فصلنامه پژوهشهای اقتصادی (رشد و توسعه پایدار) ـ سال بیست و دوم ـ شماره اول ـ بهار ۱۴۰۱ ـ صفحات ۸۲-۵۳

سنجش روابط بین بخشی آب و انرژی در دو منطقه اصفهان و یزد بر اساس رویکرد داده - ستانده دو منطقه‌ای

زهرا نصراللهی[۱]
فرناز دهقان بنادکوکی[۲]
الهام اپرا جونقانی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۳/۱ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۰/۶/۳۱

چکیده

کشور ایران با اقلیم خشک و نیمه‌خشک، اکنون بیش از قبل، نیازمند حفظ منابعی از جمله آب و انرژی است. دراین پژوهش، دو منطقه اصفهان و یزد به عنوان دو نقطه بحرانی از جهت آب و انرژی، بررسی، و از مدل داده-ستانده دو منطقه‌ای، به‌منظور سنجش و تحلیل روابط آب و انرژی بین بخش‌های اقتصادی استان اصفهان و یزد و مدل پیوند، برای بررسی جریان ترکیبی (هیبریدی) دو منبع و میزان تأثیرات پیوندی در هر منطقه در سال ۱۳۹۵، استفاده شده است. نتایج جریان آب و انرژی ترکیبی، حاکی از آن است که دو بخش «حمل و نقل» و «سایر خدمات» در اصفهان و در استان یزد، بخش‌های «حمل و نقل» و «کشاورزی»، پرمصرف‌ترین و به عبارتی، تأثیرگذارترین بخش‌ها از جهت مصرف در دو منطقه هستند؛ به‌طوری‌که مهم‌ترین گره مدیریتی در رابطه بین دو منبع آب و انرژی در مناطق مورد مطالعه، در نظر گرفته می‌شوند. همچنین محاسبات در بخش جریان کل دو منبع آب و انرژی در استان اصفهان، بیانگر آن است که، بخش «حمل و نقل» و «کشاورزی»، جایگاه نخست در جریان صادرات و واردات آب و « ساخت کک، فرآورده‌های حاصل از تصفیه نفت و سوخت‌های هسته‌ای و ساخت مواد و محصولات شیمیایی» و «ساخت فلزات اساسی»، به‌ترتیب، بیشترین خروجی (صادرات) و ورودی (واردات) انرژی را به خود اختصاص داده است. همچنین دو بخش «ساخت محصولات کانی غیرفلزی» و « ساخت کک، فرآورده‌های حاصل از تصفیه نفت و سوخت‌های هسته‌ای و ساخت مواد و محصولات شیمیایی»، به‌ترتیب، بیشترین خروجی (صادرات) و ورودی (واردات) انرژی و در مورد منابع آب نیز بخش «کشاورزی»، به‌ترتیب، بزرگترین صادرکننده و واردکننده هستند.

واژگان کلیدی: آب -انرژی، رابطه پیوندی، مدیریت یکپارچه منابع، مدل داده -ستانده دو منطقه‌ای
طبقه‌بندی JEL: Q25, P28, P48, C45, D57

---

۱. دانشیار گروه اقتصاد، دانشکده اقتصاد، مدیریت و حسابداری دانشگاه یزد، یزد، ایران nasr@yazd.ac.ir

۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد اقتصاد محیط زیست، دانشکده اقتصاد، مدیریت و حسابداری، دانشگاه یزد، ایران Dehghan.F73@gmail.com

۳. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد اقتصاد محیط زیست، دانشکده اقتصاد، مدیریت و حسابداری، دانشگاه یزد، ایران elhamoperaj@gmail.com

۱. مقدمه

دستیابی به رشد و توسعه، اگرچه دستاوردهای مثبتی مانند بهبود رفاه جامعه در ابعاد بهداشتی، آموزشی و کیفیت زندگی به همراه داشته، اما با بهره‌برداری بی‌رویه از منابع، بحران‌های عظیم و بی سابقه جهانی شامل آسیب جدی به زیست‌بوم، فرسایش خاک، آلودگی آب و هوا، کاهش شدید تنوع زیستی، تولید زباله‌های ناسازگار با طبیعت، گرم شدن زمین و نابودی سطح وسیعی از جنگل‌ها را باعث شده است؛ در حالی که امروزه، جهانی‌شدن (که با گسترش و پیچیدگی در رقابت همراه است)، رشد جمعیت و شهرنشینی[1] (که منبع اصلی تقاضا و کمیابی است) ، رشد درآمد سرانه کشورها (که باعث افزایش تقاضای کالاهای مختلف می‌شود)، ازجمله عواملی بوده که بر فشار و بهره‌برداری از منابع، از جمله منابع آب و انرژی افزوده است.

انرژی، یکی از مهم‌ترین نهاده‌های تولید است، به شکلی که سرعت رشد و توسعه اقتصادی، وابسته به سطح مصرف انرژی می‌باشد و پیش‌بینی می‌شود که میزان تقاضای انرژی در دهه‌های آینده، به دلایلی مانند شهرنشینی گسترده در مقیاس جهانی، رشد اقتصادی و رشد درآمد سرانه، افزایش می‌یابد (Madlener & Sunak, 2011; Grimm *et al.*, 2008). این شرایط، در حالی است که ازیک‌طرف، یک رابطه دوسویه بین آب و انرژی وجود دارد و به‌عبارتی، مقدار زیادی آب برای تولید انرژی (برای مثال معادن زغال‌سنگ و تولید برق نیاز به آب زیاد دارد و آب را به‌عنوان یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها معرفی می‌کند) (IEA, 2008) و مقدار قابل‌توجهی انرژی برای تأمین آب مصرف می‌شود (برای مثال برای تأمین زیرساخت‌های آب شهری مانند پمپاژ، تصفیه، انتقال آب در بخش شهری و غیره) (Lundin & Morrison, 2002; Stokes & Horvath, 2009).

از طرف دیگر، همزمان با افزایش تقاضای آب، قابلیت دسترسی به منابع آب و همچنین منابع آب رو به کاهش است و افزایش آلودگی نیز مزید بر علت شده و باعث کاهش بیشتر آب شیرین و تمیز می‌شود. طبق گزارش توسعه جهانی آب توسط سازمان ملل متحد در سال ۲۰۱۸، نزدیک به ۶ میلیارد نفر تا سال ۲۰۵۰ با کمبود منابع آب مواجه خواهند شد که این امر، ناشی از افزایش تقاضا برای آب، کاهش منابع آب و افزایش آلودگی آب است که از علل اصلی آن، می‌توان به رشد جمعیت و رشد اقتصادی اشاره کرد (Boretti & Rosa, 2019). بر اساس پیش‌بینی‌های جهانی به دنبال این رشد جمعیت، تقاضا برای منابع انرژی و آب در دهه‌های آینده در حال افزایش است؛ به‌طوری‌که برای

---

۱. افزایش جمعیت، به یک چالش جهانی تبدیل شده است؛ به‌گونه‌ای که طبق گزارش سازمان ملل، جمعیت جهان تا سال ۲۰۳۰ به ۸/۵ میلیارد نفر خواهد رسید و جمعیت مناطق شهری در کشورهای درحال‌توسعه، از ۵۵ درصد به ۶۰ درصد افزایش می‌یابد (United Nations, 2020).

تأمین نیازهای جوامع متناسب با این مقدار رشد جمعیت، تقاضا برای آب و انرژی تا سال ۲۰۳۰ به ترتیب، ۴۰ و ۵۰ درصد افزایش خواهد یافت (IEA, 2019).

مصرف آب و انرژی در شبکه فعالیت‌های اقتصادی، نه‌تنها به‌دلیل نیاز یکی به دیگری بلکه به دلیل ارتباط متقابل آنها در تولید و مصرف محصولات، درهم تنیده شده است. این موضوع، توجه جدی همزمان به چالش‌های آب و انرژی را می‌طلبد که در این راستا، طرح مفهوم پیوند[1] انرژی و آب می‌تواند به اتخاذ تصمیماتی مناسب، هم ازنظر فنی (Elias-Maxil *et al.*, 2014; Tarroja *et al.*, 2014; Mo *et al.*, 2014 and Lubega, & Farid, 2014) و هم از جنبه‌های سیاستی (Scott, *et al.*, 2011; Carrillo & Frei, 2009 and DeNooyer *et al.*, 2016) در این زمینه، کمک کند.

در ایران نیز با توجه به تغییرات اقلیمی که در حال رخ دادن است، امنیت آب و انرژی، نگرانی‌های زیادی را به‌وجود آورده، به‌گونه‌ای که با توجه به بحران کم‌آبی و مشکلات استفاده از سوخت‌های فسیلی، استفاده از سیاست‌های یکپارچه مدیریتی در جهت بهینه‌سازی و افزایش کارآیی این دو منبع ضروری است؛ در حالی که در اکثر مطالعات انجام‌گرفته در ایران، به ارزیابی جامع از مصارف آب و انرژی پرداخته‌اند و میزان مصرف آب برای تولید انرژی و میزان مصرف انرژی برای تولید آب و روابط بین بخشی آب و انرژی، نادیده گرفته شده است، ازاین‌رو، هدف از پژوهش حاضر، برآورد روابط بین بخشی آب و انرژی در دو استان اصفهان و یزد به‌عنوان دو استان مهم اقتصادی و با آب‌وهوای خشک و نیمه‌خشک کشور است.

در مقاله حاضر، پس از بیان مقدمه، در قسمت دوم، به ادبیات پژوهش پرداخته شده است. در قسمت سوم، مطالعات خارجی و داخلی انجام شده در این زمینه مرور، و در بخش چهارم، پس از معرفی منطقه مورد مطالعه، روش پژوهش تشریح، و در بخش پنجم، به تجزیه‌وتحلیل نتایج پرداخته شده و درنهایت، نتیجه‌گیری کلی از نتایج ارائه گردیده است.

۲. ادبیات پژوهش

کاربرد روزافزون انرژی و تأمین آن برای ادامه حیات، یکی از مظاهر مهم زندگی جدید است. بهره-برداری از منابع تجدیدناپذیر انرژی طی قرن گذشته، علاوه‌بر پایان‌پذیری، تبعاتی مانند افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای در جهان در اثر مصرف بی رویه انواع مختلف حامل‌های انرژی ایجاد کرده و موجب بروز بحران‌های محیط‌زیستی نظیر گرمایش جهانی، و درنتیجه، به طرح مفهوم توسعه پایدار، به منظور مقابله با این مشکلات، منجر شده است.

---

1. Nexus

اهداف توسعه پایدار (SDGs) که توسط سازمان ملل برای سال ۲۰۳۰ مطرح شده، مشکلاتی مانند حذف فقر و برقراری عدالت، آموزش، حمایت‌های اجتماعی، حفاظت از محیط زیست، تغییرات آب و هوایی، بهداشت، فرصت‌های شغلی و نهادهای قوی را هدف قرار داده، و در بخش توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌عنوان یکی از اهداف توسعه پایدار، بر تضمین دستیابی جهانی به خدمات انرژی ارزان، قابل اطمینان، نوین، افزایش تدریجی سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در مجموع منابع تولید انرژی جهان و افزایش دو برابری بهره‌وری در زمینه انرژی اشاره شده است.

