. با توجه به نتایج آزمون I موران انتظار بر این است که با برآورد الگوهای رگرسیونی ضریب فضایی rho نیز مثبت و معنی‌دار باشد.

Table 3. Moran's I test for spatial correlation between neighboring provinces' groundwater level

Year	Moran's I (Z statistics)	Year	Moran's I (Z statistics)	Year	Moran's I (Z statistics)
2008	0.490 (4.640) ***	2012	0.448 (4.261) ***	2016	0.454 (4.317) ***
2009	0.479 (4.546) ***	2013	0.460 (4.367) ***	2017	0.455 (4.318) ***
2010	0.452 (4.302) ***	2014	0.467 (4.433) ***	2018	0.455 (4.320) ***
2011	0.454 (4.323) ***	2015	0.461 (4.378) ***	2019	0.457 (4.330) ***

*** denotes significant level at 1%.

پس از محرز شدن وجود خودهمبستگی فضایی می‌توان اقدام به برآورد الگوهای رگرسیونی کرد که نتایج حاصل از برآورد سه الگوی فضایی SAR، SAC و SDM در جدول (۴) آورده شده است. همان‌طور که مشخص است، جز در الگوی SAC که تنها از طریق اثرات ثابت قابل برآورد است در دو الگوی SAR و SDM نیز آماره آزمون هاسمن بیانگر رد فرض صفر و برتری الگوی اثرات ثابت می‌باشد. با توجه به این که تمامی الگوهای فضایی از نوع اثرات ثابت هستند به منظور مقایسه با حالت غیرفضایی در دو ستون آخر جدول (۴) نتایج حاصل از برآورد الگوی اثرات ثابت غیرفضایی نیز آورده شده است.

آماره آزمون نسبت راست‌نمایی هم برای SAC و هم برای SDM در سطح یک درصد فرض صفر مبنی بر آشیانه‌ای بودن این دو الگو برای SAR را رد می‌کند و در نتیجه الگوی SAR الگویی مستقل است و به‌طور معنی‌داری متفاوت از دو الگوی متعالی‌تر خود یعنی SAC و SDM به حساب می‌آید. همچنین الگوی SAC دارای ضریب rho غیرمعنی‌دار است که یعنی این الگو در تخمین اثر فضایی متغیر وابسته که هدف اصلی در به‌کارگیری الگوهای فضایی در این مطالعه است عملکرد مناسبی ندارد. همچنین الگوی SAC از نظر معنی‌داری ضرایب متغیرهای توضیحی نیز با مشکل روبه‌رو می‌باشد، زیرا ضریب متغیر InCrop که انتظار می‌رود یکی از اصلی‌ترین عوامل اثرگذار بر عمق منابع آب زیرزمینی باشد در آن بی‌معنی است.

از میان دو الگوی SAR و SDM اگرچه SDM ضریب R2 تعدیل‌شده بزرگ‌تری دارد، اما از نظر معنی‌داری و تطابق با مبانی نظری که مهم‌ترین معیار قضاوت در خصوص الگوها است الگوی SAR به مراتب برتر از SDM می‌باشد. در الگوی SDM ضرایب مهم مربوط به InPOP و InCrop در هر سطحی بی‌معنی می‌باشند و این برخلاف انتظاری است که براساس مبانی نظری از الگوها وجود دارد. با این حال، الگوی SAR توانسته تا این دو متغیر را به شکلی معنی‌دار تخمین بزند. همچنین

ضرایب فضایی SDM نیز با آنچه در خصوص منابع آب زیرزمینی می‌دانیم همخوانی ندارند. به‌عنوان مثال، ضریب اثر فضای $\ln\text{Crop}$ حدوداً ۱۷ برابر بزرگ‌تر از اثر غیرفضایی آن می‌باشد و این یعنی برای هر استان خاص یک درصد افزایش در سطح زیرکشت زراعت آبی در استان‌های مجاور اثرش ۱۷ برابر بزرگ‌تر از یک درصد افزایش در سطح زیرکشت زراعت آبی در همان استان است و طبیعتاً چنین نتیجه‌ای حتی اگر از نظر آماری معنی‌دار باشد از نظر منطقی قابل قبول نمی‌باشد. علاوه بر این آماره BIC نیز در الگوی SAR منفی‌تر از تمام الگوهای دیگر است که نشان‌دهنده برتری نسبی SAR بر سایر الگوها می‌باشد.

