

ارزیابی و تحلیل تعاملات متابولیکی و پیوند آب، غذا و انرژی با استفاده از چارچوب MUSIASSEM

(مطالعه موردی حوضه آبریز فرامرزی هریرود)

انسیه طلایی^۱ | مجید دلاور^۲

۱. دانشجوی ارشد منابع آب، گروه مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲. دانشیار گروه مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده

آب، غذا و انرژی به عنوان سیستم‌های در هم تنیده و به هم پیوسته، تأثیرات متقابل قابل توجهی بر یکدیگر دارند و تغییرات کمی و کیفی در هر یک از این سیستم‌ها می‌تواند به سایرین آسیب بزند. رودخانه هریرود در مرز ایران و افغانستان به عنوان نمونه بارز یک سیستم در هم تنیده، تأمین‌کننده مهمی برای آب شرب کلان‌شهر مشهد و نیازهای کشاورزی دشت سرخس در ایران است و در افغانستان نیز، این رودخانه نقش حیاتی در کشاورزی هرات و تأمین انرژی برقایی ایفا می‌کند. با این حال، در سال‌های اخیر، تأمین آب به عنوان یک عامل کلیدی برای توسعه کشاورزی و انرژی در این حوضه با چالش‌های جدی مواجه شده است. دلایلی همچون مسائل سیاسی، اجتماعی، هیدرولوژیکی و ناکارآمدی در مدیریت منابع عوامل چنین چالش‌هایی در سطح حوضه می‌باشد. این پژوهش با استفاده از مفهوم متابولیسم، چارچوبی تحلیلی ارائه می‌دهد که به بررسی و مقایسه عملکرد و فرآیندهای سیستم‌های آب، غذا و انرژی در سطح کشوری و حوضه آبریز می‌پردازد. کمی‌سازی این رویکرد بر اساس داده‌ها و منابع معتبر موجود در سطح حوضه انجام شده است. نتایج این پژوهش حاکی از وابستگی شدید سیستم‌های آب و غذا و انرژی در سطح حوضه و کشورهای ساحلی آن می‌باشد به گونه‌ای که، ایران برای تولید حدود ۲ میلیون و ۷۰۰ هزار تن محصولات کشاورزی منتخب در منطقه، سالانه ۱۹۱۴ میلیون مترمکعب آب و ۱۰۷۰۱ تراژول انرژی مصرف کرده است. افغانستان نیز با مصرف ۱۴۰۰ میلیون مترمکعب آب و ۳۱۵۳ تراژول انرژی، ۷۴۰ هزار تن محصول کشاورزی تولید کرده است. همچنین نیروگاه برقایی سلما با عبور جریانی به حجم ۷۵۵ میلیون متر مکعب از توربین‌ها ۱۹۷ هزار مگاوات ساعت برق برای تأمین انرژی منطقه تولید کرده است. با این حال افغانستان وابستگی زیادی به واردات غذا و انرژی دارد. نتایج حاکی از ضرورت تقویت همکاری‌های دو کشور ایران و افغانستان و ایجاد سازوکارهای مشترک برای مدیریت بهینه منابع آبی هریرود می‌باشد.

کلمات کلیدی: پیوند آب، غذا و انرژی، حوضه آبریز فرامرزی، متابولیسم، هریرود

۱. مقدمه

بیش از ۴۵ درصد از خشکی‌های زمین و ۶۰ درصد از کل آب‌های شیرین جهان که شامل ۲۸۶ حوضه آبریز و ۳۰۰ آبخوان مشترک می‌شود، از مرزهای سیاسی میان دو یا چند کشور عبور می‌کنند. معیشت حدود دو میلیارد نفر به این منابع آبی مشترک وابسته است (Schelmm et al, 2016). آب‌های فرامرزی، این جوامع را نه تنها از نظر هیدرولوژیکی بلکه از نظر اجتماعی، اقتصادی و جغرافیایی به یکدیگر وابسته می‌کند. عواملی همچون عدم انطباق مرزهای سیاسی با مرز حوضه‌های آبریز، کمبود آب و رقابت بر سر بهره‌برداری هرچه بیشتر از منابع میان ذی‌نفعان، رفتار غیرهمکارانه و قدرت‌جویانه کشورهای بالادست در تقسیم آب و تنش‌های سیاسی بین طرفین معاهدات، موجب افزایش اختلافات و منازعه بر سر تأمین امنیت و پایداری منابع آبی و سیستم‌های وابسته به آن در بخش کشاورزی و انرژی شده است (Shoghi Javan et al, 2018).

حوضه آبریز هریرود، مشترک میان ایران و افغانستان نیز با چنین عوامل محدودکننده‌ای روبه‌رو است. علاوه بر آن اثرات تغییر اقلیم به وضوح روی افزایش دما، کاهش بارش و وقوع خشکسالی‌های هیدرولوژیکی و اقتصادی-اجتماعی حوضه تأثیر گذاشته است (Parsa et al., 2023). در این حوضه، بخش قابل توجهی از اشتغال، امنیت غذایی، انرژی و آب شرب شهر بزرگ هرات وابسته به جریان رودخانه هریرود است. همچنین تأمین آب مورد نیاز کشاورزی دشت سرخس و یک سوم آب شرب کلان شهر مشهد در پایین دست این رودخانه در گرو همکاری افغانستان در وصول آب به ایران است. بر اساس گزارش (Regional Water Company of Khorasan Razavi, 2023)، که مبتنی بر شاخص تنش آبی فالکن مارک بوده است، تمامی شهرستان‌های واقع در بخش ایران با کمبود مطلق آب یا کمبود آب مواجه هستند. در چنین شرایطی آب به عنوان یک عامل تأثیرگذار در تأمین امنیت غذایی و انرژی و از طرفی تأثیرپذیر از عوامل انسانی و طبیعی به یک چالش تبدیل شده است. این‌ها نشان می‌دهد که ارتباط متقابل و به هم پیوسته‌ای میان آب، تأمین غذا و انرژی وجود دارد و این محدودیت‌ها اثرات سیستم‌ها روی یکدیگر و واکنش‌های زنجیره‌ای را تشدید می‌کند. با این وجود مطالعات محدودی در این حوضه انجام شده است که وضعیت موجود این منابع و میزان تقاضا را به هم وابسته و در کنار یکدیگر، برای هر دو کشور ذی‌نفع ایران و افغانستان بررسی کند.

با این وجود در بسیاری از مطالعات فنی و سیاست‌گذاری‌ها، بخشی‌نگری و نگاه منفصلانه به سیستم‌های درهم‌تنیده، موجب ناکارآمدی، افزایش مبادلات و کاهش هم‌افزایی در مدیریت منابع موجود شده است. محققان به دنبال کاهش پیامدهای ناشی از چنین نگرش‌هایی، روش مدیریت یکپارچه IWRM را معرفی کردند. محور اصلی این رویکرد، مطالعات حوزه آب است و الزامات و اولیتهای سایر بخش‌ها را کم‌رنگ می‌کند. از این رو رویکردهای چندمحوری مسیر جدیدی برای جوامع تحقیقاتی و سیاست‌گذاری گشودند. مفهوم پیوند سال ۲۰۰۸ در نشست سالانه مجمع جهانی اقتصاد برای اولین بار شناخته و سال ۲۰۱۱ در کنفرانس بن به عنوان رویکردی بین بخشی در دستیابی به امنیت و پایداری منابع آب، غذا و انرژی معرفی شد (Rosell et al, 2023). این درحالی است که مطالعات اولیه معمولاً پیوند میان دو بخش مانند آب و غذا (Antonelli and Tamea, 2015)، آب و انرژی (Sarvari et al, 2021) یا غذا و انرژی (Abdelradi & Serra, 2015) را تجزیه و تحلیل کردند.

امروزه تمرکز بسیاری از مطالعات با رویکرد پیوندی آب، غذا و انرژی شامل تحلیل همبستگی، شناخت تعاملات پویا و بررسی بازخورد سیستم‌های درهم‌تنیده از یکدیگر و محرک‌های محیطی بوده است (al.,2015;White et al.,2017;Li et al.,2020;Deahan Conway et al.,2020). علاوه بر این، نتایج مطالعات یاد شده استراتژی‌هایی را برای افزایش بهره‌وری و استفاده بهینه از سیستم‌های آب، غذا و انرژی ارائه داده است. همچنین مطالعاتی در حوزه رویکرد پیوندی در سطح فراملی و حوضه‌های فرامرزی نیز انجام شده است و راهکارهای موثری به منظور افزایش پتانسیل همکاری‌های منطقه‌ای ارائه شده است (Saidi et al.,2017;Almulla et al.,2017).

پیاده‌سازی این رویکرد نیاز به ابزار و روش‌های کیفی و کمی دارد. (Purwanto et al(2019) و Aslani et al(2023) از روش‌های کیفی مانند ارزیابی حلقه‌های بازخورد برای شناخت نظری پیوند میان آب، غذا و انرژی استفاده کردند. مطالعات کیفی زمینه را برای تحلیل کمی پیوند فراهم می‌کنند. از طرفی دیگر مطالعات کمی، اجزای سیستم‌های به هم پیوسته آب، غذا و انرژی را با ابزار و روش‌هایی نظیر ماتریس و بردار کمیت‌ها (Karnib.,2016;Ghosh et al.,2024)، ابزارهای کامپیوتری مانند WEF Nexus Tool 2.0 در مطالعه (Mohta and Daher(2015)، ارزیابی و ارزش‌گذاری شاخص‌های عددی در مطالعه (Willis et al.,2016;Li et al.,2020) و بهره‌گیری از رویکرد داده_ستانده (Xia et al.,2021; Nasrollahi et al.,2019) تحلیل کردند.

هر کدام از روش‌های تحلیلی نام برده شده محدودیت‌ها و مزایایی دارد که متناسب با محدوده مطالعاتی و دسترسی به داده‌ها کاربرد دارد. برخی از این محدودیت‌ها عبارت است از عدم امکان بررسی تجارت در ساختار پیوند، عدم توجه به پارامترهای اجتماعی همچون تغییرات نرخ جمعیت و نیروی کار و تعاملات فرایندهای انسانی و طبیعی با یکدیگر (Rosell,2023). هدف این مطالعه ارزیابی منابع و مصارف حوضه ابریز هریرود مبتنی بر رویکرد پیوند آب، غذا و انرژی است. ارزیابی ارتباط میان اجزای پیوند نیز به کمک گردآوری داده‌های آماری موجود تحت چارچوب تحلیلی Musiasem^۲ انجام شد که یک روش چندمقیاسی مبتنی بر حسابداری داده_ستانده است. این رویکرد قابلیت کاربرد در مقیاس‌های مکانی مختلف را داراست؛ از تحلیل‌های بسیار کوچک در سطح مزارع گرفته تا ارزیابی‌های گسترده در سطح فراملی و بین‌المللی. این ویژگی‌ها، پردازنده‌های متابولیسمی را به ابزاری سازگار برای درک و مدیریت پویایی‌های پیچیده منابع در یک حوضه فرامرزی تبدیل می‌کند. اجزای چارچوب تحلیلی این مقاله بر مبنای مطالعه (Tovar et al(2019) و تغییراتی متناسب با اطلاعات موجود و محدودیت کشور افغانستان در نظر گرفته شد.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. محدوده مطالعاتی

حوضه ابریز هریرود از حوضه‌های آبریز مشترک میان سه کشور ایران، افغانستان و ترکمنستان واقع در جنوب آسیا است. وسعت این حوضه حدود ۹۳۲۶۰ کیلومترمربع است که حدود ۴۲ درصد از آن در بالادست و داخل مرز سیاسی افغانستان و به ترتیب ۳۷/۵ و ۲۰/۵ درصد در خاک ایران و ترکمنستان واقع شده است. بررسی و تحلیل این مطالعه روی بخش ایران و افغانستان در حوضه ابریز هریرود تمرکز دارد. به طور میانگین در بازه زمانی زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۱ جمعیت ساکنین بخش افغانستان یک میلیون و ۷۸۰ هزار نفر و بخش ایران چهار میلیون و ۲۳۴ هزار نفر برآورد شده است (Thomas and Warner.,2015;King and Sturtewagen.,2010; Regional Water Company of Khorasan

Razavi; Ministry of Jihad Agriculture Khorasan Razavi).

