



Analyzing the Sustainability and Trend of the Depth to Groundwater in Mazandaran Province

B. Mohseni¹, A. Darzi-Naftchali^{2*}, F. Mashahdi-Kholerdi³, and M.A. Hadian-Amri⁴

Abstract

Permanent exploitation of the groundwater resource necessitates the adoption of proper policies for the quantitative and qualitative protection of this valuable resource. Given the fact that parts of the Mazandaran province's development plans rely on the groundwater resources, the sustainability and trend of changes in Depth to Groundwater (GWD) in this province were investigated in this study from 1991 to 2020 (1991 to 2000: first decade, 2001 to 2010: second decade, 2011-2020: third decade). Trend analysis was performed using the Mann-Kendall test and Sen's slope estimator. The sustainability of groundwater resources was assessed using four indicators: renewable groundwater resources per capita (GWRRp), total groundwater abstraction to recharge ratio (TAGR), total abstraction of groundwater to the exploitable groundwater resources (TAGE), and water exploitation index (WEI). The Mann-Kendall statistic values ranged from -2.50 to 3.76, indicating that GWD has increased over the last 30 years in all locations except in Babol-Amol in the second and third decades and Noor-Noushahr in the third decade. The amount of GWD in Mazandaran province increased by 0.21 and 0.12 m per year during the first and second decades, respectively. The west of Mazandaran had better conditions than the province's middle and eastern areas, according to GWRRp, TAGR, and TAGE indices. According to the WEI indicator Ramsar-Chalous and Noor-Noushahr areas ($WEI < 10$), Behshahr-Bandargaz, Babol-Amol, and Sari-Neka areas ($10 < WEI < 20$), and Qaemshahr-Joibar area ($WEI > 20$) were in satisfactory, worrying, and critical state, respectively. Results showed that the groundwater resource situation in a vast section of Mazandaran is unsustainable and proper management measures are needed to avoid the situation from worsening.

Keywords: Renewable Groundwater Resources, Mann-Kendall Test, Water Abstraction, Water Exploitation.

Received: June 26, 2023

Accepted: August 21, 2023

تحلیل پایداری و روند تغییر عمق آب زیرزمینی در استان مازندران

بهروز محسنی^۱، عبدالله درزی نفتچالی^{۲*}، فرهاد مشهدی
خردی^۳ و محمدعلی هادیان امری^۴

چکیده

بهره‌برداری دائمی از منابع آب زیرزمینی مستلزم اتخاذ سیاست‌های مناسب برای حفاظت کمی و کیفی از این منبع ارزشمند است. با توجه به اتکای بخشی از برنامه‌های توسعه استان مازندران به منابع آب زیرزمینی، در این تحقیق، روند تغییرات و پایداری عمق آب زیرزمینی (GWD) در شش محدوده مطالعاتی این استان در دوره ۳۰ ساله ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ در قالب دهه‌های اول (۱۹۹۱ تا ۲۰۰۰)، دوم (۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰) و سوم (۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰) بررسی شد. برای تحلیل روند از آزمون من-کندال و تخمین گر شیب سن استفاده شد. پایداری منابع آب زیرزمینی با استفاده از چهار شاخص سرانه منابع آب زیرزمینی تجدیدپذیر (GWRRp)، برداشت کل منابع آب زیرزمینی به تغذیه آن (TAGR)، برداشت کل منابع آب زیرزمینی به میزان قابل بهره‌برداری از آن (TAGE) و شاخص بهره‌برداری از آب (WEI) انجام شد. مقادیر آماره من-کندال از $-2/50$ تا $3/76$ متغیر بود که حاکی از روند افزایشی GWD در طی ۳۰ سال گذشته در همه محدوده‌ها به جز بابل-آمل (دهه‌های دوم و سوم) و نور-نوشهر (دهه سوم) بود. در طی دهه‌های اول و دوم، مقدار GWD در مازندران به ترتیب $0/21$ و $0/12$ متر در سال افزایش یافت. براساس شاخص‌های GWRRp، TAGR و TAGE، محدوده غرب استان وضعیت نسبتاً پایدارتری نسبت به محدوده‌های شرقی و مرکزی استان داشت. براساس شاخص WEI، محدوده‌های رامسر-چالوس و نور-نوشهر ($WEI < 10$)، محدوده‌های بهشهر-بندرگز، بابل-آمل و ساری-نکا ($10 < WEI < 20$) و محدوده قائمشهر-جویبار ($WEI > 20$)، به ترتیب در وضعیت رضایت‌بخش، نگران‌کننده و بحرانی قرار داشتند. براساس نتایج، در بخش وسیعی از استان مازندران وضعیت منابع آب زیرزمینی ناپایدار است و جلوگیری از توسعه این ناپایداری، مستلزم اتخاذ مدیریت‌های مناسب است.

کلمات کلیدی: منابع آب زیرزمینی تجدیدپذیر، آزمون من-کندال، برداشت آب، بهره‌برداری از آب.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۴/۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۵/۳۰

1- Assistant Professor, Department of Engineering and Agricultural Technology, Faculty of Engineering and Technical, Payam-e-Noor University (PNU), Tehran, Iran.

2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. Email: Abdollahdarzi@yahoo.com

3- Ph.D. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

4- Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Department, Mazandaran Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Sari, Iran.

*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1402.19.3.12.1](https://doi.org/10.117352347.1402.19.3.12.1)

۱- استادیار گروه مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری، ایران.

۳- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری، ایران.

۴- استادیار پژوهش، بخش حفاظت خاک و آب‌خزرداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران.

*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۲ امکان‌پذیر است.



کشاورزی در دوره خشکسالی از منابع آب زیرزمینی، گواهی بر اتکای بخش کشاورزی بر این منابع است (Bazrafshan et al., 2021).

ارزیابی اثربخشی سیاست‌ها، برنامه‌ها و فعالیت‌های مرتبط با بهره‌برداری از آبخوان‌ها، مستلزم بکارگیری شاخص‌های پایداری است (Mohseni et al., 2022). کمیسیون توسعه پایدار سازمان ملل در انتهای قرن بیستم، شاخص‌هایی را برای سنجش پایداری وضعیت منابع آب ارائه نمود که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از: سرانه منابع آب زیرزمینی تجدیدپذیر، برداشت کل منابع آب زیرزمینی به تغذیه این منابع، برداشت کل منابع آب زیرزمینی به میزان قابل بهره‌برداری از آن و بهره‌برداری از آب (Vrba et al., 2006). این شاخص‌ها نه تنها وضعیت فعلی منابع آب منطقه را نشان می‌دهند، بلکه در اتخاذ راهکارهایی برای دستیابی به توسعه پایدار مؤثر هستند. تاکنون در تحقیقات مختلف، پایداری منابع آب زیرزمینی با استفاده از شاخص‌های پایداری مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی عوامل مؤثر بر پایداری دشت تبولی در ایتالیا نشان داد که برداشت منابع آب زیرزمینی از منطقه معدنی، تأثیر قابل‌توجهی بر بیلان آب داشت (Piscopo et al., 2022). با استفاده از شاخص‌های بهره‌برداری آب و کمبود آب سبز، پایداری منابع آب زیرزمینی در دشت بهشهر- بندرگز در شمال ایران مورد ارزیابی قرار گرفت (Mohseni et al., 2022). نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش تبخیر- تعرق در کشت گندم بهاره سبب کاهش محتوای آب خاک و درنهایت، منجر به ناپایداری بیش از حد منابع آب زیرزمینی در منطقه شد. در تحقیقی دیگر، پایداری منابع آب زیرزمینی در ایران از طریق مطالعات تطبیقی مورد تحلیل قرار گرفت (Samani, 2021). با توجه به نتایج این تحلیل، برای تقویت اثربخشی طرح ملی پایداری، نیاز به بهبود ساختارهای حکمرانی آب و مشارکت جامعه محلی است. علاوه بر این شاخص‌ها، با استفاده از تحلیل روند نیز می‌توان تغییرات رفتار آب زیرزمینی را در طولانی‌مدت ارزیابی نمود. ارزیابی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی در منطقه‌ای در هند با استفاده از آزمون من- کندال و تخمین گر شیب سن نشان داد که بیشترین تغییرات آن در دوره ژانویه تا جولای مشاهده شد؛ در حالی که در دوره آگوست تا دسامبر تغییرات کمتری به وقوع پیوست (Vinushree et al., 2022). روند تغییرات پایداری منابع آب زیرزمینی در مطالعات متعدد دیگری نیز مورد بررسی قرار گرفت (Senent-Aparicio et al., 2015; Lathuillière et al., 2018; Kumar et al., 2018; Mirabbasi et al., 2020; Jia et al., 2020; Gholami et al., 2021). نتایج این تحقیقات عموماً حاکی از آن بود که برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی برای بخش کشاورزی سبب تشدید ناپایداری این منابع شد.

آب زیرزمینی منبعی حیاتی برای توسعه کشاورزی و تأمین امنیت غذایی جمعیت رو به رشد جهان است. برآوردها حاکی از آن است که حدود ۲/۵ میلیارد نفر از جمعیت جهان برای تأمین نیازهای کشاورزی و صنعتی خود به این منبع آب وابسته هستند (Margat and van der Gun, 2013; De Chaisemartin et al., 2017; Xiao et al., 2022). در پاسخ به تقاضای فزاینده و پیشرفت‌های فنی، علمی و اقتصادی، برداشت از آب زیرزمینی در طول قرن بیستم در جهان افزایش و در سال ۲۰۱۸، به حدود ۹۷۸ کیلومتر مکعب رسید (FAO, 2020). به دلیل بهره‌برداری بیش از حد از این منبع، پایداری بسیاری از آبخوان‌ها در معرض خطر جدی قرار گرفته و هزینه‌های استخراج آب به‌طور قابل توجهی افزایش یافت (Ostadasiabi et al., 2023). آمارها حاکی از ناپایداری قابل توجه این منبع حیاتی در مناطق مختلف جهان است. بر اساس گزارش یونسکو، از لحاظ برداشت از منابع آب زیرزمینی در سطح دنیا، ایران با جمعیت به‌مراتب کمتر، پس از کشورهای هند، چین، آمریکا و پاکستان در مقام پنجم دنیا قرار دارد (UNESCO, 2022). این افزایش برداشت به‌همراه عدم مدیریت صحیح، مشکلات متعدد کمی و کیفی در دنیا از جمله افت سفره و کاهش حجم آبخوان (Campos-Gaytan et al., 2014; Du et al., 2013)، تهاجم جبهه‌های آب شور ساحلی و کویری (Azizi et al., 2013)، تهاجم جبهه‌های آب شور ساحلی و کویری (Azizi et al., 2013) و افزایش هزینه‌های استحصال آب و نشست زمین (Zhang et al., 2014) را به‌همراه داشته است. پیامد این آثار منفی، بحران‌های سیاسی و اجتماعی متعدد است. اجتناب از این بحران‌ها، مستلزم شناخت وضعیت فعلی و تحلیل رفتار آبی و میزان پایداری آبخوان و برنامه‌ریزی برای بهره‌برداری مطمئن از این منابع است (Samani et al., 2020).

