



پروژه درس تحلیل سیستم‌های انرژی

عنوان

همبست آب، انرژی و غذا

استاد درس

آقای دکتر عباس رجبی

پژوهش‌گران

امید صلاح-المیرا فراهانی

زمستان ۱۴۰۰

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه‌ای بر پژوهش	۲
۱-۱- مقدمه و بیان مسئله	۳
۲-۱- تاریخچه پژوهش	۳
۳-۱- مفهوم همبست یا Nexus	۵
۴-۱- اهمیت بخش‌های مختلف	۶
۴-۱-۱- اهمیت بخش آب	۶
۴-۱-۱-۱- بحران آب در خاورمیانه و ایران:	۸
۴-۱-۲- اهمیت بخش انرژی	۸
۴-۱-۳- اهمیت بخش غذا	۱۰
۵-۱- ساختار پژوهش	۱۰
فصل ۲: فصل دوم	۱۲
۱-۲- خاستگاه و توسعه مفهوم همبست	۱۳
۱-۱-۲- چارچوب‌های همبست	۱۴
۱-۱-۱-۲- همبست‌های دوجزئی	۱۴
۲-۱-۱-۲- انواع همبست سه‌جزئی و چندجزئی	۱۶
۲-۱-۲- محدوده‌های همبست	۱۷
۲-۲- نقش همبست در سیاست	۱۸
فصل ۳: مدل‌سازی‌ها و پلتفرم‌های توسعه مدل	۲۱
۱-۳- چالش‌های مهم مدل همبست	۲۲
۲-۳- چارچوب ایجاد یک مدل همبستی آب، انرژی، غذا و محیط زیست	۲۲
۳-۳- شاخص‌های بهره‌وری	۲۳
۳-۳-۱- شاخص بهره‌وری آب	۲۳

- ۲۳-۳-۲- شاخص بهره‌وری انرژی ۲۳
- ۲۴-۳-۳- شاخص ترکیبی همبست آب، غذا و انرژی ۲۴
- ۲۴-۴-۳- مدل‌سازی ریاضی ۲۴
- ۲۴-۳-۴-۱- تابع هدف و محدودیت‌ها از بعد اقتصادی ۲۴
- ۲۵-۳-۴-۲- تابع هدف و محدودیت‌ها از بعد زیست‌محیطی ۲۵
- ۲۵-۳-۵- پلتفرم‌های توسعه مدل ۲۵
- فصل ۴: جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۲۹
- ۳۰-۴-۱- جمع‌بندی ۳۰
- ۳۰-۴-۱- راه‌حلی برای چالش همبست سه‌گانه ۳۰
- ۳۰-۴-۱-۱- کشاورزی شهری و گل‌خانه‌های تاریک ارژتیک ۳۰

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱: ساختار پژوهش در یک نگاه ۱۱
- شکل ۲: انواع همبست‌ها از نظر چارچوب ۱۴
- شکل ۳: همبست سه‌جزئی آب، غذا و انرژی ۱۶
- شکل ۴: انواع محدوده‌های مطالعه همبست ۱۸
- شکل ۵: میزان سرانه آب در دسترس در کشورهای ایران، افغانستان و پاکستان ۱۹
- شکل ۶: برخی از نیازهای دو کشور ایران و افغانستان برای همکاری در راستای شکل‌دهی به تعاملات پایدار [۱۲] ۲۰
- شکل ۷: چارچوب ایجاد یک مدل همبست آب، انرژی، غذا و محیط‌زیست ۲۳
- شکل ۸: محیط نرم‌افزار توسعه یافته شده برای مدل خطی WEAP ۲۷
- شکل ۹: تصویری از محیط کاربری نرم‌افزار LEAP ۲۸
- شکل ۱۰: طرح‌واره گل‌خانه تاریک انرژی ۳۲

فهرست جدول

جدول ۱: مزایای کشاورزی شهری [۴۹] ۳۱

چکیده:

در سال‌های آتی، رشد جمعیت و تغییر در رژیم غذایی افراد، تقاضای غذا را افزایش خواهد داد. این افزایش تقاضا بر تقاضای آب و انرژی نیز اثر خواهد گذاشت. از آن‌جا که برای تولید غذا به منابع آب و انرژی، برای تولید انرژی به آب و جهت دسترسی به آب مورد نیاز و تامین آن نیز به انرژی نیاز است و همچنین می‌توان از غذا و پسماندهای حاصل از آن نیز جهت تولید انرژی استفاده نمود، می‌توان گفت که این سه هسته اصلی نیاز بشر، پیوندی درهم‌تنیده بایک‌دیگر دارند و یک چرخه پیچیده میان آن‌ها وجود دارد. لذا به دنبال افزایش تقاضای غذا، تقاضای آب و انرژی نیز افزایش خواهد یافت. از طرفی کمبود انرژی، آب و منابع غذایی که از رشد جمعیت، برهم‌خوردن تعادل اکوسیستم‌ها، تغییرات اقلیمی و آب‌وهوایی و تنوع اقتصادی ناشی می‌شود، بزرگ‌ترین چالش در جهان امروز به شمار می‌آید. بنابراین به منظور مدیریت بهتر منابع آب، انرژی و غذا، شناخت روابط این سه بخش و اتخاذ رویکردی جامع و یک‌پارچه برای مدیریت آن‌ها ضروری است.

