محیط زیست طبیعی، منابع طبیعی ایران، دورهٔ ۶۸، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۳۹۴
صفحات ۶۰۸-۵۹۵

سنجش کارایی و بهره‌وری مصرف آب تهران با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها

حمید سرخیل[۱*]، مهیار حبیبی‌راد [۲]، نعمت‌الله خراسانی[۳]

۱. استادیار، گروه مهندسی محیط زیست، دانشگاه محیط زیست، ایران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران- محیط زیست، دانشگاه محیط زیست، ایران

۳. استاد، گروه محیط زیست، دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۲۱- تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۵/۱۱)

چکیده

در این پژوهش با استفاده از تکنیک‌های ورودی تحلیل پوششی داده‌ها، شاخص‌های کارایی و بهره‌وری مصرف آب تهران برای دورهٔ زمانی ۱۳۸۴- ۱۳۹۲ ارزیابی شد. همچنین همبستگی بین مصرف آب و فعالیت‌های اقتصادی منطقه با استفاده از شاخص تولید ناخالص داخلی منطقه‌ای بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که بهره‌وری کل از نظر تغییر کارایی فنی و تغییر کارایی مقیاس، به‌ترتیب ۱/۸۰ و ۱/۶۸ درصد بهبود یافته است. علاوه بر آن، به‌علت اجرای طرح‌های کلان، جمع‌آوری و تصفیهٔ فاضلاب و همچنین به‌کار بردن راهکارهای مدیریت مصرف آب برای افزایش ذخیرهٔ سالانهٔ آب به‌ویژه از سال ۱۳۹۰ به بعد، بهره‌وری کل از نظر تغییر فناوری، ۱۲/۳۲ درصد بهبود یافته است. این شاخص‌ها تأیید می‌کند که بدون کاهش در میزان تولیدات و خدمات عمدهٔ مربوط به تهران، امکان کاهش مصرف آب تا ۲۲ میلیون متر مکعب در این شهر میسر است.

کلیدواژگان: بهره‌وری، تحلیل پوششی داده‌ها، کارایی، کارایی مصرف آب.

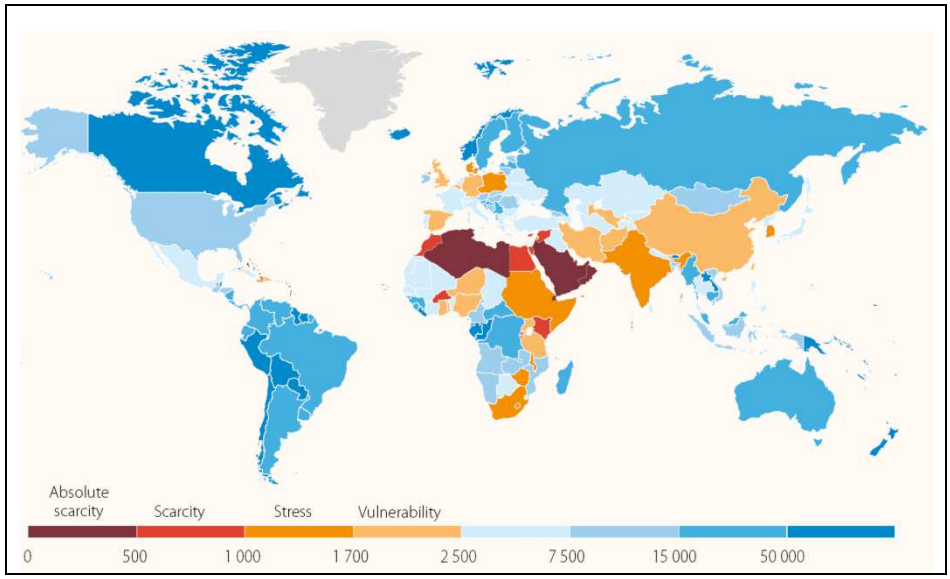
* نویسندهٔ مسئول

Email: sarkheil_h@yahoo.co.uk

۱. مقدمه

امروزه تأمین آب به‌منزلهٔ یکی از مسائل مهم محیط زیستی، اقتصادی و اجتماعی هر کشوری به‌شمار می‌رود. رشد جمعیت، تغییر آب و هوا، کاهش منابع آب، افزایش هزینه‌های تصفیه و انتقال آب، الزام رعایت دستورالعمل‌های بهداشتی و محیط زیستی سبب شده است حفاظت و مصرف بهینهٔ منابع آب از یک‌سو و جمع‌آوری و تصفیهٔ فاضلاب از سوی دیگر بسیار مهم و ضروری باشد (Bagatin *et al.*, 2014).

پیش‌بینی پژوهشگران برای درخواست جهانی آب، ۵۵ درصد افزایش را تا سال ۲۰۵۰ نشان می‌دهد، درحالی‌که بیش از ۴۰ درصد جمعیت جهانی، برای تأمین آب با دشواری روبه‌رو خواهند بود. شواهد معتبری وجود دارد مبنی بر اینکه، حدود ۲۰ درصد از منابع آب زیرزمینی به‌طور پیوسته در حال کاهش است (WWAP, 2014). براساس آمار جهانی سال ۲۰۱۱، سهم سالانهٔ هر ایرانی از ذخایر آب، ۱۷۰۰ تا ۲۵۰۰ مترمکعب در سال بوده است، به‌طوری‌که این امر سبب شده است ایران در زمرهٔ کشورهای آسیب‌پذیر از نظر منابع آب قرار گیرد. این آمار برای بیشتر کشورهای اروپایی، بیش از ۷۵۰۰ مترمکعب برای هر نفر در سال بوده است که در شکل ۱ نشان داده می‌شود. در کشور ایران رشد جمعیت و تغییر آب و هوا، سبب کاهش منابع آب به‌ویژه برای شهرهای بزرگ شده است. برای نمونه، ذخیرهٔ آب پشت سدهای تأمین‌کنندهٔ آب تهران، در سال ۱۳۹۳ نسبت به سال قبل، ۵۴ میلیون مترمکعب کاهش یافته است (TWSWWT, 2014).



شکل ۱. سهم سالانهٔ هر نفر از منابع آب در سال 2011 (مترمکعب) (WWAP, 2014)

عملکرد سیستم‌های آب و فاضلاب، به‌منظور اطمینان از تأمین آب مورد نیاز، تصفیهٔ آب و فاضلاب، ارائهٔ خدمات مربوط و هزینه‌های قابل قبول باید بهبود یابد. روش‌ها و شاخص‌هایی براساس مشخصات واقعی این سیستم‌ها شامل داده‌ها و مقادیر در دسترس از میزان برداشت از منابع آب، چگونگی تصفیه و انتقال آب، تلفات آب، چگونگی و میزان مصرف نهایی آب و چگونگی جمع‌آوری، انتقال و تصفیهٔ فاضلاب به‌منظور سنجش کارایی مصرف از منابع آب، و اثربخشی خدمات مربوط به تأمین آب و تصفیهٔ آب و فاضلاب مورد نیاز است (Vilanova *et al.*, 2015).

عوامل مختلفی در عملکرد سیستم‌های تأمین آب مؤثرند. برخی پژوهشگران، نرخ میانگین تلفات آب در عملیات تصفیه و انتقال را مهم‌ترین عامل تضعیف عملکرد سیستم‌های تأمین آب دانسته‌اند؛

به‌طوری‌که نرخ جهانی تلفات آب در این سیستم‌ها، ۳۰ تا ۴۰ درصد است (Araujo *et al.*, 2006). نرخ آب به حساب نیامده در اروپا، ۹ تا ۳۰ درصد، در آمریکای شمالی ۲۰ تا ۵۰ درصد (Colombo & Karney, 2002)، و در کشورهای عربی ۱۵ تا ۶۰ درصد است (World Bank, 2009). علاوه بر آن بین ۲ تا ۳ درصد از مصرف الکتریستهٔ جهانی به‌منظور پمپاژ آب در این سیستم‌ها استفاده می‌شود. بنابراین، تلفات آب درواقع تلفات الکتریسته نیز محسوب می‌شود که تأثیرات زیست‌محیطی نظیر افزایش آلاینده‌های گازهای گلخانه‌ای را به همراه دارد (Brandt *et al.*, 2011; Plappally & Lienhard, 2012; Elias-Maxil *et al.*, 2014).