در ایران بخش‌هایی از حوضه آبریز قره‌قوم واقع در شهرستان‌های سرخس، تایباد، تربت جام، فریمان، صالح آباد، چناران، مشهد، باخرز، گلپهر و بخش‌هایی از شهرستان قوچان را دربرمی‌گیرد. در افغانستان نیز شامل ولایت غور و هرات در غرب این کشور می‌شود. رودخانه هریرود از مهمترین منابع آبی این حوضه از کوه‌های بلند افغانستان سرچشمه می‌گیرد. این رود در نزدیکی شهرستان تایباد به مرزهای ایران و افغانستان می‌رسد و با پیوستن به رودخانه کشف‌رود خط مرزی ایران و افغانستان به طول ۲۵۹ کیلومتر را تشکیل می‌دهد (Motaghi et al., 2018). کشور افغانستان به منظور بهره‌برداری از این منبع آبی، سد سلما را با ظرفیت فعال ۵۶۰ میلیون مترمکعب در بالادست رودخانه احداث کرده است و در راستای توسعه اقتصادی، افزایش فرصت‌های شغلی و تأمین امنیت آب و انرژی، اجرای طرح‌های توسعه سازه‌های آبی مانند سدخاکی پشدان را نیز در دستور کار خود قرار داده است (Nagheeb et al., 2019). در پایین دست رودخانه هریرود نیز کشور ایران و ترکمنستان به منظور کنترل جریان ورودی، سد دوستی را با گنجایش ۱۲۵۰ میلیون متر مکعب در ۱۸۰ کیلومتری شهر مشهد احداث کرده‌اند. در شکل (۱) موقعیت حوضه آبریز، جریان رودخانه هریرود و محل قرارگیری سدها نمایش داده شده است.

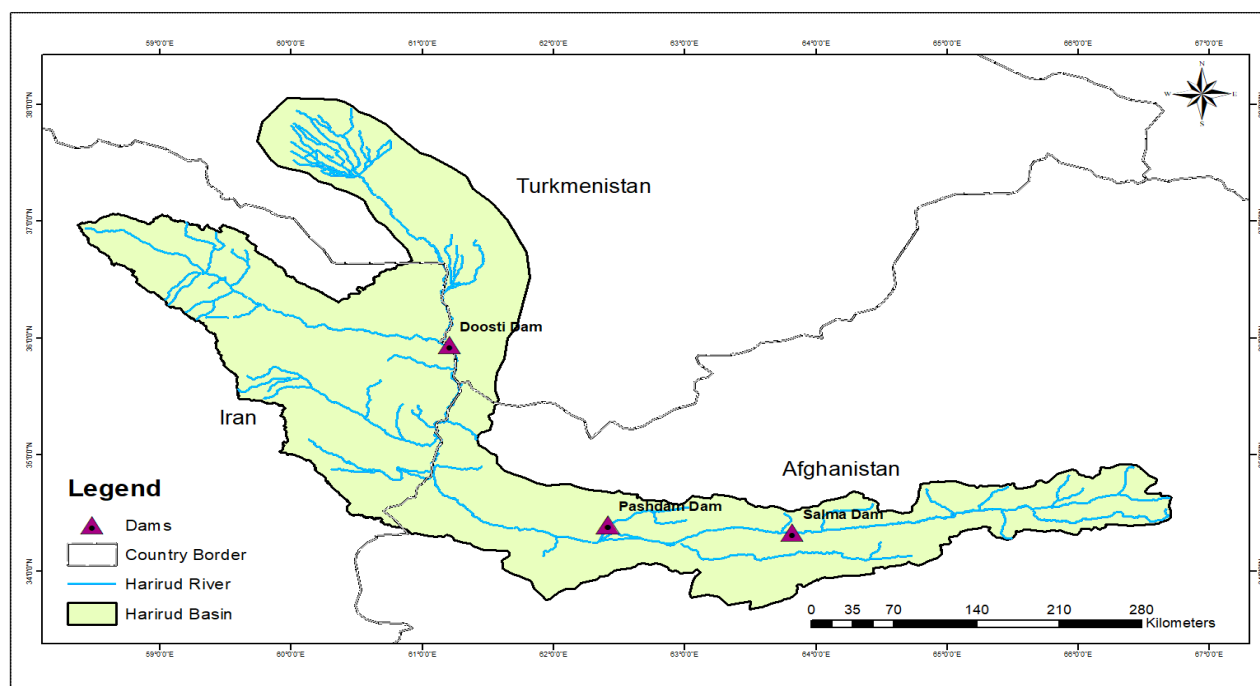


Figure1. Location of the Harirud basin

۲.۲. ساختار چارچوب تحلیلی Musiasem

چارچوب تحلیلی Musiasem نوعی حسابداری است که با استفاده از مفهوم متابولیسم، عملکرد سیستم‌های اجتماعی-اکولوژیکی را بر حسب مؤلفه‌های سرمایه و جریان به طور نسبتاً ساده‌ای توصیف می‌کند. این چارچوب برای اولین بار توسط روزن ارائه شده است (Rosen., 1958). از ویژگی‌های این چارچوب این است که نسبت به روش‌های مشابه مانند پرایم^۳ پیچیدگی کمتری در مقیاس‌های بزرگ و فراملی ایجاد می‌کند و به داده‌های کمتری احتیاج دارد.

این چارچوب متشکل از پردازنده‌هایی است که اجزای ساختاری و عملکردی یک سیستم را به صورت چند مقیاسی نشان می‌دهد. از آنجایی که ویژگی ذاتی سیستم‌های طبیعی باز بودن مرز آن‌ها است، این چارچوب امکان تعریف و تحلیل روابط تجاری و تعاملات هرکدام را با دیگر سیستم‌ها فراهم کرده است. با چنین امکانی می‌توان بر اساس سهم نسبی یک سیستم در استفاده از تولیدات داخلی خود نسبت به استفاده از جریان‌های وارداتی، بخشی از امنیت متابولیسم را در تأمین آب، غذا و انرژی بررسی کرد (Giampietro, 2022).

شکل ۲ اجزای یک پردازنده را نشان می‌دهد که به طور کلی از چهار قسمت تشکیل شده است. قسمت بالایی مربوط به ورودی‌هایی است که از تکنوسفر (فرایندهای تحت کنترل انسان) وارد می‌شود. این ورودی‌ها شامل جریان‌ها و سرمایه هستند. جریان‌ها از نوع ماده و انرژی هستند که در طول فرایند مصرف می‌شوند (مانند سوخت، کود، الکتریسیته)، اما عناصر سرمایه مصرف نمی‌شوند بلکه در طول زمان نگهداری می‌شوند (مانند ظرفیت توربین، نیروی کار، زمین) و مبدل ورودی‌ها به خروجی هستند. قسمت پایین پردازنده نیز مربوط به تعامل سیستم با بیوسفر (محیط طبیعی خارج از کنترل انسان) است که سمت چپ شامل تمام جریان‌هایی است که از محیط خارج از سیستم در طول فرایند وارد می‌شوند (مانند آب سبز، خاک و باد) و سمت راست مربوط به بارهایی است که در طول فرایند متابولیسمی به محیط اطراف بازگردانده می‌شود (مانند زباله، گازهای گلخانه‌ای و فاضلاب). خروجی پردازنده نیز نشان دهنده مقدار محصول یا محصولاتی است که با مقدار مشخصی از جریان‌ها و سرمایه‌های مورد نیاز و سطح مشخصی از تعامل با بیوسفر تولید شده است.

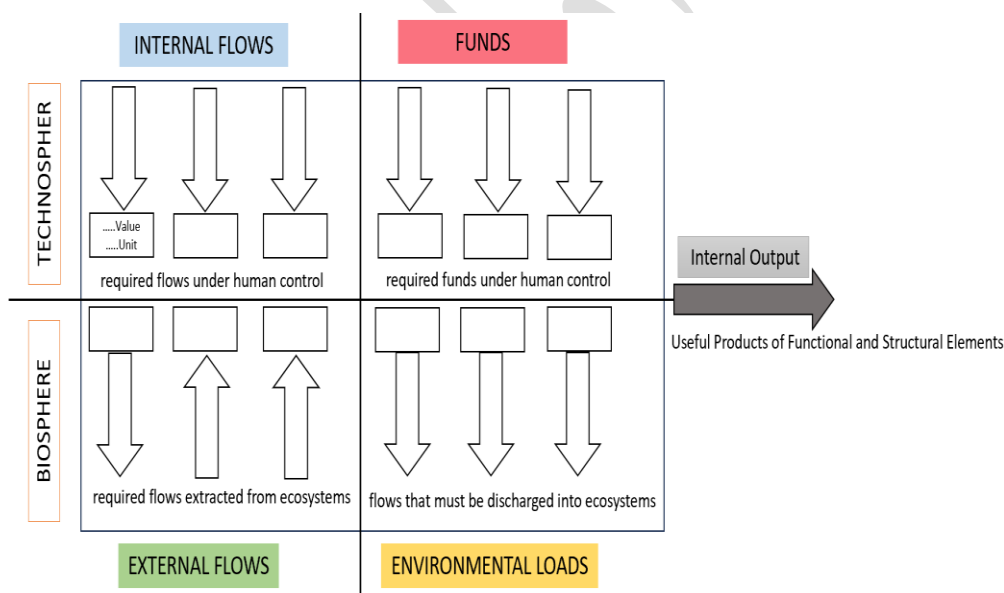


Figure 2. Graphical representation of processor's components

۳.۲. سیستم پیوندی آب، غذا و انرژی

چارچوب Musiasem قابلیت تحلیل در سطوح مختلف مکانی و زمانی را فراهم می‌کند. این سطوح مکانی می‌توانند شامل مقیاس‌های جهانی، منطقه‌ای، ملی، محلی و حتی زیرسیستمی باشند. در این مطالعه پیوند آب، غذا و انرژی در دو سطح مکانی ملی و فراملی بررسی خواهد شد.

در سطح ملی، به کمک پردازنده‌ها، در مرز کشور ایران و افغانستان واقع در حوضه هریرود به طور جداگانه پارامترهای عملکردی و ساختاری فرایند تأمین محلی آب، غذا و انرژی کمی‌سازی شده است تا اولویت‌ها و محدودیت‌های مرتبط با مدیریت منابع در هر کشور شناسایی

شوند. پردازنده آب شامل فرایند استحصال آب از آبخوان‌ها و جریان‌های سطحی است. پردازنده غذا شامل فرایند تولید محصولات کشاورزی با سطح زیرکشت غالب است (پیوست ۱). به دلیل سهم اندک سطح زیرکشت محصولات باغی و کمبود داده‌ها تنها تعداد محدودی از محصولات باغی انتخاب شده‌اند. در محدوده مطالعاتی، تنها انرژی مورد بررسی فرایند تولید الکتریسیته می‌باشد، چراکه سوخت برای کشور ایران از سیستم ملی (خارج حوضه) و برای کشور افغانستان از طریق واردات تأمین می‌شود. تأمین محلی الکتریسیته افغانستان تنها از نیروگاه تجدیدپذیر برقابی سلما و برای ایران نیروگاه‌های تجدیدناپذیر گازی، بخاری و ترکیبی در محدوده می‌باشد. سطح فراملی نیز در مرز حوضه آبریز هررود، با کمی‌سازی تجارت محصولات غذایی، تجارت انرژی و جریان ورودی رودخانه مرزی هریرود از کشور افغانستان به داخل مرز ایران ترسیم خواهد شد تا ارتباط و وابستگی دو کشور ذی‌نفع به یکدیگر بررسی شود. شکل ۳ یک سیستم پیوندی محلی متشکل از پردازنده‌ها و چگونگی ارتباط آن با مرز خود را نشان می‌دهد.

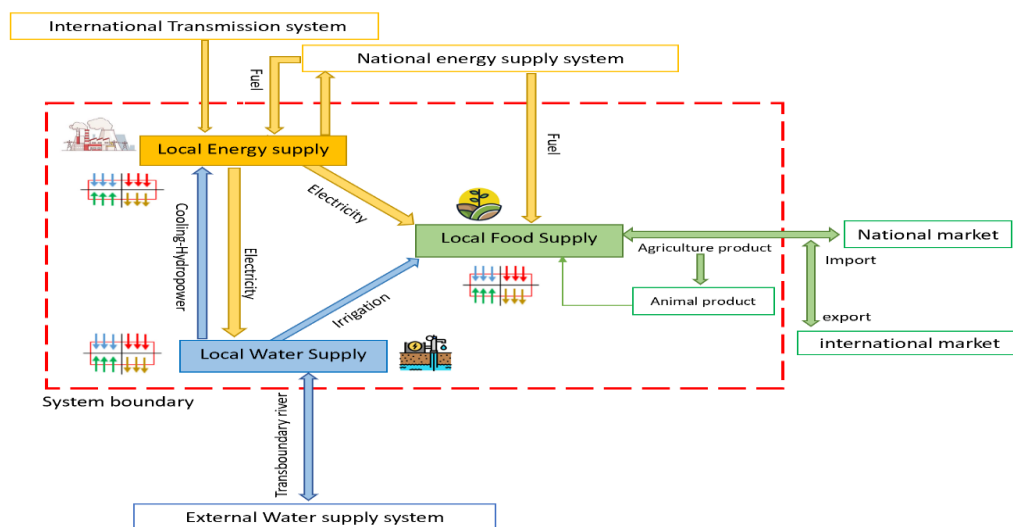


Figure3. Performance of a metabolic system under WFE NEXUS approach

۴.۲. کمی‌سازی عناصر پردازنده و سیستم پیوندی

کمی‌سازی مقادیر اجزای ساختاری و عملکردی پردازنده‌ها و روابط تجاری دو کشور با یکدیگر به روش گردآوری داده از مراجع و گزارش‌های معتبر و همچنین در موارد کمبود داده، با استفاده از روابط ریاضی حاکم بر فرایندها است که شرح مختصر آن در جدول ۱ آمده است. مفروضات مطالعه و جزئیات روابط نیز در ادامه شرح داده شده است.