فصل ۱: مقدمه‌ای بر پژوهش

۱-۱- مقدمه و بیان مسئله

آب، غذا و انرژی سه منبع حیاتی برای انسان هستند و کیفیت زندگی بشر را تامین می‌کنند. تقاضای جهانی برای تامین منابع آب، انرژی و غذا، به دلیل افزایش جمعیت، شهرنشینی و تغییر اقلیمی در سطح جهان در حال افزایش است و پیش‌بینی می‌شود که در مقایسه با سال ۲۰۱۵ به بالای ۵۰ درصد برسد [۱]. هم‌چنین پیش‌بینی می‌شود که تکیه کردن انسان بر این منابع تا سال ۲۰۳۰ به ترتیب به ۳۵، ۵۰ و ۴۰ درصد افزایش پیدا کند [۲]. کاهش امنیت غذایی، کمبود آب آشامیدنی، آلودگی و تمام شدن منابع سوخت فسیلی و آلودگی‌های زیست‌محیطی، چالش‌های اساسی پیش روی جوامع انسانی است که توجه بسیاری از دولت‌ها و مؤسسه‌های پژوهشی را به خود جلب کرده است. به همین دلیل فهمیدن روابط پیچیده بین منابع آب، غذا و انرژی برای توسعه پایدار در آینده در همه مناطق و جوامع، بسیار مهم است. برای فهمیدن این روابط ابتدا باید مفهومی به نام همبست را تعریف کرد. همبست به عنوان برهم کنش درهم تنیده بین پارامترها یا زیربخش‌های مختلف در یک سامانه کلی تعریف می‌شود. برای مثال همبست آب، انرژی، وابستگی دوطرفه بین انرژی و آب را نشان می‌دهد؛ زیرا این دو در تامین، فرآیند، توزیع و استفاده، درهم‌تنیدگی دارند. در ابتدای استفاده از مفهوم همبست برای نشان دادن ارتباط منابع، همبست‌های دوجزئی مانند همبست آب و انرژی، غذا و انرژی بیشتر مورد مطالعه قرار گرفت. سپس این منابع به صورت سه‌گانه در چارچوب همبست با عنوان همبست آب، انرژی و غذا قرار گرفتند.

۱-۲- تاریخچه پژوهش

در ابتدای حضور انسان‌ها در کره زمین، معیشت بشر از شکارگری تامین می‌شد. از حدود ۱۰ هزار سال پیش، انسان‌ها برای تهیه غذا با روش‌های کشاورزی آشنا شدند و سکونت‌گاه‌های دائمی خود را ایجاد کردند. به دنبال شروع عصر کشاورزی، شهرها و روستاها شکل گرفت. به‌طور معمول، شهرها و روستاها به دلیل نیاز به آب برای کشاورزی در کنار رودخانه‌ها و ساحل دریاها قرار داشتند.

پیشینه کشاورزی در ایران باستان به گذشته‌های خیلی دور می‌رسد. کاوش‌های باستان‌شناسی در گنج تپه (کرمانشاه)، تپه گوران (لرستان)، تورنگ تپه (گرگان)، سیلک (کاشان)، گوی تپه (ارومیه)، تپه حصار (دامغان) و مناطق دیگری در استان‌های گیلان، فارس و خوزستان، وجود کشاورزی از گذشته‌های دور در این مناطق را تایید می‌کند. به‌مرور زمان در نقاط پرآب، کشت غلات رایج شد و کشاورزی با ایجاد شیوه‌های تکامل‌یافته‌تر آبیاری توسعه یافت و ابزارهای ابتدایی کشاورزی ساخته شدند.

اقلیم ایران، دربرگیرنده خرده اقلیم‌های متفاوت و فراوان است؛ اما به‌طور کلی، ایران در دسته مناطق گرم و خشک جهان قرار دارد. ایران، سرزمین اختلاف‌های شدید دما است. به‌طور معمول، دمای هوا در تمام فصل‌های سال و در نواحی مختلف، تفاوت دمایی حدود ۴۰ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد. یکی از مشخصه‌های اصلی آب‌وهوای ایران، خشکی بیش‌ازحد تابستان‌های آن است. حتی در فصل‌های سردتر نیز باران‌های مداوم نمی‌بارد.

به‌همین دلیل آب در ایران همواره یک مسئله حیاتی بوده و ایرانیان از زمان‌های دور به ارزش آب به‌عنوان یک ماده حیاتی و ارزشمند واقف بوده‌اند. ایرانیان از زمان‌های بسیار دور، می‌دانستند که انتقال آب با روش‌های غیربهرینه در هوای خشک و با شدت تبخیر فراوان، هدر دادن این مایع حیاتی است و نتیجه‌ای نخواهد داشت؛ بنابراین از همان ابتدا به حفر قنات‌ها و کانال‌های زیرزمینی برای انتقال آب اقدام نمودند. در دامغان، آثار باقی‌مانده از قناتی با ۸۰۰۰ سال قدمت هنوز وجود دارد. حفر قنات در مسافت‌های ده‌ها تا صدها کیلومتری، کاری است که به دانش فنی پیشرفته در زمان خود و حوصله و پشتکار فراوان نیاز داشته و ایرانیان در این‌گونه امور سرآمد زمان خود بوده‌اند. آگاهی بر این امر که محل قنات کجا باشد و این‌که چگونه آن را حفر نمایند، شیوه‌ای پیشرفته و دقیق بوده و به‌گونه‌ای اعجاب‌انگیز برای مشکل انتقال آب در دشت‌های ایران چاره‌جویی کرده است.

در دهه‌های اخیر، گسترش شهرنشینی در به‌کارگیری منابع برای تامین حقوق بنیادی و جهانی امنیت غذا، آب و انرژی، بسیار تاثیرگذار شد. به‌همین دلیل برای مطالعه ارتباط بین آب، غذا و انرژی، در سال‌های اخیر مفهومی به نام همبست مطرح شد. اندیشه همبست نخستین بار توسط مجمع جهانی اقتصاد (۲۰۱۱) مطرح شد [۳].