عملکرد سیستم‌های آب و فاضلاب با سنجش «اثربخشی» و «کارایی» تعیین می‌شود. اثربخشی، مفهومی کیفی است و به‌منزلهٔ سطح خدمات ارائه‌شده در رابطه با رفع نیازهای مشتری تعریف می‌شود؛ درحالی‌که کارایی، مفهومی کمّی است و برای استفادهٔ بهینه از منابع موجود در جهت فراهم‌کردن سطح قابل اطمینانی از رضایتمندی مشتری در نظر گرفته می‌شود (Neely *et al.*, 2005). بنابراین، هنگامی که عملکرد سیستم‌های تأمین آب از نظر میزان مصرف از منابع آب مورد نظر باشد، باید کارایی آنها سنجیده شود.

پژوهش‌ها در زمینهٔ سنجش کارایی در سیستم‌های تأمین آب از سال ۱۹۶۰ با استفاده از روش‌های اقتصادسنجی آغاز شد. ابتدا کارایی این سیستم‌ها با محاسبهٔ هزینه‌ها و توابع تولید، محاسبه می شد (Abbott & Cohen, 2009). نتایج این پژوهش‌ها در سیاست‌گذاری بعضی از کشورها به‌منظور تأمین آب مورد نیاز مشتریان، به‌ویژه در بخش یارانه‌های اعطایی به آنها استفاده شده است (Tupper & Resende, 2004). در پژوهش‌های بعدی، ترکیب معیارهای کمّی و کیفی برای سنجش کارایی و ارائهٔ نتایج واقعی‌تر در نظر گرفته شده است (van der Stede, Chow & Lin, 2006)، به‌طوری‌که بیشتر این پژوهش‌ها تا سال ۱۹۹۰ صرفاً با تعیین معیارهای اقتصادی انجام می‌گرفت.

اصلاحات انجام‌شده در صنایع آب کشور انگلستان در سال ۱۹۹۰، پژوهشگران را برای توسعهٔ مطالعات در زمینهٔ کارایی و بهره‌وری در این بخش تشویق کرد. درمجموع ۶۹ پژوهش از سال ۱۹۷۸ تا ۲۰۰۷ توسط Abbott و Cohen (2009) و ۴۴ پژوهش از سال ۱۹۸۸ تا ۲۰۰۸ توسط Walter و همکاران (2009) بررسی شده است. در این پژوهش‌ها برای سنجش کارایی و بهره‌وری در سیستم‌های تأمین آب، از روش تحلیل پوششی داده‌ها[1] (DEA) و توابع ساده‌شدهٔ هزینه، استفاده شده است. متغیرهای اصلی که در این پژوهش‌ها در نظر گرفته شده است؛ شامل میزان تولید و مصرف آب، تلفات آب، هزینه‌های تولید آب، نیروی کار، انرژی مصرفی، مواد شیمیایی مصرفی، ظرفیت ذخیره، طول لوله‌ها، مباحث هیدرولیکی، تعداد اتصالات، هزینهٔ تصفیه، و نواحی جغرافیایی تحت پوشش است (Abbott & Cohen, 2009; Walter *et al.*, 2009).

در سطح ملی و بین‌المللی، شاخص‌های کارایی و بهره‌وری در رابطه با تولید ناخالص داخلی محاسبه می‌شوند و نشان می‌دهند که برای تولید مقدار معینی از کالاها و خدمات (برحسب واحد پول) چه مقدار از منابع (مواد خام، انرژی، آب و غیره) استفاده شده است (IMOE, 2013).

در پژوهش حاضر با استفاده از تکنیک‌های ورودی تحلیل پوششی داده‌ها، شاخص‌های کارایی و بهره‌وری مصرف آب شهر تهران[2]، به‌منظور محاسبهٔ میزان کاهش احتمالی در مصرف آب سنجیده می‌شوند. بهره‌وری کل با روش مالمکوئیست[3]، به مؤلفه‌هایی شامل تغییر کارایی فنی، تغییر کارایی مقیاس و تغییر فناوری تجزیه و تحلیل می‌شود. داده‌هایی که در این پژوهش استفاده می‌شود شامل مقادیر برداشت از آب‌های

1. Data envelopment analysis

۲. فقط منابع آب و مناطق تحت پوشش سیستم‌های آب و فاضلاب تهران مورد نظر این پژوهش است.

3. Malmquist

سطحی، برداشت از آب‌های زیرزمینی، فاضلاب جمع‌آوری و تصفیه‌شده، آب فروخته‌شده به استان البرز، تلفات آب و مصرف داخلی در سیستم تصفیهٔ آب، مصرف مناطق تحت پوشش، ذخیرهٔ احتمالی آب و همچنین تولید ناخالص داخلی منطقه‌ای[1] (GRDP)، از سال ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۲ برای تهران است.

روش سنجش شاخص‌های کارایی و بهره‌وری و کاربرد تجربی ارائه‌شده در این پژوهش، برای مطالعات آکادمیک در زمینهٔ کاهش مصرف آب و الزامات اقتصادی مربوط به آن و همچنین برای شرکت‌های آب و فاضلاب، به‌منظور بررسی نتایج اجرای طرح‌های کلان برای کاهش مصرف آب در شهرهای بزرگ مفید است.

۲. مواد و روش‌ها

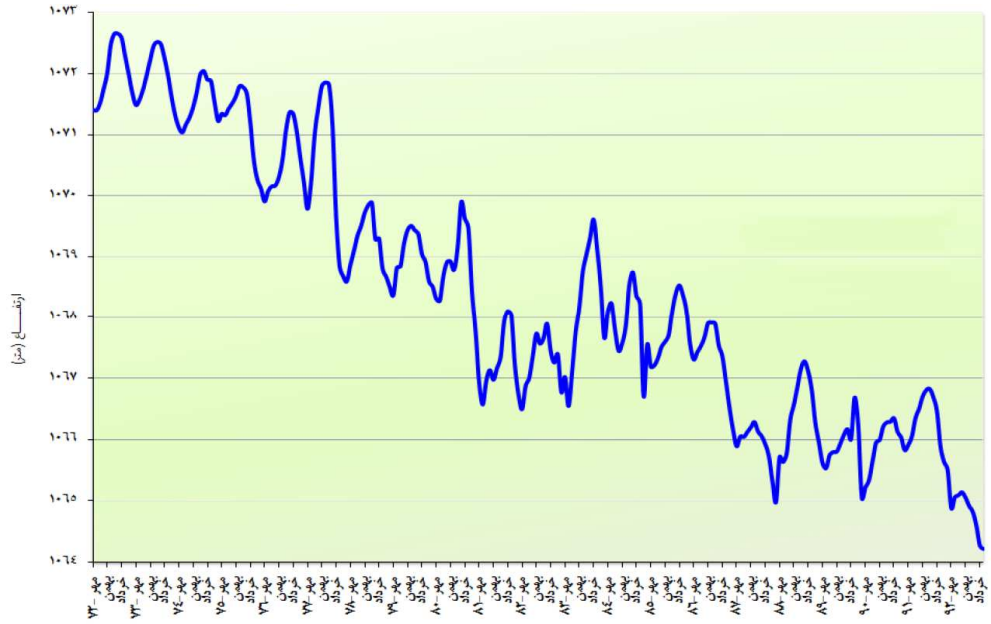
۱.۲. تهران و مسئلهٔ کمبود آب

تهران، پایتخت ایران، با مساحت ۷۳۰ کیلومترمربع و جمعیت ساکن بیش از ۸ میلیون نفر، بزرگ‌ترین و پرجمعیت‌ترین شهر ایران است که بسیاری از امکانات دولتی و ملی را به خود اختصاص داده است. این شهر در استان تهران واقع شده و این استان حدود ۱۶ درصد از جمعیت کشور (بیش از ۱۲ میلیون نفر) و ۲۴ درصد از فعالیت‌های صنعتی و اقتصادی کل کشور را در خود جای داده است (SCI, 2014). از نظر موقعیت جغرافیایی، این شهر در دامنهٔ جنوبی ارتفاعات البرز واقع شده است (شکل ۲).

