

Studying the Water Security in Tabriz City by Systemic Index using the PSIR (Environmental, Social, and Economic Pressure, State Condition, Impacts and Responses)

Y. Dinpashoh^{1*} and S. Imani²

Abstract

In this research, the water security index (WSI) in Tabriz city was evaluated using the PSIR (Pressure-State-Impact-Response) index. In this method, there are four main indices, and 56 sub-indices, all of which were evaluated. The values of the first three indices, i.e., pressure, state, and impact, were determined according to the relevant references and previous reliable research for Tabriz city. But, the value of the fourth index, i.e., the Response Index, is evaluated based on a qualitative approach via questionnaire and experts' opinions in the field of water engineering. The findings indicated that the value of the Pressure Index (P-Index) for Tabriz city was 22.83 out of 100 (the value is dimensionless). Tabriz city scored 28.5 out of 100 in the Status Index (S-Index), 25 out of 100 in the Impact Index, and 30.92 out of 100 in the Response Index. Ultimately, the obtained results showed that the final value of Water Security Index (W-Index) for Tabriz was equal to 26.81 out of 100, which implied the poor condition compared to the values reported for ten other cities around the globe i.e. Amsterdam, Toronto, Singapore, Dubai, Beijing, Hong Kong, São Paulo, Nairobi, Lima, and Jakarta. Therefore, it is necessary for decision makers to use new scientific and practical methods to manage water insecurity in this city and reduce restrictions and impacts. Finally, it should be emphasized that the method used in this study represents a novel perspective in the perception of water security and its complexity. This method was efficient in analysing the Tabriz city water security, and it is recommended to use it for other cities in Iran.

Keywords: Main and Secondary Criteria, Water Security Index (WSI), PSIR, Tabriz.

Received: April 12, 2025

Accepted: August 7, 2025

مطالعه امنیت آب شهر تبریز با استفاده از شاخص سیستمی PSIR (بررسی فشارهای محیطی، اقتصادی و اجتماعی، وضعیت موجود، اثرات و پاسخگویی)

یعقوب دین پژوه^{۱*} و سعید ایمانی^۲

چکیده

در این تحقیق، سطح امنیت آب^۱ (WSI) شهر تبریز با استفاده از شاخص PSIR^۲ فشار، وضعیت، اثر و پاسخ ارزیابی شده است. در این روش، چهار شاخص اصلی و پنجاه و شش زیرشاخص وجود دارد که همه مورد ارزیابی واقع شده است. مقادیر سه شاخص اول، یعنی فشار، وضعیت و اثر، براساس منابع و مطالعات معتبر انجام شده در این زمینه در شهر تبریز تعیین شد. اما مقدار شاخص چهارم، یعنی شاخص پاسخ، با استفاده از روش کیفی و استفاده از پرسشنامه و نظرات کارشناسان مجرب در زمینه مهندسی آب تعیین شد. نتایج نشان داد که مقدار شاخص فشار (P-Index) شهر تبریز ۲۲/۸۳ از ۱۰۰ (اعداد بی بعد است) بود. تبریز از نظر شاخص وضعیت، (S-Index) دارای مقدار ۲۸/۵ از ۱۰۰، از نظر شاخص اثرات، دارای مقدار ۲۵ از ۱۰۰ و از نظر شاخص پاسخگویی، دارای مقدار ۳۰/۹۲ از ۱۰۰ بود. در نهایت، یافته‌های به دست آمده حاکی از آن است که مقدار شاخص نهایی امنیت آب تبریز (W-Index)، برابر ۲۶/۸۱ از ۱۰۰ بوده که امنیت آبی آن در مقایسه با مقدار نظیر گزارش شده برای ده شهر دیگر جهان (آمستردام، تورنتو، سنگاپور، دبی، پکن، هنگ کنگ، سانپائولو، نیارویی، لیما و جاکارتا) از وضعیت بدی دارا است. بنابراین، ضروری است که تصمیم‌گیران برای مدیریت ناامنی آبی در این شهر و کاهش محدودیت‌ها و اثرات ناشی از آن، از روش‌های علمی و کاربردی جدید استفاده کنند. در نهایت، باید تأکید کرد که روش مورد استفاده، دیدگاه جدیدی را در مورد درک امنیت آب ارائه می‌کند. این روش، برای مطالعه در دیگر شهرهای ایران توصیه می‌شود.

کلمات کلیدی: معیارهای اصلی و فرعی، شاخص امنیت آب (WSI)، PSIR،

تبریز.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۱/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۵/۱۶

1- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Email: dinpazhoh@Tabrizu.ac.ir

2- Ph.D. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Email: saeedimani566@yhooh.com

*- Corresponding Author

Doi: [10.22034/iwrr.2025.516333.2851](https://doi.org/10.22034/iwrr.2025.516333.2851)

۱- استاد گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پاییز ۱۴۰۴ امکان پذیر است.

Padowski and Jawitz (2011) در ایالات متحده آمریکا، Fielding et al. (2012) در جنوب شرقی شهر ایالت کوئینزلند کشور استرالیا، در حوضه آبریز ساسکاتچوان کانادا Wheater and Dadson et al. (2015)، Gober (2015)، در ایالت‌های مختلف آمریکا، Dadson et al. (2017)، در شهر مدابا از شهرهای کم آب کشور اردن Abelnga Babel et al. (2022)، در شهر بانکوک کشور تایلند et al. (2020) و در ایران به Mesgaran and Azadi (2018) اشاره نمود. همچنین، در خصوص شاخص امنیت آب، محققین مختلفی از جمله Maxim et al. (2009)، Ness et al. (2010) و Malmir et al. (2021) نیز مطالعاتی داشته‌اند. اما شاخص PSIR که مبتنی بر تفکر سیستمی است، توسط Ginkel et al. (2018) برای ده شهر مهم جهان (آمستردام، تورنتو، سنگاپور، دبی، پکن، هنگ کنگ، سائوپائولو، نایروبی، لیما و جاکارتا) تخمین زده شده است. در این روش، همه ابعاد مرتبط با امنیت آبی اعم از مسائل اجتماعی و اقتصادی، زیرساخت‌ها و منابع آبی، خطرات مرتبط با آب و خطرات اقلیمی، بهداشت و سلامت، بوم‌سازگان و مسائل زیست‌محیطی بررسی شده است. همچنین، این روش توسط Jiaqi et al. (2024) برای برآورد سطوح امنیت آب در شمال غربی چین در دوره بین ۲۰۳۰-۲۰۲۳ به کار رفته است افزون بر این، تأثیر اجتماعی و اقتصادی شاخص امنیت آب بر اساس مدل مفهومی PSIR در ۲۷ کشور عضو اتحادیه اروپا توسط Zlati et al. (2024) به صورت کمی بکار رفته است. در حال حاضر، این روش بدلیل در نظر گرفتن همه شاخص‌های تأثیرگذار در سیستم تأمین آب شهرها و جامع بودن آن یکی از بهترین مدل‌های مفهومی برای برآورد شاخص امنیت آب در مناطق مختلف و به خصوص شهرها است. به طوریکه از پیشینه پژوهش می‌توان نتیجه گرفت، این روش در بررسی امنیت آب شهرهای ایران (از جمله تبریز) مورد استفاده واقع نشده است. بنابراین، هدف این مطالعه، استفاده از روش PSIR برای تحلیل امنیت آب شهر تبریز است.

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق از روش PSIR که یک شاخص سیستمی مبتنی بر چهار شاخص اصلی (فشار، وضعیت، اثر و پاسخگویی) و ۵۶ شاخص فرعی است، درجه امنیت آب شهر تبریز بدست می‌آید. نام شاخص‌های اصلی و فرعی و نحوه محاسبه آنها در جدول‌های ۱ تا ۶ آمده است. همچنین، فلوجارت مراحل مختلف این تحقیق در شکل ۱ ارائه شده است.

یکی از موضوعات مهم شهرهای بزرگ، امنیت آب آن‌ها است (Grasham, 2022). اکثر محققین معتقدند که مشکل تأمین آب مورد نیاز در شهرهای بزرگ از گذشته بوده و در حال حاضر نیز شدت گرفته است (Cifuentes and Rodriguez, 2005; Adams, 2007). این مسئله از "کمبود آب" در گذشته به "ناامنی آب"^۳ در حال حاضر تبدیل شده است (Cifuentes and Rodriguez, 2005; Bonnafous et al., 2017; Asante-Wusu and Yeboah, 2020; Daloglu Çetinkaya et al., 2022; Cawood et al., 2022).

تعاریف متعددی برای امنیت آب به کار رفته است (Gleick et al., 2007; Grey and Sadoff, 2002). امنیت آب^۴ مفهومی فراتر از "کمبود آب" دارد. تفاوت مفهوم "امنیت آب" با مفهوم "امنیت غذا" و "امنیت انرژی" در این است که با تولید و به دست آوردن غذا و انرژی بیش از حد معمول و مورد نیاز، سطح امنیت آنها پایین نمی‌رود. ولی در مفهوم «امنیت آب» نه تنها کمبود آن یک مسئله جدی است بلکه زیادی آن هم می‌تواند بدلیل عدم وجود زیرساخت‌های کافی کنترل سیل و زیرآبرفتن زمین‌ها و محصولات کشاورزی شده و برای مردم و شهر مشکل‌ساز شود (Grey and Sadoff, 2007). امنیت آب میزان آب قابل دسترس از لحاظ کمی و کیفی برای سلامت، معیشت و تولید تعریف شده است که دارای ریسک ناشی از آب در سطح قابل قبول باشد. امنیت آب یعنی ظرفیت جامعه برای رسیدن به توسعه پایدار برای دستیابی به آب با کمیت و کیفیت مناسب برای تأمین معیشت پایدار، رفاه افراد و توسعه اقتصادی و اجتماعی است. انستیتو منابع جهانی^۵ امنیت آب را ظرفیت جمعیت برای دستیابی به توسعه پایدار و امن با دسترسی مناسب و قابل قبول از لحاظ کمی و کیفی به آب برای تأمین معیشت پایدار، رفاه انسانی و توسعه اقتصادی و اجتماعی و حفاظت از آلودگی آب و ریسک‌های ناشی از آن تعریف می‌کند (Gleick, 2022). امنیت آب موجب تأمین امنیت بوم‌سازگان^۶ نیز می‌شود، طوری که زیست‌بوم به آب پاک و سایر خدمات بوم‌سازگان دسترسی خواهد داشت. شورای جهانی آب^۷، امنیت آب را قابل دسترس بودن آب با کمیت و کیفیت کافی برای تأمین کلیه نیازها (بخش‌های اقتصادی و اجتماعی و بوم‌سازگان) با هم‌دیگر می‌داند، بدون اینکه از منابع تجدیدپذیر کاسته شود (Anonymous, 2018). محققین مختلفی در زمینه مسائل و مشکلات مربوط به پایداری منابع آب مطالعه نموده‌اند که می‌توان به مطالعات انجام گرفته توسط Kundzewicz and Kowalczak (2011) در لهستان، در مناطقی از استرالیا (Cooper et al., 2011).