بهره‌برداری پایدار از آب زیرزمینی مستلزم برقراری توازن بین تغذیه و برداشت (Parhizkari et al., 2016) در راستای اجتناب از پیامدهای نامطلوب مانند کاهش غیرقابل جبران مخزن، اضمحلال کیفی آبخوان و نشست زمین است (DWR, 2015). این توازن به‌ویژه در کشور ایران که اقلیم حدود ۸۵ درصد از مساحت آن، خشک و نیمه‌خشک است و بخش عمده کشاورزی آن (بیش از ۷۵ درصد) متکی بر منابع آب‌های زیرزمینی است (Rajabi et al., 2015)، از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. در سال‌های اخیر، اجرای سیاست‌ها و برنامه‌های توسعه نامتوازن و نامتناسب با پتانسیل‌ها و قابلیت‌های سرزمینی به‌ویژه در بخش کشاورزی، افزایش میزان برداشت از منابع آب تجدیدپذیر کشور را در پی داشته است. تأمین ۵۵/۸ درصد آب

منابع آب زیرزمینی به میزان قابل بهره‌برداری از آن (TAGE³) و شاخص بهره‌برداری از آب (WEI⁴) مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

محدوده‌های مطالعاتی نوشهر- نور، رامسر- چالوس، بابل- آمل، قائمشهر- جویبار، ساری- نکا و بهشهر- بندرگز به‌عنوان منطقه مورد مطالعه در استان مازندران، بین طول‌های شرقی ۴۰° ۴۵' تا ۴۹° ۲۲' ۴۴' و عرض‌های شمالی ۰۴' ۴۴° تا ۰۳' ۳۸° قرار دارند. متوسط بارندگی سالانه در این محدوده‌ها حدود ۸۱۴ میلی‌متر است (Regional Water Company of Mazandaran, 2019). حجم آب تولید شده در این محدوده‌ها (دشت‌ها)، ۳۵۹۳/۱۸ میلیون مترمکعب است. کمترین و بیشترین حجم ریزش به‌ترتیب در محدوده‌های نور- نوشهر و بابل- آمل با مقدار ۴۴۳/۷۱ و ۱۰۹۳/۰۵ میلیون مترمکعب در سال است. حجم کل بارش مفید در سطح محدوده‌های مورد مطالعه نیز ۱۰۹۳/۰۶ میلیون مترمکعب است. ۲۷ درصد از حجم کل بارش مفید به‌صورت نفوذ و مابقی به جریان‌های سطحی ملحق می‌شوند. حجم کل نفوذ، ۲۹۸ میلیون مترمکعب است که کمترین و بیشترین آن به‌ترتیب در محدوده‌های بهشهر- بندرگز (۲۹/۰۴) و بابل- آمل (۹۸/۳۷) است. موقعیت منطقه مورد مطالعه و مشخصات هر یک از محدوده‌ها در شکل ۱ ارائه شد.

میزان وابستگی بخش کشاورزی به منابع آب زیرزمینی به‌طور متوسط در دنیا ۳۷/۸ درصد، در منطقه خاورمیانه ۴۶/۲ درصد و در ایران ۶۱ درصد است (FAO- AQUASTAT, 2022). مقایسه این مقادیر نشان‌دهنده اتکای بیش از حد بخش کشاورزی کشور بر آب‌های زیرزمینی در مقایسه با کشورهای دیگر و حتی منطقه خاورمیانه است. در میان استان‌های مختلف، مازندران دارای وابستگی حدود ۶۲ درصدی به منابع آب زیرزمینی است. بهره‌برداری از حدود ۷۰۰ چشمه، ۷۰۰ چاه آب شرب و ۱۴۰ هزار چاه آب کشاورزی در این استان شواهد روشنی از این وابستگی است. علاوه بر این، افت مداوم سطح آب زیرزمینی در بخش‌های مختلف این استان، نشان‌دهنده بهره‌برداری قابل توجه از منابع آب زیرزمینی توسط بخش‌های مختلف است (Darzi-Naftchali et al., 2020; Regional Water Company of Mazandaran, 2021). در چنین شرایطی، اجتناب از آسیب‌پذیری بخش‌های وابسته به منابع آب زیرزمینی نیازمند تحلیل پایداری این منابع در راستای اتخاذ راهکارهای مناسب برای بهره‌برداری بهینه است. مرور منابع حاکی از آن است که تاکنون مطالعه جامعی درباره ارزیابی روند تغییرات و پایداری منابع آب زیرزمینی در محدوده‌های مختلف استان مازندران انجام نشده است. بنابراین، در این تحقیق، ابتدا روند تغییرات سطح آب زیرزمینی استان مازندران در طی سه دهه گذشته ارزیابی شده و سپس پایداری این منابع با استفاده از شاخص‌های سرانه منابع آب زیرزمینی تجدیدپذیر (GWRrp¹)، برداشت کل منابع آب زیرزمینی به‌تغذیه آن (TAGR²)، برداشت کل

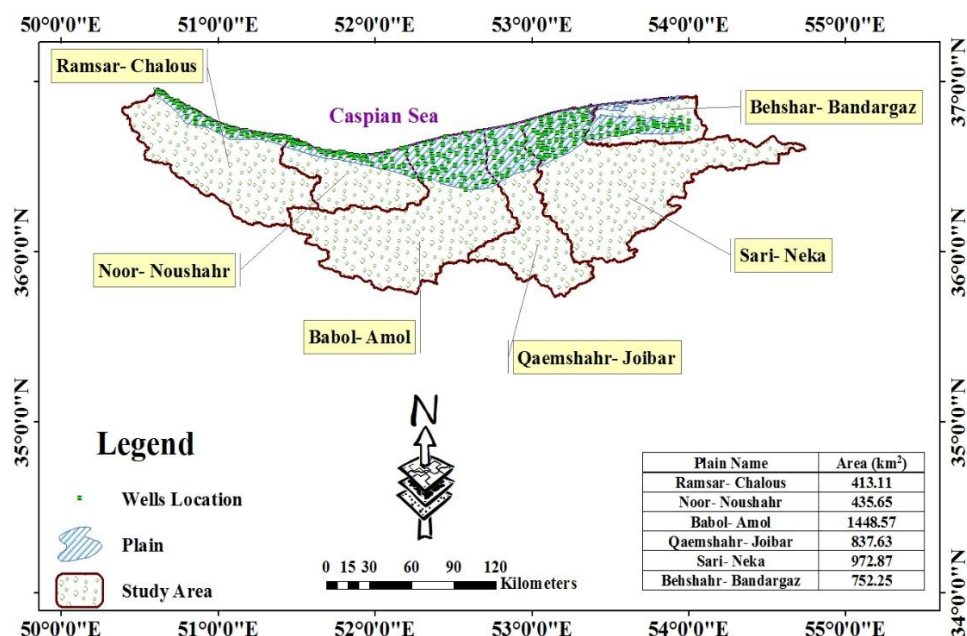


Fig. 1- The location of the study areas in Mazandaran province

شکل ۱- موقعیت محدوده‌های مطالعاتی در استان مازندران

۲-۲- ارزیابی روند تغییرات سطح آب زیرزمینی

آزمون‌های ناپارامتری، روش‌هایی برای تجزیه و تحلیل آماری هستند که فرضیات مربوط به روابط بین متغیرهای طبقه‌ای، شکل‌های توزیع و نرمال بودن توزیع را می‌آزمایند. در این راستا، آزمون من-کندال (Mann, 1945; Kendall, 1975) و تخمین‌گر شیب سن (Sen, 1968) برای تحلیل روند و تعیین شیب خط روند استفاده می‌شوند.

- تحلیل روند با استفاده از آزمون من-کندال

آزمون من-کندال یک روش ناپارامتریک برای تحلیل روند داده‌های سری زمانی است (Kendall, 1975). مزیت عمده آزمون من-کندال این است که از توزیع‌های آماری موردنیاز برای روش پارامتری برخوردار نیست. به دلیل این ویژگی، می‌توان از این آزمون برای داده‌های با چولگی نیز بهره گرفت و به داده‌های با توزیع خاص نیاز نیست (Mohammadi Bigdeli et al., 2022). در این تحقیق، روند تغییرات و پایداری عمق آب زیرزمینی (GWD) در شش محدوده مطالعاتی استان مازندران در دوره ۳۰ ساله ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ و در قالب دهه‌های اول (۲۰۰۰-۱۹۹۱)، دوم (۲۰۱۰-۲۰۰۱) و سوم (۲۰۲۰-۲۰۱۱) بررسی شد. برای تحلیل روند این داده‌ها از طریق آزمون من-کندال، از نرم‌افزار تحت اکسل XLSTAT 2019 استفاده شد. فرض صفر این آزمون، بر تصادفی بودن و عدم روند در سری داده‌ها دلالت دارد و پذیرش فرض یک (رد فرض صفر) دال بر وجود روند در سری داده‌ها است (Faghani et al., 2017). برای محاسبه آماره این آزمون ابتدا مقدار S از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (1)$$

که در آن؛ n تعداد مشاهدات سری، x_j و x_i به ترتیب داده‌های زام و آم سری هستند و تابع علامت نیز براساس رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{sgn}(x_j - x_k) &= +1 & \text{for } (x_j - x_k) > 0 \\ \text{sgn}(x_j - x_k) &= 0 & \text{for } (x_j - x_k) = 0 \\ \text{sgn}(x_j - x_k) &= -1 & \text{for } (x_j - x_k) < 0 \end{aligned} \quad (2)$$

برای مقادیر $n \geq 10$ ، S دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و انحراف معیار زیر است:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{t=1}^m t(t-1)(2t+5)}{18} \quad (3)$$

که در آن؛ q تعداد گروه‌های دارای گره و t_p طول p امین گروه گره‌دار است. در نهایت آماره Z آزمون من-کندال با استفاده از رابطه ۴ به شرح ذیل محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} z &= \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{اگر } S > 0, \quad z = 0, & \text{اگر } S = 0, \\ z &= \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{اگر } S < 0 \end{aligned} \quad (4)$$

مقادیر منفی و مثبت Z به ترتیب بیانگر روند کاهشی و افزایشی در سری داده‌ها است. با توجه به سطح اطمینان ۹۵ درصد، اگر $|Z| > 1/96$ باشد، فرض صفر مبنی بر عدم روند در سری زمانی مورد مطالعه، رد و وجود روند در سری داده‌ها پذیرفته می‌شود (Ataei et al., 2021).