کنفرانس بن^۱ در سال ۲۰۱۱ با عنوان «همبست آب، انرژی و امنیت غذایی، راه‌حلی برای اقتصاد سبز» مورد حمایت سازمان‌های بین‌المللی قرار گرفت [۴]. بعد از این کنفرانس، حدود ۳۰۰ سازمان در سراسر جهان از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۵ راه‌کارهایی در زمینه همبست آب، غذا و انرژی را مطرح کرده‌اند. در این سال‌ها، تعداد انتشار مقاله‌ها در این زمینه به‌طور چشم‌گیری افزایش پیدا کرد. بر اساس بانک داده‌های نمایه شده در پایگاه علوم (WOS^۲)، در مجموع ۴۶۹ مقاله با موضوع همبست برای دوره ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۹ برای کلیدواژه همبست شناسایی و جمع‌آوری شده است. می‌توان دریافت که اکثر این مقاله‌ها پس از کنفرانس بن منتشر شده‌اند. سه چالش اساسی بشر، شامل آب، غذا و انرژی، به‌تدریج توجه دانشمندان را به خود جلب کرده و پژوهش‌ها در این زمینه به‌شدت افزایش یافته است.

برخی از جدیدترین پژوهش‌های داخلی انجام شده در زمینه همبست نیز از قرار زیر است:

کرابی و همکاران در مقاله‌ای که در سال ۱۳۹۸ منتشر کرده‌اند، همبست آب، انرژی و غذا (WEFN) را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این پژوهش بخش‌های مختلف منابع آب، انرژی، غذا و آلودگی (اکوسیستم) در کنار جامعه (صنعت و زندگی شهری) و ارتباطات بین آن‌ها در ایران مورد بررسی قرار گرفته و سپس با ارائه مدلی که شامل توابع اقتصادی و زیست‌محیطی می‌باشد بر استفاده از رویکرد همبست در جهت دستیابی به توسعه پایدار تاکید شده است. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که کاربرد این رویکرد در حکم‌رانی منابع برای کشورهای نظیر ایران که دچار چالش‌های منابع، خصوصاً منابع آب شیرین می‌باشند امری ضروری است [۵].

^۱ Bonn

^۲ Web Of Science(WOS)

میان‌آبادی و همکاران طی گزارشی که در سال ۱۳۹۹ منتشر کرده‌اند به بررسی کاربرد رویکرد «همبست آب-ترانزیت-انرژی» در دیپلماسی آب و مدیریت مشارکتی و پایدار رودخانه‌های فرامرزی شرق ایران پرداخته‌اند. باتوجه به برتری افغانستان در منابع آبی و ضعف در زمینه انرژی و ترانزیت و همچنین کمبود منابع ایران در مناطق شرقی، پتانسیل بالای تولید انرژی و دسترسی به آب‌های آزاد، نتیجه گرفته شده است که این دو کشور می‌توانند با تعامل با یک‌دیگر نیازهای حیاتی خود را برطرف کنند [۶].

منعم و همکاران در مقاله‌ای که در سال ۱۳۹۹ منتشر کرده‌اند، به بررسی کاربرد و ارزیابی پیوند آب، غذا و انرژی (نکسوس) در مدیریت شبکه‌های آبیاری و به طور خاص شبکه آبیاری زاینده‌رود پرداخته‌اند. در این مقاله، باتوجه به مصرف آب و انرژی، دو شاخص بهره‌وری آب و بهره‌وری انرژی پیشنهاد شده است و بر اساس این شاخص‌ها یک شاخص ترکیبی پیوند آب، غذا و انرژی نیز پیشنهاد شده است. نهایتاً از مدل ارزیابی و برنامه‌ریزی منابع آب (WEAP) به منظور شبیه‌سازی شرایط تخصیص منابع و مصارف حوضه استفاده شده است. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که با در نظر گرفتن شاخص بهره‌وری نرمال شده آب مصرفی به تنهایی، بهترین سناریو، کاهش ۲۰ درصدی آورد رودخانه با حداکثر بهره‌وری ۵۴ درصد برای شبکه آبیاری نکوآباد است. بر اساس شاخص بهره‌وری نرمال شده انرژی بهترین سناریو، انسداد چاه‌های غیر مجاز با حداکثر بهره‌وری ۴۹ درصد برای شبکه آبیاری مهیار شمالی می‌باشد [۷].

۱-۳- مفهوم همبست یا Nexus

برای غلبه بر چالش‌های سیستم‌های آب، انرژی و اقلیم دانشی با رویکرد یک‌پارچه بنابر ماهیت ارتباطی این سیستم‌ها شکل گرفته است که همبست (Nexus) نامیده می‌شود. به سبب کنش و برهم‌کنش سیستم‌های مذکور برهم‌دیگر، رخدادهای ناشی از توسعه موجب ایجاد چالش‌های مشترک شده است. بنابراین راه‌حل‌ها نیز باید به صورت یک‌پارچه با لحاظ ابعاد این سیستم‌ها طرح گردند. ایران مرکز بروز چالش‌های سه‌گانه بوده و بنابراین راه حل منطقی بهره‌گیری از دانش همبست در ارائه و پیشبرد راه‌چاره‌ها خواهد بود. دو گونه تعریف برای مفهوم همبست وجود دارد که در زیر به بررسی آن‌ها پرداخته می‌شود:

- همبست به تعاملات میان زیرسامانه‌های مختلف یک سامانه اطلاق می‌شود. به طور مثال، همبست آب-انرژی به وابستگی متقابل بین آب و انرژی گفته می‌شود زیرا این دو مولفه در فرآیند تامین، فرآوری، توزیع و مصرف پیوند می‌یابند. در واقع این دسته از تعریف بر روی درک خصوصیات کلی سامانه پیچیده با استفاده از روابط میان مولفه‌های موجود در همبست تمرکز دارد. به عبارت دیگر شکست خوردن یکی از بخش‌های همبست ممکن است در بخش‌های دیگر آن ایجاد تنش نماید. بنابراین لازم است که یک روش مدیریتی همه‌جانبه بین این بخش‌ها اعمال شود.

- همبست یک رویکرد تحلیل برای کمی‌سازی ارتباطات میان گره‌های آن است. این تعریف نسبت به تعریف اول متداول‌تر است. سی. ای. اسکات و همکاران [۸] این دیدگاه را مطرح کردند که جوهره همبست، ایجاد یک بازیابی منابع با نتیجه جانبی بهبود راندمان مصرف منابع است.