Table 4. Spatial regressions' results indicating anthropogenic factors influencing groundwater level

	Model 1: SAR		Model 2: SAC		Model 3: SDM		Model 4: Nonspatial Fixed Effects	
	Coefficient	SE [†]	Coefficient	SE [†]	Coefficient	SE [†]	Coefficient	SE [†]
Main Effects:								
$\ln\text{Pop}$	0.196**	0.095	0.259*	0.138	0.072	0.153	0.370***	0.106
$\ln\text{Crop}$	0.062**	0.032	0.017	0.032	0.021	0.026	0.058	0.034
$\ln\text{Orchard}$	0.089***	0.022	0.094***	0.026	0.093***	0.021	0.110***	0.034
$\ln\text{IndPC}$	0.028*	0.016	0.030*	0.016	0.023*	0.012	0.032*	0.018
$\ln\text{ServicePC}$	-0.023*	0.013	-0.024	0.016	-0.038*	0.021	-0.023	0.017
GWdep	-0.012***	0.004	-0.019***	0.007	-0.022***	0.007	-0.009*	0.005
$\ln\text{Precip}$	-0.001	0.014	-0.005	0.021	-0.001	0.023	-0.008	0.014
Spatial Effects:								
$\ln\text{Pop}$	-	-	-	-	0.477	0.368	-	-
$\ln\text{Crop}$	-	-	-	-	0.374**	0.107	-	-
$\ln\text{Orchard}$	-	-	-	-	-0.042	0.147	-	-
$\ln\text{IndPC}$	-	-	-	-	-0.002	0.046	-	-
$\ln\text{ServicePC}$	-	-	-	-	0.010	0.048	-	-
GWdep	-	-	-	-	0.080	0.051	-	-
$\ln\text{Precip}$	-	-	-	-	0.005	0.042	-	-
ρ	0.820***	0.110	0.065	0.361	0.721***	0.113	-	-
λ	-	-	0.916***	0.338	-	-	-	-
Observations	360		360		360		360	
Adjusted R2	39.28%		35.38%		47.47%		37.61%	
BIC	-995.09		-987.11		-985.81		-952.47	
Hausman Test	19.95**		-		46.94***		-	
Provincial Effects	Fixed		Fixed		Fixed		Fixed	
LR test ^{††}	-		9.68**		49.59***		-	

*, **, *** denote significant level at 10%, 5%, and 1% respectively.

Control dummy variables are included in model estimation but are excluded in reporting.

[†] Robust standard errors – standard errors are clustered for each of the 30 provinces.

^{††} Likelihood Ratio tests; H_0 : SAR is nested within either SDM or SAC.

به‌طور کلی می‌توان گفت که در میان الگوهای فضایی برآوردشده در این مطالعه الگوی SAR هم از نظر آماری و هم از نظر انطباق با مبانی نظری برترین الگو به‌حساب می‌آید. الگوی SAR علاوه بر سایر الگوهای فضایی نسبت به الگوی اثرات ثابت غیرفضایی نیز هم از نظر ضریب R2 تعدیل‌شده، هم از نظر آماره BIC و هم از نظر معنی‌داری ضرایب برتری دارد. هم‌چنین همان‌طور که مشخص است اکثر ضرایب SAR از ضرایب الگوی غیرفضایی کوچکتر هستند که علت اصلی این کوچک‌شدن ضرایب در الگوی SAR حذف‌شدن اریب ناشی از عدم توجه به ارتباطات فضایی در الگوی غیرفضایی است که به بیش‌برآورد برخی ضرایب بالاخص ضریب $\ln\text{POP}$ در الگوی غیرفضایی منتهی شده است.