بنابراین به نظر می‌رسد که امنیت انرژی و مقابله با گرمایش زمین به‌عنوان یکی از ارکان توسعه پایدار، عاملی محرک برای تجدید سیاست‌های تأمین انرژی دولت‌های جهان باشد. در واقع، با توجه به روند رشد تکنولوژی و مطرح شدن مبحث انرژی‌های پایدار و کاهش مستمر ذخیره انرژی‌های تجدید ناپذیر، همچنین وجود منابع مناسب انرژی‌های پایدار (خورشید، آب، باد، بیو گاز و...) در اقصی نقاط دنیا برای دولت‌ها و جوامع، انگیزه‌های جدی برای حرکت به سمت توسعه منابع جدید انرژی ایجاد شده است و در این میان، انرژی‌های نو یا تجدیدشونده، اهمیت بیشتری پیدا کرده‌اند و دولت‌ها، علاقه روزافزونی به این‌گونه انرژی‌ها نشان می‌دهند؛ به طوری که در «گزارش پیشرفت انرژی ۲۰۱۹» که در آن، به میزان پیشرفت‌های ایجاد شده در راستای اهداف برنامه هدف توسعه پایدار سازمان‌ملل در حوزه انرژی پرداخته، آمده است: براساس آخرین داده‌ها، جهان درحال پیشرفت به‌سوی دستیابی به چشم‌انداز تعیین‌شده در برنامه «۷ هدف توسعه پایدار» (SDGS) است؛ اما مسأله‌ای که ممکن است در این فرایند مغفول مانده و مسبب مشکلات آتی شود، پاسخ‌گویی به این سؤال است که آیا کمبود منابع آب، می‌تواند یک عامل محدودکننده برای توسعه انرژی باشد؟ با توجه به اهداف سازمان ملل متحد در رویکرد توسعه پایدار، برای ایجاد تعادل در تولید و مصرف منابع، راه‌حل‌های میان‌رشته‌ای مطرح شده که یکی از رویکردهایی که در این راستا مورد توجه جامعه جهانی واقع شده، رویکرد پیوند آب و انرژی است (Rasul, 2014).

پیوند آب و انرژی، به‌عنوان یک پیوند امنیتی، تعاملات میان بخش‌های آب و انرژی را توصیف می‌کند؛ زیرا همان‌طور که برای داشتن صلح و رفاه، اهدافی مانند امنیت آب اهمیت دارد، به همان اندازه، امنیت انرژی نیز حائز اهمیت است. به طور عملی، پیوند آب و انرژی را می‌توان به‌عنوان رویکردی که به ارزیابی توسعه و اجرای سیاست‌هایی امنیت آب و انرژی تأکید می‌کند، تعریف کرد (Bizikova *et al.*, 2014).

پیوند آب و انرژی شامل دو مؤلفه (آب و انرژی) اصلی است. در مفهوم پیوند، تمامی مؤلفه‌ها با یکدیگر ارتباط دارند و بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند و به‌عبارتی، تغییر در عرضه و تقاضای هر عنصر بر عناصر دیگر، تأثیرگذار است (Chang *et al.*, 2016). به‌عنوان مثال، علاوه بر اینکه آب برای تولید

انرژی لازم است، از انرژی نیز برای تصفیه و توزیع آب استفاده می‌شود. بدین ترتیب، صرفه‌جویی در انرژی، می‌تواند فشار بر منابع آبی را کاهش دهد، زیرا آب مورد نیاز برای تولید انرژی، می‌تواند ذخیره شود یا مجدداً تخصیص داده شود. همچنین افزایش بهره‌وری آب، می‌تواند مقدار انرژی مصرف شده برای انتقال، استحصال و تصفیه آب را کاهش دهد (IEA, 2019).

در سال ۲۰۱۲ میلادی، حدود ۶۶ میلیارد متر مکعب آب توسط بخش انرژی استفاده شده و انتظار می‌رود تا سال ۲۰۳۵، این رقم (با افزایش ۵۰ درصدی میزان مصرف انرژی به‌دلیل توسعه و افزایش جمعیت) به ۱۳۵ میلیارد متر مکعب برسد. به‌عبارت دیگر، تلاش برای تأمین تقاضای انرژی ناشی از رشد جمعیت و تحولات اقتصادی، نیازمند بهره‌برداری از آب می‌باشد؛ اما شواهد موجود نشان دهنده محدودیت منابع آب است که می‌تواند به‌عنوان عامل محدودکننده بخش انرژی و توسعه پایدار عمل کند (United Nations of Economic and Social Affairs, 2015).

در حال حاضر، ۲۰ درصد آب در بخش انرژی و صنعت و ۷۰ درصد در بخش کشاورزی مصرف می‌شود و ۱۰ درصد هم آب آشامیدنی است (Boretti & Rosa, 2019). میزان آب تجدیدشونده در دنیا، تنها معادل ۵۰ هزار کیلومتر مکعب است که انتظار می‌رود، گرمایش زمین و آلودگی‌های محیط‌زیستی نیز باعث کاهش بیشتر آن شود. این در حالی است که با افزایش جمعیت، نیاز به آب آشامیدنی و کشاورزی، بهداشتی و غذایی، بیشتر هم می‌شود و در کنار آن، نیاز دنیا به انرژی بیشتر، معادل نیاز به آب بیشتر است و با توجه به اینکه منابع آبی (احتمالاً) افزایش پیدا نمی‌کنند، رقابت بخش‌های مختلف بر سر منابع محدود آب برای تأمین نیازهای آبی، بیشتر و بیشتر می‌شود. نیاز بخش انرژی به آب، به‌ازای هر نفر، معادل ۱۳ تا ۳۸ درصد افزایش خواهد داشت که به طور متوسط، این نرخ رشد از نرخ افزایش ۲۰ درصدی جمعیت و ۱۸ درصدی مصرف انرژی، بیشتر است؛ یعنی وضعیت در آینده بحرانی خواهد بود (Footprint Network, 2016).

پیوند آب و انرژی برای ایجاد امنیت آب و انرژی، نیازمند ابزارهای یکپارچه است، به‌منظور تحلیل‌های قابل پیش‌بینی که قادر به شناسایی مبادلات بین بخش‌های مختلف، برنامه‌ریزی و مدیریت استراتژی‌ها و سیاست‌های مقرون به صرفه باشد (Zhang & Vesselinov, 2017).

یکی از این ابزارها روش داده - ستانده است. جدول داده - ستانده به‌عنوان یکی از ابزارهای قوی به منظور انجام تحلیل‌های مختلف اقتصادی، این موقعیت را برای سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیران فراهم می‌کند تا ابتدا آثار برنامه‌ها و سیاست‌ها را قبل و بعد از اجرای آنها ارزیابی و ابعاد مختلف آن را بررسی نمایند. در حقیقت، این جدول با نمایان کردن روابط میان بخش‌ها، امکان تحلیل روابط بین‌بخشی و اتخاذ راهبردهای توسعه‌ای مناسب را فراهم می‌سازد (بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران، ۱۳۹۵).

۳. پیشینه تحقیق

اهمیت توجه به امنیت آب و انرژی در سطح جهان، به اجرای مطالعات گسترده با هدف ایجاد دید کلی در رابطه با پیوند آب و انرژی در سطح جهان منجر شده که در ادامه، به چند مورد از مطالعات انجام شده در این زمینه، اشاره می‌شود.

۳-۱. مطالعات خارجی

رسول (Rasul, 2015) در مطالعه خود، با بررسی روابط بین آب، انرژی و غذا و تأثیر این روابط در رسیدن به پایداری، به این موضوع اشاره کرده است که اگرچه سیاست‌های اجرایی مانند پایین بودن قیمت آب، و یارانه برای مصرف انرژی و آب، در کوتاه‌مدت، به افزایش تولیدات منجر می‌شود اما در بلندمدت، باعث ایجاد فشار مالی بر دولت، تخصیص ناکارآمد انرژی و بهره‌برداری بیش از حد از آب و آلودگی آب شده که رسیدن به توسعه پایدار را با مشکل مواجه می‌سازد. او رویکرد پیوند را چهارچوبی مفید برای شناسایی روابط بین منابع و حرکت به سمت توسعه پایدار می‌داند.

وانگ و چن (Wang & Chen, 2016)، با استفاده از مدل داده - ستانده چندمنطقه‌ای و به‌منظور بررسی سیستم‌های آب و انرژی در هفت بخش کشاورزی، معدن، تولیدات صنعتی، تأمین گاز و الکتریسیته، تأمین آب، حمل‌ونقل و خدمات، به محاسبه مقدار انرژی و آب مصرفی (مستقیم و غیرمستقیم) برای سه منطقه هبی، پکن و تیانجین[1] پرداختند. نتایج این مطالعه، نشان می‌دهد که ضریب وابستگی آب در مناطق پکن و هبی در بخش تولیدات صنعتی بالا است.

ژانگ و وزلینو (Zhang & Vesselinov, 2017) در مطالعه خود، به معرفی مدل (WEFO)[2] به عنوان ابزاری یکپارچه برای تجزیه‌وتحلیل پیش‌بینی‌ها و طراحی برنامه‌ریزی، استراتژی‌ها و سیاست‌های مقرون به صرفه در مدیریت پیوند آب، انرژی و غذا پرداختند.

وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2018) در مقاله خود، با استفاده از روش داده - ستانده چندمنطقه‌ای و به‌منظور بررسی میزان انرژی و آب مصرفی (مستقیم و غیرمستقیم) و مدیریت منابع در کشور چین، به محاسبه میزان انرژی و آب مصرفی، میزان وابستگی میان بخش‌ها و بررسی مبادلات انرژی و آب پرداختند. نتایج حاصل از این مطالعه، بیانگر وابستگی بین دو بخش هبی و شانگهای[3] با سایر مناطق است.

---

1. Hebei; Bejing & Tianjin
2. Water, Energy and Food security nexus Optimization model
3. Shanghai

رودریگز- د- فرانسیسکو و همکاران (Rodríguez-de-Francisco *et al.*, 2019) در پژوهشی، با استفاده از ارزیابی طرح (PES)[1]، به بررسی پیوند آب، انرژی و غذا در پروژه برق آبی در کلمبیا می‌پردازند. نتایج حاصل از این پژوهش، نشان‌دهنده تأثیر این طرح در تضمین امنیت آب برای تولید برق آبی در این منطقه است.

لیو و چن (Liua & Chen, 2020)، با استفاده از مدل داده - ستانده چند منطقه‌ای، به بررسی ریسک پیوند آب و انرژی در سیستم تجارت ملی می‌پردازند. آنها بیان می‌کنند که خطرات ناشی از کمبود منابع آب و انرژی را می‌توان از طریق فعالیت تجاری مدیریت کرد.

لی و همکاران (Lee *et al.*, 2021) در مطالعه خود، به بررسی ارتباط آب، انرژی و غذا در صنعت گردشگری چین طی سال‌های ۲۰۱۷-۲۰۱۲ پرداخته‌اند. نتایج این پژوهش، حاکی از آن است که در مجموع ۱۵۵۵۶ میلیون متر مکعب آب و ۴۹۶۴ میلیون تن انرژی برای حمایت از صنعت گردشگری چین مصرف شده است.

۲-۳. مطالعات داخلی

از مطالعات داخلی انجام شده در ایران، می‌توان به مطالعهٔ شریفی‌مقدم و صادقی (۱۳۹۷) اشاره کرد که با هدف ضرورت پیوند آب، انرژی و غذا ارائه شده است.

در پژوهش میرزایی و همکاران (۱۳۹۷)، ضمن اشاره به ارتباط میان آب، انرژی و غذا، ادبیات موضوع و وضعیت فعلی پیوند WEF، و ابزارهای جهانی و مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی موجود بررسی شده است.

در مطالعات دیگری از جمله، قربانی و همکاران (۱۳۹۹)، منعم و همکاران (۱۳۹۹) و اسلامی و همکاران (۱۳۹۹)، به ارزیابی پیوند آب، انرژی و غذا در مدیریت منابع آب شبکه‌های آبیاری، پرداخته شده است.

همان‌طور که در مطالب قبلی به آن اشاره شد، با توجه به محدودیت‌های موجود در استفاده از منابع آب و انرژی در ایران، اهمیت بررسی رویکرد آب و انرژی، ضروری است. شواهد و منابع موجود، نشان می‌دهد که مطالعات بسیار محدودی در رابطه با پیوند آب و انرژی در ایران صورت گرفته است. این مطالعات، عمدتاً به معرفی یا تعریف پیوند و پتانسیل پیاده‌سازی این مفهوم اشاره دارد؛ اما آنچه حائز اهمیت است، پیاده‌سازی این مفهوم، به‌صورت کاربردی می‌باشد.