منابع آب‌های سطحی استان تهران، حدود ۱/۸ درصد از کل کشور است. ورودی تمام سدهای استان‌های تهران و البرز به‌ویژه سدهای تأمین‌کنندهٔ آب مورد نیاز شهر تهران، به‌طور متوسط از سال ۱۳۷۲ تا کنون با کاهشی بین ۴۰ تا ۶۰ درصد مواجه بوده است. همان‌طور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، منابع آب‌های زیرزمینی استان تهران نیز به‌طور متوسط سالانه ۰/۳۵ متر کاهش یافته است و هم‌اکنون این منابع در وضعیت مناسب بهره‌برداری قرار ندارند (TRWC, 2014).

شکل ۲. موقعیت جغرافیایی شهر تهران

1. Gross Regional Domestic Product



شکل ۳. سطح منابع آب‌های زیرزمینی استان تهران در سال‌های ۱۳۷۲ـ ۱۳۹۳ (TRWC, 2014)

جمعیت تهران به‌طور متوسط سالانه ۱/۲ درصد افزایش می‌یابد (SCI, 2014) و منابع آب این شهر نیز محدود است. طرح‌های زیادی برای بهبود وضعیت آب و فاضلاب تهران به‌ویژه از سال ۱۳۹۰ اجرا می‌شود. در حال حاضر برای بررسی کارایی و بهره‌وری مصرف آب در این شهر هیچ پایشی انجام نمی‌شود، و این مسئله، اساس پژوهش حاضر است.

۲.۲. کارایی

کارایی، مفهومی کمّی و قابل سنجش برای تعیین عملکرد یک سیستم[۱] یا چند سیستم است، به‌طوری‌که به‌منظور استفادهٔ بهینه (استفادهٔ فنی، اقتصادی یا هردو) از منابع موجود، در جریان تولید محصولات یا ارائهٔ خدمات در نظر گرفته می‌شود. شاخص‌های کارایی معمولاً به‌منظور افزایش خروجی‌های مطلوب نظیر تولید محصولات یا انجام کار و یا تأمین تقاضای هدف و غیره، یا کاهش ورودی‌ها نظیر کار، زمان، هزینه، مصرف منابع (مواد خام، انرژی، آب و غیره) محاسبه می‌شوند (Bian & Yang, 2010).

«مرزهای کارایی» که درواقع همان «مرزهای تولید» هستند، لازم است برای سیستم (یا سیستم‌های) غیرکارا که مایل‌اند کارایی بیشتری داشته باشند، تعیین شود. به این ترتیب که فاصلهٔ شعاعی نقطهٔ کار مربوط به آنها تا مرز کارایی، به‌منزلهٔ میزان کارایی‌نداشتن آنها در نظر گرفته می‌شود، که باید محاسبه شود. یکی از روش‌های تعیین مرزهای کارایی، استفاده از تکنیک‌های DEA است (Lovell, 1993; Färe *et al.*, 1994).

تکنیک‌های DEA در برخی کشورها به‌منزلهٔ روش تعیین مرز اصلی برای محک‌زنی در بخش انرژی و همچنین به‌طور گسترده برای تحلیل عملکرد سیستم‌های تأمین آب استفاده شده است (Zhou *et al.*, 2008; Walter *et al.*, 2009).

معمولاً امکان دسترسی به اطلاعات مصرفی از منابع، در صنایع همگانی (مثل برق، آب و گاز) نسبت به سایر اطلاعات بیشتر است، بنابراین تکنیک‌های DEA با ماهیت ورودی برای مدل‌های کارایی در این صنایع کاربرد بیشتری دارند (Farrell, 1957).

---

۱. در این پژوهش به جای عبارت واحد تصمیم‌گیرنده (DMU) یا شرکت (Firm) که در برخی پژوهش‌ها برای تعیین کارایی استفاده شده است؛ از عبارت نقاط کار سیستم (یا سیستم‌ها) استفاده می‌شود که در متون مهندسی کاربرد بیشتری دارد.

۳.۲. مدل‌های DEA کارایی فنی

برای تعیین مرزهای کارایی و ایجاد مدل‌هایی برای سنجش کارایی فنی با بهره‌گیری از تکنیک‌های DEA، دو مشخصهٔ اصلی هر مدل یعنی ماهیت و بازده نسبت به مقیاس باید معلوم باشد:

- ماهیت ورودی: با ثابت نگه‌داشتن سطح خروجی‌ها، سعی در کاهش سطح ورودی‌ها دارد؛ به‌عبارت دیگر تا چه میزان می‌توان سطح ورودی‌ها را کاهش داد، درحالی‌که سطح خروجی‌ها بدون تغییر باقی بماند.
- ماهیت خروجی: با ثابت نگه‌داشتن سطح ورودی‌ها، سعی در افزایش سطح خروجی‌ها دارد؛ به‌عبارت دیگر سطح خروجی‌ها چقدر می‌تواند، زیاد شود بدون آنکه سطح ورودی‌ها تغییر کند (Farrell, 1957).
- بازده به مقیاس ثابت[1]: هر مضربی از ورودی‌ها همان مضرب از خروجی‌ها را ایجاد کند. مدل CCR بازده به مقیاس را ثابت فرض می‌کند (Charnes *et al.*, 1978).
- بازده به مقیاس متغیر[2]: هر مضربی از ورودی‌ها می‌تواند همان مضرب از خروجی‌ها یا کمتر از آن و یا بیشتر از آن را ایجاد کند. مدل BCC بازده به مقیاس را متغیر فرض می‌کند (Banker *et al.*, 1984).

مدل کارایی فنی با استفاده از تکنیک Input-CRS/CCR به شرح فرمول ۱ است:

$$\begin{aligned} &\mathrm{TE(VRS)}_{j_\circ} = \min_{\lambda} z_\circ = \Theta_{j_\circ}, \\ &St. \\ &\sum_j \lambda_j y_{k,j} \geq y_{k,j_\circ}, \quad k = ۱,۲,\ldots,K, \\ &\sum_j \lambda_j x_{i,j} \leq \Theta_{j_\circ} x_{i,j_\circ}, \quad \mathrm{i} = ۱,۲,\ldots,I, \\ &\lambda_i \geq ۰, \quad j = ۱,۲,\ldots,J \end{aligned} \qquad (۱)$$

که $y_{k,j_\circ}$ خروجی kام و $x_{i,j_\circ}$ ورودی iام، از نقطهٔ کار $j_\circ$ام هستند. $\Theta_{j_\circ}$ اسکالر و λ_j مقادیر ثابت‌اند. مقدار به‌دست‌آمده برای $\Theta_{j_\circ}$، امتیاز کارایی فنی TE برای نقطهٔ کار $j_\circ$ام است و باید $0 < \Theta_{j_\circ} \leq 1$ باشد. $1-\Theta_{j_\circ}$ کاهش نسبی در ورودی‌ها است که با ثابت نگه‌داشتن مقادیر خروجی‌ها برای نقطهٔ کار $j_\circ$ام به دست می‌آید. مقدار $\Theta_{j_\circ}=1$ یک نقطهٔ روی مرز کارایی (مرز تولید) را نشان می‌دهد و این نقطه از نظر فنی کاراست (Farrell, 1957). بنابراین، مرز کارایی از به هم پیوستن نقاط کاری که امتیاز کارایی فنی آنها برابر یک باشد، تعیین می‌شود.