Table1. References and data sources

Main Sector	Data Type	Method of Collection/Calculation	Source/Reference	
			Iran	Afghanistan
Water	Evapotranspiration	Remote Sensing Data	Global Land Data Assimilation System (GLDAS) Data period:2011-2021	
	Precipitation			
	Dam information	Data collection	Ministry of Energy, Macro Planning Office for Water and Wastewater. Final Report (2011). Updated Studies of the Country (Ghareh Ghum Basin)	Nagheeby et al (2019)

Volume 4: Surface Water Resources			
Input and output flows Values	Data collection	Volume 11: Balance of Resources and consumption	Based on statistics provided in the Iran section
Water Withdraw	Based on the cultivated area, Gross Water Requirement, and the application of irrigation system efficiency (Afghanistan) Data Collection(iran)	Regional Water Company of Khorasan Razavi, Profile Water of the Study area Data Period:2016-2022	Agriculture: Gross water requirement Based on ET0 Calculator Fao/KC extracted from Fao irrigation and drainage paper No.56
Water Withdraw	Data collection	Drink Water and Services: Regional Water Company of Khorasan Razavi, Per Capita and Profile Water Data Period:2016-2022	Drink water: Based on the study by Ahmadi and heravi (2024) and Population (Calculating per capita consumption)
	Data collection	Industries: Iran Water Resources Management, Report of Ministry of Industry, Mine and Trade (2021)	Industries: Based on the number of industrial units extracted from the study area map and the amount of water consumed by similar units in the Iranian sector
operating wells Information	Data Collection	Ministry of Energy, Iran water resources management Company, Water Resources Basic Studies Statistics	_____
		Regional Water Company of Khorasan Razavi, Profile Water of the Study area Data Period:2016-2022	
Electricity for groundwater pumping	Calculation with Formula 1 and 2: Monem et al (2019)		
Fuel consumption for groundwater pumping	Calculation with Formula 3	Calculating fuel and electricity for the pumping process is not possible for the Afghanistan sector due to lack of data	

	Cultivated surface Crop Pattern Crop Production	Data Collection	Ministry of Jihad Agriculture Khorasan Razavi, Statistical yearbook Data period:2011-2021	Land Use Map ESA Data Period:2000- 2021 Ministry of Agriculture, Irrigation and Livestock, Annual report of agriculture Data Period:2019- 2022
Food	Separation of blue and green water	Based on the amount of effective precipitation and Potential evapotranspiration	Based on the USDA method: $Pe = \min(\text{Total Precipitation}, ETp)$ $ET \text{ blue} = \max(0, ETp - Pe)$ $ET \text{ green} = \min(ETp, Pe)$	
	Losses	Data Collection	FAO STAT, Food Balance Data Data Period:2010-2021	
	per capita consumption	Based on per capita national consumption		
	Trade Quantity	Calculation based on the difference between agricultural product imports and exports and estimation of the basin's share of the country's total trade.FaizAbadi(2022)	app.indexbox.io, Market Data (For years without statistics in FAO)	
	Agricultural consumables(Chemical fertilizers, seeds, Labor)	Calculation with Formula 4: El Gafy (2017)		
	Technical coefficients	Data Collection (Annex2)	Ministry of Agriculture Jihad, Deputy of Planning and Economic, Annual statistics on the costs of agricultural product cultivation Data Period:2011-2021	Basiri(2013) Soltani and khajehpour (2020)
Energy	Technical information of Generating Plant	Data Collection	Ministry of Energy, Energy balance book Data Period:2018-2021 Safai., V (2018)	Report of GIZ Afghanistan (2015)
	Amount of energy exchanges	Data Collection	Khorasan Regional Electric Company, Summary of power plant production status(2021)	Report of Asian Development Bank, Power Sector Master Plan Afghanistan (2013)
	The amount of carbon dioxide emitted in the electricity generation process	Calculation with Formula 5 Bakhsi (2023)		
	The annual flow rate passing through the	Calculation with Formula 6	The hydropower plant exists only in the Afghanistan sector	

همانطور که در جدول ۱ آمده است، در پردازنده آب جریان‌های داخلی که شامل الکتریسیته و سوخت مصرفی برای پمپاژ آب از آبخوان می‌شوند به روش محاسباتی کمی‌سازی شده است. برای محاسبه توان موردنیاز پمپ‌ها از فرمول ۱، انرژی الکتریسیته مصرفی الکتروپمپ‌ها از فرمول ۲ و سوخت مصرفی موتورپمپ‌ها از فرمول ۳ استفاده شد.

$$P = (\gamma \times Q \times h) / (1000 \times \mu) \quad (1)$$

$$E = (P \times T) \times N_e \quad (2)$$

که در آن p قدرت پمپ (کیلووات)، γ وزن مخصوص آب (۹۸۱۰ نیوتون بر مترمکعب)، Q دبی پمپاژ (مترمکعب بر ثانیه)، h هد پمپاژ (متر)، μ بازده الکترو پمپ (۶۳ درصد برای پمپ‌های الکتریکی و ۳۵ درصد برای موتورهای دیزلی (Firouzbadi et al (2014))، E انرژی مصرفی (کیلووات ساعت)، T ساعت کارکرد سالانه پمپ و N_e تعداد چاه‌های برقی است. محاسبه میزان انرژی مصرفی بر این فرض استوار است که غالب روش آبیاری در منطقه به صورت سطحی است. مقدار سوخت مصرفی برای پمپاژ آب توسط موتورپمپ‌ها نیز از فرمول ۳ محاسبه شد.

$$F = \frac{P \times T \times N_d}{LHV \times \mu} \quad (3)$$

که در آن F مقدار سوخت مصرفی (لیتر)، N_d تعداد چاه‌های دیزلی و LHV ارزش حرارتی گازوئیل (۱۰ کیلووات ساعت بر لیتر) می‌باشد. در پردازنده غذا تنها مقدار نهاده‌های مصرفی (کودهای شیمیایی، بذر، نیروی انسانی، ساعت کار ماشین‌الات) در فرایند تولید محصولات کشاورزی به کمک فرمول ۴ و روش محاسباتی کمی‌سازی شد.

$$I = A \times T_c \quad (4)$$

که در آن I مقدار کل نهاده مصرفی در واحد رایج آن، A سطح زیر کشت هر محصول و T_c ضریب فنی (مقدار ورودی) هر نهاده به ازای یک هکتار است. سطح زیرکشت و ضرایب فنی نهاده‌ها بر اساس مراجع ذکرشده در جدول ۱ جمع‌آوری شد. همچنین برای ایجاد امکان مقایسه میان مقادیر نهاده‌های مصرفی محصولات کشاورزی با یکدیگر، از معادل انرژی آن که در جدول ۲ آمده است استفاده شد.

Table2. Energy coefficient used in the calculation

Reference	Unit	Energy coefficients MJ/unit	Energy source
Ozkan et al, 2004	h	1/96	Human labor
Rafiee et al, 2010	Kg	66/14	Nitrogen
Rafiee et al, 2011	Kg	12/44	Phosphate
Yilmaz et al, 2011	Kg	11/11	Potassium
Yilmaz et al, 2012	Kg	24/88	Seed
Erdal et al. (2007	L	56/31	Fuel (Diesel)
Ozkan et al, 2004	kwh	3/6	Electricity

همچنین در پردازنده غذا برخی مقادیر که در جدول ۱ نیز به آن‌ها اشاره شد به دلیل کمبود داده در برخی از سال‌های بازه زمانی مورد مطالعه، بر اساس سال‌هایی که داده در دسترس بوده است تخمین زده شد. این تخمین با محاسبه سهم منطقه مطالعاتی از مجموع تولید و سطح زیرکشت کشوری فائو در سال‌هایی که داده محدوده مطالعاتی از جهاد کشاورزی و وزارت مالداری افغانستان در دسترس بوده است، انجام شد. در این محاسبات، فرض شد که سهم هر منطقه از کل تولیدات و سطح زیرکشت کشور خود در طول بازه زمانی مورد مطالعه (۲۰۱۰-۲۰۲۱) تغییرات محسوسی نداشته است و می‌توان برای سال‌هایی که آمار حوضه موجود نیست از اعمال این نسبت روی داده‌های کشوری استفاده نمود.

در پردازنده انرژی هر دو کشور نیز، مقدار انتشار کربن دی اکسید نیروگاه‌ها به صورت مستقیم قابل اندازه‌گیری نیست. به همین دلیل مقدار آن در بلندمدت بر اساس فرمول ۵ محاسبه شد.

$$EMI_i = \varphi_i \times PE_i \quad (5)$$

EMI_i میزان انتشار برای هر نیروگاه (تن کربن دی اکسید)، φ_i ضریب انتشار (گرم کربن دی اکسید به ازای یک مگاوات ساعت تولید نیروگاه) و PE_i ظرفیت عملی نیروگاه (مگاوات) است. با توجه به این که نیروگاه‌های تجدیدناپذیر تولید برق در محدوده مطالعاتی عمدتاً گاز طبیعی مصرف می‌کنند، در نتیجه بر اساس مطالعه Kargari and mastouri (2009) ضریب انتشار نیروگاه‌های گازی میانگین بازه ۷۸۰-۴۷۰ گرم کربن دی اکسید به ازای هر کیلووات ساعت تولید برق و برای نیروگاه برقابی میانگین بازه ۳۴-۱ گرم در نظر گرفته شد.

همچنین پردازنده انرژی افغانستان که شامل تولید الکتریسته در نیروگاه برقابی می‌شود، شامل یک جریان مصرفی داخلی است که همان جریان آب عبوری از روی توربین در فرایند تولید برق است. مقدار این جریان از فرمول ۶ محاسبه شد.

$$Q = \frac{P}{\eta \times \rho \times g \times h} \quad (6)$$

که در آن Q دبی آب (حجم آب عبوری از توربین در واحد زمان، مترمکعب بر ثانیه)، P توان تولیدی نیروگاه (وات)، η بازده توربین، ρ چگالی آب (۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب)، g شتاب گرانش زمین (۹.۸۱ متر بر ثانیه)، h ارتفاع سقوط آب (متر) است. بازده توربین بر اساس اطلاعات فنی توربین‌های فرانسوی شرکت BHEL هند، ۸۰ درصد در نظر گرفته شد. همچنین ارتفاع سقوط آب به علت کمبود اطلاعات از نیروگاه برقابی سلما، بر حسب تراز نرمال مخزن محاسبه شد.

در سیستم پیوندی نیز کمی‌سازی مقادیر تجارت محصولات کشاورزی با محاسبه اختلاف میان تقاضا و تولید هر محصول در منطقه محاسبه شد. تقاضا نیز بر حسب مقادیر سرانه مصرف کشوری فائو روی جمعیت منطقه محاسبه شد. در این محاسبات فرض شد که مقدار عرضه محصولات کشاورزی در حوضه کمتر از تقاضا نبوده است و در صورت کمبود منابع محلی، تقاضای حوضه از طریق واردات تأمین شده است. مقدار تبادلات انرژی و حجم جریان ورودی آب هریرود از افغانستان به ایران نیز بر اساس گزارشات منتشر شده از مراجع رسمی هر دو کشور که در جدول ۱ آمده است لحاظ شد.