۱.۲.۳. اثر رشد جمعیت

مطابق با نتایج حاصل از الگوی SAR ضریب $\ln\text{POP}$ برابر با ۰/۱۹۶ و معنی‌دار در سطح پنج درصد می‌باشد که یعنی با فرض ثابت‌بودن تمامی عوامل به‌ازای هر یک درصد افزایش در جمعیت عمق منابع آب زیرزمینی به اندازه ۰/۱۹۶ درصد افزایش پیدا می‌کند. این ضریب بزرگ‌ترین ضریب در میان تمامی ضرایب برآوردی در الگوی SAR می‌باشد. در شرایطی که مراکز جمعیتی در ایران به‌طور عمده وابستگی بالایی به منابع آب زیرزمینی دارند و منابع آب زیرزمینی‌شان نیز با

مشکلات کمی عدیده‌ای روبه‌رو است بزرگ‌بودن ضریب InPOP بیانگر فشار مضاعفی است که در آینده از قِبَل رشد جمعیت به منابع آب زیرزمینی این استان‌ها وارد می‌شود. با این حال اهمیت ضریب بزرگ InPOP تنها محدود به قطب‌های جمعیتی نمی‌باشد. اثر سوء رشد جمعیت بر وضعیت کمی منابع آب زیرزمینی برای استان‌هایی نظیر استان مازندران که در سالیان اخیر به‌واسطه‌ی داشتن منابع آب فراوان با افزایش قابل‌توجهی در شمار مهاجرین روبه‌رو بوده‌اند نیز می‌تواند دارای اهمیت باشد، زیرا بدیهی است که با تداوم روند فعلی مهاجرت به این استان‌ها فشار وارده بر منابع آب زیرزمینی نیز افزایش می‌یابد و این موضوع در بلندمدت می‌تواند به تهدیدی برای منابع آب این استان‌ها تبدیل شود.

۲.۲.۳. اثر سطح زیرکشت آبی

ضرایب برآوردی برای دو متغیر InCrop و InOrchard به‌ترتیب برابر با ۰/۰۶۲ و ۰/۰۸۹ و معنی‌دار در سطوح پنج و یک درصد می‌باشد. این دو ضریب یعنی یک درصد رشد در سطح زیرکشت زراعت آبی و یا باغات آبی به‌ترتیب ۰/۰۶۲ و ۰/۰۸۹ درصد عمق منابع آب زیرزمینی را افزایش می‌دهد. بزرگ‌تربودن ضریب سطح زیرکشت باغات آبی نسبت به ضریب سطح زیرکشت زراعت آبی ناشی از بزرگ‌تربودن نسبی نیاز آبی محصولات باغی است که به‌درستی در ضرایب برآوردشده منعکس شده است. به‌طور کلی می‌توان گفت که به‌ازای هر یک درصد افزایش در کل سطح زیرکشت آبی زراعی و باغی عمق منابع آب زیرزمینی به اندازه ۰/۱۵۱ درصد افزایش می‌یابد که این شدت از اثربخشی از اثر ناشی از یک درصد رشد جمعیت تنها ۰/۰۴۵ درصد کم‌تر است و این بیانگر شدت قابل‌توجه اثرگذاری فعالیت‌های کشاورزی آبی بر منابع آب زیرزمینی است.

مطابق با شکل (۳) مراکز اصلی کشت محصولات به‌روش آبی عبارتند از خراسان رضوی، فارس، کرمان و خوزستان که جز خوزستان سایر استان‌ها درحال حاضر با مشکلات قابل‌توجهی در حیطه آب‌های زیرزمینی روبه‌رو هستند. بدیهی است که با وجود ضرایب معنی‌دار InCrop و InOrchard تداوم فعالیت‌های کشاورزی آبی در این استان‌ها آن‌طور که تا به‌حال انجام شده تنها می‌تواند به افزایش وخامت وضعیت منابع آب زیرزمینی این استان‌ها منتهی بشود. نکته دیگری که در خصوص سطوح زیرکشت آبی لازم است موردتوجه قرار بگیرد بزرگ‌تربودن ضریب InOrchard نسبت به InCrop در شرایطی است که روند کلی سطوح زیرکشت آبی در کشور مطابق با نمودارهای C و D در شکل (۲) بیانگر جایگزینی فعالیت‌های زراعی آبی توسط فعالیت‌های باغی آبی است و این یعنی فشار مضاعف بر منابع آب زیرزمینی به‌منظور تأمین نیاز آبی محصولات باغی.