باوجود تفاوت میان دو تعریف فوق، می‌توان نتیجه گرفت که همبست برای برقراری مدیریتی جامع برای مولفه‌های همبست با هماهنگی چندوجهی میان مولفه‌ها و به منظور نیل به توسعه پایدار در هر بخش ارائه شده است. درواقع اهمیت و ارزش رویکرد همبست در این است که یک زاویه دید بین‌بخشی و پویا ایجاد می‌کند و به مدیران کمک می‌کند تا با درک روابط بین آب، غذا و سایر مولفه‌های مربوطه، منابع محدود را به صورت پایدار مدیریت کنند [۹]. در ادامه به اهمیت هریک از اجزا همبست به صورت مجزا می‌پردازیم.

۴-۱- اهمیت بخش‌های مختلف

۴-۱-۱- اهمیت بخش آب

طبق گزارش شورای جهانی انرژی در سال ۲۰۱۰، بیش از ۷۰٪ کره زمین با آب پوشیده شده است. گرچه آب عنصر اصلی و سازنده کره زمین و اکثریت زیست‌بوم‌های طبیعی است، مقدار مواد حل‌شده این آب‌ها و کیفیت آن‌ها با یک‌دیگر متفاوت است. از کل مقدار آب موجود در کره زمین، ۲/۵٪ آب شیرین با درجه سختی کم است. حدود ۰/۵٪ آن به صورت آب شیرین قابل بهره‌برداری است که در رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، منابع آبی و بارش‌های جوی قرار دارند.

در کشورهای با درآمد بالا ۵۹٪ آب برای مصارف صنعتی مصرف می‌شود، درحالی که در سایر کشورها، ۸٪ آب در بخش صنعت مصرف می‌شود. در جهان به صورت میانگین، ۲۲٪ آب برای صنعت مصرف می‌شود.

دسترسی به آب در نواحی مختلف کره زمین متغیر است و در هر ناحیه تغییرات فصلی و سالانه عرضه آب وجود دارد. بسیاری از این تغییرات قابل پیش‌بینی نیستند. لذا مدیریت آب و تامین میزان آب مورد نیاز با چالش همراه است. روش‌های مدیریت مضیقه آب شامل روش‌های انتقال آب به اجتماعات بشری، کنترل عرضه آب، خدمات آب و قیمت‌گذاری است. در بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته از راه‌کارهای سمت عرضه استفاده می‌شود. این راه‌کارها غالباً با هزینه بالا، اثرات منفی بر روی زیست‌بوم‌های طبیعی و سلامت انسان و سایر موجودات زنده همراه است. همگام با تغییرات گسترده مردم‌شناسی مانند افزایش شهرنشینی، توسعه اقتصادی صنعتی و کشاورزی، تغییرات تقاضا و تغییر الگوی مصرف و تولید و فشارهای آب و هوایی، هرکدام از این راه‌حل‌ها به تنهایی پاسخ‌گو نخواهند بود.

بسیاری از چالش‌های موثر بر بخش آب از این امر نشأت می‌گیرد که ما به عنوان بشر چگونه از آب استفاده می‌کنیم. بر اساس پیش بینی ها حداقل ۲ و حداکثر ۷ بلیون نفر در کشور های مختلف در سال ۲۰۵۰ از کمبود آب رنج می‌برند [۱۰].

افزایش جمعیت سبب افزایش تقاضای انرژی می‌شود. آب لازم برای تولید انرژی در فرایندهای شیمیایی و خنک‌کاری افزایش می‌یابد. احداث سد برای ذخیره‌سازی آب می‌تواند سبب گسترش بیماری‌های مرتبط با آب نظیر مالاریا و همچنین تبخیر آب از سطح سد شود. لذا واحدهای نیروگاه آبی با اندازه کوچک برای کاربردهای محلی بسیار مناسب هستند. لازم به ذکر است که رشد اقتصادی دو تاثیر عمده بر تقاضای آب دارد. افزایش حجم فعالیت‌های اقتصادی باعث افزایش خدمات مربوط به آب می‌شود. نکته دوم این است که توسعه باعث ایجاد تغییرهای ساختاری در الگوی کالاهای تولید و خدمات جامعه می‌شود. توسعه و تغییر فناوری می‌تواند باعث صرفه‌جویی در مصرف آب شود. برای مثال طبق گزارش کمیسیون جهانی سدها در سازمان ملل متحد، طی سال‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۹۰ رشد اقتصاد ۵ برابر و رشد مصرف آب ۲ برابر شده است. این کمیسیون این کاهش را نتیجه رشد فناوری بازچرخانی آب اعمال استانداردهای محیط زیست، افزایش قیمت آب و فاصله گرفتن از صنایع فشرده وابسته به منابع طبیعی ذکر نموده است. از آنجا که مدیریت آب در همه کشورها یکسان نبوده است در مجموع افراد محروم از آب سالم رو به افزایش است. از طرفی رشد صنعتی چشم‌گیر در دهه گذشته سبب افزایش تقاضا برای آب و تهدید کیفیت آب شده است.

سهم ایران از جمعیت جهان ۱/۳٪ و از منابع آب شیرین ۰/۲٪ است (منبع- صفحه ۱۰ کتاب). میانگین بارش بلند مدت کشور نیز سالانه ۲۴۴/۷ میلی‌متر به ثبت رسیده است. میانگین سرانه مصرف آب آشامیدنی در جهان و ایران به ترتیب ۱۴۲ و ۲۵۶ لیتر در روز است.

در سال‌نامه آماری آب کشور کاهش سرانه منابع آب تجدیدپذیر، محدودیت آب در دسترس و توزیع جغرافیایی غیر یکنواخت آن، عدم انطباق الگوی مراکز صنعتی با منابع آب و افزایش فاضلاب‌های صنعتی از مهم‌ترین چالش‌های بخش آب و فاضلاب ایران بر شمرده شده است.