۳. نتایج

در بخش نتایج ابتدا مفهوم پیوند در پردازنده‌های تأمین محلی آب، غذا و انرژی بررسی شد که نشان‌دهنده وابستگی و تعاملات سیستم‌های طبیعی و انسانی به یکدیگر درون مرز هر دو کشور است. مقادیر اجزای تشکیل‌دهنده آن‌ها همان میانگین سالیانه پارامترها در بازه زمانی ۲۰۱۰-۲۰۲۱ است که اساس آن‌ها محاسبات و داده‌های موجود ارائه شده در بخش قبلی است. در انتها نیز به کمک ارائه یک چارچوب

ترسیمی- عددی مبتنی بر مفهوم پیوند، ارتباط هر پردازنده با دیگری درون مرز و وابستگی به تأمین تقاضای خود از خارج مرز در سطح حوضه ابریز هریرود بررسی خواهد شد

۱.۳. تأمین محلی آب

ایران

پردازنده تأمین محلی آب شامل فرایندی است که تا قبل از استحصال آب از منابع سطحی و زیرزمینی طی می‌شود تا در نهایت مقدار مشخصی آب برای مصارف مختلف برداشت شود. بیشترین تعامل پردازنده آب با بیوسفر است. در شکل ۴ اجرای پردازنده تأمین محلی آب در کشور ایران آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد در بازه زمانی مورد مطالعه، متوسط سالانه حجم جریان ورودی از طریق بارش حدود ۸۰۹۰ میلیون متر مکعب بوده است که ۷۵ درصد آن صرف تبخیر و تعرق شده است. به دلیل کمبود داده، مقادیر مربوط به جریان‌های سطحی از اطلس قره‌قوم استخراج شده است که مطالعات پایه آن در سال ۲۰۰۷ انجام گرفته؛ به همین سبب، این مقادیر ممکن است با مقادیر متوسط بازه زمانی مورد مطالعه تفاوت داشته باشد. طبق گزارشات بیان آب محدوده مطالعاتی ۱۱۱ میلیون مترمکعب از جریان‌های سطحی از محدوده حوضه خارج شده و به کشورهای مجاور افغانستان و ترکمنستان منتقل می‌شود. مقدار جریان‌های خروجی شامل تبادلات آبی بین محدوده‌های داخل حوضه نمی‌شود و تنها جریان‌ات مازادی مدنظر است که از حوضه خارج می‌شود. همچنین در این گزارش مقدار سهم حقابه زیست محیطی از جریان‌های سطحی مازاد ۱۱۳/۵ میلیون مترمکعب برآورد شده است که بخشی از جریان‌های خروجی را نیز شامل می‌شود به همین دلیل به عنوان پارامتر مستقل در پردازنده آب ایران لحاظ نشده است. تنها جریان سطحی ورودی به حوضه ابریز، ۱۰۶ میلیون مترمکعب است که از رودخانه مرزی هریرود در افغانستان است و از محدوده سرخس به ایران وارد می‌شود و در مخزن سد دوستی ذخیره می‌شود (Iran Ministry of Energy, 2011).

اجزای ساختاری پردازنده شامل سدها و ظرفیت بهره برداری از آبخوان‌های محدوده می‌باشد. به منظور بهره‌برداری از آب‌های سطحی که شامل رودخانه کشف‌رود، روس‌رود، جام‌رود و رودخانه مرزی هریرود می‌شود، ۱۵ سد احداث شده است که مخازن این سدها مجموعاً ۱۵۶۷ میلیون مترمکعب ظرفیت دارند (Iran Ministry of Energy, 2011). بر اساس گزارش آب منطقه‌ای خراسان رضوی در طول بازه زمانی مورد مطالعه، برای بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی حوضه، ۵۷۳۵ چاه عمیق با حداکثر آبدهی ۱۶/۵ لیتر بر ثانیه و متوسط عمق ۱۵۶ متر و ۵۸۹۸ چاه نیمه عمیق با حداکثر آبدهی ۳/۲۵ لیتر بر ثانیه و متوسط عمق ۶۵ متر حفاری شده است. مجموع برداشت آب از منابع آب سطحی و زیرزمینی دو میلیارد و ۴۲۰ میلیون متر مکعب برآورد شد. که نزدیک به ۸۷ درصد از منابع آب زیرزمینی و مابقی از آب‌های سطحی بوده است. البته ذکر این نکته ضروری است که این مقدار برداشت آب در محدوده بدون احتساب برخی محصولات باغی در مصارف کشاورزی و بخش پرورش دام و طیور بوده است. مجموع آب برداشت شده از آبخوان‌ها برای کشاورزی، یک میلیارد و ۷۰۴ میلیون مترمکعب است که حدود ۹۰ درصد از کل آب برداشتی این بخش را شامل می‌شود. از این مقدار یک میلیارد و ۴۴۶ میلیون مترمکعب برداشت از چاه‌ها و حدود ۲۵۹ میلیون مترمکعب از چشمه و قنات‌ها بوده است. سهم بخش کشاورزی در برداشت آب از سدها و انهار سنتی نیز ۲۰۹ میلیون مترمکعب است. ۳۵/۶ میلیون مترمکعب حجم برداشت آب صنایع است که بیشترین مصرف مربوط به گروه صنعتی کانی‌های فلزی و صنایع غذایی می‌شود (Ministry of Industry, Mine and Trade, 2021). از این مقدار سهم ناچیزی (۰/۳ درصد) از منابع آب سطحی و مابقی از آب زیرزمینی تأمین می‌شود. حجم آب برداشت شده برای بخش خدمات نیز ۱۱۱ میلیون مترمکعب است که تنها

پنج درصد از آن از منابع آب سطحی حوضه تأمین شده است (Regional Water Company of Khorasan Razavi.,2016-2022). با پوشش حدود ۹۸ درصدی جمعیت منطقه به آب شرب، حجم کل آب برداشت شده ۳۵۹ میلیون مترمکعب برآورد شد که به جز کلان شهر مشهد، منابع تأمین آب شرب کلیه شهرستان‌های واقع در حوضه از منابع آب زیرزمینی می‌باشد بر اساس امار اطلس قره قوم میزان تأمین آب شرب مشهد از منابع آب سطحی حوضه در سال ۲۰۰۸ تنها شش درصد بوده است. این در حالی است که بر اساس گزارش سرانه و سیمای آب منطقه‌ای در پنج سال منتهی به ۲۰۲۲ این مقدار به ۳۰ درصد رسیده است. بر اساس امار جهاد کشاورزی و اب منطقه‌ای خراسان رضوی، بدون در نظر گرفتن جمعیت زائرین در این بازه‌ی زمانی، جمعیت این شهر بیش از ۱۵ درصد افزایش داشته است. می‌توان گفت عواملی همچون رشد جمعیت و برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی وابستگی تأمین شرب مشهد به منابع آب سطحی که اصلی‌ترین آن جریان ورودی از هریود می‌باشد را افزایش داده است.

جریان‌های مصرفی در فرایند استحصال آب شامل سوخت و الکتریسته لازم برای پمپاژ آب از آبخوان‌ها است. کل مقدار برق مصرفی برای برداشت آب از آبخوان‌های محدوده توسط الکتروپمپ‌ها ۱۰۳۳ گیگاوات ساعت (معادل ۳۷۱۹/۵ تراژول) و کل سوخت گازوئیل مصرف شده موتورپمپ‌ها برای استحصال آب ۷۹ میلیون لیتر (معادل ۴۴۷۱ تراژول) محاسبه شد. در شکل ۴ فرایند استحصال آب از منابع آب سطحی و زیرزمینی نمایش داده شده است.

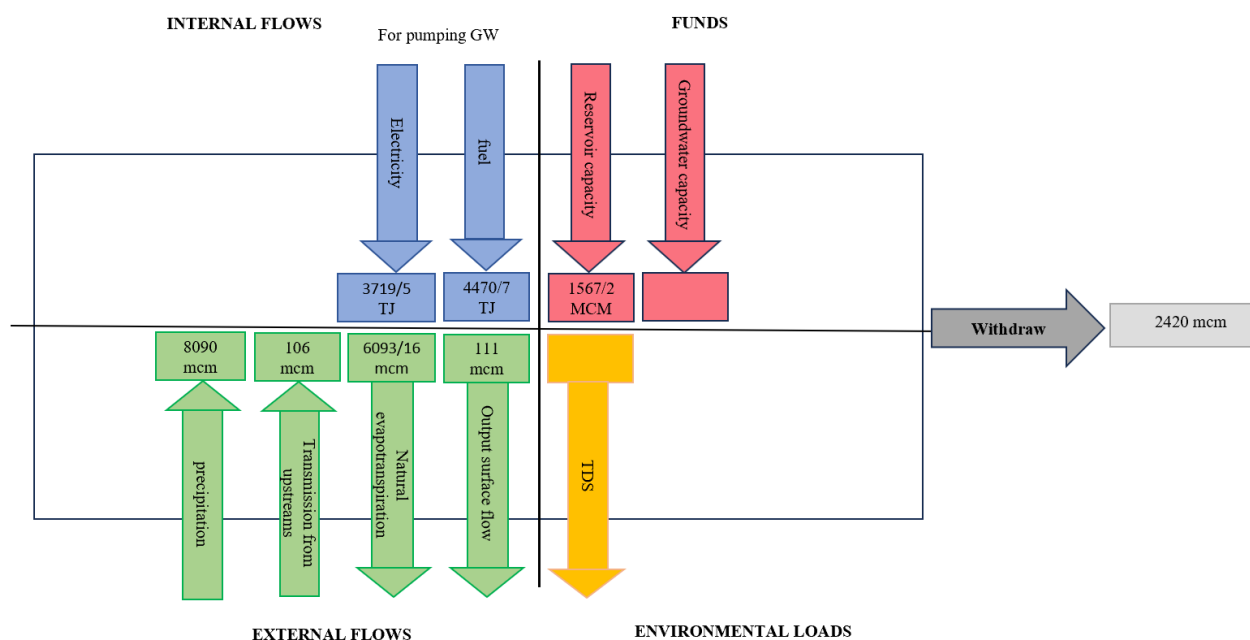


Figure4. Sized processor of the functional element local water withdraw(Iran)

افغانستان

در بخش افغانستان حجم جریان ورودی از بارش به سیستم آبی، به طور متوسط در بازه زمانی مطالعه ۲۲ درصد بیشتر از ایران بوده است که ۹۳۶۰ میلیون مترمکعب آن از طریق تبخیر و تعرق اراضی طبیعی، از دسترس خارج شده است. این مقدار تبخیر و تعرق ۳۵ درصد بیشتر

از بخش ایران است. در این محدوده جریان ورودی وجود ندارد، اما بخش افغانستان به عنوان بالا دست حوضه هریود ۱۰۶ میلیون متر مکعب به کشورهای پایین دست رهاسازی کرده است (Iran Ministry of Energy, 2011).

تنها سد مخزنی بهره‌برداری شده در محدوده افغانستان، سد سلما با ظرفیت ۶۳۳ میلیون مترمکعب است که روی رودخانه هریود احداث شده است (Nagheeb et al., 2019). در این منطقه هیچ گزارش معتبری از تعداد چاه‌های حفر شده موجود نمی‌باشد و تنها تعداد ۶۴۴ چاه عمیق و دستی در دو ولسوالی زرغون پشتون و کروخ تا سال ۲۰۰۴ ثبت شده است (Ahmadi and Heravi, 2024). از این رو مقادیر مربوط به برق و سوخت مصرفی برای استحصال آب از آبخوان‌ها قابل محاسبه نیست.

مجموع برداشت آب از منابع آبی بخش افغانستان ۱۴۳۹/۵ میلیون مترمکعب است. سهم آب برداشتی در بخش کشاورزی ۱۴۰۰ میلیون مترمکعب بوده است که ۸۵ درصد از تأمین نیاز آبی بخش کشاورزی وابسته به منابع آب سطحی بوده و ۱۵ درصد سهم آب‌های زیرزمینی است (Uhl et al., 2003; Report of DACAAR, 2013). در بخش شرب تنها ۴۵ درصد از ساکنان ولایت هرات و غور به آب آشامیدنی دسترسی دارند که سالانه برای تأمین نیاز این جمعیت، ۳۴/۵ میلیون مترمکعب از منابع آب زیرزمینی برداشت می‌شود (Ahmadi and Heravi, 2024). صنایع این بخش نیز تنها شامل ۲۰۰ واحد تولیدی در شهرک صنعتی هرات است که مجموعاً پنج میلیون مترمکعب از منابع آبی برداشت می‌کنند که بیشترین سهم مربوط به صنایع غذایی است. اطلاعات معتبری از منابع آب مورد استفاده در بخش صنایع در دسترس نیست. در شکل ۵ پردازنده مربوط به فرایند استحصال آب در بخش افغانستان نمایش داده شده است.