۳.۳. اثرات ناشی از فعالیت‌های صنعتی و خدماتی

در الگوی SAR ضریب متغیر InIndPC برابر با ۰/۰۲۸ و معنی‌دار در سطح ۱۰ درصد می‌باشد که یعنی یک درصد افزایش در سرانه ارزش افزوده بخش صنعت تنها ۰/۰۲۸ درصد به افزایش عمق منابع آب زیرزمینی منتهی می‌شود و این میزان اثرگذاری کم‌تر از ۲۰ درصد از اثری است که یک درصد توسعه سطح زیرکشت آبی بر عمق منابع آب زیرزمینی دارد. ضریب برآوردی برای InServicePC نیز برابر با ۰/۰۲۳- و معنی‌دار در سطح ۱۰ درصد می‌باشد و این یعنی افزایش در ارزش افزوده بخش خدمات با فرض ثابت‌ماندن مقیاس فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی که درواقع به معنی افزایش سهم خدمات نسبت به سایر فعالیت‌های اقتصادی در کشور است نه‌تنها فشار بیش‌تری را بر منابع آب زیرزمینی وارد نمی‌آورد، بلکه حتی می‌تواند به برداشته‌شدن فشار از این منابع نیز منتهی شود. این موضوع همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد ناشی از ماهیت خاص بخش خدمات است که خلق ارزش افزوده را با کم‌ترین میزان شدت مصرف نهاده‌های تولید انجام می‌دهد و اساساً رشد آن به کاهش فشار بر منابع تولید و بهبود وضعیت محیط زیستی منتهی می‌شود (Dombi, 2019; Kovanda and Weinzettel, 2017; Steger and Bleischwitz, 2011).

۳.۴. اثر کاهش وابستگی به منابع زیرزمینی

ضریب متغیر GWdep در الگوی SAR برابر با $0/012-$ و در سطح یک درصد معنی دار می باشد. با توجه به غیرلگاریتمی بودن GWdep تفسیر این ضریب یعنی به ازای هر یک واحد افزایش در GWdep که تعبیری از عدم وابستگی به منابع آب زیرزمینی است عمق منابع آب زیرزمینی به اندازه $0/012$ درصد کاهش می یابد. با این حال، در خصوص تفسیر این ضریب و اتخاذ توصیه های سیاستی بر مبنای آن می بایست دقت بیش تری به عمل آورد، زیرا همان طور که پیش تر گفته شد متغیر GWdep تنها براساس نسبت عرضه آب توسط سدهای مخزنی به برداشت آب از منابع آب زیرزمینی مورد محاسبه قرار گرفته است. در نتیجه سایر آثاری که توسعه سدسازی بر منابع آب زیرزمینی برجای می گذارد نظیر جلوگیری از نفوذ آب به درون زمین در این متغیر منعکس نمی شود. با این حال، با وجود این موضوع با توجه به ضریب GWdep می توان گفت که به طور کلی کاهش وابستگی به منابع آب زیرزمینی می تواند تأثیر به سزایی بر بهبود وضعیت کمی منابع آب زیرزمینی برجای بگذارد.

۳.۵. اثر نوسانات بارش

در الگوی SAR ضریب InPrecip برابر با $0/001-$ می باشد که در هیچ سطحی معنی دار نمی باشد. این ضریب منفی یعنی اگرچه مطابق با انتظار افزایش سطح نزولات جوی به تغذیه منابع آب زیرزمینی و کاهش عمق آن ها منتهی می شود، اما اثرگذاری ناشی از تغییر در نزولات جوی عملاً در مقیاس زمانی و مکانی انجام این مطالعه اثر معنی داری بر شرایط کمی منابع آب زیرزمینی ندارد. از آنجایی که تمامی متغیرهای مربوط به فعالیت های انسانی در الگوی SAR از نظر آماری معنی دار هستند اما ضریب InPrecip بی معنی است، بنابراین می توان گفت که عملاً این عوامل انسانی هستند که نقش محوری در نوسانات عمق منابع آب زیرزمینی ایفا می کنند.

۴. نتیجه گیری

در این مطالعه با به کارگیری الگوهای آمار فضایی اقدام به تفکیک و کمی سازی آثار ناشی از عوامل متعدد انسانی بر عمق منابع آب زیرزمینی ایران شد. نتایج حاصل از الگوسازی به طور کلی بیانگر نقش چشم گیر فعالیت های کشاورزی آبی و تأمین آب شرب در تخلیه شدگی منابع آب زیرزمینی ایران و نقش نسبتاً اندک فعالیت های صنعتی می باشد. وجود چنین وضعیتی اگرچه پیش تر توسط طیف وسیعی از مطالعات دیگر نیز مطرح شده بود، اما با این حال هیچ یک از آن ها سهم این عوامل انسانی را به صورت تفکیک شده و کمی مورد بحث و بررسی قرار نداده اند. هم چنین، برخلاف مطالعات پیشین در این مطالعه برای یکی از اولین دفعات به نقش توسعه اقتصادی در بخش خدمات در کاهش فشار بر منابع آب زیرزمینی پرداخته شد و این موضوع که توسط مطالعات پیشین تا حد زیادی مغفول مانده بوده به طور کمی مورد اثبات قرار گرفت.