- تخمین‌گر شیب سن^۶

پس از شناسایی روند، از تخمین‌گر شیب سن (یک شاخص بسیار مفید در آزمون من-کندال) برای یافتن شیب خط روند (نرخ کاهش سطح آب، متر در سال) در سری داده‌ها استفاده شد. شیب واقعی در داده‌های سری زمانی (تغییر در واحد زمان) با روش توصیف شده توسط سن (Sen, 1968) تخمین زده می‌شود. بزرگی روند، توسط تخمین‌گر شیب سن (Q_i) پیش‌بینی می‌شود (Vinushree et al., 2022):

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \quad \text{for } i=1, 2, 3, \dots, N \quad (5)$$

که در آن؛ x_j و x_k به ترتیب مقادیر داده در زمان‌های j و k ($j > k$) هستند. در روش سن، از میانه N داده‌ها مقدار Q_i به دست می‌آید:

$$Q_i = Q_{\frac{N+1}{2}} \quad \text{اگر } N \text{ زوج باشد} \quad (6)$$

$$Q_i = \frac{1}{2} \left(Q_{\frac{N}{2}} + Q_{\frac{N+2}{2}} \right) \quad \text{اگر } N \text{ فرد باشد}$$

مقدار مثبت Q_i نشان‌دهنده روند افزایشی و مقدار منفی Q_i روند کاهشی را در سری زمانی نشان می‌دهد. برای نشان دادن روند تغییرات محدوده‌های مورد مطالعه، از نمودار ویولن شیب سن که بیانگر سری زمانی GWD در مقیاس ماهانه است استفاده شد.

۲-۳- تحلیل پایداری منابع آب زیرزمینی

توسعه شاخص‌های پایداری منابع آب زیرزمینی یک فرایند علمی از ارائه ویژگی‌های منابع آب زیرزمینی با گروه‌های هدف مختلف در اشکال ساده و قابل فهم است. با این حال، در حال حاضر فقدان داده‌های کافی منابع آب زیرزمینی، مسأله اصلی توسعه شاخص‌ها در بسیاری از کشورها است. در این مطالعه با توجه به موجودیت داده‌ها، از شاخص‌های ذیل استفاده شد (Vrba et al., 2006).

- شاخص سرانه منابع آب زیرزمینی تجدیدپذیر (GWRRp)

این شاخص اهمیت زیادی برای تصمیم‌گیرندگان بخش آب دارد و مقدار منابع آب زیرزمینی در دسترس برای ساکنان یک حوضه در هر سال را نشان می‌دهد (منابع آب زیرزمینی تجدیدپذیر را به کل جمعیت مربوط می‌کند). مقدار این شاخص با استفاده از رابطه ۷ محاسبه شد (Gustafsson et al., 2006):

$$GWRR_p = \frac{(R_e - B_f) \times S_a + S + I_f - O_f + A_f}{I_h} \quad (7)$$

که در آن؛ $GWRR_p$ مقدار شاخص سرانه منابع آب زیرزمینی تجدیدپذیر (لیتر بر روز به ازای هر نفر)، R_e کل تغذیه منابع آب زیرزمینی حاصل از بارش، B_f جریان منابع آب زیرزمینی ورودی به رودخانه‌ها به‌عنوان بخشی از منابع آب سطحی، S_a مساحت منطقه، S بخشی از نفوذ منابع آب زیرزمینی حاصل از آب‌های سطحی، I_f کل منابع آب زیرزمینی تجدیدپذیر وارده به آبخوان از سفره‌های زیرزمینی بالادست، O_f کل منابع آب زیرزمینی تجدیدپذیر خروجی از آبخوان به سفره‌های زیرزمینی پایین‌دست، A_f تغذیه مصنوعی و I_h افراد ساکن در منطقه است. میزان تغذیه (مجموع جریان آب ناشی از بارندگی یا نفوذ از رودخانه‌های سطحی و دیگر منابع به آبخوان) براساس گزارش ارزیابی منابع آب استان مازندران استخراج شد (Regional Water Company of Mazandaran, 2019). جریان پایه به‌صورت مجموع رواناب سطحی و جریان جانبی، در نظر گرفته شد. اگرچه در حال حاضر مقدار آستانه‌ای برای این شاخص وجود ندارد، اما براساس طبقه‌بندی پیشنهادی ($GWRR_p$) بزرگتر از ۱۵۰۰، بین ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ و کمتر از ۵۰۰ لیتر بر روز/نفر، هرچه مقدار این شاخص بیشتر باشد، استفاده از منابع تجدیدپذیر زیرزمینی برای اهداف توسعه‌ای بهتر است. هیچ استاندارد خاصی برای اشاره به مقدار "خوب" این شاخص وجود ندارد (Hirata et al., 2007).

شاخص برداشت منابع آب زیرزمینی به تغذیه منابع آب زیرزمینی (TAGR)

این شاخص، منابع آب زیرزمینی برداشت‌شده (مصارف خانگی، صنعت و کشاورزی) را با میزان تغذیه مقایسه می‌کند (Perez et al., 2014):

$$TAGR = \frac{TG_{aa}}{G_{rr}} \times 100\% \quad (8)$$

که در آن؛ $TAGR$ شاخص برداشت منابع آب زیرزمینی به تغذیه آن (برحسب درصد)، TG_{aa} برداشت کل (مجاز، غیرمجاز و طبیعی) منابع آب زیرزمینی (میلیون مترمکعب در سال) و G_{rr} تغذیه کل منابع آب زیرزمینی (میلیون مترمکعب در سال) است.

در شاخص $TAGR$ ، دو پارامتر میزان تغذیه و خروجی کل (برداشت) منابع آب زیرزمینی که براساس گزارش ارزیابی منابع آب استان مازندران محاسبه شدند (Regional Water Company of Mazandaran, 2019)، نقش بسزایی را ایفا می‌کنند. استخراج آب از مجموع مساحت محدوده‌های مورد مطالعه یا هر یک از دشت‌ها، عمدتاً از طریق چاه‌ها صورت می‌گیرد. با این وجود، در سال‌های مرطوب، ممکن است تخلیه از طریق برخی چشمه‌ها نیز صورت گیرد. این

شاخص نشان می‌دهد که آیا آب‌های زیرزمینی به روشی پایدار استفاده می‌شوند یا اینکه نشانه‌ای از بهره‌برداری بیش از حد وجود دارد. مقادیر بیشتر از ۱۰۰ درصد برای این شاخص، وضعیت بسیار ناپایدار را نشان می‌دهند. در مقابل، اگر برداشت کمتر از تغذیه و مقدار این شاخص کمتر از ۱۰۰ درصد باشد، استفاده از منابع آب زیرزمینی پایدار تلقی می‌شود (Lavapuro et al., 2008).

شاخص برداشت منابع آب زیرزمینی به منابع آب زیرزمینی قابل بهره‌برداری (TAGE)

شاخص $TAGE$ بیان می‌کند که چه مقدار آب با توجه به منابع آب زیرزمینی تجدیدپذیر برداشت شد و در نتیجه، به‌وضوح در دسترس بودن منابع آب را با توجه به برداشت‌های موجود نشان می‌دهد. این شاخص رابطه بین برداشت منابع آب زیرزمینی و منابع آب زیرزمینی قابل بهره‌برداری را به‌صورت ذیل نشان می‌دهد (Vrba and Lipponen, 2007):

$$TAGE = \frac{TG_{aa}}{E_{gr}} \times 100\% \quad (9)$$

که در آن؛ $TAGE$ شاخص برداشت منابع آب زیرزمینی به میزان قابل بهره‌برداری از آن (برحسب درصد)، TG_{aa} برداشت منابع آب زیرزمینی برای کشاورزی و E_{gr} منابع آب زیرزمینی قابل بهره‌برداری است. مقدار منابع آب زیرزمینی قابل بهره‌برداری برای محاسبه این شاخص در هر یک از محدوده‌های مورد مطالعه، تحت‌عنوان جریان جانبی و نفوذ عمقی، براساس گزارش ارزیابی منابع آب استان مازندران تهیه شد (Regional Water Company of Mazandaran, 2019). در این شاخص نیز چنانچه برداشت کمتر از تغذیه و مقدار آن کمتر از ۱۰۰ درصد باشد، استفاده از منابع آب زیرزمینی، پایدار تلقی می‌شود (Lavapuro et al., 2008).