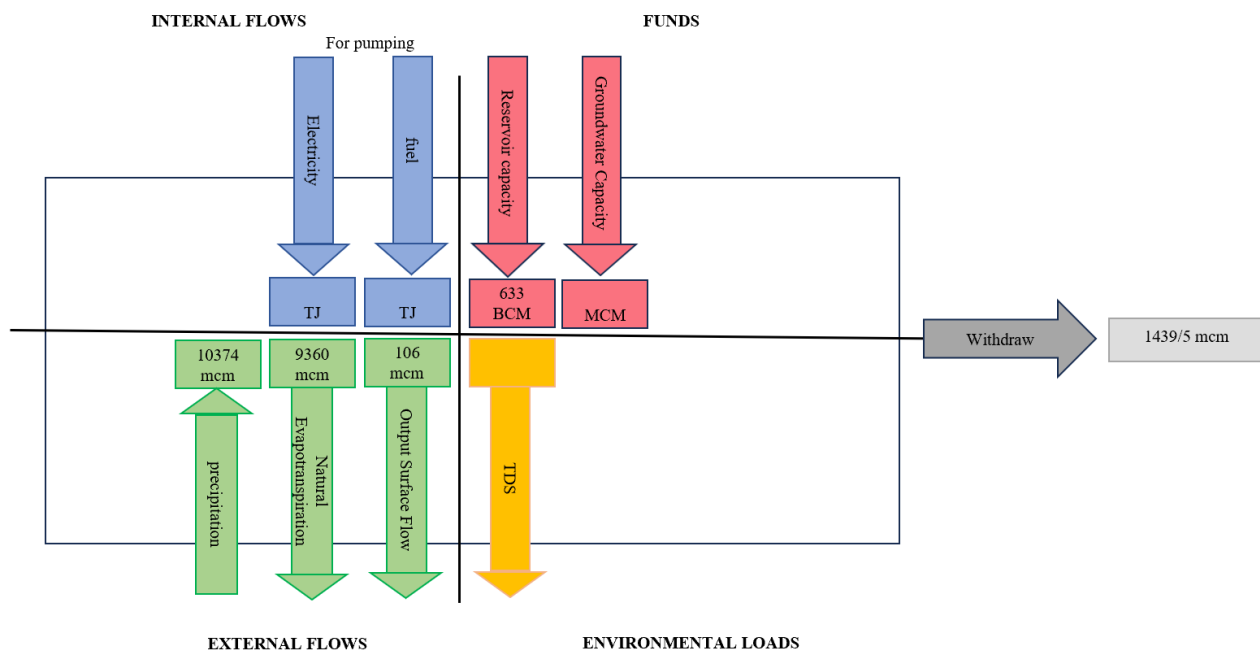


Figure5. Sized processor of the functional element lol water withdraws (Afghanistan)

۲.۳. تأمین محلی غذا

ایران

منابعی که مستقیماً در تولید محصولات کشاورزی منطقه نقش دارند، شامل آب برای آبیاری، بذر، کودشیمیایی، نهاده‌های انرژی مانند نیروی انسانی و سوخت و برق (برای پمپاژ آب از چاه) و زمین هستند. با توجه به پردازنده غذا، در مجموع ۱۹۱۸ میلیون مترمکعب آب (۳۴ درصد غلات، ۱۳/۵ درصد علوفه، ۱۹ درصد محصولات باغی منتخب، ۱۵ درصد محصولات جالیزی، ۹ درصد محصولات صنعتی، ۹/۵ درصد سبزیجات) به منظور آبیاری سطح زیرکشت محصولات منطقه از منابع آب آبی (آب‌های سطحی و زیرزمینی) برداشت شده است. نزدیک به ۳۰ درصد از محصولات زراعی منطقه که اغلب شامل غلات، حبوبات و برخی محصولات جالیزی هستند، تحت کشت دیم قرار دارند و ۴۷۷ میلیون مترمکعب از منابع آب سبز (بارش) صرف تأمین نیاز آبی این محصولات می‌شود.

در مجموع ۱۰ هزار و ۵۰۰ تراژول انرژی شامل کودشیمیایی، بذر، سوخت و الکتریسیته (برای پمپاژ آب) در جریان تولید محصولات کشاورزی مصرف شده است. این مقدار شامل حدود ۱۲۰ هزار تن بذر و غده (۳۰۰۰ تراژول انرژی)، ۸۶ هزار تن کودشیمیایی شامل نیتروژن، فسفات و پتاسیم (۳۴۰۰ تراژول انرژی)، ۵۵۵ گیگاوات ساعت برق (۲۰۰۰ تراژول) و ۳۸ میلیون و ۲۰۰ لیتر سوخت (۲۱۵۰ تراژول) می‌شود. تولید زعفران بیشترین مصرف بذر و غلات بیشترین مصرف کودشیمیایی، سوخت و الکتریسیته را داشته‌اند. در مقابل محصولات جالیزی کمترین مصرف کننده بذر و حبوبات کمترین مصرف کننده کود، سوخت و الکتریسیته شناسایی شدند.

سالانه به طور متوسط ۳۴۱ هزار و ۹۳۷ هکتار زمین به عنوان نهاده سرمایه‌ای (از محصولات زراعی ۶۴ درصد غلات، ۹ درصد محصولات جالیزی، ۶ درصد علوفه، ۳ درصد محصولات صنعتی، ۴ درصد سبزیجات، ۱ درصد حبوبات و ۱۳ درصد محصولات باغی منتخب) زیر کشت محصولات کشاورزی بوده است. به دلیل وابستگی بالای بخش کشاورزی به منابع آب زیرزمینی، بیش‌ترین تراکم سطح زیرکشت آبی در محدوده آبخوان‌های مشهد، سرخس و فریمان-تربت جام قرار گرفته است.

همچنین سالانه به طور متوسط ۱۶۴/۵ تراژول صرف کار نیروی انسانی از مراحل کاشت تا برداشت محصولات کشاورزی می‌شود. بیشترین ساعت کار به تولید زعفران و کمترین به تولید حبوبات اختصاص دارد.

سیستم تأمین محلی غذا در مجموع حدود ۲/۷ میلیون تن از محصولات کشاورزی منتخب در طول این فرایند، تولید کرده است که از مجموع تولیدات ۳۱۷/۸ هزار تن به عنوان ضایعات از زنجیره تأمین (پس از برداشت تا زمان توزیع) حذف شده است. بیشترین میزان ضایعات مربوط به گروه سبزیجات (۲۷ درصد) و پس از آن محصولات جالیزی (۲۵ درصد) و غلات (۲۲ درصد) بوده است. در شکل ۶ خلاصه‌ای از عملکرد پردازنده تأمین محلی غذا را نمایش می‌دهد.

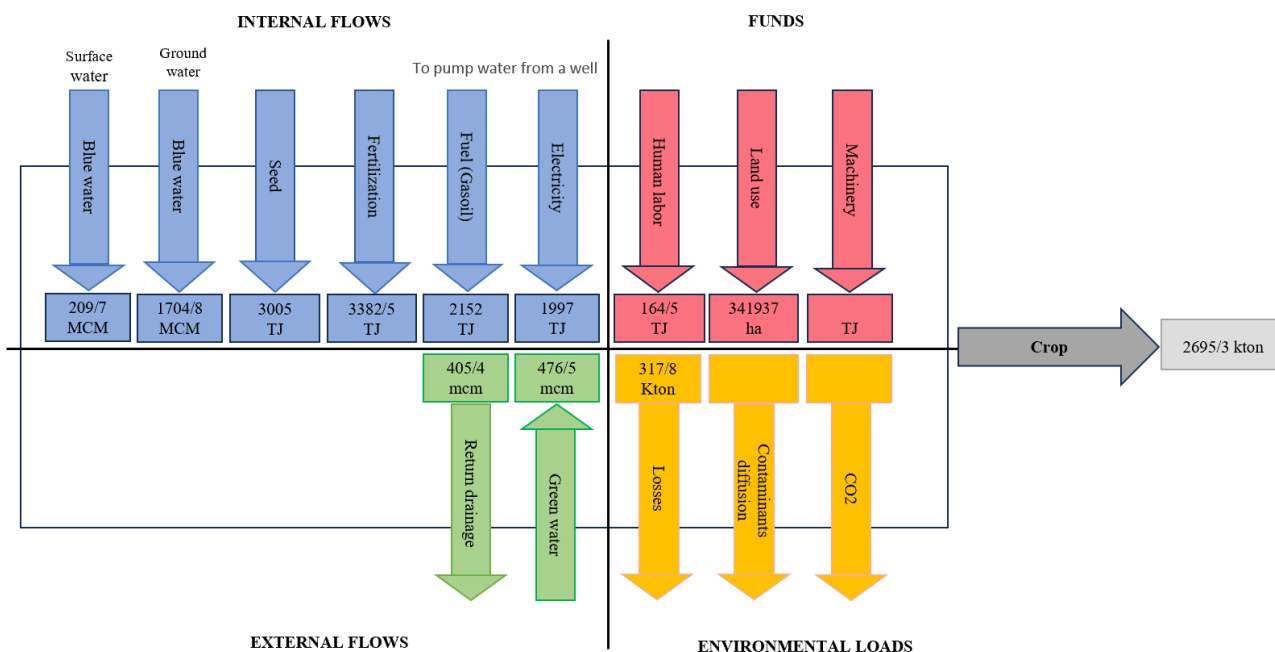


Figure 6. Sized processor of the functional element local crop production (Iran)

افغانستان

در بخش افغانستان، ۱۱۹۰ میلیون مترمکعب از منابع آب سطحی و ۲۱۰ میلیون مترمکعب از منابع آب زیرزمینی (۷۰ درصد غلات، ۸/۵ درصد محصولات باغی، ۴/۵ درصد محصولات جالیزی و ۱۷ درصد سایر محصولات) برای تامین نیاز بخش کشاورزی برداشت می شود که این مقدار در مقایسه با بخش ایران نشان دهنده پایین بودن بهره وری آب و راندمان آبیاری در بخش افغانستان است. مجموع آب سبز مصرفی تامین شده از باران ۳۷۸/۷ میلیون مترمکعب است. در این محدوده قالب کشت دیم مربوط به گندم و جو است و نزدیک به ۵۰ درصد سطح کشت غلات و ۹۷ درصد آب سبز مصرفی را به خود اختصاص داده است (Ministry of Agriculture, Irrigation and Livestock., Annual Report 2021).

از میان سایر جریان های مصرفی، تنها امار مربوط به بذر و کود مصرفی موجود بود و به دلیل عدم دسترسی به امار چاه های برداشت موجب شد تا در این بخش از محاسبه دو نهاده سوخت و برق پمپاژ برای آبیاری کشاورزی صرف نظر گردد. در مجموع ۳۰۱۶ تراژول انرژی صرف کود شیمیایی و بذر شده است که از این مقدار ۶۰ هزار تن بذر و غده (معادل ۳۰۱۶ تراژول) و ۳۷ هزار و ۹۵۰ تن کود شیمیایی (معادل ۱۵۲۲ تراژول) را شامل می شود. بیشترین بذر مصرفی به زعفران و کمترین به گروه محصولات صنعتی (پنبه، چغندر قند، کنجد و افتاب گردان) تعلق دارد. بیشترین کود مصرفی برای گروه غلات و محصولات باغی و کمترین مربوط به گروه علوفه (ارزن و ذرت) است.

بر اساس گزارشات سالانه Ministry of Agriculture, Irrigation and Livestock، مجموع ۲۱۳ هزار هکتار زمین، تحت کشت محصولات کشاورزی در محدوده افغانستان در حوضه هریود است. تراکم سطح زیر کشت منطقه در هریود بالا و در ولایت هرات است. بخش افغانستان، ۳۸ درصد سطح زیر کشت کمتری نسبت به بخش ایران دارد. و از تنوع الگوی کشت کمتری برخوردار است. ۸۸ درصد از سطح

زیرکشت متعلق به گروه غلات (گندم، جو و برنج)، شش درصد محصولات باغی (انگور، زردالو، زعفران، هلو، سیب)، دو درصد محصولات جالیزی و ۴ درصد سایر محصولات است.

از دیگر نهاده‌های ساختاری ۱۳۷ تراژول انرژی صرف نیروی کار در بخش کشاورزی شده است. مقادیر مربوط به نیروی کار نشان می‌دهد در بخش افغانستان سطح مکانیزاسیون پایین‌تر است و بهره‌وری نیروی کار در افغانستان به دلیل روش کشت و برداشت دستی و آبیاری سنتی پایین‌تر از ایران است.

در طول فرایند تأمین محلی غذا، بخش افغانستان ۷۴۰ هزار تن محصول (۷۶ درصد غلات، ۱۲ درصد محصولات باغی، ۷ درصد جالیزی، ۵ درصد سایر محصولات) تولید کرده است که ۷۲ درصد کمتر از تولید بخش ایران است که نشان دهنده شکاف بزرگ در بهره‌وری و به کار گیری فناوری در کشاورزی میان دو کشور است. از کل تولیدات محصولات کشاورزی ۱۴۸ هزارتن در فرایند برداشت تا توزیع به ضایعات تبدیل می‌شود که غلات و محصولات باغی بیشترین سهم تلفات را داشته‌اند (FAO.,2000-2022). در شکل ۷ خلاصه‌ای از پرازنده غذا در بخش افغانستان آمده است.