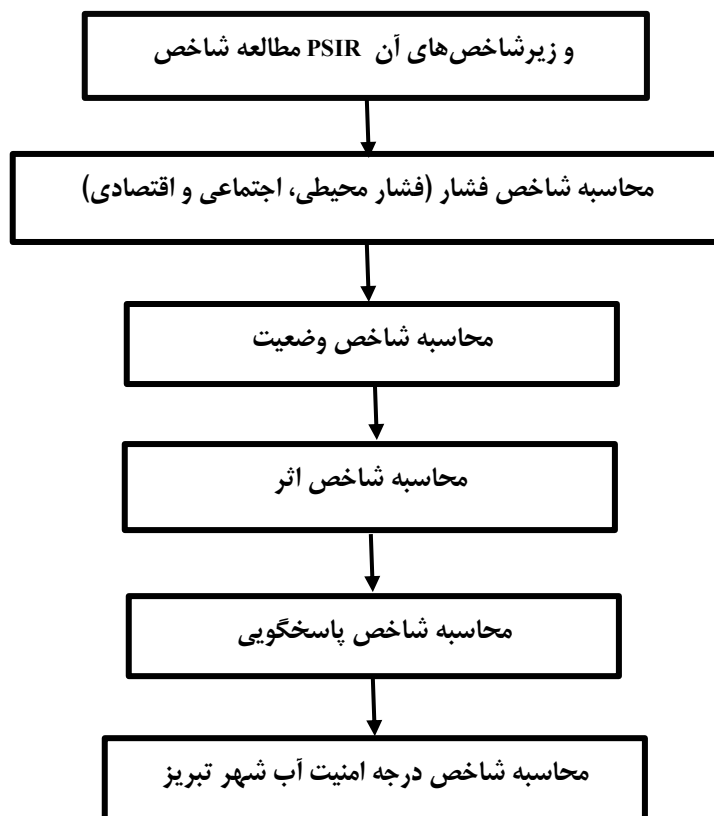


Fig. 1- Flowchart of different stages of the current research
 شکل ۱- فلوچارت مراحل مختلف تحقیق حاضر

۵- میزان مصرف آب خانوار، ۶- ردپای مصرف آب، ۷- وضعیت صنایع پرمصرف آب و ۸- شرایط حوضه آبریز در بالادست تقسیم می‌شود. بنابراین، مجموع زیرشاخص‌های فرعی به کار رفته در این بخش شامل هشت زیرمعیار است. بنابراین، مجموعه زیرمعیارهای شاخص اصلی فشار که به دو زیر معیار کلی: ۱- فشار محیطی و ۲- فشار اقتصادی و اجتماعی تقسیم می‌شود، شامل ۱۶ زیر معیار (طبق جدول‌های ۲ و ۳) است.

دومین شاخص اصلی از شاخص PSIR، یعنی شاخص وضعیت موجود سامانه آب شهر، دارای پنج زیر معیار شامل: ۱- میزان آب قابل دسترس، ۲- آسیب‌پذیری شهر در برابر سیل، ۳- نرخ فرسایش در شهر، ۴- سالم بودن زیرساخت‌ها و ۵- کیفیت آب است. شاخص اول، از پنج زیرشاخص شاخص اصلی وضعیت، یعنی میزان آب قابل دسترس، خود به سه زیرشاخص شامل: ۱- پایداری آب در مخازن و دریاچه‌ها، ۲- برداشت اضافی آب زیرزمینی و ۳- کاهش سطح آب زیرزمینی بستگی دارد. شاخص دوم از پنج زیرشاخص شاخص اصلی وضعیت به دو زیرشاخص

بر اساس روش بیان شده، شاخص فشار به دو دسته کلی: ۱- فشار محیطی و ۲- فشار اقتصادی و اجتماعی تفکیک می‌شود. شاخص فشار محیطی به دو نوع فشار شامل: الف) فشارهای ناشی از کمبود آب و ب) فشارهای وارده از محیط اطراف به شهر به علت سیلاب‌های شهری تقسیم می‌شود. شاخص فشارهای ناشی از کمبود آب به دو زیر شاخص شامل: ۱- بارش سالیانه و میزان تغییر پذیری و ۲- عدم وجود آب در اطراف شهر تقسیم می‌شود. ضمناً زیر معیار فشارهای وارده از محیط اطراف به شهر به علت سیلاب‌های شهری به زیر معیارهایی شامل: ۱- شدت رواناب و میزان تغییرپذیری آن، ۲- ریسک ناشی از طوفان، ۳- ریسک زلزله، ۴- ریسک بالا آمدن سطح آب دریا، ۵- شاخص ارتفاع محدوده مورد مطالعه نسبت به میانگین سطح دریا و ۶- میزان فرسایش بستگی دارد (جمعاً ۸ زیر شاخص). شاخص فشارهای اجتماعی و اقتصادی نیز به زیرمعیارهای مانند: ۱- جمعیت شهر، ۲- نرخ رشد جمعیت در شهر، ۳- درآمد ناخالص ملی، ۴- وضعیت سکونتگاه‌های کم برخوردار از نظر دسترسی به منابع آب،

شامل: ۱- شدت رواناب و میزان تغییرپذیری آن در شهر و ۲- ریسک طوفان بستگی دارد. شاخص سوم از پنج زیرشاخص شاخص اصلی وضعیت به سه زیرشاخص شامل: ۱- زیرساخت‌های حفاظت از سیلاب‌های ساحلی، ۲- زیرساخت‌های حفاظت از سیلاب‌های رودخانه‌ای و ۳- زیرساخت‌های زهکشی سیلاب‌های شدید بستگی دارد. شاخص چهارم از پنج زیرشاخص شاخص اصلی وضعیت به دو زیرشاخص شامل: ۱- پوشش و نشی زرسی ساخت‌های فاضلاب و ۲- مناسب بودن زیرساخت فاضلاب وابسته است. شاخص پنجم از پنج زیرشاخص شاخص اصلی وضعیت به پنج زیرشاخص شامل: ۱- کیفیت آب سطحی، ۲- سوبات آلوده، ۳- زباله در آب‌های سطحی، ۴- کیفیت آب زیرزمینی و ۵- نفوذ نمک در آب زیرزمینی بستگی دارد. بنابراین، می‌توان اظهار داشت که شاخص اصلی وضعیت به ۱۵ زیرشاخص (طبق جدول ۴) وابسته است.

سومین شاخص اصلی از شاخص PSIR، یعنی شاخص اثر در سامانه آب شهر، خود به پنج زیر معیار شامل: ۱- وابستگی به آبرسانی شهری، ۲- آبرسانی، ۳- حفاظت از سیل، ۴- بهداشت و ۵- اکولوژی وابسته است. شاخص اول از پنج زیرشاخص شاخص اصلی اثر، یعنی شاخص وابستگی به آبرسانی شهری، به دو زیرشاخص شامل: الف- محدودیت‌ها و چالش‌های مرتبط با آبرسانی شهری و ب- میزان مصرف آب در مناطق شهری و تأثیرات آن بر منابع آبی وابسته است. شاخص دوم از پنج زیرشاخص اصلی اثر، یعنی شاخص آبرسانی، به زیر معیار تعداد افرادی که به آب آشامیدنی دسترسی دارند، وابسته است. شاخص سوم یعنی شاخص حفاظت از سیل به سه زیر معیار شامل: الف- سیلاب‌های ساحل دریا، ب- سیلاب‌های رودخانه و ج- سیلاب‌های شدید ناگهانی بستگی دارد. شاخص چهارم یعنی شاخص بهداشت دسترسی دارند و ۲- بیماری‌های مرتبط با آب بستگی دارد. شاخص پنجم یعنی شاخص بوم‌شناسی به سه زیرمعیار شامل: ۱- کیفیت اکولوژیکی شهر، ۲- زیبایی‌شناسی و ۳- منظر آب شهری تفکیک می‌شود. بنابراین، شاخص اصلی اثر جمعاً به ۱۱ زیرشاخص (طبق جدول ۵) وابسته است.

چهارمین شاخص اصلی از شاخص PSIR، یعنی شاخص پاسخ‌گویی، به سه زیرشاخص شامل: ۱- چارچوب سازمانی، ۲- برنامه‌ریزی در سازمان و ۳- مدیریت عملیاتی وابسته است. شاخص اول از سه شاخص اصلی وضعیت یعنی

شاخص چارچوب سازمانی به پنج زیر معیار شامل: ۱- مشخص بودن نقش‌ها و مسئولیت‌ها در سازمان، ۲- همکاری و ارتباط افقی در سازمان، ۳- همکاری و ارتباط عمودی در سازمان، ۴- خطاها و انحرافات در سازمان و ۵- مسئولیت‌ها در سازمان وابسته است. شاخص دوم، از سه شاخص اصلی وضعیت، یعنی شاخص برنامه‌ریزی در سازمان، به پنج زیرمعیار شامل: ۱- دسترسی به اطلاعات و داده، ۲- منابع مالی، ۳- موثر بودن مدیریت سوانح، ۴- برنامه‌ریزی استراتژیک و ۵- سطح مشارکت مردمی وابسته است. شاخص چهارم از شاخص اصلی وضعیت، یعنی شاخص مدیریت عملیاتی، به چهار زیرمعیار شامل: ۱- موثر بودن مدیریت آب شهری، ۲- مؤثر بودن مدیریت سلامتی، ۳- مؤثر بودن مدیریت حفاظت از سیل و ۴- مؤثر بودن مدیریت زیست‌محیطی وابسته است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که شاخص اصلی پاسخگویی جمعاً به ۱۴ زیر شاخص (طبق جدول ۶) وابسته است.

بنابراین، جمعاً ۵۶ شاخص فرعی (۱۶ زیرمعیار مربوط به شاخص فشار، ۱۵ زیرمعیار مربوط به شاخص اثر، ۱۱ مورد مربوط به شاخص اثر و ۱۴ زیرمعیار مربوط به شاخص پاسخگویی) در محاسبه نهایی امنیت آب شهر (در اینجا تبریز) تأثیر دارند.