مدیریت تقاضا و عملیاتی سازی الگوی بهینه مصرف در بخش‌های مختلف، سیاست‌های تشویقی و حمایتی، بازچرخانی و استفاده مجدد از آب و تأمین بخشی از آب شیرین مورد نیاز از طریق بازیافت حرارت در نیروگاه‌های حرارتی از مهم‌ترین راهبردهای بخش آب ایران ذکر شده است.

در سال ۱۳۹۲ مقدار ۴۹۱۷ میلیون مترمکعب آب در کارگاه‌های صنعتی مصرف شده است که عمده آن از منابع آب تجدیدپذیر کشور تامین شده است. با توجه به منابع مختلف آماری و گزارش‌های مسئولان وزارت نیرو، سهم مصرف آب بخش صنعت در کشور کمتر از ۵٪ برآورد شده است اما اهمیت روز افزون صنایع به‌خصوص نقش صنعت نفت و گاز در تولید ناخالص داخلی کشور و آثار بیرونی منفی فاضلاب‌های صنعتی در کیفیت زیست‌بوم‌های پیرامون، سبب اهمیت موضوع آب و انرژی برای بخش صنعت کشور شده است [۱۱].

۱-۴-۱- بحران آب در خاورمیانه و ایران:

در بین نقاط مختلف دنیا، بحران و مشکلات آب در منطقه خشک و نیمه خشک آسیای غربی (خاورمیانه)، به مراتب خطرناک‌تر و وخیم‌تر از سایر نقاط دنیاست، این منطقه وسیع اغلب به عنوان منطقه‌ای با منابع نفتی غنی (انرژی) و منابع آبی فقیر توصیف شده است. قرار گرفتن این منطقه در کمربند خشک جهان موجب شده است تا این منطقه علی‌رغم دارا بودن ۵ درصد از جمعیت جهان، تنها یک درصد از آب‌های شیرین قابل دسترس را در اختیار داشته باشد که این منابع آب نیز عمدتاً به صورت مشترک مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۲].

وجود منابع آبی مشترک سبب ایجاد تنش‌ها و منازعاتی برای استفاده هر چه بیشتر از این منابع محدود گردیده است. ارتباط مستقیم میان آب با کشاورزی، به عنوان منبع اصلی تولید غذا، نیز سبب تشدید این تنش‌ها گردیده است. کشور ایران نیز به عنوان یکی از کشورهای بزرگ خاورمیانه درگیر این معضل می‌باشد. کمبود منابع آب شیرین به نسبت جمعیت، رشد سریع جمعیت، مهاجرت به شهرها و توسعه شهرنشینی، عدم وجود زیرساخت کافی جهت توزیع منابع موجود، افت کیفیت آب، کشاورزی ناکارآمد، افزایش تقاضای آب، رویای خودکفایی در تامین مواد غذایی، عدم وجود فرهنگ صحیح مصرف، قیمت ارزان حامل‌های انرژی، خشکسالی، تغییرات آب و هوایی، تحریم‌ها و مشکلات اقتصادی، ساختار نامناسب حکمرانی آب و ناآگاهی محیط‌زیستی از جمله مشکلات عمده ایران در زمینه آب محسوب می‌شوند [۱۳].

۱-۴-۲- اهمیت بخش انرژی

مطابق پیش‌بینی آژانس بین‌المللی انرژی، تقاضای انرژی تا سال ۲۰۳۵ در همه سناریوها افزایش خواهد یافت. تقاضای انرژی جهان از ۲۰۱۴ تا ۲۰۳۵ ۹۵ درصد افزایش خواهد یافت. هر چند میزان رشد سرانه سالانه تقاضای انرژی در این دوره به مقدار ۱/۴ درصد از سال‌های گذشته کمتر خواهد بود. در سناریو سیاست‌های جدید آژانس بین‌المللی انرژی تقاضای انرژی از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۳۵ به مقدار یک سوم افزایش خواهد یافت. مقدار میانگین سرانه تقاضای انرژی جهان نیز در سناریوی سیاست‌های جدید افزایش خواهد یافت و از مقدار ۱/۹ به ۲ تن معادل نفت خام برای هر نفر خواهد رسید. اما شکاف بین سرانه مصرف انرژی در کشورهای مختلف همچنان باقی خواهد ماند. مقدار سرانه تقاضای انرژی در آفریقا یک دهم یا کمتر از مقدار سرانه تقاضای انرژی در برخی کشورها نظیر کانادا، روسیه و آمریکا خواهد بود.

نگرانی‌های جهانی در رابطه با اثرات منفی مصرف انرژی و افزایش انتشار کربن دی‌اکسید در سال‌های اصلی گسترش یافته است. طی سال‌های ۲۰۰۰ الی ۲۰۱۰، شدت انرژی (تعریف در پاورقی (صفحه ۱۳ کتاب)) سالانه ۰/۴ درصد کاهش یافته است و از سال‌های ۲۰۱۰ الی ۲۰۱۲، این مقدار ۱/۵ درصد کاهش یافته است. افزایش قیمت حامل‌های انرژی، سبب افزایش صرفه جویی انرژی و حمایت‌های دولتی از تجدیدپذیرها شده است. به طور

کلی هرچه اقتصاد جهان رشد می کند ، به علت افزایش سطح فعالیت ها انرژی بیشتری برای سوخت مورد نیاز است.

در ترازنامه انرژی ایران، مقدار کل مصرف انرژی نهایی در سال ۱۳۹۳ ، برابر ۱۳۲۰/۷ میلیون بشکه معادل نفت خام گزارش شده است که ۷/۵ درصد نسبت به سال قبل افزایش داشته است. مقدار افزایش مصرف انرژی در بخش های خانگی ، صنعت ، حمل و نقلی و کشاورزی نسبت به سال قبل به ترتیب برابر ۱/۲ ، ۶/۸ ، ۹/۸ و ۱/۳ درصد بوده است. به این ترتیب بخش صنعت پس از بخش حمل و نقل بیشترین مقدار افزایش رشد مصرف را داشته است. سهم انواع حامل های انرژی نهایی در سال ۱۳۹۳ برای گاز طبیعی ، فراورده های نفتی و برق به ترتیب برابر ۷/۵۲ ، ۵۳/۳۶ و ۸۶/۹ درصد بوده است.