در ایران، پژوهش‌هایی در این راستا انجام شده است، که به مدیریت منابع آب با استفاده از این پیوند، پرداخته اند، اما میزان انرژی مورد استفاده برای آب و یا بالعکس، روابط بین بخشی این منابع

1. Payment for Ecosystem Services

و کل جریان مصرفی مستقیم و غیرمستقیم نادیده گرفته شده است که به عنوان یک ضعف قلمداد می‌شود. ازاین‌رو، نوآوری پژوهش حاضر، بدین صورت است که به‌عنوان گامی در این راستا، رابطه (پیوند) کمی میان دو منبع آب و انرژی در بخش‌های اقتصادی دو منطقه اصفهان و یزد به عنوان دو استان بسیار مهم در کشور از نظر جایگاه اقتصادی با استفاده از روش داده - ستانده دو منطقه‌ای بررسی شده که این امر، با شناسایی وضعیت مصرف (مستقیم و غیرمستقیم) آب و انرژی و روابط بین بخشی میان آنها و محاسبه کل جریان مصرفی آب و انرژی، به شناسایی پتانسیل‌ها و گامی در راستای ارائه راهکارها و سیاست‌گذاری‌های مناسب منجر می‌شود.

۴. مواد و روش‌ها

۴-۱. منطقه مورد مطالعه

پژوهش حاضر در دو منطقه اصفهان و یزد، انجام گرفته است. استان اصفهان با مساحتی حدود ۱۰۶۷۸۶ کیلومتر مربع، ۶/۴ درصد از مساحت کل کشور را به خود اختصاص داده است و از نظر وسعت، سومین استان کشور محسوب می‌گردد. جمعیت این استان در سال ۱۳۹۸ بالغ بر ۵۱۲۰۸۵۰ میلیون نفر برآورد شده که سهمی نزدیک به ۶/۵ درصد از جمعیت کل کشور را شامل می‌شود و سومین استان پرجمعیت ایران است.

با توجه به اینکه یکی از مؤلفه‌های اقتصادی جهت مقایسه اقتصاد مناطق و استان‌های یک کشور، تولید ناخالص داخلی می‌باشد، آمار موجود در سال‌های ۱۳۹۸، نشان می‌دهد که استان اصفهان پس از استان تهران و خوزستان، رتبه سوم کشوری و در صورت در نظر گرفتن نفت، رتبه دوم کشوری را به خود اختصاص داده است. ارزش تولید ناخالص داخلی این استان ۵/۴۲ درصد مقدار کل کشور است و این مقدار بدون نفت به ۸/۳ درصد افزایش می‌یابد (سالنامه آماری انرژی کشور، ۱۳۹۸).

با توجه به گزارش‌های اداره کل هواشناسی، این استان با قرارگیری در منطقه خشک و نیمه خشک مرکزی کشور و با توجه به اینکه ۳۰ درصد از مساحت استان را بیابان تشکیل داده (رتبه پنجم کشوری) از جمله استان‌های کم آب ایران و همواره تحت‌تأثیر پدیده خشکسالی بوده است؛ به‌گونه‌ای که وجود رشته‌کوه‌های زاگرس در غرب استان، مانع نفوذ رطوبت به نواحی مرکزی و شرق می‌شود (شکل ۱).

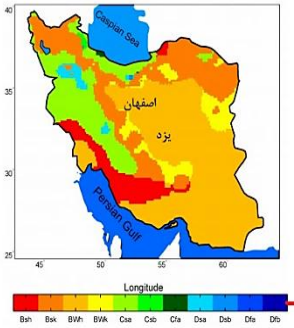
همچنین مجموع مصرف حامل‌های انرژی شامل (گازوییل، گاز طبیعی، بنزین، نفت سفید، گاز مایع، نفت کوره و نفت سیاه) استان اصفهان در سال ۱۳۹۶، معادل ۷۹۳۱ میلیون لیتر بوده است. این میزان مصرف، ۱۰/۲ درصد مصرف کل کشور را شامل می‌شود و استان را از این نظر، در رتبه دوم قرار داده است (شرکت ملی پخش فراورده‌های نفتی ایران ، ۱۳۹۶).

منطقه مورد مطالعه دیگر در پژوهش حاضر، استان یزد بوده که با مساحتی حدود ۷۳۴۷۷ کیلومتر مربع به‌عنوان هشتمین استان وسیع کشور شناخته شده است. جمعیت این استان، حدود ۱۱۳۸۵۳۳ نفر برآورد شده که ۱/۴ درصد از کل جمعیت کشور را شامل می‌شود و از این لحاظ در بین سایر استان‌های کشور، در رده ۲۴ قرار دارد.

تولید ناخالص داخلی این استان نیز حدود ۱/۶ درصد کل محصول ناخالص داخلی و حدود ۲ درصد تولید ناخالص داخلی بدون نفت کشور را تشکیل می‌دهد (سالنامه آماری انرژی کشور، ۱۳۹۸).

این استان از سمت غرب و شمال‌غرب، در همسایگی استان اصفهان است و در دشت کویر واقع در مرکزی‌ترین و خشک‌ترین منطقه کشور قرار دارد (شکل ۱)؛ به‌طوری‌که به‌عنوان یکی از کم‌بارش‌ترین و کم‌آب‌ترین استان‌های کشور، بیش از یک دهه خشکسالی مخرب را تجربه کرده، اگرچه طی دو سال اخیر، با بهبود وضعیت بارش‌ها مواجه شده است ولی همچنان با بحران کم‌آبی دست و پنجه نرم می‌کند.

همچنین مجموع مصرف فراورده‌های انرژی استان یزد در سال ۱۳۹۶، معادل ۲۲۱۷ میلیون لیتر بوده، که این میزان مصرف، ۲/۹ درصد مصرف کل کشور را شامل می‌شود و استان را در رتبه ۱۵ قرار داده است (شرکت ملی پخش فراورده‌های نفتی ایران، ۱۳۹۶).



شماره	کد یا نام اقلیم کوپن - گایگر	ویژگی‌ها
۱	BWh	بیابان خشک و بسیار گرم
۲	BWk	بیابان خشک و سرد
۳	BSh	نیمه‌بیابانی (استپ) خشک و بسیار گرم
۴	BSk	نیمه‌بیابانی (استپ) خشک و سرد
۵	Csa	معتدل با تابستان‌های خشک و بسیار گرم
۶	Csb	معتدل با تابستان‌های خشک و گرم
۷	Cfa	معتدل پرباران (بدون فصل خشک) با تابستان‌های گرم
۸	Dsa	اقلیم برفی با تابستان‌های خشک و بسیار گرم
۹	Dsb	اقلیم برفی با تابستان‌های خشک و گرم

شکل ۱. اقلیم دو منطقه یزد و اصفهان به روش کوپن-گایگر (Köppen-Geiger)

منبع: طیب رضینی، ۱۳۹۵

۲-۴. پایه‌های آماری

همان‌طور که در بخش‌های پیشین اشاره شد، در این مقاله، از چهارچوب الگوی داده - ستانده دومنطقه‌ای به منظور تجزیه و تحلیل روابط (پیوند) منابع محیط‌زیستی در بخش‌های اقتصادی استفاده شده است. بر این اساس، جدول داده - ستانده مورد استفاده، جدول ارزشی مربوط به سال ۱۳۹۵ می‌باشد که از بانک مرکزی ایران استخراج شده و میزان مصرف آب و انرژی بخش‌های مختلف در این جدول، به صورت برداری برونزا بوده که مقادیر آن برای هر بخش، برحسب میلیون بی تی یو و میلیون متر مکعب بیان شده است.

در ابتدا، جدول ارزشی داده - ستانده منطقه‌ای سال ۱۳۹۵ استان اصفهان و یزد با به‌کارگیری روش سهم مکانی خاص فلگ[1] (SFLQ) از جدول داده - ستانده سال ۱۳۹۵ بانک مرکزی و حساب‌های منطقه‌ای مرکز آمار ایران در همان سال استخراج و متناسب با ساختار تولیدات و داده‌های مصرف آب و انرژی استان اصفهان و یزد در ۲۰ بخش تجمیع شده است (جدول ۱).

جدول ۱. عناوین بخش‌های اقتصادی دو منطقه اصفهان و یزد

شماره بخش	نام بخش	شماره بخش	نام بخش
۱	کشاورزی	۱۱	ساخت فلزات اساسی
۲	نفت خام، گاز طبیعی و سایر معادن	۱۲	ساخت محصولات فلزی فابریکی بجز ماشین‌آلات و تجهیزات
۳	ساخت محصولات غذایی و آشامیدنی و تنباکو	۱۳	ساخت ماشین‌آلات و تجهیزات طبقه‌بندی نشده در جای دیگر
۴	ساخت منسوجات	۱۴	ساخت، تعمیر و نصب محصولات یارانه‌ای، الکترونیکی و نوری، ساخت، تعمیر و نصب تجهیزات برقی
۵	ساخت پوشاک، عمل‌آوری و رنگ کردن خز، دباغی و پرداخت چرم و سایر محصولات چرمی	۱۵	ساخت وسایل نقلیه موتوری و سایر تجهیزات حمل‌ونقل
۶	ساخت چوب و محصولات چوبی	۱۶	ساخت مبلمان و مصنوعات طبقه‌بندی نشده در جای دیگر

1. Industry-Specific FLQ

شماره بخش	نام بخش	شماره بخش	نام بخش
۷	ساخت کاغذ، محصولات کاغذی و چاپ	۱۷	آب و برق و گاز
۸	ساخت کک، فرآورده‌های حاصل از تصفیه نفت و سوخت‌های هسته‌ای و ساخت مواد و محصولات شیمیایی	۱۸	ساختمان
۹	ساخت محصولات از لاستیک و پلاستیک	۱۹	حمل‌ونقل
۱۰	ساخت محصولات کانی غیرفلزی	۲۰	سایر خدمات

روش SFLQ، برتری قاطعی در تخمین ضرایب منطقه‌ای نسبت به سایر روش‌های سهم مکانی دارد. مزیت این روش آن است که ضرایب ملی در بخش‌های مختلف اقتصادی به نسبت‌های متفاوتی تعدیل می‌شوند. همچنین در این روش، تا حد زیادی، مشکل تخمین بیش از حد ضرایب منطقه‌ای، برطرف شده و براساس همه معیارهای ارزیابی در روش، ستانده استانی با خطای کمتری برآورد می‌شود (Kowalewksi, 2015).

رابطه (۱)، نقطه شروع روش سهم مکانی در شرایط فقدان آمار و اطلاعات مورد نیاز است:

$$r_{ij} = (LQ)^{*} a_{ij} \qquad (۱)$$

r_{ij} عنصری از ماتریس ضرایب واسطه‌ای درون منطقه، a_{ij} عنصری از ماتریس ضرایب ملی و LQ ضریب الگوی سهم مکانی را نشان می‌دهد. در این مقاله، با توجه به استفاده از روش SFLQ، می‌توان نوشت:

$$SFLQ_{ij} = \begin{cases} CILQ_{ij} \times \lambda_j & \text{for } i \neq j \\ SLQ_{ij} \times \lambda_j & \text{for } i = j \end{cases} \qquad (۲)$$

$$\lambda = \left[\log_2 \left(1 + \frac{X^r}{X^n} \right) \right]^{\delta} \qquad 0 \leq \delta < 1 \quad 0 \leq \lambda \leq 1 \qquad (۳)$$

$$r_{ij} = \begin{cases} (SFLQ_{ij} a_{ij}) & \text{if } SFLQ_{ij} \leq 1 \\ a_{ij} & \text{if } SFLQ_{ij} > 1 \end{cases} \qquad (۴)$$

که در آن، $CILQ_{ij}$ و SLQ_{ij} به‌ترتیب، سهم مکانی متقاطع صنعتی و سهم مکانی ساده بخش عرضه‌کننده و تقاضاکننده هستند. λ ضریب تعدیل منطقه و δ ضریب تعدیل ساختار اقتصادی منطقه است. مقادیر δ برای بخش‌های مختلف در روش SFLQ متفاوت است و میزان آن، بر حسب حداقل کردن ستانده واقعی هر منطقه با ستانده تخمینی حاصل می‌شود. در این روش، مقدار کوچکتر δ به معنی λ بزرگ‌تر و تعدیل کمتر ضرائب ملی است. سپس بر مبنای جدول داده - ستانده استان اصفهان و یزد، می‌توان به محاسبه شدت (تأثیر) روابط منابع آب و انرژی در هر بخش اقتصادی دو منطقه پرداخت.