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، کلان شهر تبریز، مرکز استان آذربایجان شرقی است. مساحت این شهر حدود ۲۵۶ کیلومتر مربع بوده و پنجمین شهر بزرگ ایران است (Imani et al., 2024). موقعیت جغرافیایی ایستگاه همدید تبریز در عرض جغرافیایی ۳۸ درجه و ۰۴ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۱۸ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۳۲۱ متر از سطح دریا قرار دارد. جمعیت این شهر، براساس سرشماری سال ۱۳۳۵، برابر با ۲۹۰ هزار نفر و در سال ۱۳۹۵ حدود یک میلیون و هفتاد و هشت هزار نفر گزارش شده است (Anonymous, 2016). در طی ۶۰ سال گذشته جمعیت شهر تقریباً شش برابر شده و این امر، باعث شده که تقاضا برای تأمین نیازهای ضروری ساکنین شهری (به‌خصوص آب شهری) افزایش یابد (Zarghami et al., 2011).

براساس آمارهای بدست‌آمده و اعلام شرکت آب و فاضلاب شهرستان تبریز در سال ۱۴۰۳، ۵۸ درصد حجم آب مصرفی شهر تبریز از سد شهید کاظمی شهر بوکان (با خط لوله

آذربایجان شرقی) برای تأمین آب آشامیدنی جمعیت ساکن در این استان برداشت شده است که این میزان سالانه بدلیل افزایش جمعیت، توسعه شهری و صنعتی شدن شهر تبریز افزایش می‌یابد. میانگین دمای سالانه بر اساس آمار ایستگاه هواشناسی همدید واقع در غرب شهر تبریز در خلال سال‌های ۲۰۲۲-۱۹۵۱، برابر با ۱۲/۳۵ درجه سانتیگراد و میانگین بارش سالانه در همان بازه زمانی مزبور حدود ۲۸۶ میلی‌متر است (Anonymous, 2022). در شکل ۲، سامانه تأمین کننده آب شهر تبریز نشان داده شده است.

اصلی به طول ۱۸۰ کیلومتر و ۱۲ منبع اصلی آب) احداث شده بر روی رودخانه زربینه رود (خارج از حوضه تبریز)، ۳۷ درصد از چاه‌ها و قنوت و تنها ۵ درصد از سد نهند (نزدیک شهر تبریز) تأمین می‌شود. بدلیل برداشت بی‌رویه آب از چاه‌های آب زیرزمینی، تراز آب‌های زیرزمینی دشت تبریز از سال ۱۳۷۵ تا ۱۳۹۵ بیش از ۱۷ متر افت نموده است. ضمناً براساس آمارهای بدست‌آمده از شرکت آب و فاضلاب شهرستان تبریز در سال ۱۴۰۳، بیش از ۷۵ درصد از کل آب‌های قابل دسترس (سطحی و زیرزمینی در استان

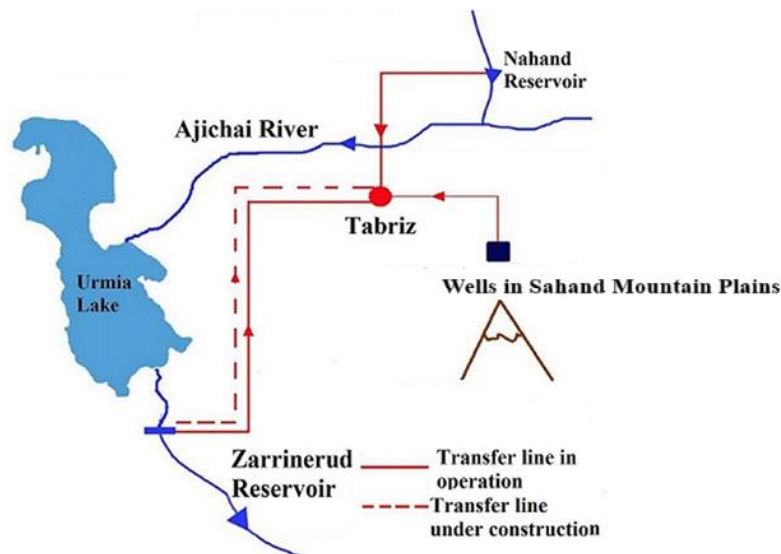


Fig. 2- Schematic representation of the drinking water supply resources in the Tabriz city (Zarghami and Akbariyeh, 2012)

شکل ۲- شماتیکی از منابع تأمین آب شرب شهر تبریز

در این مطالعه، برای محاسبه شاخص امنیت آب تبریز از روش PSIR استفاده شد. این روش سیستمی است و براساس وضعیت شبکه آب شهر تبریز با سنجش چهار شاخص اصلی (فشار، وضعیت، اثر و پاسخگویی) و ۵۶ شاخص فرعی میزان امنیت آب شهر تبریز محاسبه شد. نام هر زیرشاخص در ستون ۲ (از سمت چپ) جداول ۲ تا ۶ آمده است. برای هر کدام از این شاخص‌ها و یا زیرشاخص‌ها کدهای اختصاصی داده شده است. کد شماره ۱۰۰۰ متعلق به شاخص فشار و کد شماره ۲۰۰۰ متعلق به شاخص وضعیت است. به همین ترتیب، کدهای شماره ۳۰۰۰ و ۴۰۰۰ متعلق به شاخص اثر و پاسخگویی هستند. (البته شروع شدن از کد ۱۰۰۰ دلیل خاصی ندارد و این تأثیری در نتایج مقاله ندارد.) این کدها بصورت پررنگ در

سامانه تأمین کننده آب شهر تبریز در حوضه آبریز دریاچه ارومیه واقع است. در این سامانه، بخش زیادی از آب شهر تبریز از طریق خط انتقال آب سد شهید کاظمی (۵۸ درصد) و نیز بخش کمی از آن از طریق سد نهند تبریز (۵ درصد) و بقیه آن از طریق منابع آب زیرزمینی اطراف شهر تأمین می‌شود. فرسودگی لوله‌های آب شهری و هدررفت آب در شبکه انتقال (حدود ۲۵ درصد) از ویژگی‌های بارز در این شبکه است که باعث شده مصرف آب شهری تبریز در بخش‌های مختلف از جمله مسکونی، تجاری، صنعتی، آموزشی، خدماتی، مذهبی و غیره سالیانه افزایش یابد (Imani et al., 2024).

۲-۲- شاخص امنیت آب شهر تبریز

جداول ۲ تا ۶ درج شده‌اند. نحوه محاسبه مقدار هر شاخص در ستون سوم (جداول ۲ تا ۶) شرح داده شده است. به عنوان مثال، روش محاسبه شاخص فشار با کد ۱۰۰۰ از رابطه میانگین ارزش دو کد با شماره‌های ۱۱۰۰ و ۱۲۰۰ منهای یک بوده که حاصل آن به عدد ۲۵ ضرب می‌شود. چون ارزش دو کد ۱۱۰۰ و ۱۲۰۰ به ترتیب ۲/۲ و ۱/۶۲۵ است. بنابراین، ارزش عددی کد ۱۰۰۰ برابر با ۲۲/۸۱۳ است که به صورت زیر حاصل شده است:

$$(1) \quad \left(\frac{2.2 + 1.625}{2} - 1 \right) \times 25 = 22.813$$

برای زیرشاخص‌های فرعی، عددی بین ۱ تا ۵ در نظر گرفته شد، که مقدار آن براساس نتایج مطالعات موجود جهانی، ملی و محلی معتبر تعیین شد. لازم بذکر است در فرمول‌های نوشته در ستون ۳ جدول‌های ۲ تا ۶ فرض می‌شود که شاخص فشار در شرایط حداکثر برابر ۱۰۰ و در شرایط حداقل برابر با صفر است در فرمول ارائه شده اگر عدد ۱ (خیلی نایمن) استفاده شود، مقدار شاخص فشار برابر با صفر به دست می‌آید. اما اگر عدد ۲ (ایمن) گذاشته شود، مقدار شاخص فشار برابر ۲۵ و اگر اعداد ۳ (آستانه قابل قبول)، ۴ (ایمن) و ۵ (خیلی ایمن) گذاشته شود، مقدار شاخص فشار به ترتیب، برابر با ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ به دست می‌آید. ضمن اینکه یادآوری می‌شود که کلیه اعداد بی‌بعد هستند. این روش، برای سایر شاخص‌های اصلی یعنی وضعیت، اثر و پاسخگویی اعمال شد. همچنین، برای محاسبه شاخص چهارم (پاسخگویی) از پرسشنامه طراحی شده، استفاده شده است، در ارزیابی پرسشنامه‌ای از ضرایب ۱ تا ۵ (یعنی خیلی نایمن، ۲ نایمن، ۳ در آستانه قابل قبول، ۴ ایمن، ۵ خیلی ایمن) برای هر شاخص از کارشناسان متخصص در زمینه امنیت آب نظرخواهی به عمل آمد. پس از این مرحله، طبق فلوجارت انجام تحقیق (شکل ۱) شاخص نهایی که مقدار عددی آن بین صفر تا صد است، برای شهر تبریز بدست آمد که در آن عدد صفر یعنی دارای بدترین شرایط از لحاظ امنیت آبی و عدد ۱۰۰ به منزله بهترین شرایط است. در ادامه، نتایج هر یک از

چهار زیرشاخص برای شهر تبریز ارائه می‌شود. برای محاسبه شاخص چهارم (پاسخگویی) از پرسشنامه طراحی شده استفاده شد. بدلیل اینکه میزان پاسخگویی شرکت آب و فاضلاب بایستی سنجیده می‌شود، از روش پرسشنامه‌ای استفاده شد. در حالیکه برای سنجش شاخص‌های دیگر (سه شاخص فشار، وضعیت و اثر) اطلاعات فنی و علمی مورد نیاز است که برای رسیدن به این هدف، از منابع و تحقیقات معتبر علمی استفاده شد. در ارزیابی پرسشنامه‌ای به تعداد ۴۰ پرسشنامه بین کارشناسان و متخصصان صنعت آب تبریز توزیع شد و تعداد ۳۴ نفر پرسشنامه تهیه شده را تکمیل نمودند و نتایج بدست آمده از آن‌ها در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. پرسشنامه تهیه شده در این خصوص در جدول ۱ آمده است. در این پرسشنامه، از اعداد یک تا پنج: یک (شرایط خیلی بد)، دو (بد)، سه (متوسط)، چهار (خوب) و پنج (شرایط خیلی خوب) در نمره دهی سوالات پرسشنامه استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج شاخص فشار در تبریز

همانطور که قبلاً اشاره شد، فشارهای وارده به سامانه تأمین آب شهر تبریز در دو دسته کلی فشارهای محیطی و فشارهای اقتصادی و اجتماعی قابل توصیف است. فشارهای محیطی در این شهر بیشتر به مسائل مربوط به کمبود آب، بارش سالانه و تغییرپذیری آن، کمبود آب آشامیدنی اطراف شهر، سیلاب، شدت رواناب و تغییرپذیری آن، خطر طوفان، خطر زلزله، و مسئله فرونشست خاک را دربر می‌گیرد. براساس منابع مندرج در جدول ۲، برای هر یک از شاخص‌های زیرمجموعه، نتایج نشان داد که در تبریز به علت کمبود آب و کاهش بارش سالانه ناشی از تغییرات اقلیمی، شاخص امنیت آب تبریز دارای صفت "نایمن" (نسبت به گذشته) است.