سرانه مصرف انرژی نهایی در ایران ۱/۶ برابر مقدار متوسط جهانی است. این شاخص برای بخش صنعت ۱/۵ برابر مقدار متوسط جهانی است. رشد شدت انرژی ایران در سال ۱۳۹۳ بر مبنای انرژی اولیه و انرژی نهایی به ترتیب برابر ۴/۸ و ۲/۱ درصد بوده است. مقدار شدت مصرف انرژی نهایی در ایران ۱/۴ برابر مقدار متوسط جهانی است. این آمار و شواهد نشان دهنده وجود فرصت بزرگی صرفه جویی انرژی در کشور می باشد.

طبق گزارش شرکت نفت بریتانیا ، مصرف انرژی در خاورمیانه تا سال ۲۰۳۵ به میزان ۶۰ درصد افزایش خواهد داشت و به میزان ۸ درصد مصرف جهانی در ۲۰۳۵ خواهد رسید. نعت با ۴۴ درصد دارای بیشترین مقدار رشد تقاضای انرژی در سال ۲۰۳۵ خواهد بود. در خاورمیانه انرژی لازم برای تولید برق ۷۳ درصد رشد می کند و بیشتر توسط گاز طبیعی تامین خواهد شد. با توجه به بهبود بهره وری نیروگاهها ، مقدار ارزه برق ۱۲۳ درصد افزایش می یابد. سهم گاز در تامین انرژی اولیه از ۵۱ درصد فعلی به ۵۳ درصد در سال ۲۰۳۵ افزایش می یابد و صادرات گاز از میزان فعلی کمتر می شود. خاورمیانه بزرگترین مصرف کننده نفت خواهد شد که مصرف سرانه آن در سال ۲۰۳۵ سه برابر متوسط جهانی خواهد بود. شدت انرژی در خاورمیانه ابتدا به بیشترین حد خود می رسد و سپس تا سال ۲۰۳۵ ، ۲۰ درصد کاهش می یابد در سال ۲۰۳۰ این منطقه هنوز هم دارای بیشترین شدت انرژی در جهان خواهد بود. انتشار گاز کربن دی اکسید ۵۲ درصد افزایش خواهد داشت.

مطابق سناریوی پایه پیش بینی برنامه بلندمدت انرژی کشور در افق زمانی سالهای ۱۳۹۳ الی ۱۴۲۰ هجری شمسی توسط وزارت نیرو، تقاضای انرژی در ایران تا انتهای دوره ۲/۲ برابر رشد خواهد کرد. در این سناریو ، نرخ رشد اقتصادی ایران به صورت متوسط سالانه ۵/۵ درصد در نظر گرفته شده است و فرض شده که هیچگونه اقدامی برای صرفه جویی انرژی از سوی مصرف کنندگان انجام نمی شود. از اثر بهبود فناوری صرف نظر شده است و کلیه قیمت ها ثابت در نظر گرفته شده اند.

مقدار میانگین رشد سالانه تقاضای انرژی در سناریوهای پایه و صرفه جویی انرژی به ترتیب برابر ۳/۷ و ۲/۲ درصد خواهد بود. در سناریوی صرفه جویی انرژی ، متوسط شاخص مصرف ویژه انرژی صنایع ایران ۱۵ درصد نسبت به متوسط مقدار فعلی این شاخص در صنایع اروپا و آمریکا کاهش خواهد یافت. در سناریوی پایه و تقاضای

انرژی در بخش خانگی ۹ درصد کاهش و در بخش صنعت هفت درصد افزایش خواهد داشت. مقدار خوراک صنایع آهن و فولاد در طول در طول دوره ثابت خواهد ماند، در حالی که خوراک مورد نیاز مجتمع‌های پتروشیمی سالانه ۴/۶ درصد افزایش خواهد یافت. متوسط رشد سالانه ظرفیت نصب شده نیروگاه‌ها ۳ درصد خواهد بود. متوسط بازده نیروگاه‌های ایران از ۳۷ درصد به ۴۹ درصد افزایش خواهد یافت.

از مهمترین فرصت‌های بخش انرژی، ود بازده نیروگاه‌های کشور نام برده شده است. از مهمترین چالش‌های بخش انرژی کشور، نیاز به سرمایه‌گذاری بالا و افزایش تقاضای گاز طبیعی برای سوخت نیروگاه‌های کشور (در سناریوی پایه تا سه برابر) ذکر شده است. این موارد بیانگر آن است که مسائل آب مرتبط با صنایع تولیدی و بخش انرژی ایران نیاز به بررسی و مدیریت در آینده دارد [۱۱].

۱-۴-۳- اهمیت بخش غذا

تجزیه تحلیل داده‌های سازمان فائو (FAO) نشان می‌دهد که انرژی غذایی (Kcal) مصرفی مردم جهان که به ازای هر سرانه در روز محاسبه می‌شود، به طور قابل توجهی در سطح جهان افزایش پیدا کرده است. در دهه ۶۰ میلادی این عدد ۲۳۵۸ کیلوکالری بوده در حالی که در سال ۲۰۲۰ به عدد ۳۰۵۰ رسیده است. بنابراین با توجه به رشد جمعیت و توسعه کشورها، میزان مصرف غذا در سال‌های آینده نیز این روند صعودی را ادامه خواهد داد و نیاز به مدیریت منابع غذایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار خواهد بود.