آمارهای مربوط به مصرف شش حامل انرژی، «گازوئیل»، «گاز طبیعی»، «بنزین»، «نفت سفید»، «گاز مایع» و «نفت کوره و نفت سیاه» بخش‌های مختلف اقتصادی سطح ملی به صورت مقداری از ترازنامه هیدروکربنی سال ۱۳۹۵، استخراج، و براساس سرفصل‌های ترازنامه در ۸ سرفصل آورده شده، که شامل: تجاری، خدماتی و عمومی، صنعت، حمل‌ونقل، کشاورزی، نیروگاه، پتروشیمی، پالایشگاه و سایر معادن است. همچنین آمارهای مربوط به دو منبع آب‌های سطحی و زیرزمینی، از پایگاه‌های شرکت مدیریت منابع آب، شرکت مهندسی آب و فاضلاب ایران، سازمان جهاد کشاورزی و نتایج آمارگیری از معادن در حال بهره‌برداری، از سایت مرکز آمار ایران استخراج شده است. حال برای محاسبه میزان انرژی و آب مصرفی بخش‌های اقتصادی استان اصفهان و یزد، ابتدا از ضرایب انرژی و آب بخش ملی که مطابق رابطه (۵) محاسبه می‌شود، استفاده می‌کنیم:

$$\tau_{ij}^{e-w} = \frac{\omega_{ij}^{e-w}}{X_i^{e-w}} \qquad (۵)$$

τ_{ij}^{e-w} ضریب انرژی و آب بخش‌های اقتصادی در سطح ملی، ω_{ij}^{e-w} مقدار انرژی و آب مصرفی توسط هر بخش ملی و x_i^{e-w} ستانده هر بخش در سطح ملی است. سپس با استفاده از ستانده بخش‌های مختلف استان اصفهان و یزد که از حساب‌های منطقه‌ای مرکز آمار استخراج شده و با پیش‌ضرب ستانده استانی هر بخش در ضرایب مصرف ملی، میزان مصرف آب و انرژی هر بخش در سطح هر دو استان محاسبه می‌شود. نکته‌ای که در این مرحله باید موردتوجه قرار گیرد، یکسان‌سازی واحدها است. پس از جمع‌آوری داده‌ها و به علت متفاوت بودن واحد هر حامل انرژی، به یکسان‌سازی هر واحد به بی تی یو، پرداخته می‌شود. در این مرحله، با ضرب انرژی مصرفی هر بخش در مقادیر جدول (۲)، می‌توان میزان انرژی مصرفی هر بخش را برحسب میلیون بی تی یو، به‌دست آورد.

جدول ۲. ضرایب تبدیل انواع حامل‌های انرژی (میلیون بی تی یو)

گازوئیل	گاز طبیعی	بنزین	نفت سفید	گاز مایع	نفت کوره و نفت سیاه
۳۵/۸۲	۴۰/۹۳	۳۱/۸۹	۳۴/۱۱	۴۲/۶۹	۴۰/۹۳

منبع: معاونت امور برق و انرژی، دفتر برنامه‌ریزی و اقتصاد کلان برق و انرژی

۳-۴. روش‌شناسی روابط (پیوند) آب و انرژی با استفاده از مدل داده - ستانده دو منطقه‌ای

نتایج مطالعات منطقه‌ای، حاکی از آن است که هر منطقه، نقش اکولوژیکی متفاوتی در مصرف آب و انرژی منطقه‌ای ایفا می‌کند (Li *et al.*, 2014). در این راستا، در پژوهش حاضر، تلاش بر این بوده تا چگونگی جریان دو منبع آب و انرژی در بین بخش‌های اقتصادی دو منطقه اصفهان و یزد، تبیین شود.

ردیابی جریان دو منبع آب و انرژی و تعیین مقدار وابستگی متقابل آنها برای ایجاد تعادل در چهارچوب متابولیسم منطقه‌ای، امری اساسی است (Wang *et al.*, 2016). شباهت‌هایی بین ارزیابی مقدار آب لازم برای تأمین انرژی و میزان مصرف انرژی برای استفاده از آب وجود دارد، که یکی از جنبه های آشکار آن، انعکاس تقاضا و تأثیر انسان در شرایط طبیعی محیط‌زیستی توسط دو منبع آب و انرژی است. مفهوم پیوند می‌تواند به عنوان یک استعاره مفید برای بررسی وابستگی متقابل آب و انرژی از نظر مکانیزم‌های به‌هم پیوسته و فرایندهای تعبیه شده در زنجیره‌های چند رشته‌ای درهم تنیده در مقیاس‌های مختلف معرفی شود (Chen *et al.*, 2015).

برای انعکاس سیستم‌های جریان آب و انرژی هر منطقه، یک چهارچوب حسابداری مناسب که شامل فرایندهای عرضه و تقاضا باشد، لازم است. ردیابی آب و انرژی اختصاص داده شده توسط یک سیستم منطقه‌ای، از دیدگاه تولید و مصرف، اغلب بر اساس تجزیه و تحلیل جریان مواد (MFA)[1] و تجزیه و تحلیل داده - ستانده[2] ارائه می‌شود (Kennedy *et al.*, 2011).

الگوی داده - ستانده، یک روش حسابداری کارا بوده، که برای تخمین روابط فیزیکی مبتنی بر جریان‌های پولی اتخاذ شده است (Liu *et al.*, 2017). این الگو توسط لئونتیف[3] ارائه، و برای تحلیل فعالیت‌ها و ارتباطات محیط‌زیستی از جمله تحلیل جریان مستقیم و غیرمستقیم آب و انرژی میان بخش‌های مختلف اقتصاد، جریانات انتشارات محیطی و فعل و انفعالات ناشی از آنها در میان بخش های اقتصاد، ایجاد شده است (Li *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2016).

رویکرد بالا به پایین[4] (ملی به منطقه‌ای)T از جمله رویکردهای منطقه‌ای جدول داده - ستانده است که به بررسی جریان‌های فیزیکی آب و انرژی پرداخته و سیاست‌گذاران را قادر می‌سازد تا علاوه بر شناسایی بخش‌های کلیدی مناطق از نظر تولید و اشتغال، تحلیل پیوندهای بخشی مناطق و جریان مبادلات تجاری هر منطقه، الگوی تجارت بین مناطق را نیز شناسایی و طراحی نمایند. همچنین،

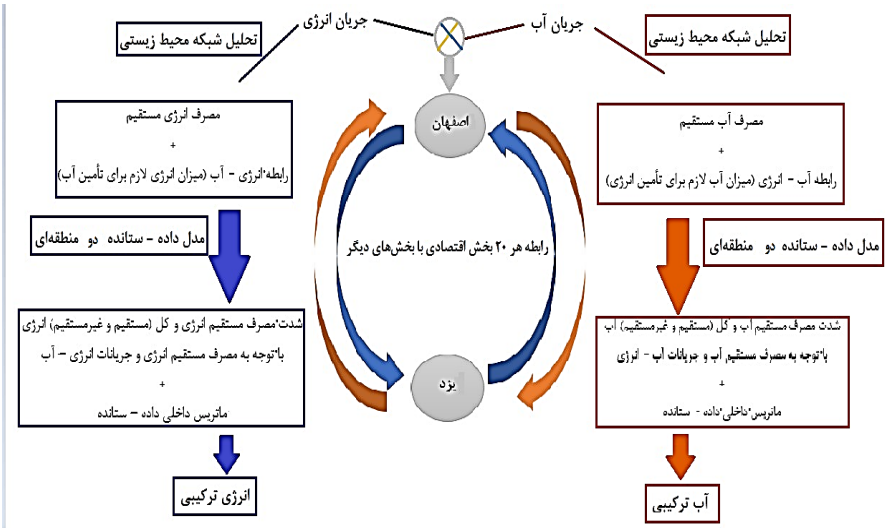
---

1. Material flow analysis
2. Input-output analysis
3. Leontief

۴. در این رویکرد، جدول داده - ستانده ملی در کنار حداقل آمار و اطلاعات موجود منطقه و یا استان مانند ستانده، اشتغال، مصرف و یا ارزش افزوده در سطح بخش‌های منطقه، مبنای محاسبه ضرایب داده - ستانده و یا جدول داده - ستانده منطقه‌ای قرار می‌گیرد.

می تواند ضعف‌های آماری موجود در سطح منطقه را به طور شفاف نشان داده و ممکن است جزئیات بیشتری را در سطح منطقه شرح دهد (Wang *et al.*, 2016).

آنچه که در روابط (پیوند) منابع محیط‌زیستی، به آن پرداخته می‌شود، پی بردن به مصارف مستقیم آب و انرژی، روابط انرژی و آب بین هر بخش اقتصادی (در این پژوهش ۲۰ بخش اقتصادی مورد بررسی است) از طریق تحلیل شبکه‌های محیط‌زیستی و سرانجام ردیابی شدت انرژی و آب مصرف شده و جریان‌های بین‌بخشی ناشی از برهم کنش‌ها و اختلافات بخشی در سیستم پیوند آب و انرژی با استفاده از مدل داده - ستانده دومنطقه‌ای است که بیانگر جریانات انرژی ترکیبی[1] و آب ترکیبی[2] می‌باشد (شکل ۲). همچنین شکل (۲)، بیانگر آن است که، هر بخش اقتصادی در هر منطقه، علاوه‌بر اینکه با یکدیگر ارتباط مستقیم و غیرمستقیم از جهت تبادل دو منبع انرژی و آب دارند، دو منطقه اصفهان و یزد هم با یکدیگر ارتباط تجاری دارند. در ادامه، فرایند محاسبه روابط دو منبع انرژی و آب در قالب یک اقتصاد دو منطقه‌ای ۲۰ بخشی تشریح خواهد شد.



شکل ۲. مدل MRNN[3] برای منطقه‌های اصفهان و یزد

منبع: Wang and Chen, 2016

1. Hybrid Energy
2. Hybrid Water
3. Multiregional nexus network

۱-۳-۴. محاسبه جریان‌های انرژی و آب

اساس مدل‌سازی پیوندها، محاسبه شدت (تأثیر) مصرف مستقیم و غیرمستقیم انرژی و آب در هر منطقه و برهم کنش‌های ناشی از هر منبع است. انرژی مستقیم شامل مجموع انرژی‌های مصرفی (گازوئیل، گاز طبیعی، بنزین، نفت سفید، گاز مایع، نفت کوره و نفت سیاه) و آب مستقیم شامل مجموع آب‌های مصرفی (آب سطحی و آب زیرزمینی) توسط هر بخش در دو منطقه اصفهان و یزد است. بنابراین، در ابتدا و براساس روابط (۶) و (۷)، به محاسبه میزان مصرف مستقیم انرژی و آب (f_i^{ene} و f_i^{wat}) در هر منطقه پرداخته می‌شود (Kenway *et al.*, 2015):

$$f_i^{ene} = \sum_{m=1} e_i^m \tag{۶}$$

$$f_i^{wat} = \sum_{m=1} w_i^m \tag{۷}$$

که در آن، e_i^m میزان مصرف شش حامل انرژی و w_i^m میزان مصرف آب سطحی و زیرزمینی توسط هر بخش اقتصادی در دو منطقه مورد بررسی است. با اقتباس از مطالعات قبلی، میزان مصرف آب مربوط به انرژی ($f_i^{wat-ene}$) و مصرف انرژی مورد نیاز آب ($f_i^{ene-wat}$) برای تمام بخش‌های اقتصادی دو منطقه را می‌توان محاسبه نمود (Jiang *et al.*, 2016).