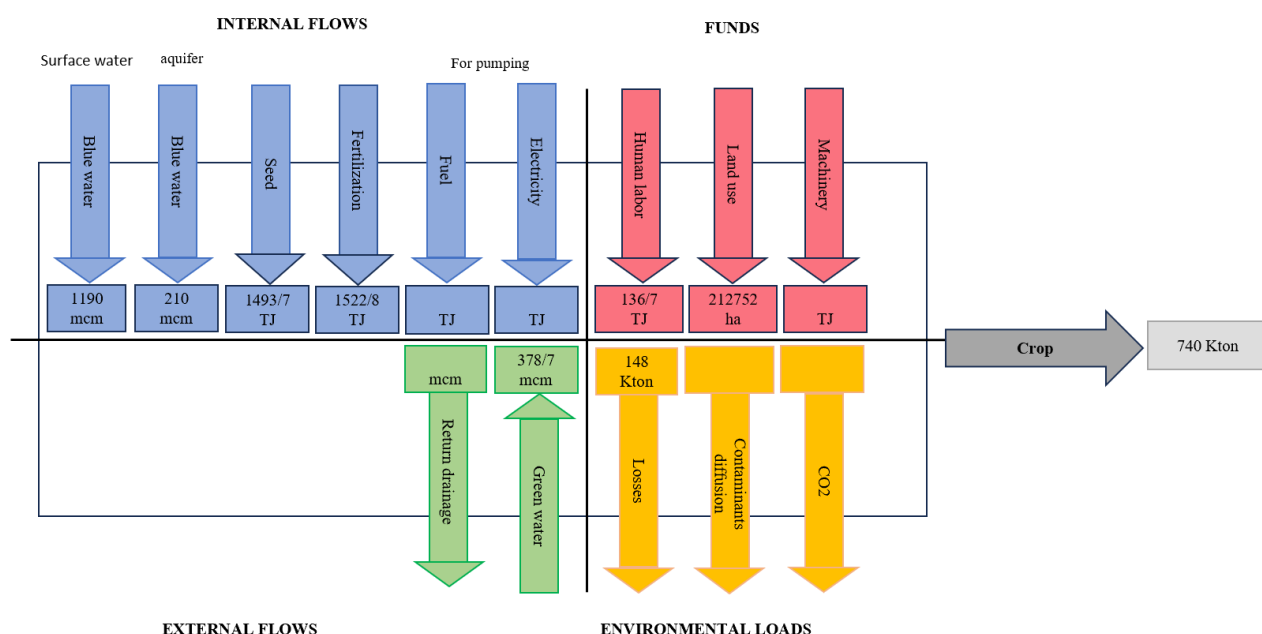


Figure7. Sized processor of the functional element local crop production (Afghanistan)

۳.۳. تأمین محلی انرژی

ایران

پنج نیروگاه تجدیدناپذیر واقع در بخش ایران که شامل نیروگاه حرارتی مشهد و توس، سیکل ترکیبی شریعتی و فردوسی و نیروگاه گازی شمس می‌شود، برای بررسی پردازنده انتخاب شدند. این نیروگاه‌ها در مجموع برای تولید ۱۰ میلیون مگاوات ساعت برق (Safai.,2018)، سالانه ۳/۱۱ میلیون متر مکعب آب از منابع آب زیرزمینی (Ministry of Industry, Mine and Trade.,2021)، ۴۱۸ هزار و ۹۴۱ مگاوات ساعت برق مستقیماً برای مصرف ماشین‌الات و تجهیزات نیروگاه‌ها استفاده کرده است (Safai.,2018). همچنین متوسط سوخت مصرفی این

نیروگاه در بازه زمانی مورد مطالعه شامل ۲۲۹۸ میلیون مترمکعب گاز طبیعی و کمتر از ۰/۵ میلیون مترمکعب گازوئیل و مازوت از سیستم تأمین انرژی ملی بوده است. ۲۶۶۳ مگاوات بیشترین ظرفیت عملی قابل بهره برداری و کاربری زمین ۲۵۳ هکتاری به عنوان پارامتر سرمایه‌ای در مقدار برق قابل تأمین لحاظ شد (Khorasan Regional Electric Company., 2021).

این سیستم به طور موثر حجم بالایی از برق تولید می‌کند و از ظرفیت عملیاتی قابل توجهی بهره می‌برد. با این حال، این فرآیند مستلزم مصرف قابل توجه منابع از جمله سوخت‌های فسیلی است که با تولید سالانه ۱۴ میلیون تن کربن دی‌اکسید، اثرات بالقوه زیست محیطی را به همراه دارد. شکل ۵ عملکرد اجرای پردازنده تأمین انرژی را نشان می‌دهد.

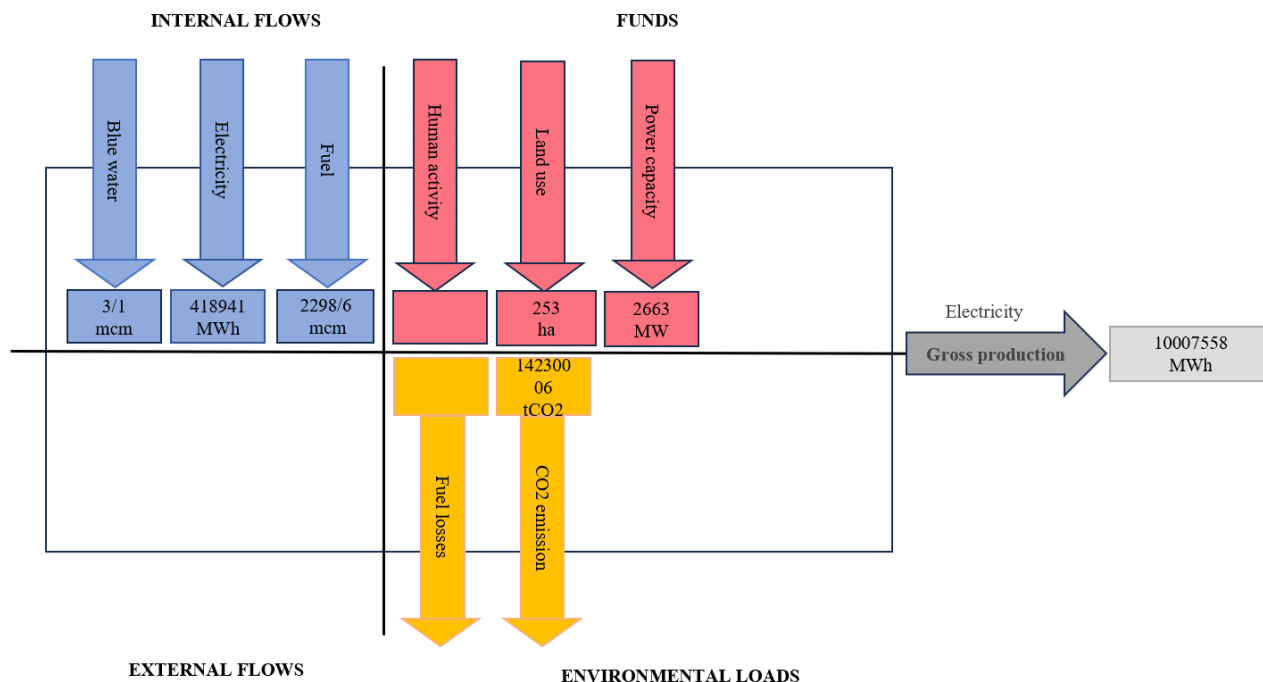


Figure 8. Sized processor of the functional element local electricity supply (Iran)

افغانستان

با توجه به این که ۷۳ درصد از انرژی الکتریسیته افغانستان از کشورهای هم‌جوار تأمین می‌شود، سهم تأمین برق محلی بسیار ناچیز است (GIZ, Afghanistan., 2015). در ولایت هرات نیروگاه تولید برق تجدیدناپذیر وجود ندارد و تنها تولیدکننده برق در این منطقه نیروگاه آبی سد سلما است که از طریق پست برق چخچران به ولایت غور نیز متصل است. اگرچه حوضه هریود در افغانستان پتانسیل تولید انرژی‌های تجدیدپذیر همچون فوتولتالیک و بادی را دارد، اما در این مطالعه با توجه به کمبود اطلاعات و مقدار ناچیز تولید (به ترتیب کمتر از پنج و هشت مگاوات برای هر منبع) تنها نیروگاه برقابی سلما بررسی شد (Asian Development Bank., 2013).

همان‌طور که در پردازنده شکل ۸ مشخص است، فرایند تأمین برق محلی نسبت به بخش ایران عملکرد ساده‌تری دارد. این نیروگاه دارای سه توربین با ظرفیت حداکثر ۱۴ مگاوات است که در مجموع ظرفیت تولید سالانه ۴۲ مگاوات برق را دارد. مجموع تولید ناخالص انرژی این نیروگاه ۱۹۷ هزار مگاوات ساعت در سال است (GIZ Afghanistan., 2015). برای تأمین این مقدار برق، نیاز به عبور جریان آب از توربین با دبی ۲۳/۹۴ مترمکعب بر ثانیه است که در سال حجمی بالغ بر ۷۵۵ میلیون مترمکعب آب را شامل می‌شود. این مقدار جریان به جز

حجم ناچیزی از تبخیر که از سطح مخزن انجام می‌شود، در طول فرایند تولید برق مصرف نمی‌شود. به همین دلیل در پردازنده، جریان داخلی آب به مفهوم مصرف آن نیست بلکه لزوم آن در فرایند تولید برق است که در نهایت پس از عبور از توربین صرف تأمین نیاز آبی پایین‌دست می‌شود.

اگرچه خروجی برق این نیروگاه ناچیز و در تعادل با نیاز منطقه نمی‌باشد، اما اثرات زیست محیطی اندکی به همراه دارد و کربن دی اکسید تولیدی مربوط به مرحله تولید و ساخت نیروگاه می‌باشد. همچنین نقش کاربری زمین نیز در ساخت این نیروگاه‌ها کم‌رنگ است.

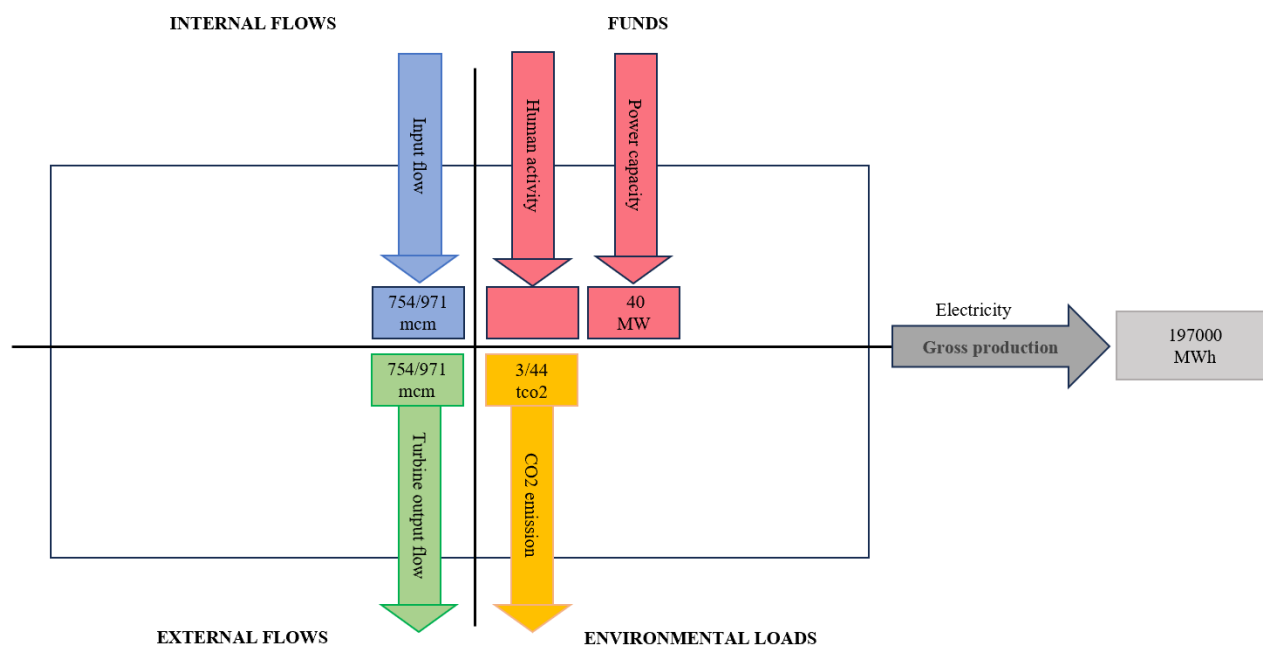


Figure8. Sized processor of the functional element local electricity supply (Iran)

۴.۳. سیستم پیوندی آب، غذا و انرژی حوزه آبریز هریرود

تحلیل پیوند آب، غذا و انرژی در حوزه آبریز هریرود که تحت پوشش دو کشور ایران و افغانستان قرار دارد، نشان‌دهنده تعاملات پیچیده و روابط تجاری مهم میان این دو کشور در زمینه منابع حیاتی می‌باشد. در شکل ۹ سیستم پیوندی آب، غذا و انرژی حوزه آبریز هریرود ترسیم شده است در این سیستم، سه مؤلفه اصلی آب، غذا و انرژی در دو زیرسیستم افغانستان و ایران به‌طور پویا با هم در ارتباط هستند. در ایران، سیستم انرژی دارای قابلیت تولید بالایی است و علاوه بر تأمین نیاز داخلی، انرژی مازاد خود را به افغانستان و به شرکت‌های توزیع برق در استان‌های مختلف ارسال می‌کند (Khorasan Regional Electric Company). به‌طور خاص، ۷۲۷ هزار مگاوات ساعت از برق تولیدی ایران از طریق اتصال به سیستم برق هرات به این منطقه منتقل می‌شود که می‌تواند ۸۷ درصد از تقاضای ناخالص برق هرات و غور را تأمین کند (ADB, 2013).