Table 1- One questionnaire prepared to evaluate the water security response, main and sub-index, in Tabriz city

جدول ۱- نمونه‌ای از پرسشنامه تهیه شده برای سنجش شاخص پاسخگویی امنیت آب شهری تبریز

ردیف	سوالات	۱	۲	۳	۴	۵
چارچوب سازمانی	آیا در چارچوب سازمانی نقش‌ها و مسئولیت‌ها برای پاسخگویی مناسب به نیازهای شهروندان مشخص شده است؟					
	آیا در چارچوب سازمانی هماهنگی و ارتباط افقی بین کارکنان برای پاسخگویی مناسب به نیازهای شهروندان وجود دارد؟					
	آیا در چارچوب سازمانی هماهنگی و ارتباط عمودی بین کارکنان برای پاسخگویی مناسب به نیازهای شهروندان وجود دارد؟					
	آیا در چارچوب سازمانی انحرافات یا خطاها برای پاسخگویی مناسب به نیازهای شهروندان مشخص شده است؟					
	آیا در چارچوب سازمانی مسئولیت‌ها برای پاسخگویی مناسب به نیازهای شهروندان تعیین شده است؟					
برنامه‌ریزی	آیا در چارچوب سازمانی دسترسی به داده و اطلاعات برای برنامه‌ریزی مناسب وجود دارد؟					
	آیا در چارچوب سازمانی منابع مالی برای برنامه‌ریزی مناسب وجود دارد؟					
	آیا در چارچوب سازمانی برای مدیریت انواع سوانح برنامه‌ریزی صورت گرفته است؟					
	آیا در چارچوب سازمانی از برنامه‌ریزی استراتژیک برای برنامه‌ریزی مناسب استفاده شده است؟					
	آیا در چارچوب سازمانی از مشارکت مردمی برای برنامه‌ریزی مناسب استفاده شده است؟					
مدیریت عملیات	آیا در چارچوب سازمانی، مدیریت عملیاتی مناسبی برای مدیریت آب شهری صورت گرفته است؟					
	آیا در چارچوب سازمانی، مدیریت عملیاتی مناسبی برای مؤثر بودن مدیریت بهداشت صورت گرفته است؟					
	آیا در چارچوب سازمانی، مدیریت حفاظت سیلاب به‌صورت مناسب انجام گرفته است؟					
	آیا در چارچوب سازمانی، مدیریت محیطی و اکولوژیکی به‌صورت مناسب انجام گرفته است؟					

بارش‌ها (باران/ برف) و کم‌کاری در زمینه کنترل رواناب‌ها و تغییرات گسترده کاربری اراضی، توسعه شهری و ساخت‌وسازها و عدم رفع موانع مسیر جریان سیل از شهر و تخلیه نخاله‌های ساختمانی در آن‌ها، شدت رواناب‌ها و میزان تغییرپذیری آن‌ها در شرایط خیلی نایمن قرار دارد. شکل ۳ نمونه‌هایی از موانع موجود در سر راه عبور جریانات سطحی تبریز را نشان می‌دهد. از لحاظ خطر طوفان و احتمال تخریب سامانه آب‌رسانی در اثر سیلاب،

همچنین، مقدار بارش‌ها و نوع آن‌ها (باران یا برف) از لحاظ توزیع زمانی و مکانی نسبت به گذشته تغییر یافته است. همچنین، منابع آب آشامیدنی نیز به‌علت برداشت‌های بی‌رویه از آب‌های قابل دسترس (سطحی و زیرزمینی) برای استفاده در آبیاری باغات و مزارع کشاورزی و هم به‌علت تغییرات اقلیمی یعنی تغییرات بارش و دمای منطقه و تغییر نوع بارش‌ها و نیز آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی با شرایط نایمن روبرو است. بنابراین، به‌دلیل تغییر نوع



An example of obstacle in a surface- 3. Fig waterway in Tabriz city

شکل ۳- نمونه‌ای از موانع موجود بر سر راه مسیر جریانات سطحی در تبریز

شرایط "قابل قبولی" دارد ولی به علت قرارگیری این شهر در مجاورت گسل‌های فعال و احتمال وقوع زلزله، میزان آسیب‌پذیری شبکه آب‌رسانی در این شهر در وضعیت "خیلی نایمن" قرار دارد (Namjo et al., 2020). همچنین، ساختار شهر تبریز به دلیل دوری از دریا، با خطر بالا آمدن سطح آب دریا مواجه نبوده و از این نظر در شرایط "خیلی ایمن" قرار دارد. اما به دلیل استفاده بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی دشت تبریز، فرونشست خاک در دشت اتفاق افتاده (Naboreh et al., 2022) و بنابراین، از این لحاظ تبریز در شرایط "نایمن" قرار دارد (Negahban and Dinpashoh, 2019). شکل ۴ درجه ایمنی شهر تبریز را از نظر زیر شاخص‌های مرتبط با فشار محیطی مورد مطالعه نشان می‌دهد.

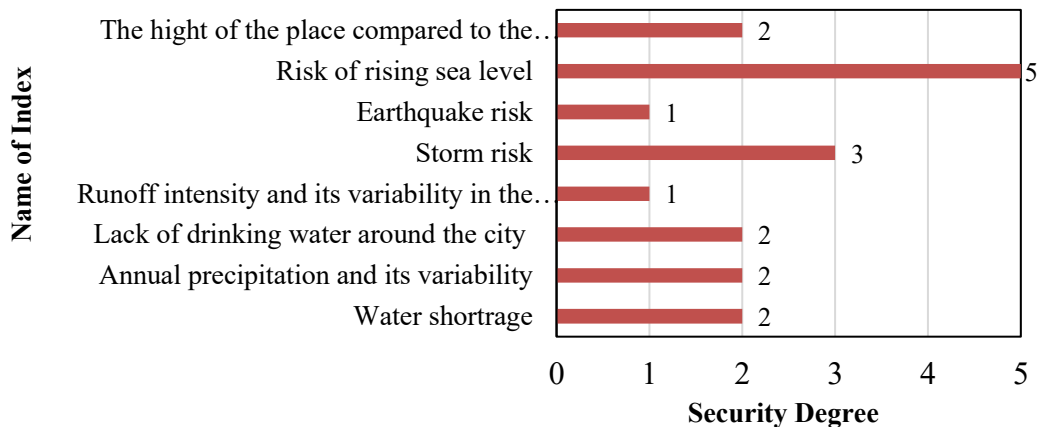


Fig. 4- The value of the sub-indices related to the main environmental pressure index in Tabriz city

شکل ۴- درجه ایمنی زیرشاخص‌های مربوط به شاخص اصلی فشار محیطی امنیت آب شهر تبریز

در مقایسه با سایر کشورها، در رتبه سی و چهارم دنیا قرار دارد (Anonymous, 2024). می‌توان نتیجه گرفت که از نظر تولید ناخالص ملی وضعیت قابل قبولی برای شهر وجود دارد. اما چون محله‌های فقیرنشین تبریز از لحاظ دسترسی به آب وضعیت مطلوبی ندارند، بنابراین، شرایط و وضعیت آن‌ها "نایمن" است. از لحاظ مصرف آب نیز درجه امنیت آبی "خیلی نایمن" است؛ زیرا سرانه مصرف آب خانوارهای تبریز در مقایسه با دنیا بالا است (Ganbari et al., 2022). از لحاظ ردپای مصرف آب، ایران و بخصوص شهر تبریز در وضعیت "نایمن" قرار دارد. به علت تمرکز صنعت در حومه تبریز و مصرف زیاد آب کارخانجات و کارگاه‌های تولیدی و عدم بازیافت آب در بسیاری از کارخانه‌ها و کارگاه‌ها، می‌توان نتیجه

فشارهای اقتصادی و اجتماعی شامل میزان جمعیت و نرخ رشد آن، میزان تولید ناخالص ملی (GDP)، وضعیت محله‌های فقیرنشین از لحاظ دسترسی به آب، میزان مصرف آب خانگی، ردپای مصرف آب، وضعیت صنایع پر مصرف آب و وضعیت حوضه آبریز بالادست منطقه است (جدول ۲) بررسی وضعیت جمعیت و میزان رشد آن نشان داد که با اینکه نرخ رشد جمعیت نسبت به چند سال گذشته اندکی کمتر شده است (Imani et al., 2024)، با این وجود، توسعه شهری و رشد ساخت‌وسازها از یک طرف و مهاجرت جمعیت از روستاها و شهرهای اطراف به تبریز (به دلیل مرکزیت آن) از طرف دیگر، باعث شده که شهر از نظر این شاخص در وضعیت "نایمن" قرار گیرد. در سال ۲۰۲۴، ایران از لحاظ تولید ناخالص ملی (GDP)

کوه‌های اطراف (سهند) نسبت به دهه‌های قبل بسیار کاهش یافته که تأمین آب مشروب تبریز را با مشکل مواجه ساخته است. شکل ۵ درجه ایمنی زیرشاخص‌های مرتبط با شاخص فشار اقتصادی و اجتماعی را در شهر تبریز نشان می‌دهد.

گرفت که وضعیت "خیلی نالایم" از لحاظ مصرف آب صنایع وجود دارد. وضعیت استقرار طبیعی حوضه آبریز در بالادست این شهر آن را از نظر سیل "خیلی نالایم" کرده است، نوع بارش‌ها به دلیل تغییرات اقلیمی و افزایش دمای زمستان عمده‌تاً از برف به باران تبدیل شده است (Kanani et al., 2019) و حجم ذخیره برف در

Table 2- Calculation methods of Environmental pressure index and its sub-indexes in Tabriz city
جدول ۲- روش محاسبه شاخص اصلی فشار (فشار محیطی) و زیرشاخص‌های فرعی آن در شهر تبریز

Code	Index name	Method	Index amount*
1000	Pressure Index (PI)	[Average (1100,1200)-1]*25	22.83
1100	Environment pressure	Average (1110,1120)	2.2
1110	Water shortage	Average (1111,1112)	2
1111	Annual precipitation and its variability	Asakere (2011) (Mirzaei, 2022)	2
1112	Lack of drinking water around the city	(Zarghami et al., 2009)	2
1120	Flood vulnerability in the city	Average (1121, ..., 1126)	2.33
1121	Runoff intensity and its variability in the city	(Zarghami et al., 2011) (Salimi, 2022)	1
1122	Storm risk	(Namjo et al., 2019)	3
1123	Earthquake risk	(Namjo et al., 2019)	1
1124	Risk of rising sea level	Based on its location, the city has very safe conditions.	5
1125	Height of the studied area compared to the average sea height	(Nabourah, 2021)	2
1126	Issue of subsidence	(Zarghami, 2011) (Salimi, 2022)	2

* The index amount is obtained based on the findings of previous references and/or data.