رابطه آب - انرژی، معادل مقدار مصرف مستقیم آب برای هر نوع حامل انرژی در شدت انرژی است. شدت انرژی، شاخصی برای تعیین کارآیی انرژی در سطح اقتصاد ملی هر کشور می‌باشد که از تقسیم مصرف نهایی انرژی (و یا عرضه انرژی اولیه) بر تولید ناخالص داخلی محاسبه می‌شود و نشان می‌دهد که برای تولید مقدار معینی از کالاها و خدمات (برحسب واحد پولی) چه مقدار انرژی به کار رفته است (رابطه ۸):

$$f_i^{wat-ene} = \sum_{m=1} w_i^m \times \overline{e}^m \tag{۸}$$

$\overline{e}^m$ معادل شدت شش حامل انرژی در هر بخش اقتصادی است. به طور مشابه، رابطه انرژی - آب بر اساس مقدار مصرف مستقیم انرژی برای دو منبع آب سطحی و زیرزمینی در شدت آب است.

$$f_i^{ene-wat} = \sum_{m=1} e_i^m \times \overline{w}^m \tag{۹}$$

در رابطه (۹)، $\overline{w}^m$ معادل شدت دو منبع آب (سطحی و زیرزمینی) در هر بخش اقتصادی است.

محاسبات ارائه شده در رابطه با مصرف آب مورد نیاز انرژی (آب - انرژی) و انرژی مورد نیاز آب (انرژی - آب)، امکان ارزیابی واحدی از رابطه انرژی و آب را فراهم می‌کند؛ ازاین‌رو و با توجه به روابط (۱۰) و (۱۱)، اصطلاح "انرژی ترکیبی (هیبریدی)"، با ترکیب مصرف مستقیم انرژی و آب موردنیاز

برای زیرساخت‌های انرژی ارائه شده است. به‌طور مشابه، اصطلاح "آب ترکیبی"، از حاصل‌جمع مصرف مستقیم آب و انرژی موردنیاز برای تأمین آب، محاسبه می‌شود (Liu *et al.*, 2017):

$$f_i^{h-ene} = f_i^{ene} + f_i^{wat-ene} \quad (۱۰)$$

$$f_i^{h-wat} = f_i^{wat} + f_i^{ene-wat} \quad (۱۱)$$

۲-۳-۴. تجزیه و تحلیل جریان‌های مستقیم و غیرمستقیم انرژی و آب بر اساس الگوی داده - ستانده دو منطقه‌ای

رابطه بین انرژی و آب، از طریق جریان‌های مستقیم و غیرمستقیم در شبکه‌های اقتصادی درهم تنیده شده است. مسیر مستقیم، بیانگر میزان تقاضای مستقیم به کار رفته برای تولید ستانده ناخالص، و مسیر غیرمستقیم، نشان‌دهنده میزان تقاضای نهاده استفاده شده در تولید کالاها و خدمات واسطه ای است (Park, 1982: 127S). حال تجزیه و تحلیل انرژی و آب مصرفی، از طریق الگوی داده - ستانده دومنطقه‌ای، تمام مسیرهایی که توسط بخش‌های اقتصادی به‌هم مرتبط شده است را در نظر می‌گیرد، به‌طوری‌که بیانگر تأثیر پیوند در اکوسیستم‌های منطقه‌ای از دیدگاه مصرف و ارزیابی رابطه انرژی و آب با استانداردسازی واحد است (Liu *et al.*, 2017).

برای نشان دادن تأثیر پیوند بین انرژی و آب، لازم است شدت روابط آب و انرژی به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم، طبق روابط (۱۲) و (۱۳) محاسبه شود.

$$\theta_e = \frac{f_{e,i}}{x_{e,i}} \quad (۱۲)$$

$$\theta_w = \frac{f_{w,i}}{x_{w,i}} \quad (۱۳)$$

در رابطه (۷)، θ_e نشان‌دهنده تأثیر (شدت) پیوند انرژی به‌صورت مستقیم، و دو پارامتر $f_{e,i}$ و $x_{e,i}$ به‌ترتیب، بیانگر انرژی ترکیبی (هیبریدی) مصرف شده و شدت انرژی در هر بخش اقتصادی است. تفاسیر ذکر شده با پارامترهای موجود در رابطه (۸) و مرتبط با منابع آب، انطباق دارد.

سپس، بر اساس ماتریس معکوس لئونتیف و ماتریس صادرات و واردات انرژی و آب در دو منطقه، مصرف مستقیم و غیرمستقیم دو منبع انرژی و آب که از طریق تقاضای نهایی در هر بخش اقتصادی در منطقه ایجاد شده است، طبق روابط (۱۴) و (۱۵) محاسبه می‌شود:

$$\theta_e' = \theta_e^{diag} (I - A)^{-1} f^{Ee/Ie} \quad (۱۴)$$

$$\theta_w' = \theta_W^{diag} (I - A)^{-1} f^{Ew/Iw} \quad (۱۵)$$

θ_e' و θ_w' به‌ترتیب، بیانگر کل شدت پیوند انرژی و آب (مستقیم و غیرمستقیم)، و همچنین پارامترهای θ_e^{diag} و θ_w^{diag} نشان‌دهنده ماتریس‌های قطری از شدت پیوندهای مستقیم انرژی و آب هستند. عبارت $(I-A)^{-1}$ در هر دو رابطه، بیانگر ماتریس معکوس لئونتیف است که تغییرات در تقاضای نهایی که به تغییر تولید منجر می‌شود را نشان می‌دهد. همچنین ماتریس A در این عبارت، بیانگر ماتریس مستقیم داخلی هر منطقه است که توسط الگوی داده - ستانده چند منطقه‌ای محاسبه شده و دو پارامتر $f^{Ee/Ie}$ شامل ماتریس صادرات و واردات انرژی و $f^{Ew/Iw}$ شامل ماتریس صادرات و واردات آب است.

۵. تجزیه و تحلیل نتایج

پس از شرح روش پژوهش، در ادامه، به تحلیل و ارائه نتایج از این پژوهش پرداخته شده است. همان‌طور که در مطالب قبلی به آن اشاره شد، ردیابی جریان دو منبع آب و انرژی و تعیین مقدار وابستگی متقابل آنها برای ایجاد تعادل در چهارچوب متابولیسم منطقه‌ای، امری اساسی بوده، و برای رسیدن به این هدف در پژوهش حاضر، از رویکرد پیوند آب و انرژی استفاده شده است. آنچه که در پیوند به آن پرداخته می‌شود، پی بردن به مصارف مستقیم آب و انرژی و روابط آب و انرژی و در نهایت، بررسی جریانات انرژی هیبریدی و آب هیبریدی در هر منطقه است؛ که در ادامه، به ارائه و بررسی نتایج حاصل از این مفاهیم می‌پردازیم.

۵-۱. تحلیل روابط بین‌بخشی آب و انرژی مصرفی

در گام اول، مقدار انرژی و آب مصرف شده در دو منطقه مورد مطالعه، در قالب نمودار (۱) و (۲) به تصویر کشیده شده، که از دیدگاه مبتنی بر مصرف، کل مصرف مستقیم انرژی در ایران در سال ۱۳۹۵ برابر با ۱۱۴۹۱۹۶۵۰۸۱ میلیون بی‌تی‌یو بوده، در حالی که استان اصفهان با ۸۷۸۵۷۵۸۹۶/۴ میلیون بی‌تی‌یو، سهم ۷/۶ از میزان کل انرژی مصرفی ملی را به خود اختصاص داده است و از میان بخش‌های اقتصادی استان اصفهان، بخش «حمل و نقل» با سهم ۳۹/۵۸ درصد، بزرگترین مصرف‌کننده انرژی می‌باشد. همچنین کل آب مصرفی در بخش‌های اقتصادی ایران در سال ۱۳۹۵، معادل ۸۰۰۳۳/۹۵ میلیون متر مکعب است، که کل آب مصرفی در بخش‌های اقتصادی استان اصفهان، ۴۹۶۲/۸ میلیون متر مکعب و ۶/۲ درصد از کل مصرف ملی را شامل می‌شود. بخش «کشاورزی» با سهم ۹۳/۹ درصد، جایگاه نخست مصرف آب را در استان اصفهان به خود اختصاص داده است.

از آنجایی که پژوهش حاضر، یک مطالعه دومنطقه‌ای شامل دو استان اصفهان و یزد است، در ادامه، به بررسی نتایج حاصل مربوط به استان یزد پرداخته شده است. بدین ترتیب بر اساس نتایج، کل انرژی مصرفی استان یزد، برابر با ۲۶۲۲۳۰۴۹۷/۶ میلیون بی‌تی‌یو است که ۲/۲ درصد از مصرف

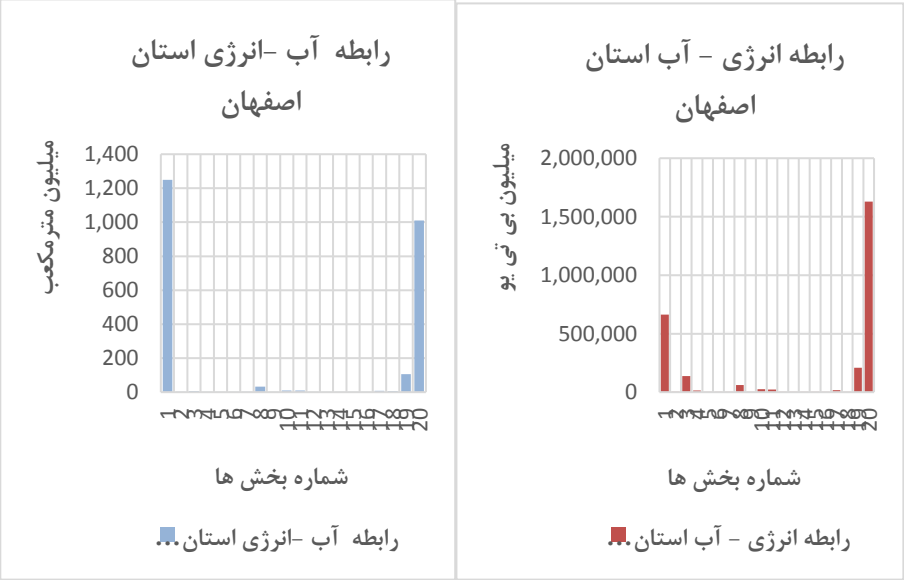
کل کشور را به خود اختصاص داده است. و بخش «حمل و نقل» با سهم ۳۵/۶ درصد، بزرگترین مصرف‌کننده انرژی در بخش‌های اقتصادی این استان به‌شمار می‌رود. اما در مورد منابع آب، کل آب مصرف شده برای تولیدات استان یزد، برابر با ۱۸۱۶/۱ میلیون متر مکعب با سهم ۲/۲ درصدی از کل کشور است. در استان یزد نیز بخش «کشاورزی» با ۹۱/۶ درصد بزرگترین مصرف کننده آب است.