مدل کارایی فنی با تکنیک Input-VRS/BCC، شبیه فرمول ۱ است با این تفاوت که قید $\sum_j \lambda_j = 1$ نیز در نظر گرفته می‌شود.

اگر اختلافی بین امتیازهای کارایی فنی به‌دست‌آمده در CRS و VRS برای یک نقطهٔ کار خاص وجود داشته باشد، نشان می‌دهد که این نقطهٔ کارایی مقیاس ندارد. بنابراین، کارایی مقیاس از نسبت کارایی فنی CRS به کارایی فنی مطلق (یا به‌عبارتی کارایی فنی VRS) به دست می‌آید، به‌طوری‌که تمامی این مقادیر بین صفر و یک هستند.

$$\mathrm{SE} = \mathrm{TE}_{\mathrm{CRS}} / \mathrm{TE}_{\mathrm{VRS}} \qquad (۲)$$

تکنیک‌های DEA، غیرپارامتریک هستند؛ یعنی به تعیین صریح روابط تابعی بین ورودی‌ها و خروجی‌ها نیازی ندارند، حتی می‌توان عواملی را با هم در یک مدل در نظر گرفت که هیچ رابطهٔ تابعی بین آنها در دسترس نباشد. به‌طور مثال عوامل اجتماعی مثل جمعیت یا نفر ساعت را در کنار میزان مصرف از منابع مثل انرژی، آب و غیره برای ورودی‌ها و میزان تولید کالاهای مختلف را برای خروجی‌ها در یک مدل در نظر گرفت (Cherchye *et al.*, 2000).

۴.۲. شاخص‌های بهره‌وری

«بهره‌وری» اندازهٔ میانگین کارایی تولید است که با نسبت خروجی به ورودی‌های استفاده‌شده در فرایند تولید یا به‌عبارتی خروجی بر واحد ورودی

1. constant returns to scale (CRS)
2. variable returns to scale (VRS)

بیان می‌شود (Hu *et al.*, 2006). وقتی جدول داده‌های نقاط کار سیستم (یا سیستم‌ها) موجود باشد، محاسبهٔ شاخص بهره‌وری کل (TFP) با محاسبهٔ دو مؤلفهٔ آن، یعنی تغییر کارایی فنی و تغییر فناوری انجام‌پذیر است. این شاخص TFP، مالمکوئیست نامیده می‌شود. مؤلفه‌های شاخص مالمکوئیست، با استفاده از مرزهای کارایی به‌دست‌آمده از مدل‌های DEA، محاسبه می‌شوند (Färe *et al.*, 1994).

تغییر TFP بین دو گروه نقاط کاری از یک سیستم (یا چند سیستم) با شاخص مالمکوئیست محاسبه می‌شود به‌طوری‌که هر گروه نقاط کاری مربوط به اجرای یک فناوری یا یک دورهٔ زمانی هستند. بنابراین، وقتی یک فناوری جدید در سیستمی به‌کار گرفته می‌شود؛ تغییر در بهره‌وری با استفاده از نقاط کاری قبل و بعد از اجرای آن فناوری در سیستم، محاسبه می‌شود. اگر این شاخص برابر یک باشد، فناوری موجود در سیستم، برترین فناوری است و اگر کمتر از یک باشد، یعنی فناوری برتری از آن، وجود دارد. اگر این شاخص بیشتر از یک باشد، یعنی با به‌کارگیری فناوری جدید، بهره‌وری در سیستم ارتقا یافته است (Färe *et al.*, 1998).

مؤلفه‌های تغییر کارایی فنی و تغییر فناوری با استفاده از مرزهای کارایی به‌دست‌آمده از مدل‌های DEA، به‌ترتیب در فرمول‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. اندیس اول، شمارهٔ مرز و اندیس دوم، شمارهٔ گروه نقاط کاری را نشان می‌دهد. گروه نقاط کاری اول و دوم به‌ترتیب مربوط به قبل و بعد از اجرای فناوری یا به‌عبارتی مربوط به دو دورهٔ زمانی مختلف در سیستم یا سیستم‌ها هستند. به‌طور مثال TECRS(12) یعنی میانگین هندسی فاصلهٔ شعاعی نقاط کاری گروه دوم تا مرز کارایی اول. البته مرز کارایی اول با تکنیک Input-CRS، از روی داده‌های نقاط کاری گروه اول تعیین شده است. یا برای مثال TECRS(22)، یعنی میانگین هندسی فاصلهٔ شعاعی نقاط کاری گروه دوم تا مرز کارایی دوم. البته مرز کارایی دوم با تکنیک Input-CRS از روی داده‌های نقاط کاری گروه دوم تعیین شده است و به همین ترتیب سایر اجزای فرمول‌های زیر به دست می‌آید. به‌دلیل شباهت چگونگی به دست آوردن این فواصل شعاعی با فرمول ۱، در این پژوهش این فواصل نیز با TE نشان داده می‌شوند و از تکرار فرمول‌های مربوطه صرف نظر می‌شود.

$$Effch = \frac{TE_{CRS(۲۲)}}{TE_{CRS(۱۱)}} \qquad (۳)$$

$$Techch = \left[\frac{TE_{CRS(۱۱)}}{TE_{CRS(۲۲)}} \times \frac{TE_{CRS(۱۲)}}{TE_{CRS(۲۱)}}\right]^{۱/۲} \qquad (۴)$$

بنابراین، شاخص بهره‌وری مالمکوئیست از فرمول ۵ به دست می‌آید:

$$M-TFP = Effch \times Techch \qquad (۵)$$

همچنین تعدادی از پژوهشگران پیشنهاد کردند که مؤلفهٔ تغییر کارایی فنی، خود به دو مؤلفهٔ دیگر یعنی تغییر کارایی خالص فنی[1] و تغییر کارایی مقیاس[2] تجزیه شود که به‌ترتیب در فرمول‌های ۶ و ۷ نشان داده شده‌اند (Färe *et al.*, 1994).

$$Pech = \frac{TE_{VRS(22)}}{TE_{VRS(11)}} \qquad (۶)$$

$$Sech = \frac{SE_{(۲۲)}}{SE_{(۱۱)}} = \frac{TE_{CRS(۲۲)} \times TE_{VRS(۱۱)}}{TE_{CRS(۱۱)} \times TE_{VRS(۲۲)}} = \frac{Effch}{Pech} \qquad (۷)$$