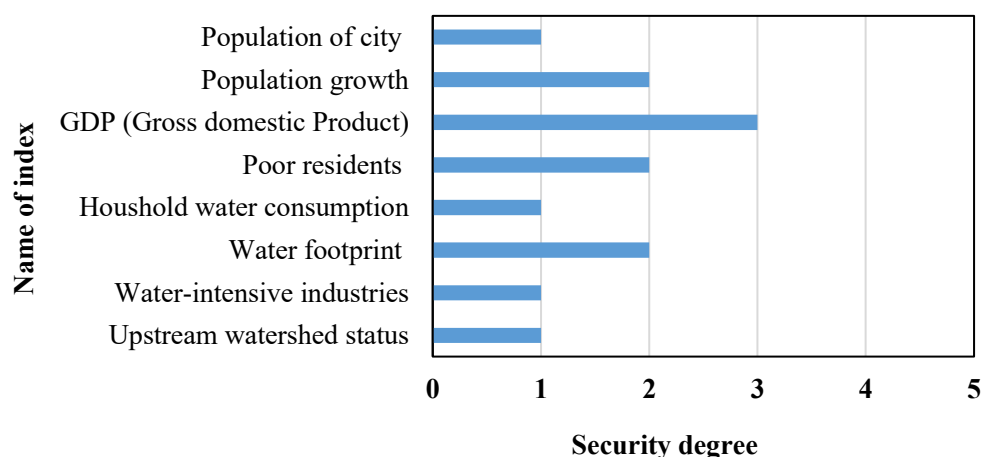


Fig. 5- The degrees of security in the sub-indexes related to the main economic and social pressure index for Tabriz city

شکل ۵- درجه ایمنی زیرشاخص‌های مربوط به شاخص اصلی فشار اقتصادی و اجتماعی درجه امنیت آب شهر تبریز

Table 3- Calculation method of Social and Economic Pressure Index and its sub-indices for Tabriz city

جدول ۳- روش محاسبه مقدار شاخص اصلی فشار اقتصادی و اجتماعی و زیرشاخص‌های فرعی آن در شهر تبریز

Code	Index name	Method	Index amount*
1200	Economic and social pressures	Average (1201, ...,1208)	1.625
1201	Population of the city	(Anonymous, 2016)	1
1202	Growth rate of the population in the city	(Anonymous, 2016)	2
1203	The Gross Domestic Product (GDP)	(Anonymous, 2024)	3
1204	The status of poor settlements in terms of access to water	(Ghanbari et al., 2023)	2
1205	The amount of household water consumption	(Ghanbari et al., 2023)	1
1206	The footprint of water consumption	(Barzegar Nemati et al., 2024)	2
1207	The status of water-intensive industries	(Anonymous, 2023)	1
1208	The condition of the basin in the upstream of the studied area	(Salimi et al., 2022)	1

* The index amount is obtained based on previous resources and data.

۲-۳- نتایج شاخص وضعیت موجود در تبریز

شاخص وضعیت موجود آب تبریز دارای پنج شاخص اصلی شامل مقدار کمبود آب، زیرساخت‌های تأمین آب، زیرساخت‌های حفاظت از سیل، زیرساخت‌های بهداشتی و کیفیت آب است. اولین شاخص موسوم به مقدار کمبود آب است که خود شامل الف) شاخص میزان تداوم تأمین مخازن آب و دریاچه‌ها، ب) میزان بهره‌برداری از سفره‌های آب زیرزمینی و ج) میزان کاهش تراز آب زیرزمینی است. بررسی منابع قابل دسترس (Vaezehir and Tabarmayeh, 2015; Negahban and Dinpashoh, 2019; Dorabad et al., 2020) معلوم کرد که سطح آب‌های زیرزمینی دشت تبریز (به‌خصوص در بخش‌های شرقی و جنوب‌شرقی شهر) طی سال‌های گذشته افت شدید داشته است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تأمین آب سالم از سفره‌های آبدار زیرزمینی دشت تبریز با مشکلات زیادی همراه است. در نتیجه، می‌توان ادعا نمود که از نظر کمی، درجه ایمنی هرکدام از شاخص‌های مذکور برای تبریز دارای ارزش یک بوده و از نظر توصیفی تبریز "خیلی نایمن" است. شاخص زیرساخت‌های تأمین آب شامل شاخص پوشش و نشت از سامانه آبرسانی شهری و تداوم و کیفیت تأمین آب است که بررسی شرایط و وضعیت آن‌ها براساس گزارش (Najaf Zadeh et al. 2017) نشان دادند که امنیت آب از این منظر در تبریز مابین دو وضعیت "خیلی نایمن" و "نایمن" قرار دارد. همچنین، زیرساخت‌های حفاظت از سیل نیز شامل زیرساخت‌های حفاظت از سیلاب‌های ساحلی، زیرساخت‌های حفاظت از سیلاب‌های رودخانه‌ای و

زیرساخت‌های زه‌کشی آب ناشی از وقوع طوفان است. با توجه به وضعیت فعلی مسیرهای عبور سیل از شهر، زیرساخت‌های حفاظت از سیل تبریز در وضعیت "نایمن" قرار دارند. شاخص زیرساخت‌های بهداشتی شامل زیرشاخص‌های مسیر عبور فاضلاب، پوشش و نشتی آن‌ها به خاک و کفایت تصفیه فاضلاب شهر است. بررسی‌ها نشان داد که وضعیت زیرساخت‌های بهداشتی تبریز در وضعیت "نایمن" قرار دارد. شاخص کیفیت آب نیز شامل زیرشاخص کیفیت آب‌های سطحی، رسوبات آلوده، میزان زیاده در آب‌های سطحی، کیفیت آب زیرزمینی و میزان نفوذ املاح به سفره‌های آبدار است که برخی گزارشات از جمله: Asl-Hashemi (2022) و Jafari and Dinpashoh (2024) حاکی از آن است که میزان آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی در دشت تبریز بسیار بالا و نگران‌کننده است. بنابراین، براساس یافته‌های محققین مذکور می‌توان بیان داشت که کیفیت آب در حد "قابل قبول" تا "نایمن" قرار دارد. شکل ۶ درجه ایمنی شهر تبریز را با توجه به زیرشاخص‌های مرتبط با وضعیت موجود آب نشان می‌دهد.

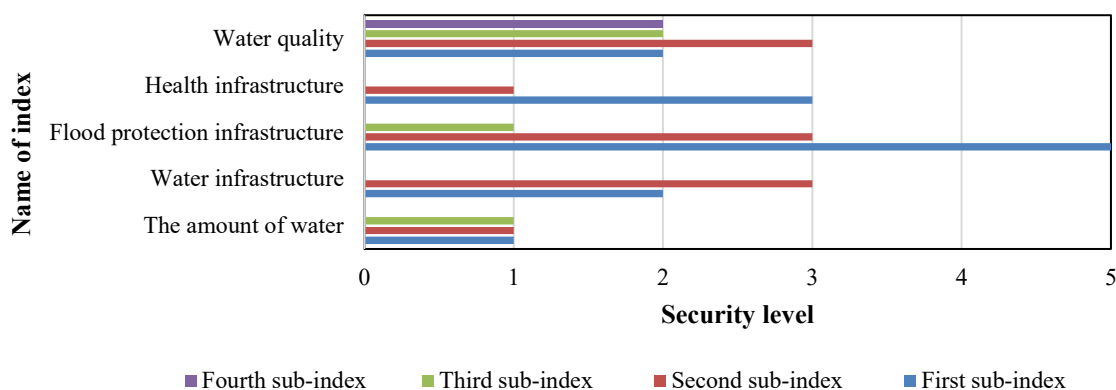


Fig. 6- Degrees of security of sub-indices related to the main state index for Tabriz city
 شکل ۶- درجه ایمنی زیرشاخص‌های مربوط به شاخص اصلی وضعیت موجود در تبریز

Table 4- Calculation process of the main state index and its sub-indexes for Tabriz city
 جدول ۴- فرایند محاسبه "شاخص وضعیت" و زیرشاخص‌های فرعی آن در شهر تبریز

Code	Index name	Method	Index amount*
2000	State Index (SI)	$[Average(2100, \dots, 2500)-1] \times 25$	28.5
2100	Accessible Water	$Average \times (2101, 2102, 2103)$	1
2101	Sustainability of water reservoirs and lakes	(Maidani et al., 2020) (Emami and Koch, 2019)	1
2102	Excessive exploitation of underground water resources	(Vaezihir and Tabarmayeh, 2015) (Darabad et al, 2020)	1
2103	Reducing the level of underground water	(Vaezihir and Tabarmayeh, 2015) (Darabad et al., 2020)	1
2200	Flood vulnerability in the city	Average (1121, ..., 1125)	2.5
2201	Runoff intensity and its variability in the city	(Najafzadeh et al., 2017)	2
2202	Storm risk	(Najafzadeh et al., 2017)	2
2300	Rate of subsidence in the city	Average (2301, 2302, 2303)	3
2301	Coastal flood protection infrastructure	According to the location of the city	5
2302	River flood protection infrastructure	(Yazdani, 2016)	3
2303	Storm flood drainage infrastructure	(Yazdani, 2016)	1
2400	Health infrastructure	Average (2401, 2402)	2
2401	Covering and leakage of sewage infrastructure	(Najafzadeh et al., 2017)	3
2402	Adequacy of wastewater treatment	(Najafzadeh et al., 2017)	1
2500	Water quality	Average (2501, ..., 2505)	2.2
2501	Surface water quality	(Sadeghzadeh Sadat et al., 2016)	2
2502	Contaminated sediments	(Sadeghzadeh Sadat et al., 2016)	3
2503	Garbage in surface water	(Sadeghzadeh Sadat et al., 2016)	2
2504	Groundwater quality	(Sadeghzadeh Sadat et al., 2016) (Vaezihir and Tabarmayeh, 2015)	2
2505	Salt infiltration in groundwater	(Sadeghzadeh Sadat et al., 2016) (Vaezihir and Tabarmayeh, 2015)	2