نمودار ۱. حجم کل انرژی مستقیم مصرف شده در بخش‌های اقتصادی استان اصفهان و یزد

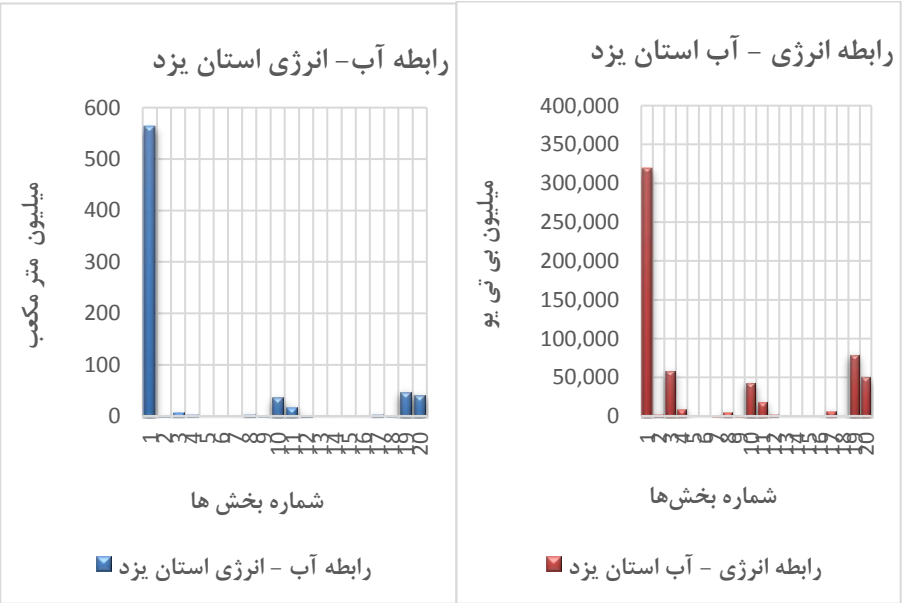
نمودار ۲. حجم کل آب مستقیم مصرف شده در بخش‌های اقتصادی استان اصفهان و یزد

در ادامه نتایج، به تجزیه‌وتحلیل رابطه انرژی - آب و آب - انرژی اصفهان و یزد پرداخته شده است. نتایج حاصل از محاسبات استان اصفهان که در نمودار (۳) به تصویر کشیده شده، نشان‌دهنده این است که آب مصرف شده برای تولید انرژی در استان اصفهان، برابر با ۲۴۴۹/۴ میلیون متر مکعب است. علاوه بر این، انرژی مصرف شده برای تولید آب در این استان، معادل ۲۷۹۴۱۸۵۸۰/۴ میلیون بی‌تی‌یو است؛ که بخش «کشاورزی» به‌ترتیب، با سهم ۵۱ درصدی و بخش «سایر خدمات» با سهم ۵۸/۲ درصدی، جایگاه نخست را به خود اختصاص داده‌اند.

در مورد استان یزد، آب مصرفی برای تولید انرژی، برابر با ۷۲۹/۲ میلیون متر مکعب است و انرژی مصرفی برای تولید آب، معادل ۵۹۷۵۲۲۷۷/۸ میلیون بی‌تی‌یو است که بخش «کشاورزی» به‌ترتیب، با سهم ۷۷/۱ و ۵۳/۴ درصدی، در جایگاه نخست این مصرف قرار دارد. نتایج مربوط به استان یزد، در نمودار (۴) به تصویر کشیده شده، که این نکته مورد توجه قرار می‌گیرد که بخش «کشاورزی»، سهم زیادی در مصرف آب برای تولید انرژی و بالعکس، مصرف انرژی برای تولید آب را به خود اختصاص داده است.



نمودار ۳. رابطه آب انرژی و انرژی - آب در بخش‌های اقتصادی استان اصفهان

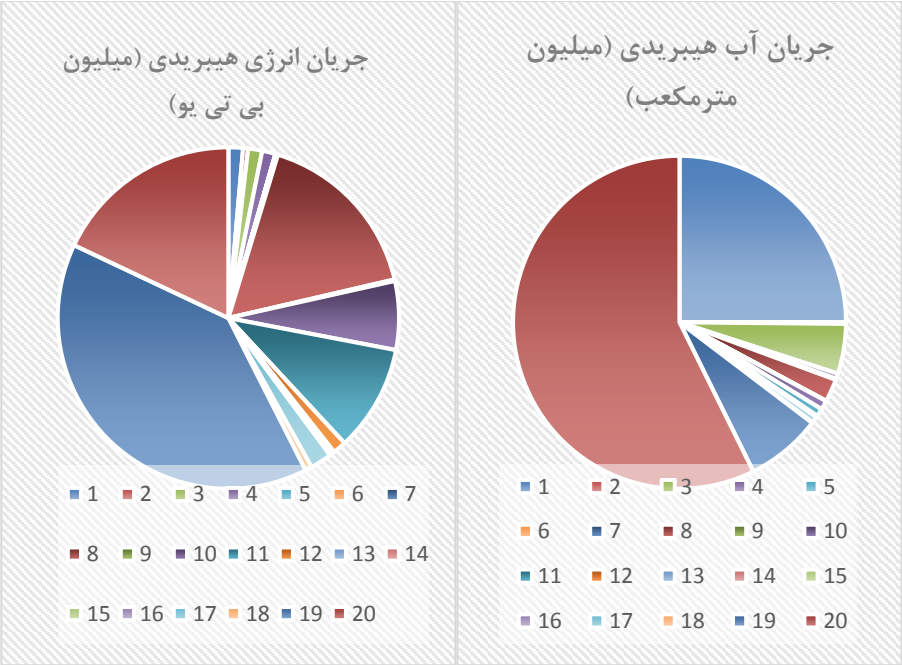


نمودار ۴. رابطه آب - انرژی و انرژی - آب در بخش‌های اقتصادی استان یزد

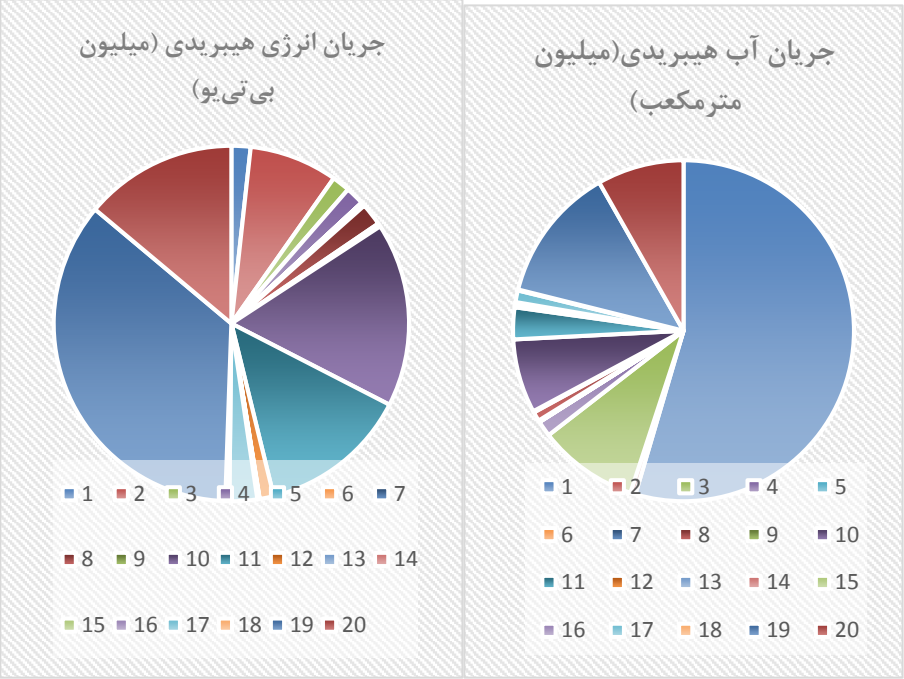
۲-۵. جریان آب و انرژی هیبریدی در بخش‌های اقتصادی دو منطقه مورد مطالعه

با استفاده از این شاخص و بر اساس شدت (تأثیر) روابط بین هر بخش، می‌توان جریان بین بخش‌ها را تشخیص داد. جریان بین‌بخشی، نقش هر بخش در سیستم منطقه‌ای (شهری) را مشخص می‌کند. نتایج این بخش، حاکی از آن است که، دو بخش «حمل و نقل» و «سایر خدمات» در اصفهان، به‌ترتیب، بزرگترین جریان انرژی هیبریدی و آب هیبریدی را دارا هستند. و در استان یزد بخش‌های «حمل و نقل» و «کشاورزی»، به‌ترتیب، جایگاه نخست جریان انرژی هیبریدی و آب هیبریدی را به خود اختصاص داده‌اند. بالا بودن سهم بخش «حمل و نقل» در جریانات هیبریدی دو منطقه به‌دلیل بالا بودن سهم مصرفی منابع انرژی، از سهم مصرفی کل در بین بخش‌ها است.

همانطور که در قسمت‌های بالاتر، به آن اشاره شد، بالا بودن مصارف آب به‌دلیل اقلیم خشک منطقه و بهره‌وری پایین آب در تولیدات کشاورزی است که نیازمند استفاده بیشتر از منابع آبی بوده، که نتایج حاصل از جریان آب و انرژی هیبریدی دو منطقه در نمودار (۵) و (۶) ملاحظه می‌شود.



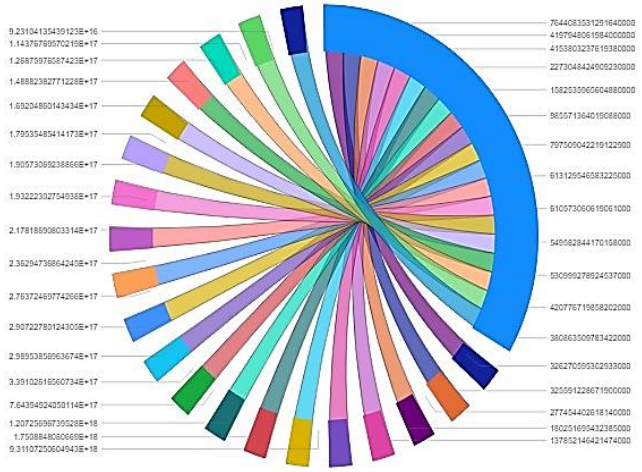
نمودار ۵. جریان آب و انرژی هیبریدی بخش‌های اقتصادی استان اصفهان



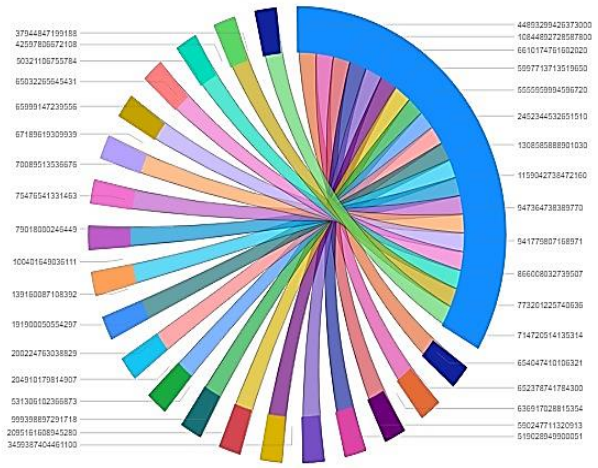
نمودار ۶. جریان آب و انرژی هیبریدی بخش‌های اقتصادی استان یزد

۳-۵. جریانات کل (مستقیم و غیرمستقیم) انرژی و آب در دو منطقه مورد مطالعه

در این قسمت از تحلیل نتایج، به بررسی جریان مستقیم و غیرمستقیم با استفاده از صادرات و واردات بین بخشی مناطق مورد مطالعه پرداخته شده و جریانات هر بخش توسط یک رنگ و با مقادیر جریان کل هر بخش، نمایش داده شده است. بررسی این نتایج، به شناسایی بخش‌های کلیدی هر منطقه در استفاده از منابع آب و انرژی منجر می‌شود. نتایج حاصل از جریانات کل انرژی و آب در دو منطقه مورد نظر در نمودار (۷) و (۸) رسم شده است. از این رو، در استان اصفهان بر اساس جریانات کل آب، بخش «حمل و نقل» و «کشاورزی»، جایگاه نخست در جریان صادرات و واردات و بخش‌های «ساخت کک، فرآورده‌های حاصل از تصفیه نفت و سوخت‌های هسته‌ای و ساخت مواد و محصولات شیمیایی» و «ساخت فلزات اساسی»، به‌ترتیب، جایگاه نخست صادرات و واردات انرژی را به خود اختصاص داده، و به عنوان بخش کلیدی استان اصفهان برای مدیریت منابع انرژی و آب به‌شمار می‌روند.