یکی از چالش‌های بخش غذا، گرسنگی است که در سطح جهان در حال افزایش است. اوایل دهه ۱۹۹۰، افزایش تعداد افراد گرسنه در سطح جهان بعد از طی دو دهه سیر نزولی دچار تغییر فاحشی شد و از آن پس به دلیل افزایش قیمت غذا در اثر بحران مالی، رو به افزایش گذاشت. بحران مالی نیز به نوبه خود موجب شد قیمت محصولات کشاورزی تا حدودی افت کند و تجارت محصولات کشاورزی و مبادله‌های مرتبط با آن کاهش یابد. امروزه قشرهای کثیری از مردم گرسنه جهان به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم برای بقای خود به کشاورزی وابسته‌اند. بر اساس آخرین ارزیابی به عمل آمده از سوی سازمان فائو (FAO)، امروزه بالغ بر ۹۶۹ میلیون نفر در جهان با هزینه‌ای کمتر از یک دلار در روز زندگی می‌کنند و حدود سه چهارم از آن‌ها برای بقا خود به کشاورزی وابسته هستند. چالش دیگر در زمینه تولید غذا، نابودی محیط‌زیست و طبیعت می‌باشد. تخریب محیط‌زیست از دو جنبه با غذا در ارتباط است. این مسئله با محدود کردن محصولات غذایی، تولید مواد غذایی را کاهش می‌دهد. از سوی دیگر، این مسئله حاصل فعالیت‌های نادرست کشاورزی است. مشکلاتی مانند فرسایش خاک، آلودگی آب، انتشار گازهای گل‌خانه‌ای و از بین رفتن تنوع زیست محیطی، تهدیدی جدی علیه تولید جهانی غذا به‌شمار می‌رود [۱۴].

۱-۵- ساختار پژوهش

پژوهش حاضر از چهار فصل تشکیل شده است. در فصل اول به بیان مسئله پرداخته شده است. همچنین مقدمه‌ای از موضوع پژوهش، اهمیت موضوع، هدف و جایگاه آن مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل دوم، ضمن

پرداختن به تعریف مبانی موضوع با جستجو در پژوهش‌های صورت گرفته و مرور آن‌ها، یک دسته‌بندی اجمالی از انواع همبست‌ها ارائه شده است. همچنین محدوده‌های همبست و نقش آن در سیاست مورد بررسی قرار گرفته است. ضمن پرداختن به مبانی همبست، تاریخچه‌ای مفصل‌تر که حاصل مرور مهم‌ترین مقاله‌های اخیر است، ارائه می‌شود. فصل سوم این پژوهش به مدل‌سازی ریاضی همبست در پژوهش‌های انجام شده، بررسی چالش‌های این موضوع، شاخص‌های بهره‌وری و پلتفرم‌های توسعه مدل اختصاص دارد. در این فصل تابع هدف همبست آب، انرژی و غذا مورد بررسی قرار می‌گیرد و با استفاده از پلتفرم‌های مرتبط مدل‌سازی همبست بررسی می‌شود. در نهایت، فصل چهارم با نتیجه‌گیری و جمع‌بندی موضوع مورد بررسی به پایان می‌رسد. شکل ۱ ساختار کلی پژوهش را در یک نگاه نمایش می‌دهد.



شکل ۱: ساختار پژوهش در یک نگاه

فصل ۲: فصل دوم

۱-۲- خاستگاه و توسعه مفهوم همبست

جمعیت جهان تا سال ۲۰۵۰، از هفت و نیم میلیارد نفر کنونی به نه و نیم میلیارد نفر رسید [۱۴]. افزایش جمعیت سال‌های اخیر و سال‌های آتی از یک طرف و افزایش سطح کیفیت زندگی از طرف دیگر، باعث افزایش چشم‌گیر تقاضا و تولید در راستای تامین سه حقوق بنیادی بشر یعنی امنیت انرژی، امنیت آب و امنیت غذا شده است. از طرفی این روند صعودی بدون دیدگاه کارشناسی، کره زمین را با بحران محیط‌زیست روبرو کرده است. این چالش پس از سال‌ها پژوهش، در سال ۲۰۱۴ در گزارش جامع هیئت بین دولتی سازمان ملل متحد، موسوم به گزارش ارزیابی پنجم و تحت عنوان چالش تغییر آب و هوایی به رسمیت شناخته شد [۱۵]. واژه لاتین Nexus به معنی فعل گره خوردن و به هم پیوستن، به گونه‌ای که باز کردن یک گره به تنهایی ممکن نباشد است. به کارگیری این واژه توسط دانشگاه سازمان ملل متحد در سال ۱۹۸۳ در برنامه همبست غذا، انرژی فراگیر شد [۱۶]. قبل از آن از این واژه در ادبیات پزشکی، اقتصاد و سیاست استفاده می‌شد [۱۷]. اما از دهه ۱۹۷۰، دیدگاه ((بررسی چرخه زندگی^۱) تحت عنوان ((چرخه زندگی انبار^۲) در میان صاحبان صنایع رونق گرفت. این دیدگاه در گزارشی در کنفرانس جهانی انرژی سال ۱۹۶۳ مطرح شد.