* The index amount is obtained based on previous resources and data

۳-۳- نتایج شاخص اثرات موجود در تبریز

در بررسی امنیت آب شهری، شاخص اثرات موجود خود شش زیرشاخص شامل: ۱- وابستگی به تأمین آب، ۲- آبرسانی، ۳- حفاظت از سیل، ۴- بهداشت، ۵- بوم‌شناسی و ۶- زیبایی‌شناسی دارد. شاخص وابستگی به تأمین آب به‌نوبه خود شامل زیرشاخص مشکلات و موانع مربوط به آبرسانی شهری است. در تبریز، این شاخص با توجه به منابع و مطالعات موجود (Beheshti et al., 2017; Najaf Zadeh et al., 2019)، در شرایط "ناایمن" قرار دارد. یعنی مشکلات و موانع زیادی در امر آبرسانی شهر تبریز وجود دارد. از جمله این مسائل می‌توان به پوسیده بودن لوله‌های انتقال آب در محلات مختلف شهری اشاره نمود. از لحاظ ردپای آب شهری نیز براساس داده‌ها و مطالعات قبلی وضعیت "ناایمن" در تبریز حاکم است. به‌عبارت دیگر، حجم زیادی از آب‌های قابل‌دسترس این شهر برای تولید انواع محصولات کشاورزی، صنعتی و شرب مصرف می‌شود. افزایش جمعیت شهری موجبات فراهمی شرایط "ناایمن" را در تأمین آب تبریز فراهم ساخته است. شاخص آبرسانی نیز دارای زیرشاخص "تعداد افراد برخوردار از آب شهری" است و بررسی‌ها نشان داد که با اینکه نزدیک به ۹۸٪ افراد ساکن در شهر به آب آشامیدنی دسترسی دارند، ولی در عمل، حجم عظیمی از آب‌های زیرزمینی دشت تبریز و مناطق اطراف آن استخراج می‌شود. طوریکه، در حال حاضر، به دلیل کمبود آب سالم، مقدار زیادی از آب آشامیدنی شهر تبریز (شامل شهرک‌های مسکونی و صنعتی اقماری) از منابع آب حوضه‌های مجاور (مانند زرینه‌رود و نهند) تأمین می‌شود. مطالعه و پیش‌بینی‌های انجام گرفته در خصوص حوضه آبریز نهند حاکی از آن است که تا سال ۲۱۰۰، متوسط رواناب ورودی به مخزن سد نهند بین ۸/۵٪ تا ۱۹٪ نسبت به دوره پایه ۲۰۱۴-۲۰۰۱ کاهش خواهد یافت (Salimi et al., 2023). این در حالی است که طبق اعلام شرکت آب و

فاضلاب آذربایجان شرقی میزان سرانه مصرف آب به ازای هر نفر ۱۵۵ لیتر در شبانه‌روز است. واضح است که این میزان در شرایط تغییرات اقلیمی و افزایش دمای هوا از یک سو و بالا رفتن استانداردهای بهداشتی قطعاً افزایش خواهد یافت. گزارشات اخذ شده از شرکت آب و فاضلاب شهرستان تبریز در سال ۱۴۰۳ نشان داد که در اوقات اوج مصرف آب، میزان تقاضای آب بیشتر از میزان نظیر تأمین آب شهری بوده و به‌علت توازن منفی، سازمان با قطعی آب مشترکین به استقبال مسئله آمده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که وضعیت آبرسانی تبریز دارای شرایط "ناایمن" است. شاخص حفاظت از سیل نیز دارای زیرشاخص‌های سیلاب‌های ساحلی، رودخانه‌ای و سیلاب‌های ناشی از وقوع طوفان است. از لحاظ سامانه دفع سیلاب‌های ساحلی شهر به‌علت دوری شهر از دریا شرایط "خیلی ایمن" است. ولی از نظر سیلاب‌های رودخانه‌ای و سیلاب‌های ناشی از وقوع طوفان در شرایط "ناایمن" قرار دارد. شاخص اصلی بهداشت نیز دارای دو زیرشاخص شامل الف) افراد برخوردار از بهداشت و ب) بیماری‌های مرتبط با آب است. مطالعات نشان می‌دهد که در حال حاضر در تبریز این شاخص‌ها "قابل قبول" هستند ولی در آینده، اگر اقدامات کنترلی مناسب انجام نشود، شرایط ممکن است تغییر یابد. در مورد شاخص بوم‌شناسی بررسی‌ها نشان داد که در تبریز از منابع طبیعی بویژه آب، خیلی بیشتر از توان بوم‌شناسی آن استفاده می‌شود (Mikayili and Sadeghi, 2010) و از این نظر، شهر در شرایط "خیلی ناایمن" است. زیبایی‌شناسی شاخص اصلی دیگری است که به چشم‌انداز ظاهری شهر تبریز از نظر آب‌نماها مربوط می‌شود. چون تعداد چشم‌اندازهای آب در نقاط مختلف شهر انگشت‌شمار است، بنابراین، شرایط "خیلی ناایمن" در تبریز حاکم است (جدول ۵). شکل ۷ درجه ایمنی شهر تبریز را از لحاظ زیرشاخص‌های "اثرات آب" نشان می‌دهد.

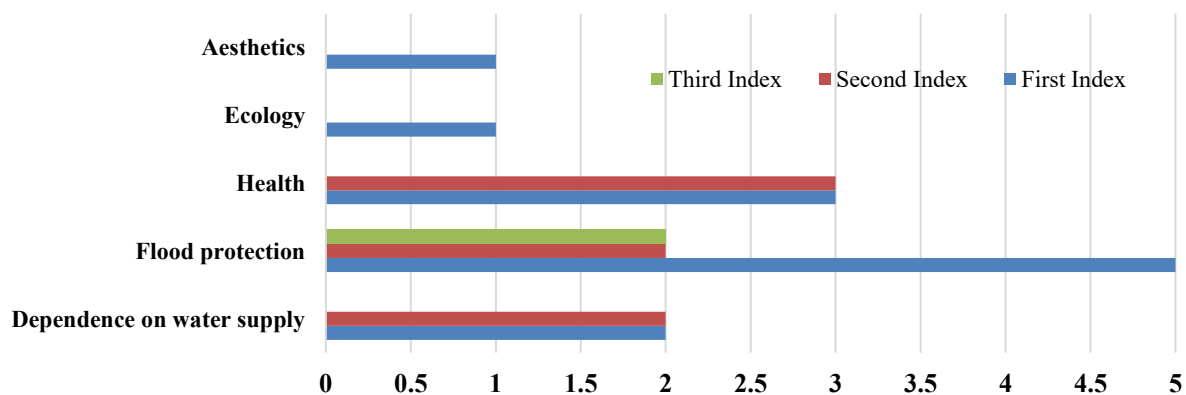


Fig. 7- Degrees of security for sub-indexes related to the main impact index for Tabriz city

شکل ۷- درجات ایمنی زیرشاخص‌های مربوط به شاخص اصلی اثر موجود در تبریز

Table 5- Index values for the main Impact Index and its sub-indexes for Tabriz city
جدول ۵- مقادیر شاخص اصلی اثر و زیرشاخص‌های فرعی آن در شهر تبریز

Code	Index Name	Method	Index amount*
3000	Impact Index (II)	$[Average(3100, \dots, 3600)-1] \times 25$	25
3100	dependency on the water supply	Average (3101, ..., 3102)	2
3101	Challenges and obstacles related to water supply	Beheshti et al. (2019)	2
3102	Sustainability of urban water footprint	Barzegar Nemati (2024)	2
3200	Water supply	Equal to (3201)	2
3201	The number of people with access to water	Najaf Zadeh et al. (2017)	2
3300	Flood protection	Average (3301, 3302, 3303)	3
3301	Coastal flooding	Considering the location of the city	5
3302	River flooding	Yazdani (2016)	2
3303	Storm-induced flooding	Yazdani (2016)	2
3400	Hygiene	Average (3401, 3402)	3
3401	People with access to hygiene	Asl-Hashemi et al. (2022)	3
3402	Water-related diseases	Asl-Hashemi et al. (2022)	3
3500	Ecology	Average (3501)	1
3501	Ecological quality of the city	Mikayili and Sadeghi Benis (2010)	1
3600	Aesthetics	Average (3601)	1
3601	Urban water perspective	Mikayili and Sadeghi Benis (2010)	1

چهار زیرشاخص است که در مطالعه حاضر، براساس نتایج پرسش‌نامه‌های توزیع شده بین کارشناسان آب و کشاورزی، درجه امنیت آب تبریز تخمین زده شد که در جدول ۶ و شکل ۸ نشان داده شده است.

۳-۴- نتایج شاخص پاسخگویی (R-Index) در تبریز
 شاخص پاسخگویی (R-Index)، درجه امنیت آب شهر تبریز را براساس زیرشاخص‌های چارچوب سازمانی، برنامه‌ریزی و مدیریت عملیاتی می‌سنجد. چارچوب سازمانی و شاخص برنامه‌ریزی، هر کدام دارای پنج زیرشاخص است و شاخص مدیریت عملیاتی دارای

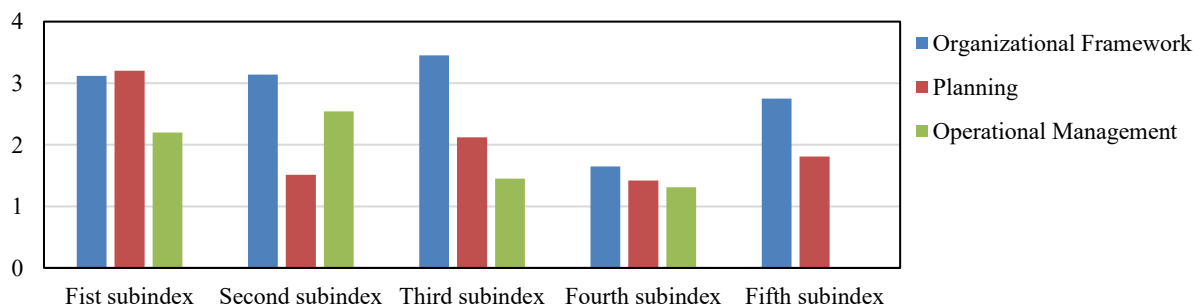


Fig. 8- Degrees of security for the response index and its sub-indexes for Tabriz city