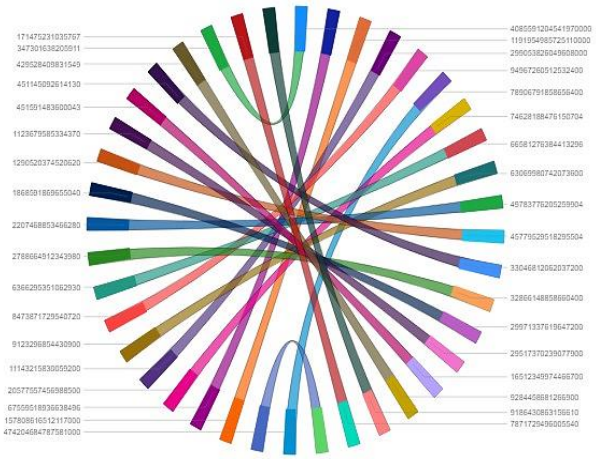
نمودار ۷. نمودار جریان ترکیبی انرژی در بخش‌های اقتصادی استان اصفهان



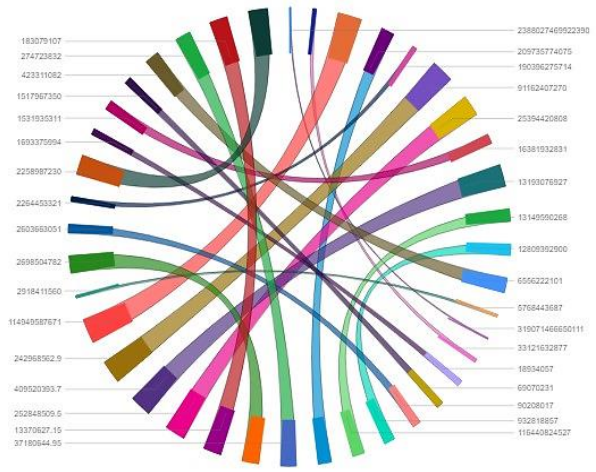
نمودار ۸. نمودار جریان ترکیبی آب در بخش‌های اقتصادی استان اصفهان

اما در مورد استان یزد، دو بخش «ساخت محصولات کانی غیرفلزی» و «ساخت کک، فرآورده‌های حاصل از تصفیه نفت و سوخت‌های هسته‌ای و ساخت مواد و محصولات شیمیایی»، به‌ترتیب، بیشترین جریان کل صادرات و واردات انرژی را به خود اختصاص داده است و در مورد منابع آب نیز

بخش «کشاورزی»، به‌ترتیب، بزرگترین صادرکننده و واردکننده هستند و به عنوان بخش‌های کلیدی استان یزد برای مدیریت منابع انرژی و آب شناخته می‌شوند.



نمودار ۹. نمودار جریان ترکیبی انرژی در بخش‌های اقتصادی استان یزد



نمودار ۱۰. نمودار جریان ترکیبی آب در بخش‌های اقتصادی استان یزد

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله، تلاش شد تا با مرور اجمالی بر مدل پیوند منابع طبیعی، میزان مصرف مستقیم دو منبع آب و انرژی‌های فسیلی، روابط آب - انرژی و انرژی - آب و جریان کل (مستقیم و غیرمستقیم) بین بخشی در دو منطقه و در سطح بخش‌های اقتصادی استان اصفهان و یزد در سال ۱۳۹۵ مورد سنجش قرار گیرد. بدین‌منظور از مدل داده - ستانده دومنطقه‌ای برای تجزیه و تحلیل انرژی مورد نیاز برای تأمین آب (رابطه انرژی - آب) و آب مورد نیاز برای تأمین انرژی (رابطه آب - انرژی) براساس دیدگاه مبتنی بر مصرف و تولید با توجه به تأثیر مستقیم و غیرمستقیم بین‌بخشی استفاده شده است.

همچنین از مصرف مستقیم برای نشان دادن رابطه پیچیده بین دو منبع آب و انرژی در هر بخش اقتصادی به صورت کمی استفاده شده، درحالی‌که رابطه انرژی و آب هیبریدی (ترکیبی)، می‌تواند این ارتباط را در امتداد زنجیره‌های تأمین دو منبع ترسیم کند و در مرحله آخر، از جریان کل (مستقیم و غیرمستقیم) هربخش، برای نشان دادن سهم هر بخش در کل جریان، استفاده شده است.

به‌رغم اهمیت ویژه روابط کمی دو منبع آب و انرژی در بین بخش‌های اقتصادی، تعداد پژوهش‌های داخلی انجام شده در این حوزه، ناچیز است؛ به‌طوری‌که اغلب مطالعات در حوزه روابط بین بخشی مانند مطالعات میرزایی و همکاران (۱۳۹۷) و قربانی و همکاران (۱۳۹۹)، به صورت کیفی و اغلب در زمینه آبیاری انجام گرفته است؛ در حالی که روابط به صورت کیفی در مقایسه با سنجش آن به صورت کمی، از دقت کمتری برخوردار می‌باشد و حتی استفاده از نتایج آن در سیاست‌گذاری، باید با احتیاط صورت گیرد.

براساس نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، استان اصفهان و یزد، به‌ترتیب، با سهم ۷/۶ و ۲/۲ درصدی از میزان کل مصرف انرژی کشور، جایگاه دوم و پانزدهم را به خود اختصاص داده‌اند. با وجود آنکه دو منطقه مورد مطالعه از جهت برخی از حامل‌های انرژی غنی هستند، اما به‌دلیل سرمایه-گذاری‌های صنعتی صورت‌گرفته در این مناطق، به‌عنوان مناطق پرمصرف انرژی شناخته شده‌اند، به‌طوری‌که از بین ۲۰ بخش اقتصادی مورد مطالعه در این پژوهش، بخش «حمل و نقل» در دو استان به عنوان پرمصرف‌ترین بخش در زمینه مصرف انرژی شناخته شده است.

همچنین نتایج حاصل از بررسی میزان مصرف آب در دو استان، بیانگر این است که در هر دو استان، بخش «کشاورزی»، بزرگترین مصرف‌کننده آب است که با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک این دو استان و اهمیت منابع آبی ناشی از کمبود و بحران آب، این موضوع بسیار حائز اهمیت است؛ زیرا مدیریت نادرست منابع آبی، علاوه بر مشکل کم آبی در منطقه، به ایجاد ناامنی غذایی نیز منجر خواهد شد. از این رو، افزایش بهره‌وری و ارتقاء تکنولوژی تولید در این بخش، امری ضروری و مهم تلقی می‌شود که هم به صورت مستقیم، به کاهش هدر رفت آب در بخش کشاورزی منجر می‌شود و

هم، به صورت غیرمستقیم، در کاهش مصرف آب در تولیدات صنایع وابسته به کشاورزی، نمود پیدا می‌کند.

تجزیه و تحلیل جریان انرژی و آب ترکیبی، نشان می‌دهد که بخش «حمل و نقل» در دو منطقه، از جهت جریان انرژی ترکیبی و دو بخش «سایر خدمات» در استان اصفهان و «کشاورزی» در استان یزد از جهت جریان آب ترکیبی، پرمصرف‌ترین و به عبارتی، تأثیرگذارترین بخش‌ها از جهت مصرف در دو منطقه هستند؛ به‌طوری‌که مهم‌ترین گره مدیریتی در رابطه بین دو منبع انرژی و آب در مناطق مورد مطالعه در نظر گرفته می‌شوند.

در زمینه جریان آب ترکیبی می‌توان گفت، پایین بودن بهره‌وری آب در این مناطق و به تبع آن، نیاز برای استفاده بیشتر از منابع آبی برای تولیدات کشاورزی، به استفاده بیشتر از انرژی برای استخراج، پمپاژ آب، تصفیه آب و غیره منجر شده، که نیازمند استفاده از انرژی است. مصرف بالای انرژی در بخش «کشاورزی»، با زیان‌های اقتصادی و خسارت‌های محیطزیستی نظیر انتشار گازهای گلخانه‌ای همراه می‌باشد که نیازمند برنامه‌های هدفمند صرفه‌جویی از جمله صرفه‌جویی در انرژی های فسیلی و استفاده از انرژی‌های نو است.

از طرفی نیز، این صرفه‌جویی در منابع انرژی و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، به کاهش مصرف آب برای تولید، استخراج سوخت‌های فسیلی و یا تولید نیروی برق منجر شده و در مجموع، علاوه بر کاهش مصارف آب و انرژی، میزان وابستگی این منابع به یکدیگر در این بخش، کاهش می‌یابد.

همچنین در رابطه با تحلیل جریان کل انرژی و آب بین بخشی در دو منطقه، می‌توان ذکر کرد که بخش «حمل و نقل» و «کشاورزی» در استان اصفهان بر اساس جریانات کل آب، جایگاه نخست از جهت جریان صادرات و واردات، بخش‌های «ساخت کک، فرآورده‌های حاصل از تصفیه نفت و سوخت‌های هسته‌ای و ساخت مواد و محصولات شیمیایی» و «ساخت فلزات اساسی»، به‌ترتیب، جایگاه نخست صادرات و واردات انرژی را دارا هستند.

در مورد استان یزد، بخش «کشاورزی»، به‌ترتیب، بزرگترین صادرکننده و واردکننده در زمینه منابع آب است و دو بخش «ساخت محصولات کانی غیرفلزی» و «ساخت کک، فرآورده‌های حاصل از تصفیه نفت و سوخت‌های هسته‌ای و ساخت مواد و محصولات شیمیایی»، به‌ترتیب، بیشترین جریان کل صادرات و واردات انرژی را به خود اختصاص داده‌اند. به‌عبارتی، بخش‌های مذکور، بیشترین ورودی و خروجی دو منبع انرژی و آب را دارا هستند. از این‌رو، با توجه به آب و هوای خشک منطقه و صنعتی بودن دو استان و با توجه به بالا بودن صادرات و واردات آب و انرژی در بخش‌های ذکر شده، می‌توان به این نکته اشاره کرد که ایجاد صنایع و فعالیت‌های اقتصادی در هر منطقه، باید متناسب با شرایط اقلیمی و آب و هوایی منطقه باشد و در این مناطق، اقدام به ایجاد صنایع پرمصرف

مانند صنایع فولاد و کشت محصولات با آب‌بری بالا که نیازمند استفاده بیشتر از منابع آب و انرژی هستند، نشود.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که مصرف انرژی در بخش‌های اقتصادی کشور و مناطق از جمله اصفهان و یزد، رو به افزایش است. از آنجایی‌که ایران در منطقه خشک و نیمه‌خشک واقع شده و آب یکی از منابع کمیاب در کشور محسوب می‌شود، سیاست‌گذاران در حوزه منابع محیط‌زیستی (انرژی و آب) می‌باید گام‌هایی در جهت کاهش انرژی‌بری و آب‌بری در بخش‌های مختلف اقتصاد بردارند. بنابراین پیشنهاد می‌شود:

- با توجه به نتایج مطالعه، بخش «کشاورزی» از آب‌بری بالایی برخوردار است، به‌طوری‌که تقاضای نهایی داخلی بخش مذکور، سهم زیادی از کل تقاضای نهایی دو منطقه را در برمی‌گیرد. بدین ترتیب، لازم است که از شیوه‌های نوین آبیاری مانند آبیاری قطره‌ای، کانال‌کشی لوله‌ای یا بتونی و آبیاری با روش زیرزمینی که می‌تواند از جذب و بخار شدن آب و همچنین مصرف بی‌رویه آن جلوگیری کند، استفاده شود.
- توجه به سیستم کشت گلخانه‌ای از دیگر راهکارهای مهم برای کاهش مصرف آب و افزایش بازدهی در صنعت کشاورزی است.
- با توجه به اینکه در صنایع وابسته به کشاورزی، از محصولات کشاورزی به عنوان نهاده واسطه استفاده می‌شود، مکانیزه کردن کشاورزی و کمک به راندمان آبیاری در این بخش، می‌تواند به صورت غیرمستقیم، از آب‌بری بخش‌های تولیدی بکاهد.
- استراتژی واردات «انرژی مجازی» و «آب مجازی»، می‌تواند به عنوان یک راهکار مناسب برای رفع کمبود انرژی و آب در دو منطقه اصفهان و یزد، مورد توجه سیاست‌گذاران کشور قرار گیرد. در این راستا، پیشنهاد می‌شود که بر اساس یک برنامه ریزی بلندمدت و با در نظر گرفتن سایر عوامل، الگوی تجارت در این دو منطقه بر مبنای واردات حداکثری و صادرات حداقلی آب و انرژی مجازی، قرار گیرد.
- از آنجایی که دو منطقه در اقلیم خشک و نیمه‌خشک واقع هستند، پیشنهاد می‌شود سرمایه‌گذاری و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، زمین گرمایی با روند فزاینده در دستور کار سیاست‌گذاران قرار گیرد تا به افزایش کارآیی انرژی و کاهش انرژی‌بری در مناطق مورد نظر، بپردازند.
- با توجه به نتایج مطالعه، بخش «حمل‌ونقل» از انرژی‌بری بالایی برخوردار است. بدین منظور، لازم است در دو منطقه، به توسعه حمل‌ونقل عمومی، به کارگیری تکنولوژی جدید و افزایش راندمان خودروها، بالا بردن سهم حمل‌ونقل ریلی بویژه در حمل بار با اتخاذ سیاست‌های لازم و رفع موانع موجود و ترویج فرهنگ صحیح مصرف، پرداخته شود.

منابع و مآخذ

اداره حساب‌های اقتصادی بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران (۱۳۹۵). جدول داده - ستانده اقتصاد ایران، سال ۱۳۸۹. آذرماه ۱۳۹۵:www.ead.cbi@.ir

اسلامی، زینب؛ جنت رستمی، سمیه؛ اشرف‌زاده، افشین و پورمحمد، یاور (۱۳۹۹). تأثیر رویکرد پیوندی آب، انرژی و غذا در مدیریت یکپارچه منابع آب شبکه آبیاری و زهکشی سفیدرود. *نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، ۳۴(۱): ۲۵-۱۱.

پایگاه اینترنتی وزارت نیرو، ترازنامه هیدروکربنی انرژی کشور، ۱۳۹۵.

رضینی، طیب (۱۳۹۵). منطقه‌بندی اقلیمی ایران به روش کوپن-گایگر و بررسی جابه‌جایی مناطق اقلیمی کشور در سده بیستم. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۴۳ (۲): ۴۳۹-۴۱۹.

سالنامه انرژی (۱۳۹۸)، معاونت امور برق و انرژی، دفتر برنامه‌ریزی و اقتصاد کلان برق و انرژی. شرکت ملی پخش فراورده‌های نفتی ایران، ۱۳۹۶.

شریفی‌مقدم، احسان و صادقی، سید حمیدرضا (۱۳۹۹). کاربرد همبست آب- انرژی- غذا در مدیریت منابع آب. *اولین همایش ملی راهبردهای مدیریت منابع آب و چالش‌های زیست‌محیطی*، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ۱۰و ۱۱ اردیبهشت ۱۳۹۷.

قربانی، الهام؛ منعم، محمدجواد و واعظ تهرانی، مهسا (۱۳۹۹). توسعه مدل پیوند آب، انرژی و غذا در سطح شبکه‌های آبیاری بر اساس شاخص‌های کفایت و پایداری آب (مطالعه موردی شبکه آبیاری قزوین). *تحقیقات مهندسی آبیاری و زه‌کشی*، ۲۱(۸۰): ۸۰-۶۱.

منعم، محمدجواد؛ دلاور، مجید و حسینی، سید معین (۱۳۹۹). کاربرد و ارزیابی پیوند آب، غذا و انرژی (نکسوس) در مدیریت شبکه‌های آبیاری: مطالعه موردی شبکه آبیاری زاینده‌رود. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱(۱۴): ۲۸۵-۲۷۵.

میرزایی، شکیبا؛ قهرمان، بیژن؛ مساعدی، ابوالفضل و ضرغامی، مهدی (۱۳۹۷). بررسی اهمیت پیوند آب - انرژی - امنیت غذایی در حوضه زرینه رود، ایران. *پنجمین کنفرانس انجمن انرژی ایران، کنفرانس بین‌المللی فناوری و مدیریت انرژی با رویکرد پیوند انرژی، آب و محیط‌زیست.*

Bizikova, L.; Roy, D.; Swanson, D.; Venema, H. D., & McCandless, M. (2014). *Water-Energy-Food Nexus and Agricultural Investment: A Sustainable Development Guidebook*. Winnipeg, Canada: International Institute for Sustainable Development (IISD).

Boretti, A., & Rosa, L. (2019). Reassessing the projections of the world water development report. *NPJ Clean Water*, *2*(1), 1-6.

Chang, Y.; Li, G.; Yao, Y., & Zhang, L. (2016). Quantifying the water-energy-food nexus: Current status and trends. *Energies*, 9(2): 1-17.

Chen, B., & Chen, S.Q. (2015). Urban metabolism and nexus. *Eco. Info.*, 26:1-2.

Carrillo, A. M. R., & Frei, C. (2009). Water: A key resource in energy production. *Energy Policy*, *37*(11), 4303-4312.

DeNooyer, T.A.; Peschel, J.M.; Zhang, Z., & Stillwell, A.S. (2016). Integrating water resources and power generation: The energy-water nexus in Illinois. *Appl. Energy*, 162: 363-371.

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. *Renew Sustain Energy Rev.*, 30: 808-820.

Grimm, N.B.; Faeth, S.H.; Golubiewski, N.E.; Redman, C.L.; Wu, J.; Bai, X., & Briggs, J. M. (2008). Global change and the ecology of cities. *Science*, 319 (5864): 756-760.

IEA (International Energy Agency). World Energy Outlook 2008. Paris: IEA/ OECD; 2008.

IEA (International Energy Agency). World Energy Outlook 2019. Paris: IEA/ OECD; 2019.

Jiang, W.Q.; Li, J.S.; Chen, G.Q.; Yang, Q.; Alsaedi, A.; Ahmad, B., & Hayat, T. (2016). Mercury emissions embodied in Beijing economy. *J. Clean Prod.*, 129: 134-142.

Kenway, S.J.; Binks, A.; Lane, J.; Lant, P.A.; Lam, K.L., & Simms, A. (2015). A systemic framework and analysis of urban water energy. *Environ. Model. & Soft.*, 73 (C): 272-285.

Kowalewksi, J. (2015). Regionalization of national input-output tables: Empirical evidence on the use of the FLQ formula. *Regional Studies*, 2(49): 240-250

Kennedy, C.; Pincetl, S., & Bunje, P. (2011). The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design. *Environ. Pollut.*, 159 (8): 1965-1973.

Lee, L. C.; Wang, Y., & Zuo, J. (2021). The nexus of water-energy-food in China's tourism industry. *Resources, Conservation and Recycling,164*: 105157.

Liu, Y.; Wang, S., & Chen, B. (2017). Regional water-energy-food nexus in China based on multiregional input-output analysis. *Energy Procedia*, 142: 3108-14.

Li, Z.; Pan, L.Y.; Fu, F.; Pei, Liu.; Ma, L.W., & Amorelli, A. (2014). China's regional disparities in energy consumption: An input-output analysis. *Energy*, 78: 426-438.

Li, J.S.; Xia, X.H., & Chen, G.Q. (2016). Optimal embodied energy abatement strategy for Beijing economy: Based on a three-scale input-output analysis. *Renew Sustain. Energy Rev.*, 53: 1602-10.

Liua, L., & Chen, B. (2020). Water-energy scarcity nexus risk in the national trade system based on multiregional input-output and network environ analyses. *Energy*, 268, 114974

Lundin, M., & Morrison, G.M. (2002) A life cycle assesment based procedure for development of environmental sustainability indicators for urban water systems. *Urban Water*, 4(2): 145-152.

Lubega, W.N., & Farid, A.M. (2014). Quantitative engineering systems modeling and analysis of the energy-water nexus. *Appl. Energy*, 135: 142-157.

Madlener, R., & Sunak, Y. (2011). Impacts of urbanization on urban structures and energy demand: What can we learn for urban energy planning and urbanization management? *Sustain. Cities Soc.*, 1 (1): 45-53.

Mo, W.; Wang, R., & Zimmerman J.B. (2014). Energy-water nexus analysis of enhanced water supply scenarios: A regional comparison of Tampa Bay, Florida, and San Diego, California. *Environ. Sci. Technol.*, 48 (10): 5883-91.

Park, S. H. (1982). An input-output framework for analysing energy consumption. *Energy Economics*, 4(2): 105-110.

Rasul, G. (2014). Food, water, and energy security in South Asia: A nexus perspective from the Hindu Kush Himalayan region. *Environmental Science and Policy*, 39: 35-48.

Rasul, G. (2015). Managing the food, water, and energy nexus for achieving the sustainable development goals in South Asia. *Environmental development*, 18: 14-25.

Rodríguez-de-Francisco, J. C.; Duarte-Abadía, B., & Boelens, R. (2019). Payment for ecosystem services and the water-energy-food nexus: Securing resource flows for the affluent?. *Water*, *11*(6): 1143.

Scott, C.A.; Pierce, S.A.; Pasqualetti, M.J.; Jones, A.L.; Montz, B.E., & Hoover, J.H. (2011). Policy and institutional dimensions of the water-energy nexus. *Energy Policy*, 39: 6622-30.

Stokes, J.R., & Horvath, A. (2009). Energy and air emission effects of water supply. *Environ. Sci. Technol.*, 43(8): 2680-87.

Tarroja, B.; AghaKouchak, A.; Sobhani, R.; Feldman, D.; Jiang, S., & Samuelsen, S. (2014). Evaluating options for balancing the water-electricity nexus in California: Part 1-securing water availability. *Sci. Total Environ.*, 497: 697-710

United Nations (2020). Department of Economic and Social Affairs Population Facts, December 2020 No. 2020/2.

Wang, S., & Chen, B. (2016). Energy water nexus of urban agglomeration based on multiregional input-output table and ecological network analysis: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Energy*, 178: 773-783.

Wang, S.; Liu, Y., & Chen, B. (2018). Multiregional input-output and ecological network analyses for regional energy-water nexus within China. *Energy*, 227: 353-364. WWW.Footprintnetwork.org

Zhang, Y.; Zheng, H.M.; Yang, Z.F.; Li, Y.X.; Liu, G.Y.; Su, M., & Yin, X. (2016). Urban energy flow processes in the Beijing-Tianjin-Hebei (Jing-Jin-Ji) urban agglomeration: Combining multi-regional input-output tables with ecological network analysis. *J. Clean Prod.*, 114: 243-256.

Zhang, X., & Vesselinov, V. V. (2017). Integrated modeling approach for optimal management of water, energy and food security nexus. *Advances in Water Resources*, 101: 1-10.