نتایج حاصل از الگوسازی نشان می دهد که جمعیت و سطح زیرکشت آبی اصلی ترین عوامل اثرگذار بر عمق منابع آب زیرزمینی در استان های ایران بشمار می روند و یک درصد رشد در جمعیت و سطح زیرکشت آبی به ترتیب $0/196$ و $0/151$ درصد به افزایش عمق منابع آب زیرزمینی منتهی می شوند. با توجه به این که مراکز اصلی جمعیت و قطب های کشاورزی آبی در ایران همگی در نواحی با وابستگی بالایی به منابع آب زیرزمینی قرار گرفته اند، بنابراین، تداوم وضع موجود تنها به افزایش وخامت وضعیت آب های زیرزمینی در این استان ها و بروز پیامدهای آن نظیر فرونشست زمین منتهی خواهد شد. از آنجایی که در کوتاه مدت عامل جمعیت و جانمایی آن کم تر در اختیار سیاست گذار است، بنابراین یک راه مؤثر به منظور احیای منابع آب زیرزمینی و جلوگیری از تداوم روند فعلی افزایش عمق آبخوان ها مدیریت سطح

زیرکشت آبی است. راه‌کارهایی نظیر افزایش عملکرد محصولات دیم و در عوض کم کردن سطح زیرکشت محصولات آبی و همچنین تغییر الگوی کشت و افزایش کشت محصولات کم آب بر می‌تواند راه‌کارهایی به منظور کم کردن فشار فعالیت‌های کشاورزی بر آب‌های زیرزمینی ایران باشد. همچنین انتقال تدریجی فعالیت‌های کشاورزی به نواحی با وابستگی بیش‌تر به آب‌های سطحی می‌تواند یک راه‌کار دیگر به منظور کاهش فشار تقاضا از منابع آب زیرزمینی باشد. مطابق با نتایج الگوسازی هر یک درصد افزایش در سرانه ارزش افزوده صنعتی تنها ۰/۰۲۱ درصد به افزایش عمق منابع آب زیرزمینی منتهی می‌شود و هر یک درصد افزایش در سرانه ارزش افزوده خدمات نیز ۰/۰۲۳ درصد عمق منابع آب زیرزمینی را کم می‌کند و این یعنی افزایش سهم خدمات در اقتصاد نه تنها فشار بیش‌تری بر منابع آب زیرزمینی وارد نمی‌آورد، بلکه حتی با کاهش فشار بر منابع آب زیرزمینی به احیای آن‌ها نیز کمک نماید. به‌طور کلی با توجه به ضرایب مربوط به سرانه ارزش افزوده صنعت و خدمات و مقایسه آن با ضرایب برآوردی برای سطوح زیرکشت آبی می‌توان گفت که لاقفل در بلندمدت که امکان انتقال نیروی کار در میان بخش‌های مختلف اقتصادی وجود دارد بهتر است تا توسعه صنعت و خدمات به‌جای توسعه کشاورزی مدنظر سیاست‌گذاران قرار بگیرد و تلاش بشود تا بستر مناسبی جهت انتقال نیروی کار از کشاورزی به صنعت و خدمات مهیا شود. بدین ترتیب هم ارزش افزوده اقتصادی با فشار بسیار کم‌تر بر منابع آب زیرزمینی خلق می‌شود و هم از پیامدهای سوء ناشی از نابودی مشاغل کشاورزی جلوگیری به‌عمل می‌آید. براساس یافته‌های حاصل از الگوهای فضایی میزان عدم وابستگی به منابع آب زیرزمینی دیگر عاملی است که می‌تواند به احیای منابع آب زیرزمینی کمک نماید، با این حال توصیه به افزایش اتکا به منابع آب سطحی به خودی خود ممکن است توصیه مناسبی جهت کم کردن فشار از منابع آب زیرزمینی نباشد، زیرا در بسیاری از نقاط ایران به‌واسطه اقلیم خشک اساساً آب‌های سطحی پایدار و قابل اتکایی وجود ندارد. با این حال، افزایش به‌کارگیری آب‌های نامتعارف نظیر پساب تصفیه‌شده و آب شیرین‌شده دریاها می‌تواند یک راه‌کار مناسب جهت کاهش وابستگی به منابع آب زیرزمینی و کمک به احیاشدن آن‌ها به حساب بیاید.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Moran's I.
2. Spatial Auto Regressive (SAR).
3. Spatial Autocorrelation (SAC).
4. Spatial Durbin Model (SDM).
5. Likelihood Ratio.
6. Information Criterion.
7. Bayesian Information Criterion (BIC).
8. Quasi maximum likelihood
9. Fixed Effects.
10. Random Effects.
11. Hausman Test.
12. Dummy variable.