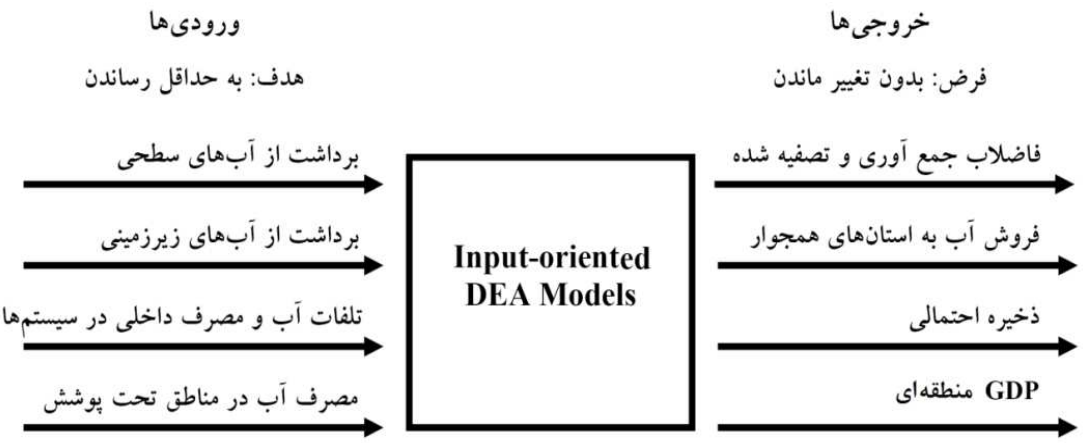
همچنین می‌توان در فرمول ۸ درصد ممکن برای کاهش ورودی‌ها را با ثابت نگه‌داشتن سطح خروجی‌ها محاسبه کرد.

$$\%input = (۱ - TE_{CRS(۲۲)}) * ۱۰۰ \qquad (۸)$$

۵.۲. داده‌ها و متغیرها

در این پژوهش با استفاده از تکنیک‌های DEA با ماهیت ورودی، کارایی و بهره‌وری مصرف آب تهران سنجیده می‌شود. ورودی‌ها و خروجی‌های مدل‌های به‌کار برده‌شده، در شکل ۴ ارائه شده است.

1. Pure efficiency change
2. Scale efficiency change



شکل ۴. شمای مدل‌های DEA برای سنجش کارایی و بهره‌وری مصرف آب تهران

همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، منظور از ذخیرهٔ احتمالی، تفاوت مجموع برداشت از آب‌های سطحی و زیرزمینی با مصرف آب در بخش‌های مختلف شهر تهران است. به‌طورکلی، متغیرهایی که باید سطح آنها کاهش یابد، در بخش ورودی‌ها و متغیرهایی که فرض می‌شود هنگام کاهش ورودی‌ها، سطح آنها ثابت نگه داشته شود، در بخش خروجی‌های مدل‌های DEA، در نظر گرفته می‌شوند. همان‌طور که در بخش ۳.۲. اشاره شد، وجود رابطهٔ تابعی بین این متغیرها الزامی نیست.

داده‌های این پژوهش، شامل آمار مربوط به سیستم آب و فاضلاب شهر تهران و GRDP از سال ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۲ است. این داده‌ها از مراجع مختلف گرفته شده است. مرجع مقادیر مربوط به آب و فاضلاب، گزارش‌های بهره‌برداری شرکت آب و فاضلاب تهران (TWSWWT, 2014) و مرجع مقادیر GRDP، آمارهای منطقه‌ای ایران از درگاه ملی آمار ایران (SCI, 2014) است.

مدل‌های کارایی و شاخص‌های بهره‌وری معرفی‌شده در این پژوهش، برای سنجش کاهش ممکن در مصرف آب تهران به‌ویژه برای بعد از سال ۱۳۹۰ به‌کار گرفته شده است. زیرا در سال ۱۳۹۰، اجرای طرح‌های کلان جمع‌آوری و تصفیهٔ فاضلاب تهران و همچنین مدیریت مصرف آب برای افزایش ذخیرهٔ سالانه آب شروع شده است. برای این منظور، داده‌ها به دو گروه تقسیم شده‌اند. گروه نقاط کاری اول، مربوط به سال‌های ۱۳۸۴ـ ۱۳۸۹ و گروه نقاط کاری دوم، مربوط به سال‌های ۱۳۹۰ـ ۱۳۹۲ است.

در این پژوهش، مدل‌ها در نرم‌افزار GAMS تدوین شده و با درج داده‌های مربوطه، انواع شاخص‌های کارایی و بهره‌وری با استفاده از مرزهای کارایی به‌دست‌آمده از مدل‌های DEA، محاسبه شده است.

۳. نتایج

در این پژوهش امتیازهای کارایی مصرف آب تهران در سال‌های ۱۳۸۴ـ ۱۳۹۲ با استفاده از تکنیک‌های Input-CRS و Input-VRS و با در نظر گرفتن دو رویکرد GRDP، به‌دست آورده‌شده که نتایج آن در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

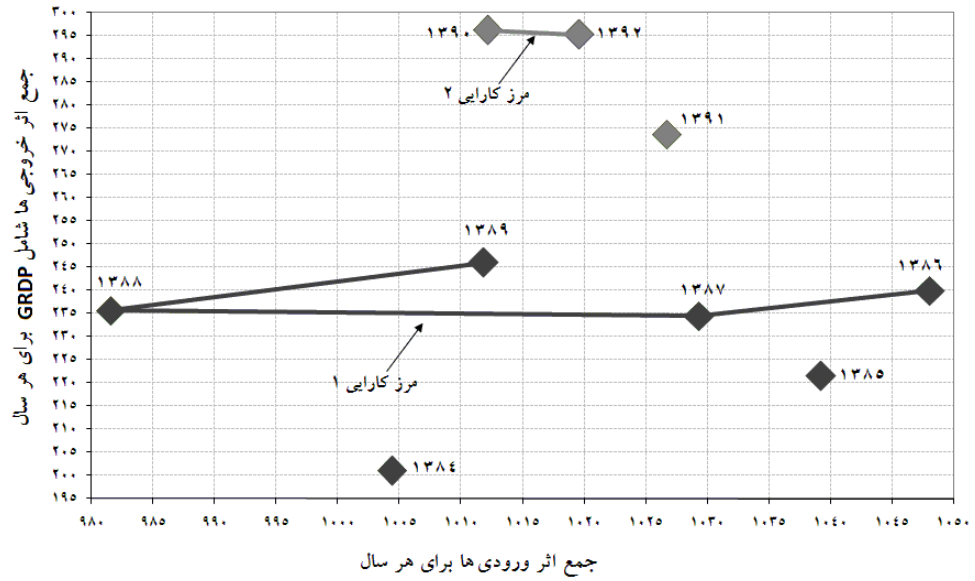
شمای مرزهای کارایی برای مصرف آب تهران با استفاده از نتایج جدول‌های ۱و ۲ و با در نظر گرفتن GRDP، در شکل ۵ رسم شده است. این شکل در فضای هندسی به‌صورت چندبعدی است و مرزها هم درواقع صفحه هستند، ولی در این پژوهش برای سادگی به‌صورت دوبعدی رسم شده است.