شاخص بهره‌برداری آب (WEI)

یک شاخص کمبود آب است که نشان می‌دهد کل تقاضای آب تا چه حد میزان منابع آب را تحت فشار قرار می‌دهد (EEA, 2003). شاخص WEI به‌صورت ذیل ارائه می‌شود (Pedro-Monzonis et al., 2015):

$$WEI = \frac{\text{آب برگشتی} - \text{آب برداشتی}}{\text{مقدار آب تجدیدپذیر}} \quad (10)$$

این شاخص برای بررسی رودخانه‌های اروپا استفاده شد. براین اساس، برای استفاده از این شاخص لازم است پارامترهای مربوطه برای منابع آب زیرزمینی باز تعریف شوند. آب برداشتی شامل مقدار برداشت از آبخوان از طریق چاه‌ها و قنات است و آب برگشتی نیز مقدار حجم آبی

است که پس از استفاده‌های مختلف کشاورزی، شرب و صنعت به آبخوان باز می‌گردد. بر این اساس، شاخص بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی با استفاده از رابطه ۱۱ محاسبه شد:

$$WEI^+ = \frac{V_{QW} - RW_{QW}}{TR - RW} \quad (11)$$

که در آن؛ V_{QW} تخلیه چاه و قنات، RW_{QW} آب برگشتی چاه و قنات، TR تغذیه کل و RW آب برگشتی است. تمامی این پارامترها براساس گزارش ارزیابی منابع آب استان مازندران و با در نظر گرفتن راندمان آبیاری محاسبه شدند (Regional Water Company of Mazandaran, 2019). باتوجه به طبقه‌بندی ارائه شده توسط آژانس محیط زیست اروپا، مقدار WEI^+ کمتر از ۵ درصد، بین ۵ تا ۱۰ درصد، بین ۱۰ تا ۲۰ درصد، بین ۲۰ تا ۴۰ درصد و بیشتر از ۴۰ درصد به ترتیب مبین آبخوان عالی، خوب، نگران‌کننده، بحرانی و فوق بحرانی هستند (EEA, 2013).

۳- نتایج و تحلیل نتایج

۳-۱- تحلیل روند تغییرات عمق منابع آب زیرزمینی

در جدول ۱، نتایج آزمون من-کندال و تخمین گر شیب سن برای GWD در دهه‌های مختلف ارائه شد. از آنجایی که آماره Z آزمون من-کندال در برخی محدوده‌ها در طی دوره‌های مورد مطالعه کمتر از مقدار بحرانی (۱/۹۶) بود، فرض صفر مبنی بر عدم روند معنی‌دار در تغییرات GWD پذیرفته شد. در مقیاس فصلی، کمترین و بیشترین روند افزایشی معنادار به ترتیب در فصل بهار (۱/۹۷) و تابستان (۳/۷۶) بود. نتایج روند تغییرات فصلی GWD با توجه به آزمون شیب سن نشان داد که کمترین افزایش عمق منابع آب زیرزمینی در دهه اول و در محدوده ساری-نکا برابر ۰/۰۸ متر و بیشترین آن نیز در دهه دوم و در محدوده رامسر-چالوس برابر ۰/۱۲ متر بود. در مقیاس زمانی ماهانه، ماه اکتبر، کمترین روند افزایشی معنادار (۱/۹۷) و آوریل بیشترین روند افزایشی معنادار (۳/۶) را نشان داد. در مقابل، بیشترین روند کاهش معنادار (۲/۵۰-) در ماه آوریل و کمترین روند کاهش نیز در ماه آوریل (۱/۹۷-) بود. نتایج روند تغییرات ماهانه GWD با توجه به آزمون شیب سن نشان داد که کمترین افزایش عمق منابع آب زیرزمینی (دهه دوم) در محدوده ساری-نکا برابر ۰/۰۴ متر در ماه و بیشترین افزایش در محدوده رامسر-چالوس برابر ۰/۲۲ متر در ماه بود. از طرف دیگر، کمترین کاهش عمق منابع آب زیرزمینی (دهه دوم) در محدوده ساری-نکا برابر ۰/۰۹- متر در ماه و بیشترین کاهش در دهه دوم در محدوده بابل-آمل برابر ۰/۱۴- متر در ماه بود. در

مقیاس سالانه نیز کمترین روند افزایشی معنادار برابر ۲/۳۳ و بیشترین روند افزایشی معنادار برابر ۳/۵۸ بود. تحلیل روند تغییرات سالانه GWD با توجه به آزمون شیب سن نشان داد که کمترین (۰/۰۷) متر در سال) و بیشترین (۰/۱۴) متر در سال) افزایش آن به ترتیب در دهه اول در محدوده ساری-نکا و دهه دوم در محدوده رامسر-چالوس بود. محدوده رامسر-چالوس در دهه‌های دوم و سوم در معرض فشار بیش از حد قرار گرفت و شرایط آن به لحاظ منابع آب زیرزمینی در معرض خطر قرار گرفت. به‌طور کلی، استان مازندران در دهه دوم بیشترین فشار بر منابع آب زیرزمینی را تجربه کرد. با توجه به تخمین گر شیب سن، در هیچ محدوده‌ای کاهش معنادار GWD رخ نداد.

در شکل ۲، نمودار ویولن شیب سن روند تغییرات GWD در محدوده‌های مطالعاتی ارائه شد. در محدوده رامسر-چالوس، متوسط فصلی افزایش GWD در دهه اول (به جز فصل بهار) حدود ۰/۰۸ متر بود و با افزایش حدود دو برابری به ۰/۱۵ متر در دهه دوم رسید. این روند افزایش GWD، در دهه سوم کمتر شد (۰/۰۴) متر. متوسط افزایش ماهانه GWD در دهه اول، ۰/۰۷ متر در ماه بود که با افزایش دو برابری در دهه دوم به ۰/۱۴ متر در ماه رسید. در دهه سوم، روند افزایشی/کاهش معناداری وجود نداشت. در محدوده نور-نوشهر، متوسط فصلی افزایش GWD در دهه اول (به جز فصل تابستان) حدود ۰/۱۳ متر بود که با ۳۱ درصد کاهش، به ۰/۰۹ متر در دهه دوم رسید. تغییرات فصلی GWD در دهه سوم معنادار نبود. متوسط افزایش ماهانه GWD در دهه اول، ۰/۱۲ متر (بجز ماه‌های جولای، آگوست، سپتامبر و دسامبر) بود که در دهه دوم به ۰/۱۱ متر رسید. در دهه سوم نیز روند کاهش معنادار فقط در ماه جولای با مقدار ۰/۰۷- متر اتفاق افتاد. در محدوده بابل-آمل، روند تغییرات فصلی GWD در دهه اول به ترتیب در بهار، تابستان، پاییز و زمستان برابر ۰/۵۸، ۰/۶۲، ۰/۶۰ و ۰/۵۹ متر بود. در دهه‌های دوم و سوم، روند افزایشی یا کاهش معناداری وجود نداشت. متوسط ماهانه تغییرات GWD در این محدوده در دهه اول ۰/۶۱ متر بود لکن در دهه‌های دوم و سوم، روند کاهش/افزایش معنادار رخ نداد. در محدوده قایمشهر-جویبار، متوسط فصلی افزایش تغییرات GWD در دهه اول فقط در تابستان با مقدار ۰/۱۹ متر، معنادار بود. در دهه‌های دوم و سوم روند معناداری وجود نداشت. متوسط ماهانه تغییرات GWD در این محدوده در دهه اول طی ماه‌های مارس، آگوست، نوامبر و دسامبر ۰/۲۰ متر بود ولی در دهه‌های دوم و سوم روند کاهش/افزایش معنادار رخ نداد.

Table 1- Values of Mann-Kendall and Sen's Slope statistics for groundwater depth in the study area
جدول ۱ - مقادیر آماره من- کندال و شیب سن برای عمق سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه

Decade	Statistics	Season			Month												Annual		
		Spr	Sum	Aut	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec			
1991-2000	Z	1.61	2.33*	2.68**	2.68**	2.50*	2.68**	1.61	1.79	2.50*	2.50*	2.50*	1.25	2.50*	2.50*	3.04**	2.50*	2.68**	
		3.4***	3.76***	2.33*	2.68**	2.33*	2.33*	3.6***	2.86**	3.4***	3.04**	1.61	3.4***	1.97*	2.33*	3.04**	3.58***	3.58***	
		-0.72	0.18	0.89	0.54	1.07	1.61	-0.18	-0.89	-0.36	0.36	-0.72	0.89	0.18	1.07	0.54	0.18	0.18	0.18
1991-2000	Sen's Slope	0.04	0.05	0.11	0.09	0.10	0.09	0.06	0.05	0.03	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05	0.11	0.12	0.09	0.07
		0.15	0.12	0.18	0.17	0.16	0.13	0.17	0.22	0.13	0.12	0.11	0.14	0.14	0.14	0.12	0.20	0.14	0.14
		-0.06	0.02	0.08	0.04	0.07	0.09	-0.02	-0.04	-0.07	-0.04	0.01	-0.03	0.03	0.02	0.13	0.04	0.03	0.03
1991-2000	Z	2.50*	1.61	2.50*	2.68**	2.50*	3.04**	2.50*	2.15*	2.15*	1.43	1.61	1.43	1.97**	2.5*	2.5*	1.43	2.50*	
		1.97*	1.43	2.86**	2.33*	2.15*	1.07	2.50*	1.97*	1.43	2.15*	1.07	1.25	1.97*	1.25	2.50*	3.04**	2.68**	
		-1.25	-1.43	-0.18	0.18	0.89	0.00	-0.72	-1.07	-1.25	-2.33**	-1.61	-1.61	-1.61	-1.25	1.25	1.25	0.36	-1.07
1991-2000	Sen's Slope	0.12	0.12	0.17	0.12	0.14	0.11	0.09	0.12	0.14	0.10	0.14	0.12	0.1	0.16	0.17	0.08	0.11	0.11
		0.06	0.09	0.13	0.08	0.11	0.04	0.11	0.07	0.08	0.05	0.08	0.10	0.10	0.08	0.15	0.22	0.10	0.10
		-0.03	-0.06	-0.01	0.01	0.03	0.01	-0.01	-0.04	-0.07	-0.04	-0.07	-0.06	-0.05	-0.07	0.03	0.01	-0.02	-0.02
1991-2000	Z	2.86**	2.86**	3.04**	3.22**	3.04**	3.04**	3.22**	2.68**	2.68**	2.68**	2.86**	2.86**	2.86**	2.86**	3.04**	3.04**	3.04**	
		-1.43	-1.07	-1.43	-1.43	-0.36	-1.43	-1.61	-2.50*	-2.33*	-0.54	-0.18	-1.43	-2.15*	-1.79	-2.15*	-0.72	-1.79	
		-1.07	-0.36	0.00	0.60	-0.18	1.79	1.61	-0.72	-0.89	-0.89	-0.54	-0.54	-0.54	1.07	-0.18	0.00	-0.72	
1991-2000	Sen's Slope	0.58	0.62	0.60	0.59	0.57	0.58	0.62	0.52	0.63	0.67	0.67	0.69	0.63	0.63	0.57	0.54	0.61	0.61
		-0.08	-0.01	-0.08	-0.06	-0.02	-0.08	-0.11	-0.14	-0.09	-0.08	-0.02	-0.11	-0.07	-0.12	-0.09	-0.06	-0.07	
		-0.07	-0.07	0.01	0.03	0.00	0.05	0.04	-0.02	-0.07	-0.09	-0.1	-0.06	-0.02	0.07	-0.03	0.00	-0.02	
1991-2000	Z	1.43	1.61	1.79	1.97*	1.61	1.79	1.17	1.79	1.79	1.79	2.15*	2.15*	1.79	1.79	1.97*	1.79	1.79	
		0.18	1.43	-0.89	-0.89	-1.07	-0.54	-0.72	-1.07	-0.18	1.25	1.25	1.61	1.25	-0.72	-1.07	-1.07	0.00	
		-0.72	-0.89	0.36	1.07	0.72	0.72	1.25	1.25	-1.43	-1.43	-1.61	-1.61	-1.07	0.89	0.00	0.54	0.00	
1991-2000	Sen's Slope	0.19	0.23	0.18	0.19	0.20	0.18	0.19	0.14	0.21	0.22	0.25	0.25	0.18	0.18	0.17	0.21	0.19	
		0.01	0.14	-0.09	-0.14	-0.22	-0.13	-0.11	-0.04	-0.02	0.09	0.18	0.13	0.06	-0.14	-0.09	-0.14	0.01	
		-0.09	-0.07	0.04	0.07	0.06	0.06	0.08	-0.01	-0.07	-0.12	-0.18	-0.10	-0.05	0.11	0.00	0.05	-0.02	
1991-2000	Z	1.97*	1.07	1.43	1.25	1.25	1.07	1.79	1.25	2.15*	1.25	0.89	1.25	1.79	1.79	1.07	1.07	2.33*	
		-0.54	1.25	0.72	0.36	0.54	0.36	-0.89	1.97*	-0.89	0.72	0.89	1.79	1.79	1.97*	0.89	0.00	0.36	
		0.89	0.54	1.43	2.15*	2.50*	2.15*	1.43	1.07	0.54	0.18	0.00	1.25	0.72	1.79	2.15*	1.79	1.43	
1991-2000	Sen's Slope	0.08	0.05	0.08	0.10	0.08	0.10	0.08	0.06	0.09	0.08	0.02	0.06	0.06	0.05	0.08	0.07	0.07	
		-0.05	0.08	0.03	0.10	0.06	0.01	-0.02	-0.09	-0.06	0.05	0.03	0.08	0.08	0.04	0.02	-0.01	0.02	
		0.05	0.02	0.10	0.19	0.17	0.17	0.18	0.09	0.05	0.04	0.01	0.00	0.07	0.06	0.11	0.13	0.08	
1991-2000	Z	0.89	2.15*	2.15*	2.50*	1.79	2.68**	2.50*	1.79	1.43	1.97*	1.79	1.79	2.15*	2.15*	1.97*	2.15*	1.61	
		0.36	1.25	0.54	0.36	0.00	0.18	0.00	0.36	0.18	0.89	1.07	1.43	1.07	0.72	0.00	0.54	0.18	
		1.79	1.61	1.43	1.25	0.72	1.43	1.25	0.54	1.25	1.79	1.61	1.79	1.43	1.43	1.97*	1.97*	1.43	
1991-2000	Sen's Slope	0.12	0.20	0.19	0.22	0.19	0.20	0.24	0.09	0.13	0.09	0.15	0.20	0.19	0.16	0.22	0.17	0.172	
		0.02	0.17	0.05	0.03	0.01	0.04	0.05	0.06	0.01	0.07	0.15	0.21	0.16	0.12	0.01	0.05	0.027	
		0.15	0.20	0.24	0.17	0.15	0.19	0.18	0.11	0.12	0.24	0.19	0.24	0.29	0.24	0.22	0.33	0.247	

Positive trends (Z over 1.96) and negative trends (Z below 1.96) shows respectively increase and decrease in GWD (* 95% level of significance, ** 99% level of significance)
روند مثبت (مقادیر Z بیشتر از ۱/۹۶) نشان دهنده افزایش GWD و روند منفی (مقادیر Z کمتر از ۱/۹۶) نشان دهنده کاهش GWD هستند (* معنی داری در سطح ۹۵٪، ** معنی داری در سطح ۹۹٪).

روند تغییرات فصلی GWD در محدوده ساری- نکا در طی دو دهه، دستخوش تغییرات قابل توجهی شد به طوری که در فصل بهار و در دهه اول با مقدار ۰/۰۸ متر، افزایش معناداری را نشان داد.

همچنین، در فصل زمستان و در دهه سوم (به مقدار ۰/۱۹ متر) افزایش معنادار بود. متوسط ماهانه تغییرات GWD در این محدوده در دهه اول و در ماه‌های آوریل و ژانویه، ۰/۰۸ متر بود. در دهه دوم و در ماه اکتبر، افزایش معنادار حدود ۰/۰۴ متر و کاهش معنادار در ماه آوریل، ۰/۰۹- متر بود. در دهه سوم نیز روند افزایشی معنادار در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس و دسامبر با متوسط ۰/۱۶ متر به وقوع پیوست. متوسط تغییرات فصلی GWD در محدوده بهشهر- بندرگز در دهه اول (بجز فصل بهار)، ۰/۲۰ متر بود. متوسط ماهانه تغییرات GWD در این محدوده در دهه اول و در ماه‌های فوریه، مارس، جولای، نوامبر و دسامبر، ۰/۱۹ متر بود. در دهه دوم، روند افزایشی معناداری رخ نداد. در حالی که، انتهای دهه سوم و در ماه‌های نوامبر و دسامبر، متوسط بیشترین افزایش معنادار GWD، ۰/۲۷ متر در ماه بود. از میان محدوده‌های مورد مطالعه، در محدوده بابل- آمل و در دهه اول با افزایش GWD حدود ۰/۶۱ متر در ماه، به شدت برداشت بی‌رویه منابع آب زیرزمینی اتفاق افتاد. در دهه دوم، محدوده رامسر- چالوس با مقدار GWD برابر ۰/۱۴ متر در ماه، بیشترین فشار بر منابع آب زیرزمینی را تجربه نمود. در دهه سوم، بیشترین فشار بر این منابع نیز در محدوده بهشهر- بندرگز با متوسط افزایش GWD یعنی ۰/۲۷ متر در ماه بود. نتایج روند تغییرات سالانه GWD با توجه به آزمون شیب سن نشان داد که در استان مازندران و در طی دهه اول، متوسط افزایش سالانه GWD، برابر ۰/۲۱ متر بود که در دهه دوم به ۰/۱۲ متر در سال رسید. در دهه سوم، روند افزایشی یا کاهش، معنادار نبود. این مقادیر افت معنی‌دار GWD در مناطق مختلف استان، حاکی از آن است که در طی دهه‌های اخیر، برداشت از منابع آب زیرزمینی بیشتر از تغذیه سالانه آن بود که دلیل آن عدم تناسب نیاز آبی با منابع آب تجدیدپذیر منطقه است. تأثیر این شرایط بر افت GWD و افزایش ناپایداری در برخی تحقیقات مورد تأیید قرار گرفت (Gautam et al., 2022).

۳-۲- شاخص‌های پایداری

در جدول ۲ مقادیر شاخص GWRRP ارائه شد. برای تمامی محدوده‌های مورد مطالعه به جز نور- نوشهر (بالای ۱۵۰۰ لیتر/روز/نفر)، این شاخص بین ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ لیتر/روز/نفر بود که حاکی از

وابستگی زیاد به آب‌های زیرزمینی است. در محدوده نور- نوشهر به دلیل دارا بودن بیشترین مقدار جریان پایه (۱۴۲/۷۵ میلی‌متر در سال)، تغذیه مناسب و جمعیت کمتر (۱۰۹۹۵۴ نفر) در مقایسه با سایر محدوده‌ها، شرایط نسبتاً پایدارتری برقرار بود. محدوده بابل- آمل که برای تامین نیازهای آبی منطقه (با دارا بودن بیشترین جمعیت)، به برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی متکی است، دارای تنش زیاد آبی و وضعیت ناپایدار (۷۰۱ لیتر/نفر/روز) بود. مرور تحقیقات مختلف حاکی از آن است که می‌توان با تقویت منابع آب زیرزمینی از طریق تغذیه مصنوعی (Lavapuro et al., 2008; Mohseni et al., 2022)، ارتقای شاخص‌های مختلف اجتماعی- اقتصادی و زیست‌محیطی (Majidipour et al., 2021) و بهبود برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب زیرزمینی (Anbazhagan & Jothibas, 2016)، این شاخص پایداری را ارتقاء داد. علاوه بر این، صرفه‌جویی در بخش‌های مختلف به‌ویژه کشت محصولات کشاورزی با نیاز آبی کمتر یا استفاده از منابع آبی نامتعارف نیز می‌تواند در بهبود GWRRP مؤثر باشد.