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- Anselin, L. (1988). *Spatial Econometrics: Methods and Models*. Dordrecht: Springer.
- Ashraf, S., Nazemi, A., & AghaKouchak, A. (2021). Anthropogenic drought dominates groundwater depletion in Iran. *Scientific Reports*, 11(1).
- Babaei, S., Mousavi, Z., Masoumi, Z., Malekshah, A. H., Roostaei, M., & Aflaki, M. (2020). Land subsidence from interferometric SAR and groundwater patterns in the Qazvin plain, Iran. *International Journal of Remote Sensing*, 41(12), 4778-4796.
- Bayat Varkeshi, M., Farahani Dastjani, M., & Sough, G. (2018). Effect of Meteorological Drought on Groundwater Resources (Case Study: Komijan Aquifer in Markazi Province). *Iran-Water Resources Research*, 14(1), 114-124. (In Persian).
- Belotti, F., Hughes, G., & Mortari, A. P. (2017). Spatial Panel-data Models Using Stata, *The Stata Journal*, 17(1), 139-180.
- Cotterman, K. A., Kendall, A. D., Basso, B., & Hyndman, D. W. (2018). Groundwater depletion and climate change: future prospects of crop production in the Central High Plains Aquifer. *Climatic Change*, 146(1-2), 187-200.
- Delbari, M., Bahreinimotlagh, M., & Amiri, M. (2013). Spatio-temporal variability of groundwater depth in the Eghlid aquifer in southern Iran. *Earth Sciences Research Journal*, 17(2), 105-114.
- Devineni, N., Perveen, S., & Lall, U. (2022). Solving groundwater depletion in India while achieving food security. *Nature Communications*, 13(1), 1-10.
- Dombi, M. (2019). The service-stock trap: analysis of the environmental impacts and productivity of the service sector in Hungary. *Environmental Research Letters*, 14(6), 065011.
- Elhorst, J. P. (2014). *Spatial Econometrics: From Cross-Sectional Data to Spatial Panels*. Heidelberg: Springer.
- Ghazi, B., Jeyhouni, E., & Kalantari, Z. (2021). Predicting groundwater level fluctuations under climate change scenarios for Tasuj plain, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(2), 1-12.
- Gholami, V., Khaleghi, M. R., Teimouri, M., & Sahour, H. (2023). Prediction of annual groundwater depletion: An investigation of natural and anthropogenic influences. *Journal of Earth System Science*, 132(4), 1-17.
- He, L., Feng, H., Luo, P., Luo, Y., & Xu, Y. (2023). Groundwater stress induced by shale resources development in the US: Evolution, response, and mitigation. *Applied Energy*, 340, 121037.
- Jain, M., Fishman, R., Mondal, P., Galford, G. L., Bhattarai, N., Naeem, S., Lall, U., Balwinder-Singh, & DeFries, R. S. (2021). Groundwater depletion will reduce cropping intensity in India. *Science Advances*, 7(9).
- Jeyhouni, E., Eslamian, S., Mohammadi, M., & Zareian, M. J. (2019). Simulation of groundwater level fluctuations in response to main climate parameters using a wavelet-ANN hybrid technique for the Shabestar Plain, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 78(10), 1-9.
- Jia, X., O'Connor, D., Hou, D., Jin, Y., Li, G., Zheng, C., Ok, Y. S., Tsang, D. C. W., & Luo, J. (2019). Groundwater depletion and contamination: Spatial distribution of groundwater resources sustainability in China. *Science of The Total Environment*, 672, 551-562.
- Kalu, I., Ndehedehe, C. E., Okwuashi, O., Eyoh, A. E., & Ferreira, V. G. (2022). A new modelling framework to assess changes in groundwater level. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 43, 101185.
- Kovacs, K., & West, G. (2016). The Influence of Groundwater Depletion from Irrigated Agriculture on the Tradeoffs between Ecosystem Services and Economic Returns. *PLoS ONE*, 11(12).
- Kovanda, J., & Weinzettel, J. (2017). Economy-wide Material Flow Indicators on a Sectoral Level and Strategies for Decreasing Material Inputs of Sectors. *Journal of Industrial Ecology*, 21(1), 26-37.
- LeSage, J., & Pace, R. K. (2009). *Introduction to Spatial Econometrics*. Florida: CRC Press.
- Li, H., Calder, C. A., & Cressie, N. (2007). Beyond Moran's I: Testing for Spatial Dependence Based on the Spatial Autoregressive Model. *Geographical Analysis*, 39(4), 357-375.
- Liu, H., & Song, Y. (2020). Financial development and carbon emissions in China since the recent world financial crisis: Evidence from a spatial-temporal analysis and a spatial Durbin model. *Science of The Total Environment*, 715, 136771.
- Madani, K. (2014). Water management in Iran: what is causing the looming crisis? *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 4(4), 315-328.