جدول ۱. امتیازهای کارایی مصرف آب تهران در سال‌های ۱۳۸۴ـ ۱۳۸۹

سال (نقطه کار)	با در نظر گرفتن GRDP				بدون در نظر گرفتن GRDP			
	TECRS (۱۱)	TECRS (۲۱)	TEVRS (۱۱)	SE (۱۱)	TECRS (۱۱)	TECRS (۲۱)	TEVRS (۱۱)	SE (۱۱)
۱۳۸۴	۰/۸۴۳۰	۰/۶۹۲۴	۰/۹۸۵۵	۰/۸۵۵۴	۰/۲۰۳۷	۰/۰۷۸۱	۰/۹۸۵۵	۰/۲۰۶۷
۱۳۸۵	۰/۹۳۴۴	۰/۷۳۷۷	۰/۹۹۰۵	۰/۹۴۳۴	۰/۶۳۵۵	۰/۲۳۷۶	۰/۹۹۰۵	۰/۶۴۱۶
۱۳۸۶	۱/۰۰۰۰	۰/۷۹۲۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۰/۴۰۴۷	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰
۱۳۸۷	۱/۰۰۰۰	۰/۷۸۸۱	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۰/۷۷۴۰	۰/۲۵۲۶	۱/۰۰۰۰	۰/۷۷۴۰
۱۳۸۸	۱/۰۰۰۰	۰/۸۳۰۸	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۰/۴۲۰۲	۰/۱۴۲۹	۱/۰۰۰۰	۰/۴۲۰۲
۱۳۸۹	۱/۰۰۰۰	۰/۸۴۱۱	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۰/۲۰۸۸	۰/۰۷۳۹	۰/۹۷۴۵	۰/۲۱۴۳
میانگین هندسی	۰/۹۶۱۰	۰/۷۷۸۶	۰/۹۹۶۰	۰/۹۶۴۹	۰/۴۵۴۳	۰/۱۶۴۸	۰/۹۹۱۷	۰/۴۵۸۱

جدول ۲. امتیازهای کارایی مصرف آب تهران در سال‌های ۱۳۹۰ـ ۱۳۹۲

سال (نقطه کار)	GRDPبا در نظر گرفتن				GRDPبدون در نظر گرفتن			
	TECRS (۱۱)	TECRS (۱۲)	TEVRS (۲۲)	SE (۲۲)	TECRS (۲۲)	TECRS (۱۲)	TEVRS (۲۲)	SE (۲۲)
۱۳۹۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰
۱۳۹۱	۰/۹۳۶۳	۱/۰۰۰۰	۰/۹۹۱۵	۰/۹۴۴۳	۰/۸۸۹۹	۱/۰۰۰۰	۰/۹۹۱۵	۰/۸۹۷۵
۱۳۹۲	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰
میانگین هندسی	۰/۹۷۸۰	۱/۰۰۰۰	۰/۹۹۷۰	۰/۹۸۱۰	۰/۹۶۲۰	۱/۰۰۰۰	۰/۹۹۷۰	۰/۹۶۵۰



شکل ۵. شمای مرزهای کارایی برای مصرف آب تهران

نتایج به‌دست‌آمده از محاسبات شاخص‌های کارایی و بهره‌وری مصرف آب تهران با دو رویکرد GRDP، برای داده‌های این پژوهش در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. شاخص‌های کارایی، درواقع میانگین هندسی مقادیر به‌دست‌آمده در جدول‌های ۱ و ۲ هستند.

نتیجهٔ محاسبات مربوط به کاهش احتمالی مصرف آب شهر تهران در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به اینکه در آمار شرکت تأمین و تصفیهٔ آب و فاضلاب تهران، میزان برداشت از آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی در سال ۱۳۹۲، به‌ترتیب ۷۱۸ و ۲۹۰ میلیون مترمکعب اعلام شده است، بنابراین امکان کاهش برداشت از منابع آب شهر تهران، درمجموع ۲۲/۱۸ میلیون مترمکعب برآورد می‌شود.

جدول ۳. شاخص‌های کارایی مصرف آب تهران

رویکرد	TECRS (۱۱)	TECRS (۲۲)	TECRS (۲۱)	TECRS (۱۲)	TEVRS (۱۱)	TEVRS (۲۲)	SE (۱۱)	SE (۲۲)
با GRDP	۰/۹۶۱۰	۰/۹۷۸۰	۰/۷۷۸۶	۱/۰۰۰۰	۰/۹۹۶۰	۰/۹۹۷۰	۰/۹۶۴۹	۰/۹۸۱۰
بدون GRDP	۰/۴۵۴۳	۰/۹۶۲۰	۰/۱۶۴۸	۱/۰۰۰۰	۰/۹۹۱۷	۰/۹۹۷۰	۰/۴۵۸۱	۰/۹۶۵۰

جدول ۴. شاخص‌های بهره‌وری مصرف آب تهران

رویکرد	Effch	%Effch	Techch	%Techch	Pech	%Pech	Sech	%Sech	M-TFPch	%M-TFPch
با GRDP	۱/۰۲	۱/۸۰	۱/۱۲	۱۲/۳۲	۱/۰۰	۰/۱۰	۱/۰۲	۱/۶۸	۱/۱۴	۱۴/۳۴
بدون GRDP	۲/۱۲	۱۱۱/۷۰	۱/۶۹	۶۹/۳۰	۱/۰۱	۰/۶۰	۲/۱۱	۱۱۰/۶۰	۳/۵۸	۲۵۸/۴۰

جدول ۵. درصد ممکن برای کاهش مصرف آب تهران

رویکرد	درصد کاهش	مقدار کاهش برداشت از آب‌های سطحی	مقدار کاهش برداشت از آب‌های زیرزمینی	مقدار کاهش تلفات آب	مقدار کاهش مصرف مناطق
با GRDP	۲/۲۰	۱۵/۸۰	۶/۳۸	۰/۲۶	۲۰/۸۴
بدون GRDP	۳/۸۰	۲۷/۲۸	۱۱/۰۲	۰/۴۴	۳۵/۹۹

توجه: تمامی مقادیر برحسب میلیون مترمکعب است.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

ایران در زمرهٔ کشورهای آسیب‌پذیر از نظر منابع آب است. رشد جمعیت و تغییر آب و هوا، سبب کاهش منابع آب به‌ویژه برای شهرهای بزرگ ایران شده است. منابع آب شهر تهران محدودند، بنابراین لازم است کارایی مصرف آب بهبود داده شود. در این پژوهش با استفاده از تکنیک‌های ورودی DEA، سنجش شاخص‌های کارایی و بهره‌وری مصرف آب تهران و به‌منظور محاسبهٔ کاهش ممکن در مصرف آب در این شهر انجام شده است.

۱.۴. تکنیک‌های DEA

از مقایسهٔ نتایج تکنیک‌های DEA این پژوهش با روش‌های غیر DEA که در برخی پژوهش‌ها برای محاسبات کارایی و بهره‌وری مصرف آب استفاده شده است، معلوم می‌شود که:

۱. برای تحلیل آمار سالانهٔ صنایع آب قابل استفاده هستند. درحالی‌که روش‌های اتفاقی[1] نظیر پژوهش‌های (Huang & Loucks, 2000; Blokker *et al.*, 2010)، قدرت تحلیل این اطلاعات را به‌طور مجزا برای هر سال ندارند. اگر سالی وجود داشته باشد که از نظر منابع آب در وضعیت بدی باشد، DEA آن را به‌صورت کاهش بهره‌وری در آن سال، تفسیر می‌کند درحالی‌که با روش‌های اتفاقی، کارایی فنی که برای کل سال‌ها سنجیده می‌شود، کمتر به‌دست می‌آید.

۲. قابلیت محاسبهٔ تمامی مؤلفه‌های مؤثر در بهره‌وری کل یعنی: تغییر کارایی فنی، تغییر فناوری، تغییر کارایی مقیاس و همچنین کارایی تخصیصی را دارند. درحالی‌که با روش‌های اقتصادسنجی نظیر پژوهش(Tupper & Resende, 2004)، مؤلفهٔ تغییر کارایی فنی محاسبه نمی‌شود.

۳. از نوع غیرپارامتریک هستند و به تعیین صریح روابط تابعی بین ورودی‌ها و خروجی‌ها نیازی ندارند. حتی می‌توان علاوه بر مصارف آب، عوامل اجتماعی نظیر جمعیت، یا سایر عوامل اقتصادی نظیر نیروی کار و سرمایه را در مدل‌ها در نظر گرفت، نظیر پژوهش Hu و همکاران (2006)، درحالی‌که در روش‌های اقتصادسنجی و اتفاقی، باید بین عوامل بحث‌شده، روابط تابعی موجود باشد (Frija *et al.*, 2009).