سیستم آب ایران برای تأمین بخشی از نیاز آبی شرب مشهد و کشاورزی سرخس به دریافت جریان از رودخانه هریرود وابسته است، اما در بازه زمانی مورد مطالعه، جریان ورودی سهم ناچیزی در سیستم تأمین آب ایران داشته است. سهم آب برداشتی برای سیستم تأمین انرژی بسیار ناچیز است. این درحالی است سیستم تأمین غذا، ۸۰ درصد از کل برداشت آب را به خود اختصاص داده است و وابستگی بالایی به منابع آبی دارد. با این حال بخش ایران مقدار تولید محصولات کشاورزی زیادی دارد و ۲۵ درصد از کل تولیدات خود را به بازار داخلی و

خارجی عرضه می‌کند که شامل محصولات جالیزی، پسته، زعفران و در برخی از سال‌ها مازاد تولیدات میوه می‌شود. از طرفی برای تامین تقاضای یک میلیون و ۴۷۰ هزار تنی خوراک انسان و یک میلیون و ۹۲ هزار تن خوراک دام منطقه، با کمبود محصولات استراتژیک نظیر غلات، سبزیجات، حبوبات و علوفه مواجه است که ۸۹۱ هزار تن سهم واردات این محصولات از خارج حوضه است.

از سوی دیگر، وضعیت در افغانستان با چالش‌هایی همراه است. سیستم تأمین انرژی افغانستان به برق‌رسانی ملی متصل نیست و به واردات وابسته است؛ این کشور برق را از خط‌های وارداتی از ایران و ترکمنستان تأمین می‌کند و نیز بخشی از نیاز خود را از نیروگاه آبی سلما تأمین می‌کند که به منابع آبی منطقه وابسته است. تلفات بالای سیستم خطوط انتقال و توزیع برق در این کشور، که نزدیک به ۴۵ درصد است، تأمین نیازهای برق ولایت غور و بخش‌هایی از هرات را با مشکلاتی مواجه کرده است (ADB.,2013;Afghanistan Ministry of Energy and Water,2011). بررسی منابع آبی نشان می‌دهد که افغانستان با سطح زیرکشت کمتر، صنایع محدودتر و دسترسی بسیار پایین‌تر جمعیت به آب شرب، ۴۰ درصد برداشت آب کمتری نسبت به ایران دارد و وابستگی بسیار بالایی به منابع آب سطحی دارد. از نظر سیستم غذایی، بیش از ۹۵ درصد از کل برداشت منابع آبی افغانستان به بخش کشاورزی اختصاص دارد که ۱۲ درصد بیشتر از ایران است. اگرچه اطلاعاتی از میزان وابستگی به انرژی موجود نیست، اما بر اساس سهم آب برداشتی از منابع آب زیرزمینی می‌توان نتیجه گرفت که مقدار بسیار ناچیزی الکتریسیته در مقایسه با ایران صرف پمپاژ برای آبیاری می‌شود.

تولید ناخالص محصولات کشاورزی در افغانستان به‌طور قابل توجهی کمتر از ایران است و صرفاً ۱۰ درصد از تولیدات این کشور به کشورهای همسایه صادر می‌شود، در حالی که این منطقه با کمبودهای جدی در تأمین نیازهای غذایی محلی، همچون غلات و حبوبات، مواجه است. سالانه تقاضای محصولات غذایی در افغانستان به ۵۳۳ هزار تن می‌رسد و واردات غذا نقش حیاتی در تأمین امنیت غذایی منطقه دارد. واردات محصولات غذایی از مناطق دیگر به بخش افغانستان شامل ۳۰ درصد از اقلام اصلی سبذ غذایی خانواده‌ها نظیر غلات، سبزیجات و حبوبات است که با کمبود در تامین محلی مواجه است.

براساس تحلیل‌های انجام‌شده، برای مدیریت کارآمد منابع حوضه آبریز هریرود، توصیه می‌شود که ایران و افغانستان همکاری‌های منطقه‌ای را در توسعه پروژه‌های مشترک آب و انرژی ارتقا دهند تا به بهینه‌سازی مصرف و کاهش تلفات در زیرساخت‌های برق‌رسانی، به‌ویژه در افغانستان، دست یابند. همچنین، سرمایه‌گذاری در بهبود زیرساخت‌های کشاورزی و تکنیک‌های آبیاری در نواحی با دسترسی ضعیف به آب، به‌ویژه در افغانستان، ضروری است. تشویق کشاورزان به تنوع بخشی به محصولات کشاورزی می‌تواند وابستگی به واردات را کاهش دهد و تأمین مواد غذایی محلی را تضمین کند. به منظور تقویت وضعیت اقتصادی، توسعه شبکه‌های تجاری بین دو کشور باید تسهیل شود تا صادرات محصولات کشاورزی افغانستان افزایش یابد و کسری غذایی کاهش یابد. در نهایت، برگزاری برنامه‌های آموزشی برای جوامع محلی در هر دو کشور به منظور بهره‌وری بهتر از منابع آب، غذا و انرژی، به بهبود مدیریت منابع و افزایش امنیت غذایی کمک خواهد کرد.

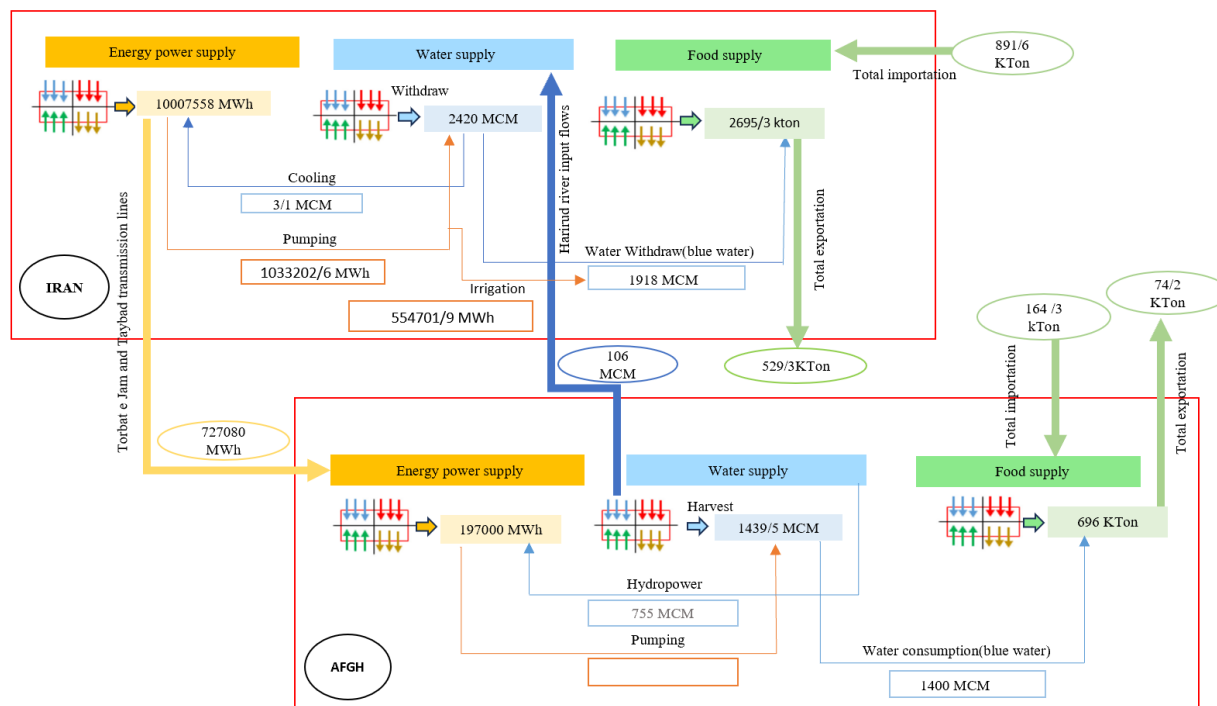


Figure9. WEF nexus system of the Harirud basin

۴. نتیجه گیری

در این مطالعه با استفاده از بکارگیری چارچوب Musiasem مبتنی بر رویکرد پیوندی، به تحلیل وابستگی های متقابل و آسیب پذیری سه بخش عملکردی تامین محلی آب، غذا و انرژی به تفکیک در بخش ایران و افغانستان و تعاملات فرامرزی از طریق تجارت در حوضه آبریز هریود پرداخته شد.

نتایج این مطالعه نشان داد که در محدوده ایران، بخش کشاورزی اتکای شدیدی به منابع آب زیرزمینی دارد که منجر به استخراج بیش از حد و فشار بر این منابع شده است. ادامه این روند علاوه بر اثرات زیست محیطی، موجب کاهش شدید سطح آب زیرزمینی و افزایش عمق چاه های بهره برداری می شود. این درحالی است که تاکنون نیز مصرف انرژی برای پمپاژ آب مقدار قابل توجهی بوده است. همچنین ماهیت فرامرزی حوضه رودخانه هریود نیز در پایداری و امنیت منابع آبی بخش ایران حائز اهمیت است. با توجه به اینکه تأمین آب مورد نیاز کلان شهر مشهد به جریان ورودی رودخانه هریود وابستگی بیشتری نسبت به گذشته پیدا کرده، کاهش قابل توجه این جریان می تواند کسری شدیدی در تأمین آب مورد نیاز ایجاد کند. از طرفی، دشت مشهد جزو دشت های ممنوعه است و با محدودیت های برداشت مواجه است. استفاده از منابع زیرزمینی برای جبران این کمبود، پایداری منابع آبی را به طور جدی تهدید می کند. در نتیجه، این مسئله می تواند در آینده به یک بحران جدی تبدیل شود.

در حالی که ایران در بخش تولید انرژی برق عملکرد خوبی داشته است، اما اتکای تولید انرژی بر سوخت های فسیلی تجدیدنپذیر و به موجب آن انتشار گاز کربن دی اکسید، تاثیراتی همچون الودگی هوا، افزایش غلظت گازهای گلخانه ای را در پی خواهد داشت. سیستم غذایی بخش ایران، در حالی که مولد است، وابستگی قابل توجهی به آب و انرژی نشان می دهد و در برخی محصولات اصلی با کمبودهایی مواجه است که واردات را در منطقه ضروری می کند.

در افغانستان، وابستگی بخش انرژی به واردات و ظرفیت محدود سیستم برق آبی محلی، آسیب پذیری امنیت انرژی را با چالش جدی مواجه کرده است. بخش کشاورزی، در حالی که به شدت به منابع آب وابسته است، مصرف انرژی کمتری را در مقایسه با ایران نشان می‌دهد که نشان‌دهنده یک سیستم کشاورزی کمتر مکانیزه است. تولید مواد غذایی به طور قابل توجهی کمتر از ایران است و در نتیجه واردات مواد غذایی قابل توجهی برای پاسخگویی به تقاضای داخلی انجام می‌شود. در بخش افغانستان لزوم افزایش بهره‌وری زمین و آب در بخش کشاورزی و آموزش کشاورزان در زمینه کوددهی، مبارزه با آفات، مدیریت بذر و آبیاری به خصوص برای محصولات استراتژیکی همچون گروه غلات احساس می‌شود.