مقادیر شاخص‌های TAGR و TAGE و پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه آن‌ها به ترتیب در جداول ۳ و ۴ ارائه شد. شاخص TAGR تمامی محدوده‌های مورد مطالعه به غیر از محدوده نور- نوشهر بیشتر از ۱۰۰ بود. ناپایداری محدوده آمل- بابل بیشتر از سایر محدوده‌ها بود و پس از آن به ترتیب محدوده‌های ساری- نکا، رامسر چالوس، قایمشهر- جویبار و بهشهر- بندرگز در معرض ناپایداری (زیاد تا کم) قرار داشتند. با توجه به اهمیت منابع آب زیرزمینی در منطقه، شاخص TAGR وابستگی زیاد و تقاضای بالای این منبع را تأیید کرد. مقادیر شاخص TAGE همانند شاخص TAGR در محدوده نور- نوشهر کمتر از ۱۰۰ بود که بیانگر وضعیت نسبتاً پایدار در این محدوده بود. مقدار این شاخص در پنج محدوده آمل- بابل، ساری- نکا، قایمشهر- جویبار، بهشهر- بندرگز و رامسر- چالوس به ترتیب برابر با ۴۷۷/۹۳، ۴۱۲/۲۷، ۲۶۸/۷۳، ۲۲۰/۳۴ و ۱۲۵/۵۷ درصد بود. به عبارت دیگر، این محدوده‌ها با کمبود شدید آب مواجه بودند. بررسی دو شاخص TAGR و TAGE حاکی از آن است که محدوده غرب استان مازندران شرایط مطلوب‌تری نسبت به محدوده‌های شرقی و مرکزی داشت. دلیل این امر را می‌توان به مساحت کم اراضی کشاورزی (آبی) در محدوده غربی استان نسبت داد که سبب وابستگی کمتر به استخراج منابع آب زیرزمینی برای تامین نیاز آبی در این مناطق شد (Ministry of Agriculture Jihad, 2021).

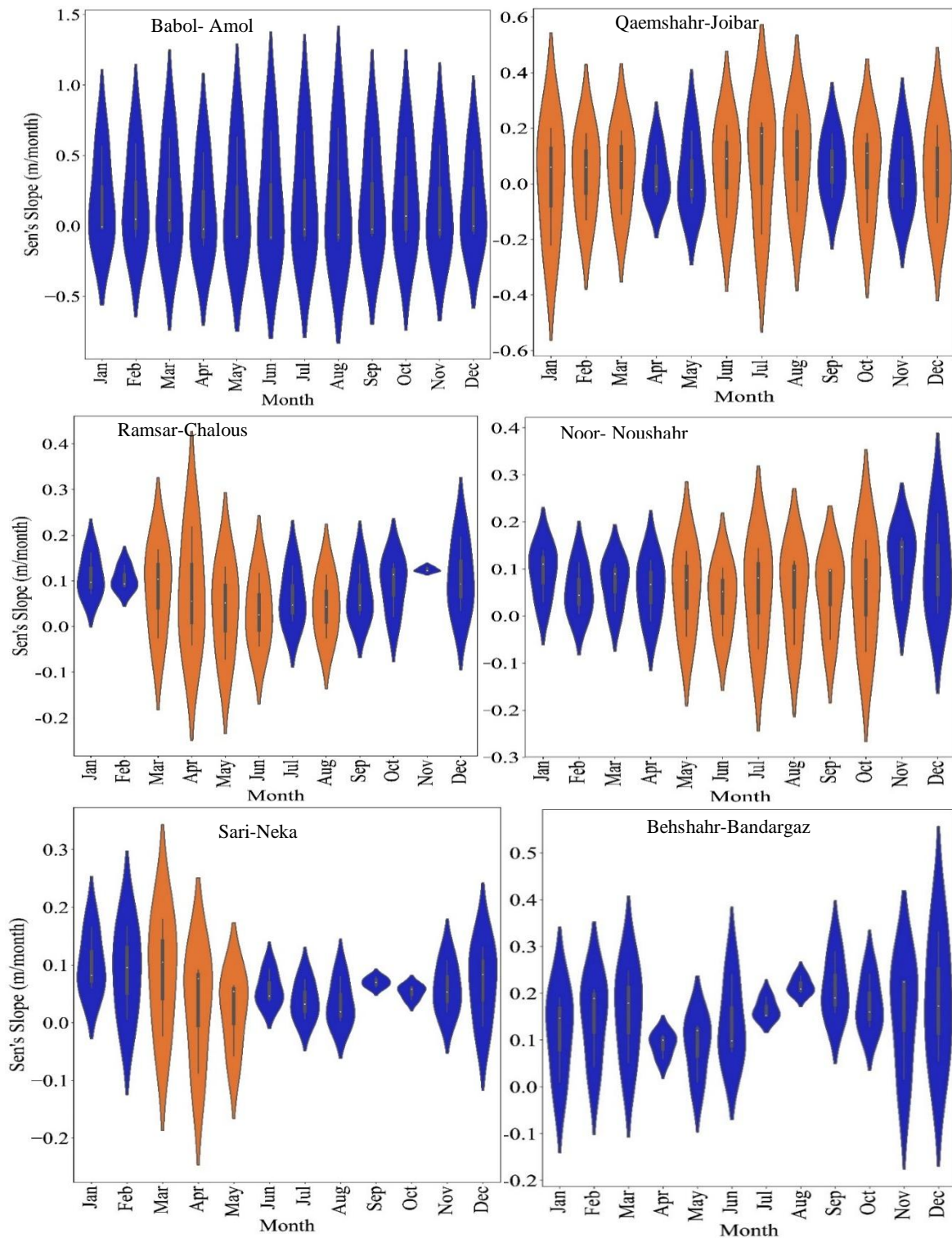


Fig. 2- Violin plot of Sen's slope for GWD in the study area (Increasing trend: blue color, Decreasing trend: orange color)

شکل ۲- نمودار ویلون شیب سن برای GWD در منطقه مورد مطالعه (روند افزایشی: رنگ آبی، روند کاهششی: رنگ نارنجی)

Table 2- Values of GWRR_P in the study area
جدول ۲- مقادیر شاخص GWRR_P در منطقه مورد مطالعه

Area	Parameters			GWRR _P (day/capita/lit)
	Inhabitants (capita)	Base-flow (mm/yr)	Recharge (mm/yr)	
Ramsar- Chalous	264578	139.14	309.94	730.65
Noor- Noushahr	109954	142.75	285.53	1549.84
Babol- Amol	714728	89.20	215.39	701
Qaemshahr- Joibar	292835	101.92	271.13	1326.10
Sari- Neka	427966	83.15	217.43	836.32
Behshahr- B. Gaz	210863	35.45	115.49	1341.26

در جدول ۵ مقادیر شاخص WEI ارائه شد. افزایش جریان برگشتی چاه و قنات و برداشت از چاه و قنات علی‌رغم افزایش تغذیه، سبب افزایش شاخص بهره‌برداری و در نتیجه برداشت بیش از حد از منابع آب زیرزمینی شد. این موضوع سبب شد تا وضعیت اغلب محدوده‌ها، ناپایدار شود. مقدار شاخص WEI در دو محدوده غربی استان (رامسر- چالوس و نور- نوشهر) در وضعیت رضایت‌بخش قرار داشت (کمتر از ۱۰). در مقابل، مقادیر این شاخص در سه محدوده بهشهر- بندرگز، بابل- آمل و ساری- نکا (به ترتیب ۱۱/۱۷، ۱۹/۵۱ و ۱۹/۶۴)، بیانگر شرایط نگران‌کننده این محدوده‌ها بود.

به عبارت دیگر، برداشت کمتر منابع آب زیرزمینی در مقایسه با میزان تغذیه، سبب بهبود پایداری در این منطقه در مقایسه با مناطق دیگر شد. در سایر محدوده‌ها، میزان برداشت تا حدود ۳/۵ برابر میزان تغذیه، متغیر بود که سبب تشدید ناپایداری شد. به طور کلی، منابع آب زیرزمینی محدوده‌های آمل- بابل، ساری- نکا، قایم‌شهر- جویبار، بهشهر- بندرگز و رامسر- چالوس به ترتیب در وضعیت هشدار (زیاد تا کم) قرار دارد و تغذیه محلی در این محدوده، پاسخگوی تقاضای فعلی نیست.

Table 3- Values of TAGR index in the study area
جدول ۳- مقادیر شاخص TAGR در منطقه مورد مطالعه

Area	Parameters		TAGR (%)
	Total abstraction (mm/yr)	Recharge (mm/yr)	
Ramsar- Chalous	724.50	309.94	233.76
Noor- Noushahr	284.31	285.53	99.5
Babol- Amol	834.62	215.39	387.49
Qaemshahr- Joibar	624.38	271.13	230.28
Sari- Neka	668.64	217.43	307.52
Behshahr- B. Gaz	150.10	115.49	129.97

Table 4- Values of TAGE index in the study area
جدول ۴- مقادیر شاخص TAGE در منطقه مورد مطالعه

Area	Parameters			TAGE (%)
	Total abstraction _{Agri} (mm/yr)	Lateral flow (mm/yr)	Deep percolation (mm/yr)	
Ramsar- Chalous	631.79	458.84	44.32	125.57
Noor- Noushahr	268.89	242.63	59.8	88.91
Babol- Amol	778.57	141.01	21.9	477.93
Qaemshahr- Joibar	571.92	157.96	54.87	268.73
Sari- Neka	619.71	116.56	33.76	412.27
Behshahr- B. Gaz	126.58	39.29	18.16	220.34

Table 5- Values of WEI in the study area
جدول ۵- مقادیر شاخص WEI در منطقه مورد مطالعه

Area	Parameters				WEI Index (%)
	Discharge (Well and Qanat) (mm/yr)	Agricultural return flow (mm/yr)	Well and Qanat return flow (mm/yr)	Total recharge (mm/yr)	
Ramsar- Chalous	168.35	391.62	105.22	1331.82	6.71
Noor- Noushahr	157.37	185.72	98.36	1018.5	7.09
Babol- Amol	176.9	346.58	97.3	754.57	19.51
Qaemshahr- Joibar	267.77	282.35	147.28	713.04	27.98
Sari- Neka	196.3	214.14	107.96	664	19.64
Behshahr- B. Gaz	114.5	49.6	57.24	561.96	11.17

برداشت منابع آب زیرزمینی به منابع آب زیرزمینی قابل بهره‌برداری (TAGE) و شاخص بهره‌برداری از آب (WEI) بررسی شد. مقادیر آماره من- کندال نشان‌دهنده روند افزایشی GWD در طی ۳۰ سال گذشته در همه محدوده‌ها بجز بابل- آمل (دهه‌های دوم و سوم) و نور- نوشهر (دهه سوم) بود. به‌طور کلی، در طی دهه‌های اول و دوم، مقدار GWD در مازندران به ترتیب ۰/۲۱ و ۰/۱۲ متر در سال افزایش یافت. براساس شاخص‌های پایداری، محدوده‌های شرقی و مرکزی وضعیت ناپایدارتری نسبت به محدوده نور-نوشهر داشت. نتایج این شاخص‌ها حاکی از آن است که ادامه روند بهره‌برداری و مدیریت حاکم، وضعیت نگران‌کننده فعلی در برخی مناطق را تبدیل به وضعیت خیلی بحرانی می‌نماید. از طرف دیگر، شاخص‌های برداشت منابع آب زیرزمینی نشان دادند که میزان تغذیه سفره‌ها برای پاسخگویی به تقاضای فعلی در منطقه کافی نیست. براساس نتایج، در بیش از ۹۵ درصد از محدوده‌های مورد مطالعه (به‌جز نور-نوشهر)، مقدار GWD در فصول خشک به‌طور قابل توجهی افزایش یافت. با توجه به وضعیت منابع آب زیرزمینی در محدوده‌های مختلف استان، اجرای سناریوهای مختلف آبخیزداری/آبخوان‌داری برای تغذیه مصنوعی، بازبینی و کاهش میزان برداشت از این منابع، افزایش راندمان آبیاری، تغییر الگوی کشت و صرفه‌جویی در مصرف آب در بخش‌های مختلف می‌تواند تا حدی از افت بی‌رویه سطح آب جلوگیری کند.