شکل ۸- درجه ایمنی زیرشاخص‌های مربوط به شاخص اصلی پاسخگویی در شهر تبریز

Table 6- Estimated values for the response index and its sub-indexes for Tabriz city
جدول ۶- مقادیر تخمین زده شده برای شاخص اصلی پاسخگویی و زیرشاخص‌های فرعی آن در شهر تبریز

Code	Index name	Method	Index amount*
4000	Response Index (RI)	[Average (4100, ..., 4300)-1]*25	30.92
4100	Organizational framework	Average (4101, ..., 4105)	2.82
4101	Clarity of roles and responsibilities in the organization	Questionnaire	3.12
4102	Horizontal coordination and communication within the organization	Questionnaire	3.14
4103	Vertical coordination and communication within the organization	Questionnaire	3.45
4104	Deviations or errors in the organization	Questionnaire	1.65
4105	Responsibilities in the organization	Questionnaire	2.75
4200	Planning in the organization	Average (4201, ..., 4205)	2.01
4201	Access to data and information	Questionnaire	3.2
4202	Financial resources	Questionnaire	1.51
4203	Effectiveness of disaster management	Questionnaire	2.12
4204	Strategic planning	Questionnaire	1.42
4205	Level of public participation	Questionnaire	1.81
4300	Operational management	Average (4301, ..., 4304)	1.88
4301	Effectiveness of urban water management	Questionnaire	2.2
4302	Effectiveness of health management	Questionnaire	2.54
4303	Effectiveness of flood protection management	Questionnaire	1.45
4304	Effectiveness of environmental and ecological management	Questionnaire	1.31

جاکارتا ارائه شد. به طوری که از شکل ۸ می‌توان مشاهده کرد، شهر تبریز در مقایسه با ۱۰ شهر دیگر جهان از امنیت آب پایین‌تری برخوردار است. به عبارت بهتر، تبریز در بین یازده شهر، رتبه یازدهم (آخر) را احراز کرده است. این نتیجه، زنگ خطر و ضرورت توجه مسئولین را به موضوع امنیت آب شهری نشان می‌دهد. لازم است مسئولین شهر اقدامات موثرتری برای ارتقای سطح امنیت آب شهر تبریز انجام دهند.

۳-۵- نتیجه شاخص نهایی امنیت آب (WSI) در تبریز
جدول ۷ نتیجه کمی شاخص امنیت آب (WSI) و چهار زیرشاخص اصلی را در تبریز نشان می‌دهد. به طوری که از این جدول می‌توان استنباط نمود، از نظر کمی درجه امنیت آبی شهر تبریز برابر ۲۶/۸۱ است. که از میانگین چهار شاخص I-index, S- index, P-index و R-index محاسبه شده است. در شکل ۸ درجه امنیت آب شهر تبریز و همچنین ۱۰ شهر مهم دیگر جهان شامل: آمستردام، تورنتو، سنگاپور، دبی، پکن، هنگ‌کنگ، سائو پائولو، نایروبی، لیما (پرو) و

Table 7- Water Security Index (WSI) and its four related sub-indexe for Tabriz city
جدول ۷- شاخص امنیت آب شهر تبریز (WSI) و چهار زیرشاخص های مربوط به آن

Name of city	Pressure index	State index	Impact Index	Response index	WSI
Tabriz	22.83	28.5	25	30.92	26.81

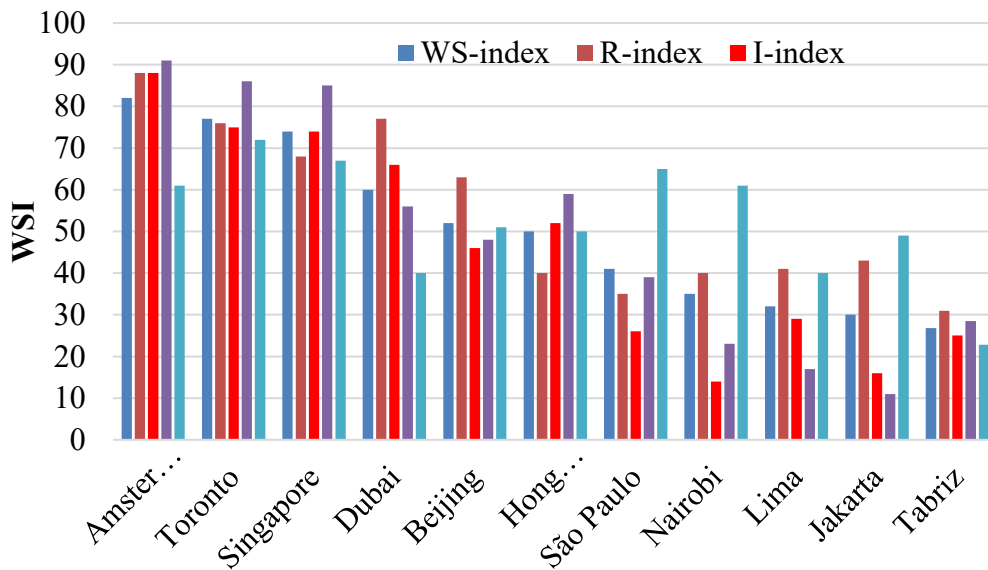


Fig. 8- Water Security Index (WSI) for Tabriz city and ten other cities according to the WS and its four sub-indices

شکل ۸- امنیت آب شهر تبریز و ۱۰ شهر دیگر جهان با توجه به شاخص‌های (WS) و چهار زیرشاخص آن

۴۰)، پکن (۵۱)، هنگ‌کنگ (۵۰)، سائو پائولو (۶۵)، نایروبی (۶۱)، شهر لیما (پرو) (۴۰) و جاکارتا (۴۹) است. از نظر شاخص وضعیت (S-Index)، شاخص امنیت آب شهر تبریز برابر (۲۸/۵) و بدتر از هفت شهر مهم جهان یعنی: آمستردام (۹۱)، تورنتو (۸۶)، سنگاپور (۸۵)، دبی (۵۶)، پکن (۴۸)، هنگ‌کنگ (۵۹)، سائو پائولو (۳۹) است و فقط از سه شهر نایروبی (۲۳)، لیما (پرو) (۱۷) و جاکارتا (۱۱) بهتر است. از نظر شاخص (I-Index) امنیت آب شهر تبریز از شهرهای

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه شاخص امنیت آب شهر تبریز با استفاده از روش PSIR (روشی جامع بر مبنای تفکر سیستمی) به‌دست آمد. نتایج نشان داد که در شهر تبریز مقدار عددی شاخص فشار (P-Index) ۲۲/۸۳ بوده که در مقایسه با دیگر شهرهای مورد مطالعه وضعیت نامطلوبی دارد. میزان شاخص فشار در ده شهر مورد مقایسه به ترتیب برابر است با: آمستردام (۶۱)، تورنتو (۷۲)، سنگاپور (۶۷)، دبی

پی‌نوشت‌ها

- 1- Water Security Index (WSI)
- 2- Pressure- State-Impact- Response (PSIR)
- 3- Water Unsecurity
- 4- Water Security
- 5- World Resource Institute
- 6- Ecosystem
- 7- World Water Council (WWC)

۶- تقدیر و تشکر

این مقاله با حمایت مالی بنیاد ملی علم ایران با شماره طرح ۴۰۱۳۳۳۱ انجام گرفته است. که بدینوسیله قدردانی می‌شود.

نایروبی (۱۴) و جاکارتا (۱۶) بهتر بوده و از هشت شهر دیگر آمستردام (۸۸)، تورنتو (۷۵)، سنگاپور (۷۴)، دبی (۶۶)، پکن (۴۶)، هنگ‌کنگ (۵۲)، سائو پائولو (۲۶)، لیما (پرو) (۲۹) شرایط بدتری دارد. از نظر شاخص (R-Index) امنیت آب در شهر تبریز برابر ۳۰/۹۲ و در رده آخر نسبت به ده شهر مورد مقایسه یعنی: آمستردام (۸۸)، تورنتو (۷۶)، سنگاپور (۶۸)، دبی (۷۷)، پکن (۶۳)، هنگ‌کنگ (۴۰)، سائو پائولو (۳۵)، نایروبی (۴۰)، شهر لیما (پرو) (۴۱) و جاکارتا (۴۳) قرار دارد. در نهایت، ارزش کمی درجه امنیت آب شهر تبریز (W-Index) ۲۶/۸۱ بوده که در مقایسه با ده شهر مهم مورد مطالعه در جهان یعنی آمستردام (۸۲)، تورنتو (۷۷)، سنگاپور (۷۴)، دبی (۶۰)، پکن (۵۲)، هنگ‌کنگ (۵۰)، سائو پائولو (۴۱)، نایروبی (۳۵)، شهر لیما (پرو) (۳۲) و جاکارتا (۳۰) وضعیت نامناسبی را نشان می‌دهد.

در دشت تبریز نیز در سال‌های اخیر فشار محیطی زیادی بر منابع آب زیرزمینی وارد شده است طوری که خطرات بالقوه نشست زمین آن را تهدید می‌کند (Negahban and Dinpashoh, 2019). در تبریز، احتمال وقوع سیلاب‌های مخرب بالا است. همچنین، برخی از مسیرهای اصلی جریان سیل از جمله مهران‌رود به دلیل افزایش فشارهای اجتماعی و اقتصادی، توسعه ساخت و سازها و توسعه بی‌رویه شهری با موانع متعدد مسدود شده است. بررسی مصرف آب شهری در تبریز نشان می‌دهد که سرانه مصرفی آب شهر تبریز به‌طور متوسط در سال حدود ۱۵۵ لیتر در روز به ازای هر نفر است که برای تأمین مصرف آب، علاوه بر آب‌های سطحی، از آب‌های زیرزمینی نیز بطور گسترده استفاده می‌شود. هر سال بر تعداد چاه‌های بهره‌برداری افزوده می‌شود و این مسئله باعث می‌شود که از میزان یا حجم آب قابل دسترس موجود در دشت تبریز کاسته شود. همچنین، براساس آمارهای اخذ شده از شرکت آب و فاضلاب شهرستان تبریز، ۵۸ درصد آب شهر تبریز از سد شهید کاظمی شهر بوکان واقع بر روی رودخانه زربینه‌رود، ۳۷ درصد از چاه‌ها و قنوات و تنها ۵ درصد از سد نهند تأمین می‌شود. براساس آمارهای شرکت آب و فاضلاب شهرستان تبریز، بیش از ۷۵ درصد از کل آب‌های قابل دسترس (سطحی و زیرزمینی در استان آذربایجان شرقی) برای تأمین آب آشامیدنی جمعیت ساکن در این استان برداشت می‌شود که این میزان در شرایط تغییرات اقلیمی، افزایش جمعیت و گسترش شهرسازی و صنعت، هر سال افزایش می‌یابد و این مسئله باعث کاهش درجه ایمنی آبی تبریز می‌شود.