عدم قطعیت‌های ناشی از محدودیت دسترسی به داده‌ها، فرضیات و تخمین برخی مقادیر در پردازنده‌ها به ویژه در بخش افغانستان در این مطالعه غیرقابل چشم پوشی است و می‌تواند بر دقت نتایج تاثیر بگذارد. علی‌رغم این محدودیت‌ها، این مطالعه بینش‌های ارزشمندی را در مورد پیوستگی پیوند آب، غذا و انرژی در حوضه رودخانه هریود ارائه می‌کند. یافته‌ها به ارائه استراتژی‌هایی برای مدیریت کارآمد و کاهش آسیب پذیری منابع هر دو کشور و زمینه‌های همکاری در راستای بهبود وضعیت پایداری منابع حوضه آبریز هریود، کمک می‌کند.

۵. پی‌نوشت

1. Nexus
2. MUSIASSEM (Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism)
3. Prime

۶. پیوست‌ها

Annex 1. energy inputs per hectare of the studies food crops

Crop	Fertilizers (Kg/ha)		Seed (Kg/ha)		Human labor (Person-day/ha)	
	IRAN	AFG	IRAN	AFG	IRAN	AFG
Wheat (Irrigated)	306/6	325	280/12	175	15	25
Wheat (Rainfed)	30/2	23/9	62/24	73	5	8
Barley (Irrigated)	278/6	200	257/52	110	11	16
Barley (Rainfed)	42	33	66/4	80	5	7
Rice		195		30		50
Sugar Beet	475/2	324/9	2/4	2/4	47	67
Cotton	527/8	250	95/05	14	61	70
Sesame		100		6		75
**Pulses	100	65	45	15	7	22
Onion	573/9	300	10/9	15	62	75
Potato	402/6	400	2043	1000	44	60
Tomato	488/5		1		91	
Leafy Vegetables	573/9		12		27	
Watermelon	490/7	267	3/3	2	34	27

Melon and Cantaloupe	490/7	250	2/5	3/5	34	32
cucumber	511/75		3/5		74	
Alfalfa	258/1		41		27	
Maize	449/5	150	45/4	20	13	24
Millet		120		30		28
Sunflower		207		4/5		35
Grape	285	290	-	-	89	80
Apple	195	184		-		60
Apricot		170		-		60
Pistachio	366		-		27	
Saffron	210	400	4300	5000	233	555

* For Afghanistan, data on barley cultivation area differentiated by rain-fed and irrigated systems was not available; therefore, the assumption was based on irrigated barley.

**Based on the predominant cultivation, chickpeas and Lentil Rainfed were considered for Iran and mung beans for Afghanistan.

۶. منابع

- Abdelradi, F., & Serra, T. (2015). Food–energy nexus in Europe: Price volatility approach. *Energy Economics*, 48, 157–167.
- Ahmadi, A.W., Heravi, A.N. (2023). A Perspective on the Water Resources of Harirud Marghab and Investigation of the Quality of Groundwater in Rural Areas of Herat Province. *International Journal of Sustainability in Energy and Environment*, 1(1)
- Almulla, Y., Ramos, E., Gardumi, F., & Howells, M., (2017). Integrated resource assessment of the Drina River Basin, *EGU General Assembly*, 19, 15215.
- Al-Saidi, M., Elagib, N., Ribbe, L., Schellenberg, T., Roach, E., & Oezhan, D. (2017). Water-Energy-Food Security Nexus in the Eastern Nile Basin: Assessing the Potential of Transboundary Regional Cooperation .In *book water-energy-food nexus: Principles and Practices*. 10, 103–116.
- Antonelli, M., & Tamea, S. (2015). Food-water security and virtual water trade in the Middle East and North Africa. *International Journal of Water Resources Development*, 31(3), 326–342.
- An, D. (2022). Interactions in water-energy-food security nexus: A case study of South Korea. *Frontiers in Water*, 4, 943053.
- Aslani, M., Monem, M. J., & Bagheri, A. (2023). Development of the Conceptual Model for Water, Food and Energy Chain (Nexus) in Water Management in Irrigation Networks Using Systems Dynamics Approach. *J Watershed Manage Res*, 14(28), 16–36. (In Persian).
- Bakhshi, R. (2023). Environmental assessment of renewable and non-renewable power plants for electricity generation from the perspective of CO2 emission. *Iranian Energy Economics*. (In Persian).
- Conway, D., Archer, E., Krueger, E., & Landman, W. A. (2015). Climate and Southern Africa's Water–Energy–Food Nexus.” *Nature Climate Change*, 5(9), 837–846.
- Daher, B.T., & Mohtar, R.H. (2015). Water–Energy–Food (WEF) Nexus Tool 2.0: Guiding integrative resource planning and decision-making. *Journal of Water International*, 40, 748–771.
- El-Gafy, I. I. (2017). Water–food–energy nexus index: analysis of water–energy–food nexus of crop’s production system applying the indicators approach. *Applied Water Science*, 7, 2857–2868.

- Food and Agriculture Organization (FAO). <https://www.fao.org/faostat>
- Giampietro, M., Renner, A., & Benelcazar, J. C. (2022). An accounting framework recognizing the complexity of the nexus. *Handbook on the Water-Food-Energy Nexus*, 18, 329–345.
- Ghadami Firouzabadi, A., Dehghani Sanij, H., Khoshravesh, M., & Seyedan, S. M. (2015). Evaluation of Energy Efficiency and Water Consumption in Gasoline Pumping Stations. *Journal of Water Research in Agriculture*, 29(3), 367–377. (In Persian).
- Ghosh, B., Gubareva, M., Ghosh, A., Paparas, D., & Vo, X.V. (2024). Food, energy, and water nexus: a study on interconnectedness and trade-offs. *Energy Econ*, 133, 107521.
- Ghodrati, S., Kargari, N., Farsad, F., Javid, A. H., & Kani, A. R. (2021). Investigation of Water Consumption with Water and Energy Nexus Approach in Iranian Combined Cycle Power Plants. *Journal of Water and Sustainable Development*, 8(1), 11–18. (In Persian).
- Kargari, N., & Mastouri, R. Comparison of GHG Emission in Different Kinds of Power Plants by LCA Approach. (2010). *Iranian Journal of Energy*, 13(2), 67–78. (In Persian).
- Karnib, A. (2017). A Quantitative Assessment Framework for Water, Energy and Food Nexus. *Computational Water, Energy, Environmental*, 6(1), 11–23.
- Li, J., Cui, J., Sui, P., Yue, Sh., Yang, J., Lv, Z., Wang, D., Chen, X., Sun, B., Ron, M., & Chen, Y. (2021). Valuing the synergy in the water-energy-food nexus for cropping systems: a case in the North China Plain. *Ecological Indicators*, 127, 107741.
- Ministry of Energy & Water, Islamic Republic of Afghanistan. No Data. Final Report: Institutional Capacity Assessment of Vocational Training for Operation and Maintenance in the Energy Sector of Afghanistan Retrieved from https://energypedia.info/images/0/0f/VTC_Assessment_Report_Final.pdf.
- Motaghi, A., kavianirad, M., Zarghani, S. H., & Sadrania, H. (2018). Identifying and analyzing the factors affecting the hydropolitical relations of Iran and Afghanistan in the Harirud Basin. *Journal of Subcontinent Researches*, 10(34), 235–254. (In Persian).
- Nasrollahi, Z., Dehghan, F., & Operajuneghani, E. Evaluating the Energy - Water Nexus in the Economic Sectors of Isfahan and Yazd Based on Two-Region Input - Output Analysis. (2022). *QJER*, 22(1), 53–82. (In Persian).
- Nazari Mejdari, H., Moridi, A., & Yazdi, J., & KhazaiePoul, A. Sustainability Outlook of Domestic and Agricultural Demand of Dusti Dam Considering Climate change Scenarios and Impact of Salma Dam. (2019). *Iran-Water Resources Research*, 15(3), 17–32. (In Persian).
- Neifer, R. (2013). Islamic Republic of Afghanistan: Power Sector Master Plan: Sovereign Project. Retrieved from Asian Development Bank, Website: <https://www.adb.org/projects/43497-012/main>.
- Parsa, S., Zarrin, A., Mofidi, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2024). The Impact of Climate Change on Temperature and Precipitation in Afghanistan with Emphasis on the Helmand and Hariroud Basins. *Journal of Water and Sustainable Development*, 11(1), 35–48. (In Persian).
- Report of GIZ Afghanistan, Submitted to Ministry of Energy & Water, Islamic Republic of Afghanistan. Institutional Capacity Assessment of Vocational Training for Operation and Maintenance in the Energy Sector of Afghanistan.
- Rosell, A.G., Arfa, I., & Blanco, M. (2023). Introducing GoNEXUS SEF: a solutions evaluation framework for the joint governance of water, energy, and food resources. *Sustainability Science*, 18, 1683–1703.

- Safaei, V., Pourmohamad, Y., & Davari, K. (2020). Integrated Approach of Water, Energy and Food in Water Resources Management (Case Study: Mashhad Catchment). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 14(5), 1708–1721. (In Persian).
- Saffi, M., Javid, H. (2013). Water Resource Potential, Quality Problems, Challenges and Solutions in Afghanistan: Research Report. Retrieved from DACAAR Main Office Kabul, Website: <https://www.dacaar.org>.
- Schlemm, A., Mulligan, M., Tang, T., Agramont, A., Namugize, J., Malombala, E., & Griensven, A. V. (2024). Developing meaningful water-energy-food-environment (WEFE) nexus indicators with stakeholders: An Upper White Nile case study. *Science of the Total Environment*. 931, 172839.
- Shoghi, J. A., & Ahmadi, A. (2018). A Stability Analysis of Treaties in Transboundary Rivers Using Game Theory, A Case Study: Harirud River. *Iran-Water Resources Research*, 14(4), 102–113. (In Persian).
- Tovar, T. S., Suarez, B. P., Musicki, A., Bencomo, J. F., Cabello, V., & Giampietro, M. (2019). Structuring an integrated water-energy-food nexus assessment of a local wind energy desalination system for irrigation. *Science of the Total Environment*, 689(1), 945057.
- Uhl, V. W., Uhl, B., Associates, R. (2003). Stream: An Overview of Groundwater Resources and Challenges. Washington Crossing, PA, USA: Academic Press.
- White, D. J., Hubacek, k., Kuishuang, F., Laxiang, S., & Meng, B. (2018). The Water-Energy-Food Nexus in East Asia: A tele-connected value chain analysis using inter-regional input-output analysis. *Applied Energy*, 210, 102–113.
- Xiaoa, Z., Yaob, M., Tang, X., & Su, L. (2019). Identifying critical supply chains: An input-output analysis for Food-Energy-Water Nexus in China. *Ecological modelling*. 392, 31–37.

Assessment and Analysis of Metabolic Interactions and Water, Food, and Energy Nexus Using the MUSIASSEM Framework

(Case Study of the Harirud Transboundary Basin)

Ensiyeh Talaei¹  | Majid Delavar² 

1. Master's student in Water Resources, Department of Water Resources Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2. Associate professor of Water Resources Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Abstract:

Water, food, and energy, as intertwined and interconnected systems, have significant mutual impacts on each other, and quantitative and qualitative changes in each system can adversely affect the others. The Harirud River located on the border between Iran and Afghanistan, as a prime example of an intertwined system, is a major supplier of drinking water for the metropolis of Mashhad and supports the agricultural needs of the Sarakhs Plain in Iran and also this river plays a vital role in Herat's agriculture and hydropower energy supply in Afghanistan. However, in recent years, water supply as a key factor for the development of agriculture and energy in this basin, has faced serious challenges. Reasons such as political, social, and hydrological issues, along with inefficiencies in resources management are factors for such challenges at the basin level. This study provides an analytical framework that examines and compares the performance and processes of water, food, and energy systems at the national and basin levels using the concept of metabolism. The quantification of this approach is carried out based on reliable data and resources available at the watershed level. The results of this study reveal the significant dependence on water, food, and energy systems at the basin level and within the riparian countries, in such a way that Iran consumed 1,914 million cubic meters of water and 10,701 terajoules of energy annually to produce approximately 2.7 million tons of selected agricultural products. Afghanistan, meanwhile, produced 740,000 tons of agricultural products by consuming 1400 million cubic meters of water and 3,153 terajoules of energy. Additionally, the Salma powerplant has generated 197,000 megawatt-hours of electricity to meet the region's energy demands by utilizing a flow volume of 755 million cubic meters through its turbines. However, they remain highly dependent on food and energy imports. The results emphasize the necessity of strengthening cooperation between Iran and Afghanistan and establishing joint mechanisms to ensure the optimal management of the Harirud water resources.

Keywords: Water, food, and energy Nexus, Transboundary Basin, Metabolism, Harirud