۵- قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری تحت قرارداد با شماره ۲۳-۱۴۰۱-۰۲ انجام شد که به این وسیله سپاسگزاری می‌شود.

محدوده قایمشهر- جویبار، دارای وضعیت بحرانی بود. بهبود وضعیت این ناحیه مستلزم فعالیت‌های مدیریتی جدی و سرمایه‌گذاری‌های کلان خواهد بود. افزایش تغذیه از طریق پخش سیلاب و آبخوان‌داری (Mohseni et al., 2022) در ارتقای این شاخص مؤثر است.

۳-۳- پهنه‌بندی شاخص‌های پایداری

نقشه پهنه‌بندی شاخص‌های پایداری در سطح استان در شکل ۳ ارائه شد. براساس شاخص‌های TAGR و TAGE، به ترتیب ۸۱ و ۱۹ درصد منطقه در وضعیت ناپایدار و نیمه‌پایدار قرار داشت. این در حالی است که براساس شاخص GWRRP، به ترتیب ۱۱ و ۸۹ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه در وضعیت پایدار و نیمه‌پایدار قرار داشت. در نهایت نقشه WEI، به ترتیب بیانگر سهم ۱۷/۲، ۱۷/۵ و ۶۵/۳ درصدی منطقه در محدوده‌های بحرانی، نیمه‌پایدار و ناپایدار است. با توجه به مقادیر فوق، ۱۷/۲، ۷۳/۱۵، ۴۱/۸۳ و ۱۱ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه به ترتیب بحرانی، ناپایدار، نیمه‌پایدار و پایدار است. براساس این نتایج، بیشترین شدت ناپایداری در بخش‌های شرقی و مرکزی استان مازندران مشاهده شد. هم‌سو با نتایج محققان دیگر (Mohseni et al., 2020; Karimi et al., 2022)، ادامه وضعیت فعلی و بهره‌برداری بی‌رویه می‌تواند سبب افزایش محدوده ناپایدار و بحرانی شود.

۴- خلاصه و جمع‌بندی

در این مطالعه روند تغییرات عمق آب زیرزمینی (GWD) و پایداری آن در استان مازندران از طریق آزمون روند من- کندال، تخمین‌گر شیب سن و شاخص‌های پایداری سرانه منابع آب زیرزمینی تجدیدپذیر (GWRRP)، برداشت منابع آب زیرزمینی به تغذیه آن (TAGR)،

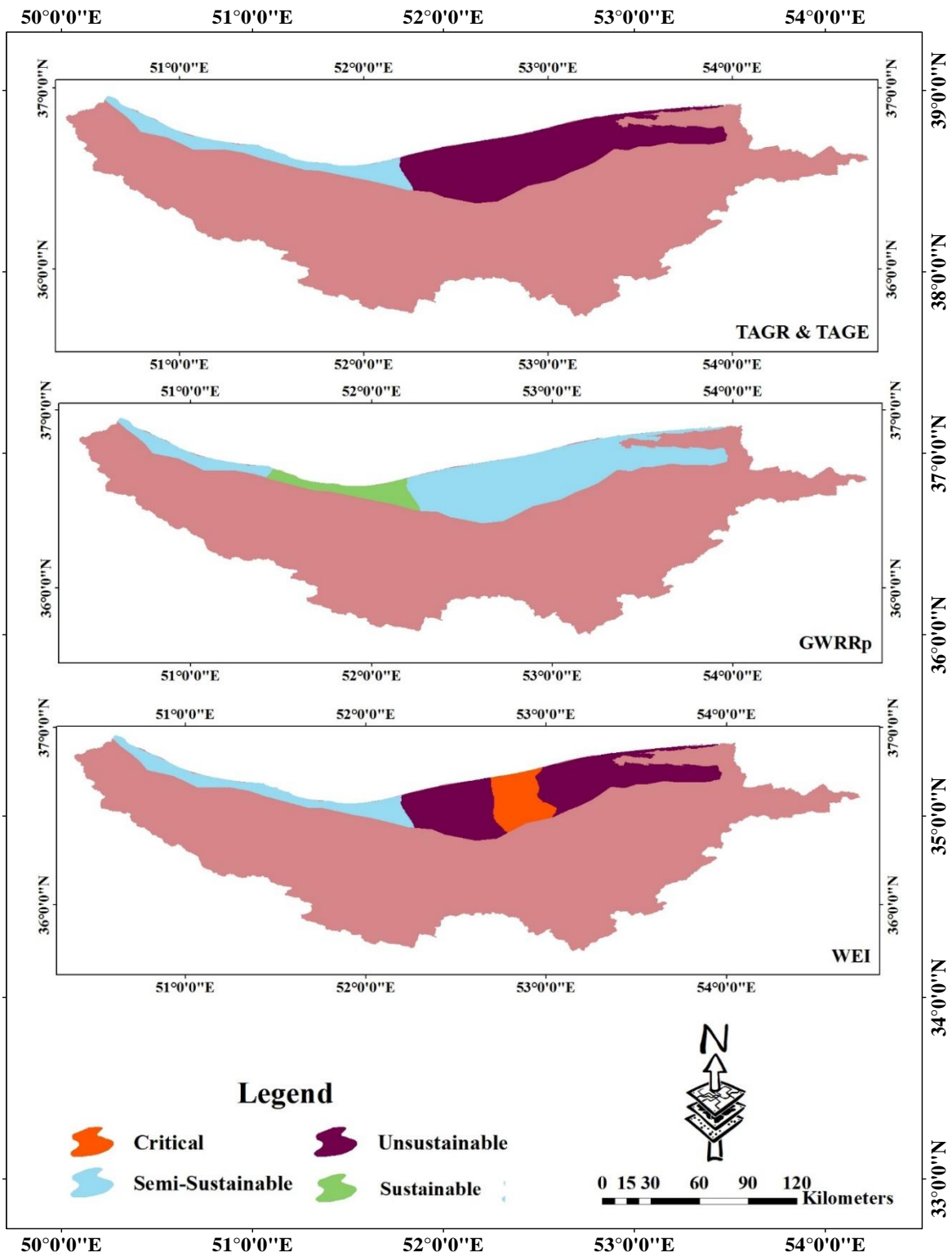


Fig. 3- Zoning of sustainability indicators in the study area

شکل ۳- پهنه‌بندی شاخص‌های پایداری در منطقه مورد مطالعه

پی نوشتها

- 1- Ground Water Renewable Resources per Capita
- 2- Total Abstraction of Groundwater/Groundwater Recharge
- 3- Total Abstraction of Groundwater/ Exploitable Groundwater Resources
- 4- Water Exploitation Index
- 5- Ground Water Dept
- 6- Sen's Slope
- 7- European Environment Agency

۶- منابع

- Anbazhagan S, Jothibasu A (2016) Groundwater sustainability indicators in parts of Tiruppur and Coimbatore districts, Tamil Nadu. *Journal of the Geological Society of India* volume 87:161–168
- Ataei H, Mokhtari-Malekabadi R, Mohseni B (2021) Investigation of the trend of hydro-climatology changes using non-parametric tests in the Kasilian watershed of Mazandaran province. *Journal of Sustainable Rural Development (JSRD)* 5(2):259-270 (In Persian)
- Azizi F, Vadiati M, Moghaddam AA, Nazemi A, Adamowski J (2019) A hydrogeological-based multi-criteria method for assessing the vulnerability of coastal aquifers to saltwater intrusion. *Environmental Earth Sciences* 78(17):1-22
- Bazrafshan J, Khalili A, Zand-Parsa Sh, Sepaskhah AR, Alizadeh A, Farhoodi J (2021) Documentary study of the situation of agricultural water resources and uses in Iran: Analysis of the current situation, pathology and solutions to the challenges. *Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources* 6(1):35-50 (In Persian)
- Bui DD, Kawamura A, Tong TN, Amaguchi H, Nakagawa N (2012b) Spatio-temporal analysis of recent groundwater-level trends in the red river Delta, Vietnam. *Hydrogeology Journal* 20:1635–1650
- Campos-Gaytan JR, Kretzschmar T, Herrera-Oliva CS (2014) Future groundwater extraction scenarios for an aquifer in a semiarid environment: case study of Guadalupe valley aquifer, Baja California, Northwest Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment* 186(11):7961-7985
- Darzi-Naftchali A, Bagherian-Jelodar M, Mashhadi-Kholerdi F, Abdi-Moftikolaei M (2020) Assessing socio-environmental sustainability at the level of irrigation and drainage network. *Science of the Total Environment* 731:138927
- de Chaisemartin M, Varady RG, Megdal SB, Conti KI, van der Gun J, Merla A, Nijsten GJ, Scheibler F (2017) Addressing the groundwater governance challenge. *Freshwater Governance for the 21st Century* 6:205–227
- Department of Water Resources (DWR) (2015) Groundwater Sustainability Program of California, Draft Strategic Plan. March 9
- Du S, Su X, Zhang W (2013) Effective storage rates analysis of groundwater reservoir with surplus local and transferred water used in Shijiazhuang city, China. *Water and Environment Journal* 27(2):157-169
- Elangovan K, Selva-kumar P (2018) Site Selection for rainwater harvesting structures using GIS for the augmentation of groundwater. *Journal of Ecology & Natural Resources* 2:1-5
- European Environment Agency (EEA) (2003) Europe's environment: the third assessment. EEA State of Environment report No. 1/2003, Copenhagen
- European Environment Agency (EEA) (2013) Results and lessons from implementing the water assets accounts in the EEA area. From concept to production. EEA Technical report No 7/2013, European Environment Agency
- Faghani M, Ghorbani Kh, Salarijazi M (2017) Trend and change point analysis of seasonal SPI drought index in Iran. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 4(11):667-679 (In Persian)
- FAO- AQUASTAT Main Database (2022) Website Accessed on [2022.05.14 14:27]
- Gautam VK, Kothari M, Singh PK, Bhakar SR, Yadav KK (2022) Analysis of groundwater level trend in Jakham River Basin of Southern Rajasthan. *Journal of Groundwater Science and Engineering* 10(1):1—9
- Gholami F, Zarei H, Maroufi S (2021) Trend analysis of groundwater quantity and quality parameters (case study: Tuyserkan plain). *Irrigation Sciences and Engineering (JISE)* 44(1):127-140 (In Persian)
- Gustafsson J, Kinnunen T, Kivimäki AL, Suomela T (2006) Protection of groundwater: Background study part IV, guidelines for water protection to 2015. Reports in Finnish Environment Institute 25/2006 [In Finnish with English abstract]
- Hirata R, Suhogusof AV, Fernandes A (2007) Groundwater resources in the state of São Paulo, (Brazil): The application of indicators. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences* 79(1):141-152