- Madani, K., AghaKouchak, A., & Mirchi, A. (2016). Iran's Socio-economic Drought: Challenges of a Water-Bankrupt Nation. *Iranian Studies*, 49(6), 997-1016.
- Moridi, A. (2017). State of Water Resources in Iran. *International Journal of Hydrology*, 1(4).
- Noori, R., Maghrebi, M., Mirchi, A., Tang, Q., Bhattarai, R., Sadegh, M., Noury, M., Torabi Haghighi, A., Kløve, B., & Madani, K. (2021). Anthropogenic depletion of Iran's aquifers. *Scientific Reports*, 118(25).
- Nouri, M., Homaei, M., Pereira, L. S., & Bybordi, M. (2023). Water management dilemma in the agricultural sector of Iran: A review focusing on water governance. *Agricultural Water Management*, 288, 108480.
- Panda, D. K., Ambast, S. K., & Shamsudduha, M. (2021). Groundwater depletion in northern India: Impacts of the sub-regional anthropogenic land-use, socio-politics and changing climate. *Hydrological Processes*, 35(2), e14003.
- Saatsaz, M. (2020). A historical investigation on water resources management in Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 22(3), 1749-1785.
- Saemian, P., Tourian, M. J., AghaKouchak, A., Madani, K., & Sneeuw, N. (2022). How much water did Iran lose over the last two decades? *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 41, 101095.
- Shahi, A. (2019). Drought: The Achilles heel of the Islamic republic of Iran. *Asian Affairs*, 50(1), 18-39.
- Steger, S., & Bleischwitz, R. (2011). Drivers for the use of materials across countries. *Journal of Cleaner Production*, 19(8), 816-826.
- Stern, D. I. (2004). *Environmental Kuznets Curve*. In Cutler J. Cleveland (Ed.), *Encyclopedia of Energy* (Vol. 2, pp. 517-525). Elsevier.
- Tabari, H., Nikbakht, J., & Shifteh Some'e, B. (2012). Investigation of groundwater level fluctuations in the north of Iran. *Environmental Earth Sciences*, 66(1), 231-243.
- Xu, X., & Wang, Y. (2017). Study on Spatial Spillover Effects of Logistics Industry Development for Economic Growth in the Yangtze River Delta City Cluster Based on Spatial Durbin Model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(12), 1508.
- Zamani, T., Karimi, H., Tavakoli, M., & Alimoradi, S. (2018). Factors Affecting the Groundwater Drawdown in Mehran Plain, Ilam Province. *Hydrogeology*, 2(2), 17-28. (In Persian).
- Zhou, K., Yang, J., Yang, T., & Ding, T. (2023). Spatial and temporal evolution characteristics and spillover effects of China's regional carbon emissions. *Journal of Environmental Management*, 325, 116423.