- Abelnga TH, El-Naser H, Ribbe L, Frechen FB (2022) Assessing water security in water-scarce cities: Applying the integrated urban water security index (IUWSI) in Madaba, Jordan. *Water* 12(5):1-22
- Adams EA (2017) Thirsty slums in African cities: Household water insecurity in urban informal settlements of Lilongwe, Malawi. *International Journal of Water Resources Development* 34(6):869-887
- Anonymous (2013) Meteorological organization of east Azerbaijan Province. (In Persian)
- Anonymous (2016) Iranian statistical organization. (In Persian)
- Anonymous (2018) Global water security: Lessons learnt and long-term implications. World Water Council, Singapore
- Anonymous (2024) GDP (current US\$). data.worldbank.org. Archived from the original on 13 June 2024. Retrieved 2024-06-13
- Asakere H and Razmi R (2011) Analysis of annual precipitation changes in the northwest of Iran. *Geography and Environmental Planning* 23(3):147-162 (In Persian)
- Asante-Wusu I, Yeboah IE (2020) Geography of water insecurity in three localities in the Accra Tema City-Region, Ghana. *African Geographical Review* 39(4):308-323
- Asl-Hashemi A, Safari GH, Khairy N (2022) A brief review of the quality of drinking water in Tabriz. *Quarterly Journal of Chemistry Application in the Environment* 12(47):12-21 (in Persian)
- Babel MS, Victor RS, Devesh S, Nguyen MD (2020) Measuring water security: A vital step for climate change adaptation. *Environmental Research* 185:109400
- Barzegar Nemati R, Mahvi AH, Dehghani MH, Hemmati Borji S, Hadi M (2024) A feasibility study to estimate household water footprint in Iran: Adaptation and application of a localized questionnaire. *Cleaner Water* 2(10043)
- Beheshti MB, Behbodhi D, Zali N, Ahmadzadeh Deljovan F (2019) Identification and analysis of key factors and effective drivers in the integrated management of water resources based on the future research approach (Case study: Tabriz city). *Ecohydrology* 7(1):59-76 (in Persian)
- Bonnafous L, Lall U, Siegel J (2017) A water risk index for portfolio exposure to climatic extremes: Conceptualization and an application to the mining industry. *Hydrology and Earth System Sciences* 21(4):2075-2106
- Cawood S, Wahby N, Ferrara LN (2022) Hybridity in practice: Responding to water insecurity in São Paulo, Dhaka and Cairo. *Water Alternatives* 15(3):688-708
- Cifuentes E, Rodriguez S (2005) Urbans sprawl, water insecurity, and enteric diseases in children from Mexico City. *EcoHealth* 2(1):70-75
- Cooper B, Burton M, Crase L (2011) Urban water restrictions: Attitudes and avoidance. *Water Resources Research* 47(12):1-13
- Dadson S, Hall JW, Garrick D, Sadoff C, Grey D, Whittington D (2017) Water security, risk and economic Growth, insight from dynamical systems model. *Water Resources Research* 53(8):6425-6438
- Daloğlu Çetinkaya I, Yazar M, Kılınç S, Güven B (2022) Urban climate resilience and water insecurity: Future scenarios of water supply and demand in Istanbul. *Urban Water Journal* 20(10):1336-1347
- Dorabad F, Mostafazadeh R, Ebadi E, Saadati R (2020) Modeling the spatial distribution and lowering of the Tabriz plain groundwater level. *Land Geographical Engineering* 3(6):1-16
- Emami F, Koch M (2019) Modeling the impact of climate change on water availability in the Zarrine River Basin and inflow to the Boukan Dam, Iran. *Climate* 7(51):1-20
- Fielding KS, Russell S, Spinks A, Mankad A (2012) Determinants of household water conservation: The role of demographic, infrastructure, behavior, and psychosocial variables. *Water Resources Research* 48(10):1-12
- Ghanbari A, Faizizadeh B, Nafs Natigeh M (2023) Application of GIS spatial analysis in modeling and predicting urban water consumption pattern in Tabriz. *Journal of Civil Engineering and Environment* 53 (111):180-188 (in Persian)
- Gesuldo GC, Oliveira PT, Rodrigues DBB, Gupta HV (2019) Assessing water security in the São Paulo metropolitan region under projected climate change. *Hydrology and Earth System Sciences* 23(12):4955-4968
- Ginkel KCHV, Hoekstra AY, Buuman J, Hogeboom RJ (2018) Urban water security dashboard: Systems approach to characterizing the water security of cities. *Water Resources Planning and Management* 144(12):1-11
- Gleick P, Charles I, Trivedi A (2020) Ending conflicts over water: Solutions to water and security challenges. World Resources Institute
- Grasham CF, Charles KJ, Abdi TG (2022) (Re-)orienting the concept of water risk to better understand inequities in water security. *Frontiers in Water* 3:799515
- Grey D, Sadoff C (2007) Sink or swim? Water security for growth and development. *Water Policy* 9(6):545-571
- Imani S, Dinpashoh Y, Asadi E, Fakheri-Fard A (2024) Estimation of Tabriz population based on exponential and logistic growth models for water scarcity analysis. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater Research* 11(2):102-109
- Zarghami M & Akbariyeh S (2012) System dynamics modeling for complex urban water systems:

- Application to the city of Tabriz, Iran. *Resources, Conservation and Recycling* 60:99–106
- Jafari N, Dinpashoh Y (2024) Application of TOPSIS method in the investigation of river water quality (Case study: Aji Chai River). *Water and Soil* 37(6):855-869 (In Persian)
- Jiaqi L, Weijun H, Enhui J, Liang Y, Bo Q, Dagmawi MD, Thomas SR (2024) Evaluation and prediction of water security levels in Northwest China based on the DPSIR model. *Ecological Indicators* 163:112045
- Kanani R, Fakheri A, Gorbani MA, Dinpashoh Y (2019) Analysis of the role of climatic and human factors in runoff variations (Case study: Lighvan River in Urmia Lake Basin, Iran). *Journal of Water and Climate Change* 11(1):291-302
- Kundzewicz ZW, Kowalczak P (2011) Water-related conflicts in urban areas in Poland. *Hydrological Sciences Journal* 56:588-596
- Malmir M, Javadi S, Moridi A, Neshat A, Razdar B (2021) A new combined framework for sustainable development using the DPSIR approach and numerical modeling. *Geoscience Frontiers* 12(4):101169
- Martins JH, Camanho Ana S, Gaspar S, Miguel B (2012) A review of the application of driving forces-Pressure-State-Impact-Response framework to fisheries management. *Ocean & Coastal Management* 69:273–281
- Maxim L, Spangenberg JH, O'Connor M (2009) An analysis of risks for biodiversity under the DPSIR framework. *Ecological Economics* 69(1):12–23
- Mesgaran M, Azadi P (2018) A National adaptation plan for water scarcity in Iran. Working Paper 6, Stanford Iran 2040 Project, Stanford University
- Mikayili A, Sadeghi Benis M (2010) Ecological network of Tabriz city and proposed solutions for its preservation and development. *Environmental Research* 1(2):43-52 (In Persian)
- Mirzaei S, Estwari Yaser Y, Ahmadi J, Ghorbani Dashtaki S, Shahbazi Kia S (1401) Forecasting changes in precipitation and temperature of Tabriz synoptic station during the period of 2020-2100. *Journal of Climatology Research* 13(52):125-142 (In Persian)
- Monica LZ, Valentin-Marian A, Romeo-Victor I, Catalina I, Lucian PG (2024) Quantifying the impact of the water security index on socio-economic development in EU27. *Socio-Economic Planning Sciences* 93:101912
- Nabourah R, Rezaei Farei AH, Faizizadeh B (2022) The effect of lowering the groundwater level and geotechnical soil parameters on land subsidence using GIS (Case study: Tabriz city). *Journal of Civil and Environmental Engineering* 52(1):185-201 (In Persian)
- Najaf Zadeh H, Hossinzadeh Dalir K, Pourmohammadi MR (2017) Analyzing Tabriz metropolitan drinking water utilities by using performance benchmarking. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater* 4(2):334-342
- Namjoo F, Samadzadeh R, Masoumi MT (2019) Measuring urban resilience against earthquake risk (Case study: Tabriz metropolis). *Geography and Environmental Hazards* 36:219-201 (In Persian)
- Negahban F, Dinpashoh Y (2019) Trend analysis of groundwater level, using Mann-Kendall nonparametric method (Case study: Tabriz plain). [Journal of Water and Soil Science](#) 23(2):335-347 (In Persian)
- Ness B, Anderberg S, Olsson L (2010) Structuring problems in sustainability science: The multi-level DPSIR framework. *Geoforum* 41(3):479488
- Padowski JC, Jawitz JW (2011) Water availability and vulnerability of 225 large cities in the United States. *Water Resources Research* 48(12):1-16
- Salimi M, Sattari MT, Parsa J (2023) Investigation of the effect of climate change based on different scenarios on the runoff and inflow to the Sahand dam reservoir. *Water and Soil Science* 33(4):133-147 (In Persian)
- UN-Water (2013) Water security and the global water agenda; A UN Water Analytical Brief. available at: https://www.unwater.org/app/uploads/2017/05/analytical_brief_oct2013_web.pdf.
- Vaezihir A, Tabarmayeh M (2015) Total vulnerability estimation for the Tabriz aquifer (Iran) by combining a new model with DRASTIC. *Environmental Earth Sciences* 74:2949–2965
- Wheater HS, Gober P (2015) Water security and the science agenda. *Water Resources Research* 54:5406–5424
- Yazdani MH, Ghasemi M, Saleki Maleki MA, Afkhami F (2016) Micro-zoning of cities' vulnerability to floods (case study: Tabriz city). *Scientific and Research Quarterly of Relief and Rescue* 9(36):33-44 (In Persian)
- Zarghami M, Abdi A, Babaecian I, Hassanzadeh Y, Kanani R (2011) Impacts of climate change on runoffs in East Azerbaijan, Iran. *Global and Planetary Change* 78(3-4):137–146
- Zarghami M, Hassanzadeh Y, Babaecian I, Kanani R (2009) Climate change and water resources vulnerability; Case study of Tabriz City. *SENSE Symposium on Climate Proofing Cities, Amsterdam*
- Zlati ML, Antohi VM, Ionescu RV, Iticescu C, Georgescu LP (2024) Quantifying the impact of the water security index on socio-economic development in EU27. *Socio-Economic Planning Sciences* 93:101912