- Hoekstra AY, Hung PQ (2005) Globalization of water resources: International virtual water flows in relation to crop trade. *Global Environmental Change Journal* 15(1):45-56
- Jia X, Hou D, Wang L, O'Connor D, Luo J (2020) The development of groundwater research in the past 40 years: A burgeoning trend in groundwater depletion and sustainable management. *Journal of Hydrology* 587:125-139
- Kardan-moghaddam H, Banihabib ME (2017) Investigation of interference of salt water in desert aquifer (case study: South Khorasan, Sarayan aquifer). *Journal of Water and Soil* 31(3):673- 688 (In Persian)
- Karimi D, Bahrami J, Mobaraki J, Missimer TM, Taheri K (2022) Groundwater sustainability assessment based on socio-economic and environmental variables: A simple dynamic indicator-based approach. *Hydrogeology Journal* 30:1963–1988
- Kendall MG (1975) Rank correlation methods, Charles Griffin. London, UK
- Kumar P, Chandniha SK, Lohani AK, Krishan G, Nema AK (2018) Trend analysis of groundwater level using non-parametric tests in alluvial aquifers of Uttar Pradesh, India. *Current World Environment* 13(1): 44-54
- Lambán LJ, Martos S, Rodríguez-Rodríguez M, Rubio JC (2011) Application of groundwater sustainability indicators to the carbonate aquifer of the Sierra de Becerrero (Southern Spain). *Environment Earth Science* 64:1835–1848
- Lathuillière MJ, Coe MT, Castanho A, Graesser J, Johnson MS (2018) Evaluating water use for agricultural intensification in southern Amazonia using the water footprint sustainability assessment. *Journal of Water* 10(4):1-22
- Lavapuro M, Lipponen A, Artimo A, Katko TS (2008) Groundwater sustainability indicators: testing with Finnish data. *Boreal Environment Research* 13:381–402
- Majidipour F, Najafi SMB, Taheri K, Fathollahi J, Missimer TM (2021) Index-based groundwater sustainability assessment in the socio-economic context: A case study in the Western Iran. *Environmental Management* 67:648–666
- Mann HB (1945) Non-parametric tests against trend. *Econometrica* 13(3):245–259
- Margat J, van der Gun J (2013) *Groundwater around the World*. CRC Press: Boca Raton, FL, USA
- Ministry of Agriculture Jihad (2021) Information and Communication Technology Center. Statistics Letter of Agricultural Crops, 100 pp (In Persian)
- Mirabbasi R, Ahmadi F, Jhajharia D (2020) Comparison of parametric and non-parametric methods for trend identification in groundwater levels in Sirjan plain aquifer, Iran. *Hydrology Research* 51(6):1455-1477
- Mohammadi Bigdeli S, Malmasi S, Zaeemdar M, Zamanpoore M (2022) Evaluation of climate change in the Tashk river basin with emphasis on the modeling and scenario making. *Watershed Management Research* 35(2):88-100 (In Persian)
- Mohseni B, Shahedi K, Habibnejhad-Roshan M, Darzi-Naftchali A (2022) Improving groundwater sustainability through conservation strategies in a critical-prohibited coastal plain. *Physics and Chemistry of the Earth* 127:103176
- Mohseni B, Shahedi K, Habibnejhad-Roshan M, Darzi-Naftchali A (2022) Assessing the sustainability of groundwater resources using water exploitation and green water scarcity indicators. *Iran-Watershed Management Science & Engineering* 16(59):23-32 (In Persian)
- Negahban F, Dinpazhoh Y (2019) Trend analysis of groundwater level, using Mann-Kendall non-parametric method (case study: Tabriz plain). *Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)* 23(2):335-348 (In Persian)
- Ostadasiabi L, Najafi Alamdarlo H, Vakilpour MH (2023) The effects of competition between agricultural and urban sectors on the economic value of groundwater resources. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 1(17):180-191 (In Persian)
- Panahi MR, Mousavi M, Rahimzadegan M (2017) Delineation of groundwater potential zones using remote sensing, GIS, and AHP technique in Tehran–Karaj plain, Iran. *Environmental Earth Sciences* 76:1-5
- Parhizkari A, Khodadadi-Hoseyni M, Taghizade-Ranjbari H, Mahmoodi A (2016) Determining the appropriate economic strategy to conserve groundwater resources in Qazvin plain. *Rural Development Strategies* 2(4):477-496 (In Persian)
- Pedro-Monzonis M, Solera A, Ferrer J, Estrela T, Paredes-Arquiola J (2015) A review of water scarcity and drought indexes in water resources planning and management. *Journal of Hydrology* 527:482-493
- Perez M, Tujchneider O, Paris M, D'Elia M (2014) Sustainability indicators of groundwater resources in

- the central area of Santa Fe province, Argentina. *Environment Earth Science* 73:2671–2682
- Phi TH, Strokova LA (2015) Prediction maps of land subsidence caused by groundwater exploitation in Hanoi, Vietnam. *Resource Effect Technology* 2:80–89
- Piscopo V, Sbarbati Ch, Lotti F, Lana L, Petitta M (2022) Sustainability indicators of groundwater withdrawal in a heavily stressed system: The case of the Acque Albule basin (Rome, Italy). *Sustainability* 14:15248
- Rajabi M, Saravani S, Noorbakhsh A (2015) A look at the situation of water resources and consumption in the world and Iran (report). Social and Cultural Committee of Urmia Lake Restoration Headquarter 28 pp (In Persian)
- Regional Water Company of Mazandaran (2019) Report of Water balance assessment. 5:81 pp (In Persian)
- Regional Water Company of Mazandaran (2021) Report on the status of water resources in Mazandaran province. 14 pp (In Persian)
- Samani S (2021) Analyzing the groundwater resources sustainability management plan in Iran through comparative studies. *Groundwater for Sustainable Development* 12:100521
- Samani S, Roozbahani R, Kavooosi Heydari A, Kardan Moghaddam H (2020) A framework for indicator-based water sustainability assessment. *Journal of Water and Sustainable Development* 7(1):49-60 (In Persian)
- Sarah S, Ahmed S, Violette S, de Marsily G (2021) Groundwater sustainability challenges revealed by quantification of contaminated groundwater volume and aquifer depletion in hard rock aquifer systems. *Journal of Hydrology* 597:126286
- Sen PK (1968) Estimate of the regression coefficients based on Kendall tau. *Journal of the American Pharmacists Association* 63:1379-1389
- Senent-Aparicio J, Pérez-Sánchez J, García-Aróstegui JL, Bielsa-Artero A, Domingo-Pinillos JC (2015) Evaluating groundwater management sustainability under limited data availability in semiarid zones. *Water* 7:4305-4322
- Siebert S, Burke J, Faures JM, Frenken K, Hoogeveen J, Döll P, Portmann FT (2010) Groundwater use for irrigation-a global inventory. *Hydrology and Earth System Sciences* 14(10):1863–1880
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) (2022) The United Nations World Water Development Report. Groundwater Making the invisible visible 246 pp
- Vinushree R, Ashalatha KV, Mohammed-Rizwan S, Vasantha- Kumari J, Shanwad UK (2022) Trend analysis of groundwater level using Mann-Kendall test in Dharwad district. *The Pharma Innovation Journal* 11(5):596-600
- Vrba J, Hirata R, Girman J, Haie N, Lipponen A, Shah T, Wallin B (2006) Groundwater resources sustainability indicators. In: Webb BW, Hirata R, Kruse E, Vrba J (eds), *Sustainability of groundwater resources and its indicators*. International Association of Hydrological Sciences (IAHS) Publication 302:3-9
- Vrba J, Lipponen A (2007) Groundwater resources sustainability indicators. IHP-VI, Series on Groundwater N_ 14: 123 pp
- Xiao Y, Hao Q, Zhang Y, Zhu Y, Yin S, Qin L, Li X (2022) Investigating sources, driving forces and potential health risks of nitrate and fluoride in groundwater of a typical alluvial fan plain. *Science of the Total Environment* 802:149909
- Zhang W, Ga'’o L, Jiao X, Yu J, Su X, Du S (2014) Occurrence assessment of earth fissure based on genetic algorithms and artificial neural networks in Su-Xi-Chang land subsidence area, China. *Geosciences Journal* 18(4):485-493