۴. قدرت تشخیص و تفکیک نویز داده‌ها را ندارند و اگر داده‌های پرت وارد مدل شوند، در نتیجهٔ نهایی تأثیر می‌گذارند! درحالی‌که در روش‌های اقتصادسنجی و اتفاقی داده‌های نویزدار قابل تشخیص است (Hollingsworth, 2004).

۵. در این پژوهش چون از روش کاهش شعاعی در تحلیل پوششی داده‌ها، استفاده شده است، واحدهای عوامل مختلف تأثیرگذار نیستند و نیازی به بدون واحد شدن ندارند. اما اگر روش‌های غیرشعاعی نظیر پژوهش Bian & Yang (2010) و همچنین روش‌های اقتصادسنجی و اتفاقی استفاده شود، باید تأثیر واحدها در نظر گرفته شود.

۶. مدل‌های DEA این پژوهش، به‌سادگی و با دقت توانستند به کلیهٔ سؤالات مربوط به میزان کاهش مورد نیاز برای انواع داده‌ها (ازقبیل برداشت از منابع آب) و یا تعیین همبستگی با عوامل خارج از سیستم (نظیر GDP منطقه‌ای) پاسخ دهند. درحالی‌که در روش‌های اقتصادسنجی و اتفاقی باید ابتدا سهم عوامل در تابع کل تعیین شوند تا بتوانند به این سؤالات پاسخ دهند (Speelman *et al.*, 2008).

۷. سرعت عمل اجرای مدل‌های DEA این پژوهش بسیار زیاد بود (فقط چند ثانیه) و از نظر محدودیت در نرم‌افزار GAMS نیز با مشکلی مواجه نشد. درحالی‌که کاربرد نرم‌افزارها برای روش‌های اقتصادسنجی و اتفاقی چندان آسان نیست و با محدودیت‌های زیادی مواجه‌اند (Hollingsworth, 2004).

۸. مدل‌های DEA این پژوهش، کاملاً انعطاف‌پذیر هستند و امکان افزودن فرضیات یا قیود جدید برای کاهش ورودی‌ها، تقویت خروجی‌های مطلوب و تضعیف خروجی‌های نامطلوب به‌منظور تحلیل شاخص‌های کارایی و بهره‌وری مصارف آب را میسر می‌سازند.

۲.۴. داده‌ها و متغیرها

از مقایسهٔ داده‌ها و متغیرهای به‌کار برده‌شده در این پژوهش با تحقیقات دیگر معلوم می‌شود که:

۱. متغیرهای مختلفی برای این‌گونه پژوهش‌های به‌کار برده شده است که مهم‌ترین آنها شامل میزان تولید و مصرف آب، تلفات آب، هزینه‌های تولید آب، نیروی کار، انرژی مصرفی، مواد شیمیایی مصرفی، ظرفیت ذخیره، طول لوله‌ها، مباحث هیدرولیکی، تعداد اتصالات، هزینهٔ تصفیه، و نواحی جغرافیایی تحت پوشش است.

۲. در پژوهش‌های حاضر، هم مقادیر برداشت[2] از منابع آب شهر تهران (شامل سدهای تأمین‌کنندهٔ آب تهران، چاه‌ها و غیره) و هم مقادیر

1. Stochastic

2. Water withdrawal

مصرف[1] آب در مناطق شهر تهران به‌کار برده شده است، زیرا هر دو مورد نشان‌دهندهٔ استفاده از آب هستند. اما در بیشتر پژوهش‌های فقط یکی از این موارد در نظر گرفته شده است. نظیر پژوهش‌های (Hu *et al.*, 2006; Bian & Yang, 2010; Sun *et al.*, 2014) که مقادیر مصرف آب و تحقیقات (Ali & Klein, 2014; Song *et al.*, 2014) که مقادیر برداشت از منابع آب به‌کار برده شده است.

۳. در تعداد کمی از پژوهش‌ها، از شاخص‌های اقتصادی نظیر GDP برای بهبود نتایج سنجش کارایی و بهره‌وری مصرف آب استفاده شده است نظیر (Hu *et al.*, 2006; Bian & Yang, 2010; Song *et al.*, 2014; Sun *et al.*, 2014). پژوهش‌هایی وجود دارد که به‌علت استفاده نکردن از چنین شاخص‌هایی، مقادیر بهره‌وری یا خیلی کم (Ali & Klein, 2014) یا خیلی زیاد (Speelman *et al.*, 2008) به‌دست آمده است، به‌طوری‌که با توجه به تغییرات انجام‌شده در سیستم‌های مربوط چندان قابل قبول نیستند.

۳.۴. همبستگی مصرف آب و GDP

براساس بررسی این پژوهش، بین مصرف آب و GDP منطقه‌ای همبستگی برقرار است. اما در شرایطی که عوامل اقتصادی دیگری ایجاد شود ممکن است این همبستگی برقرار نباشد. مصرف آب و همچنین GDP منطقه‌ای از سال ۱۳۸۹ـ ۱۳۹۲ افزایش چندانی نداشته است که این مسئله نشانهٔ مشخص و تثبیت شدن سطح نیاز به آب در شهر تهران است زیرا تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان برای صرفه‌جویی اقتصادی تمایل دارند از منابع آب منطقهٔ خود استفاده کنند.

۴.۴. شاخص‌های بهره‌وری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بهره‌وری کل با روش مالمکوئیست، ۱۴/۳۴ درصد بهبود پیدا کرده است. بهره‌وری کل شامل ۱/۸ درصد بهبودی از نظر تغییر کارایی فنی و ۱۲/۳۲ درصد بهبودی از نظر تغییر فناوری به‌دلیل استفاده از طرح‌ها و فناوری‌های جدید نظیر جمع‌آوری و تصفیهٔ فاضلاب و همچنین انجام راهکارهای مدیریت مصرف آب به‌دلیل افزایش ذخیرهٔ سالانه است. علاوه بر آن، تغییر در کارایی مقیاس هم وجود دارد که تا ۱/۶۸ درصد سبب بهبود بهره‌وری شده است. از نتایج این پژوهش معلوم می‌شود که مؤلفهٔ تغییر کارایی فنی به‌دست‌آمده، با نسبت خروجی‌ها بر ورودی‌ها در مدل‌های کارایی وابسته است به‌طوری‌که هر چقدر این نسبت‌ها بزرگ‌تر باشد بهبودی بیشتری در شاخص بهره‌وری ایجاد می‌شود. همچنین مؤلفهٔ تغییر فناوری به‌دست‌آمده، به مرزهای کارایی وابسته است به‌طوری‌که هر چقدر فاصلهٔ این مرزها از هم بیشتر باشد و تقاطع نداشته باشند، بهبودی بیشتری در شاخص بهره‌وری ایجاد می‌شود. مؤلفهٔ تغییر کارایی مقیاس به‌دست‌آمده، به رابطهٔ بین ورودی‌ها و خروجی‌ها در مدل‌های کارایی وابسته است، به‌طوری‌که هر چقدر این رابطه به‌صورت منحنی باشد یا به‌عبارتی هر چقدر افزایش خروجی‌ها بیشتر از افزایش ورودی‌ها باشد، بهبودی بیشتری در شاخص بهره‌وری ایجاد خواهد شد.

۵.۴. کاهش مصرف از منابع آب

کاهش برداشت از منابع آب در شرایطی مورد قبول است که روی سطح تولیدات و خدمات عمده (GDP منطقه‌ای)، تأثیر نامطلوب نداشته باشد. به همین دلیل در این پژوهش در محاسبات شاخص‌های کارایی و بهره‌وری با فرض ثابت‌ماندن خروجی‌ها شامل GDP منطقه‌ای، امکان کاهش ورودی‌ها شامل برداشت از منابع آب بررسی شد.

از نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش مشاهده می‌شود که اگر GDP منطقه‌ای در سطح سال ۱۳۹۲ باقی بماند، می‌توان برداشت از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی را تا حدود ۲/۲ درصد یا به عبارت دیگر، حدود ۲۲ میلیون متر مکعب کاهش داد.

1. Water consumption

۶.۴. اثر GDP در شاخص‌های بهره‌وری

محاسبات کارایی و بهره‌وری بدون در نظر گرفتن GRDP، افزایش غیرقابل قبولی در شاخص‌های بهره‌وری نشان می‌دهد، بنابراین تأکید می‌شود که به اطلاعات به‌دست‌آمده از داخل سیستم‌ها اکتفا نشود و عوامل خارج از سیستم شامل عوامل اقتصادی، محیط زیستی و همچنین عوامل اجتماعی نظیر جمعیت در منطقهٔ بررسی‌شده نیز در نظر گرفته شوند.

REFERENCES

1. Abbott, M., Cohen, B., 2009. Productivity and efficiency in the water industry, Utilities Policy, 130, 233–44.
2. Ali, M.K., Klein, k.k., 2014. Water Use Efficiency and Productivity of the Irrigation Districts in Southern Alberta, Water Resources Management, 28, 2751–2766.
3. Araujo, L.S., Ramos, H., Coelho, T., 2006. Pressure control for leakage minimization in water distribution systems management, Water Resources Management, 20, 133–49.
4. Bagatin, R., Klemeš, J.J., Reverberi, A.P., Huisingh, D., 2014. Conservation and Improvements in Water Resource Management: a Global Challenge, Cleaner Production, 77, 1–7.
5. Banker, R.D., Charnes, A., Cooper, W.W., 1984. Some Models for estimating technical and scale inefficiencies in Data Envelopment Analysis, Management Science, 30, 1078–92.
6. Bian, Y., Yang, F., 2010. Resource and environment efficiency analysis of provinces in China: a DEA approach based on Sannon's entropy, Energy Policy, 38, 1909–17.
7. Blokker, E.J.M., Vreeburg, J.H.G., van Dijk, J.C., 2010. Simulating residential water demand with a stochastic end-use model, Water Resource Planning Management, 136, 19–26.
8. Brandt, M., Middleton, R., Wheale, G., Schulting, F., 2011..Energy efficiency in the water industry, a Global Research Project., Water Practice Technology, 6.
9. Charnes, A., Cooper, W.W., Rhodes, E., 1978. Measuring the efficiency of decision making units, European Journal of Operational Research, 2, 429–444.
10. Cherchye, L., Kuosmanen, T., Post, T., 2000. New tools for dealing with errors-in-variables in DEA, Catholic University of Leuven, Technical report.
11. Colombo, A.F., Karney, B.W., 2002. Energy and costs of leaky pipes: toward comprehensive picture, Water Resources Planning and Management, 128, 441–50.
12. Elias-Maxil, J.A., van der Hoek, J.P., Hofman, J., Rietveld, L., 2014. Energy in the urban water cycle: actions to reduce the total expenditure of fossil fuels with emphasis on heat reclamation from urban water, Renewable and Sustainable Energy Review, 30, 808–20.
13. Färe, R., Grosskopf, S., Norris, M., Zhang, Z., 1994. Productivity growth, technical progress, and efficiency change in industrialized countries. American Economic Review, 84, 66–83.
14. Färe, R., Grosskopf, S., Roos, P., 1998. Malmquist productivity indexes: a survey of theory and practice, in Färe, R., Grosskopf, S., Russell, R. (editors) (1998) Index numbers: essays in honour of Sten Malmquist, Kluwer Academic Publishers, Boston.
15. Farrell, M.J., 1957. The Measurement of Productive Efficiency, Journal of the Royal Statistical Society, 120, series A, Part III, 253–90.
16. Frija A., Chebil A., Speelman S., Buysse J., Huylenbroeck V.G., 2009. Water use and technical efficiencies in horticultural greenhouses in Tunisia, Agriculture Water Management, 96, 1509–1516.
17. Hollingsworth, B., 2004. Non Parametric Efficiency Measurement, Economic Journal, 114, 307–311.
18. Huang, G.H., Loucks, D.P., 2000. An inexact two-stage stochastic programming model for water resources management under uncertainty, Civil Engineering & Environmental Systems, 17, 95–118.
19. Hu, J., Wang, S., Yeh, F., 2006. Total-factor water efficiency of regions in China, Resources Policy, 31, 217–30.

20. Iran ministry of energy (IMOE), 2013. Iran energy balance sheet 2012, department of power and energy, office macro planning of electric energy, Tehran, Iran, available from http://pep.moe.gov.ir/, accessed 02 June 2015.

21. Lovell, C.A.K., 1993. Production Frontiers and Productive Efficiency, in Fried HO and SS Schmidt (eds.) the Measurement of Productive Efficiency: Techniques and Applications, Oxford U.K., pp. 3–67.

22. Neely, A., Gregory, M., Platts, K., 2005. Performance measurement system design: a literature review and research agenda. International Journal of Operations & Production Management, 25, 1228–63.

23. Plappally, A.K., Lienhard, J.H., 2012. Energy requirements for water production, treatment, end use, reclamation and disposal, Renewable Sustainable Energy Reviews, 16, 4818–48.

24. Song, M., Wang, Sh., Liu, W., 2014. A two-stage DEA approach for environmental efficiency measurement, Environmental Monitoring and Assessment, 186, 3041–3051.

25. Speelman S., D'Haese M., Buysse J., 2008. A measure for the efficiency of water use and its determinants, a case study of small-scale irrigation schemes in North-West Province, South Africa. Agriculture systems, 98, 31–39.

26. Statistical Center of Iran (SCI), 2014. Iran statistical yearbook 2013, statistics by topic, regional accounts, Tehran, Iran, available from http://www.amar.org.ir/, accessed 02 June 2015.

27. Sun, C., Zhao, L., Zou, W., Zheng, D., 2014. Water resource utilization efficiency and spatial spillover effects in China, Geographical Sciences, 24, 771–788.

28. Tehran regional water Company (TRWC), 2014. Season reports, office basic studies of water resources, Tehran, Iran, available from http://www.thrw.ir/, accessed 07 June 2015.

29. Tehran water supply and water and wastewater treatment Company (TWSWWT), 2014, operation reports, Tehran, Iran, available from http://tww.tpww.co.ir/, accessed 02 June 2015.

30. Tupper. H.C., Resende., M., 2004. Efficiency and regulatory issues in the Brazilian water and sewage sector: an empirical study, Utilities Policy, 12, 29–40.

31. United Nations World Water Assessment Programme (WWAP), 2014. The United Nations World Water Development Report 2014: Water and Energy, UNESCO, Paris.

32. Van der Stede, W., Chow, C.W., Lin, T.W., 2006. Strategy, choice of performance measures, and performance, Behavioral Research in Accounting, 18, 185–205.

33. Vilanova, M.R.N., Filho, P.M., Balestieri, J.A.P., 2015. Performance measurement and indicators for water supply management: Review and international cases, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 43, 1–12.

34. Walter, M., Cullmann, A., von Hirschhausen, C., Wand, R., Zschille, M., 2009. Quo vadis efficiency analysis of water distribution? A comparative literature review, Utilities Policy, 17, 225–32.

35. World Bank, 2009. Water in the Arab World: Management Perspectives and Innovations. N. V. Jagannathan, A. S. Mohamed and A. Kremer (eds). Washington DC, The World Bank.

36. Zhou. P., Ang, B.W., Poh, K.L., 2008. A survey of data envelopment analysis in energy and environmental studies, European Journal of Operational Research, 189, 1–18.