چرخه زندگی انبار به این معنی است که تولید یک واحد محصول صنعتی چه مقدار انرژی و مواد اولیه مصرف می‌کند. در نهایت، با پررنگ شدن چالش پسماندهای جامد در دهه ۱۹۹۰ این روش بررسی چرخه زندگی در استاندارد ۱۴۰۰۰ ایزو به عنوان یک روش شاخص مقایسه فرآیندها گنجانده شد [۱۸]. در سال ۱۹۹۶، واژه آب مجازی ابداع و معرفی شد. آب مجازی به مقدار آب مصرف‌شده برای تولید یک واحد از یک محصول می‌گویند [۱۹]. در سال ۲۰۰۳، مفهوم آب مجازی در پروتکل کیوتو در پی موضوع چالش جهانی امنیت آب مطرح شد و در ادبیات همبست آب، غذا به شدت مورد توجه قرار گرفت [۲۰، ۲۱]. در نهایت اندیشه همبست اولین بار توسط گردهمایی اقتصاد جهانی در سال ۲۰۱۱ برای ترویج پیوندهای جدایی‌ناپذیر میان استفاده از منابع برای تامین حقوق بنیادی و جهانی امنیت غذا، آب و انرژی، مطرح شد. این گردهمایی با هدایت اصل ادغام مدیریت و حاکمیت در بخش‌ها و مقیاس‌ها، بیان داشت که رویکرد همبست می‌تواند امنیت آب، انرژی و غذا را هم‌زمان بهبود بخشد و در عین حال از انتقال به یک اقتصاد سبز حمایت کند [۲۲]. به علاوه در این گردهمایی، چهارچوب همبست از منظر امنیت پایدار (امنیت پایدار آبی انرژی و غذایی) ارائه شد [۲۳، ۲۴]. در نهایت در گزارش سال ۲۰۱۵ هیئت بین دولتی سازمان ملل متحد، اندیشه همبست را تنها راه رسیدن به ۱۷ هدف برنامه توسعه پایدار اعلام کرد [۱۵]. همچنین آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر در همین سال در گزارش انرژی‌های تجدیدپذیر در همبست آب، غذا و انرژی، به کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر را به عنوان بهترین راه کار همبست معرفی و بررسی کرده است [۲۵]. در ادامه انواع چهارچوب‌ها، روش‌ها و محدوده‌های همبست بیان شده است.

^۱ Life Cycle Assessment

^۲ Life Cycle Inventory

۲-۱-۱- چارچوب‌های همبست

مفهوم همبست در پی درک تعامل‌های بین اجزای اصلی آن توسعه یافته است. همان‌طور که اشاره شد، نگرش همبست از بررسی پیوند غذا و انرژی شروع شد. سپس آب و محیط زیست به این پیوند اضافه شدند و امنیت آب، غذا و انرژی در کنار حفظ محیط زیست به عنوان حقوق بنیادی بشر شناخته شد [۲۲]. محیط زیست با عنوان‌هایی مانند خاک، تغییر آب و هوا یا زیست‌بوم، در همبست‌ها ظاهر شد [۲۶-۲۸]، اما محیط‌زیست شامل تمامی این اجزا است. این دیدگاه، ممکن است ساده‌تر از دیدگاه کلی محیط‌زیست باشد، اما توجه به یکی از این اجزا، اجزای دیگر را از دید پنهان می‌کند. در ادامه این بخش، به تعامل بین اجزای اصلی آب، محیط‌زیست، غذا و انرژی پرداخته شده است. سپس همبست‌های سه جزئی و چهار جزئی عنوان شده است. در آخر همبست چهار جزئی و دیدگاه حتمی نسبت به آن شرح داده شده است. در شکل ۲ انواع همبست‌ها از نظر چارچوب نشان داده شده است.



شکل ۲: انواع همبست‌ها از نظر چارچوب

۲-۱-۱-۱- همبست‌های دو جزئی

هر دو جزء همبست با یک‌دیگر رابطه‌ای متقابل و دوسویه دارند. در ادبیات مربوط به همبست، این رابطه به‌عنوان هم‌ارزی نامیده می‌شود [۲۹]. هم‌ارزی به این معنی است که بخش اول به‌گونه‌ای بر بخش دوم و بخش دوم به شیوه‌ای متفاوت بر بخش اول تاثیر می‌گذارد. شناسایی هرچه دقیق‌تر این روابط، به درک اهمیت آن هم‌ارزی کمک می‌کند. در ادامه، تمام شش رابطه هم‌ارزی میان اجزای همبست چهارگانه آب، محیط‌زیست، غذا و انرژی مورد بررسی قرار گرفته است.

آب مایه حیات است. این چهار کلمه به‌طور خلاصه رابطه آب و محیط‌زیست را نشان می‌دهد. میزان و کیفیت آب، هویت زیست‌بوم را مشخص می‌کند. هم‌چنین میزان بارش را نیز محیط‌زیست تعیین می‌کند [۳۰]. از ابتدا انسان منابع آب شیرین را از محیط‌زیست برای آشامیدن، کشاورزی و مصارف دیگر برداشت کرده است. برداشت آب از طریق استخراج آب‌های زیرزمینی، نمک‌زدایی آب دریا و سایر روش‌ها به‌طور مستقیم بر محیط‌زیست تاثیر می‌گذارد. از طرفی، تاثیر منفی دیگر رابطه آب و محیط‌زیست، ورود فاضلاب انسانی و صنعتی به آب‌های طبیعی است [۳۱].

به‌طور میانگین ۹۰ درصد مصرف آب توسط بشر، مربوط به بخش کشاورزی است [۳۲]. به‌علاوه فراوری مواد غذایی به مصرف آب فراوانی نیاز دارد [۳۳].

انرژی برق‌آبی، خنک‌سازی سیال عامل سیکل‌های حرارتی تولید برق و استفاده از آب در پالایش سوخت‌های فسیلی، نشان‌دهنده شدت بالای آب مجازی در ردپای انرژی است. از طرفی انتقال (پمپاژ) آب‌های سطحی و زیرزمینی، تصفیه آب، نمک‌زدایی آب، توزیع آب تا محل مصرف‌کننده و گرمایش آب در مرحله نهایی مصرف آب، نشان‌دهنده شدت بالای انرژی مجازی در ردپای آب است. این رابطه در مدیریت سامانه‌های آب‌رسانی و انرژی از دیرباز موردتوجه بوده و پژوهش‌های زیادی در این زمینه انجام شده است [۳۴، ۳۵].

چالش‌های محیط‌زیستی، یکی از مهم‌ترین علت کشاورزی دیم است. به‌علاوه پتانسیل جذب کربن محصول‌های کشاورزی، ردپای زمین مجازی در اقتصاد غذا، آلودگی‌های ناشی از کودهای شیمیایی و مقصد نهایی زباله‌های غذایی در طبیعت نشان‌دهنده اهمیت رابطه غذا و محیط‌زیست است [۳۶، ۳۷].

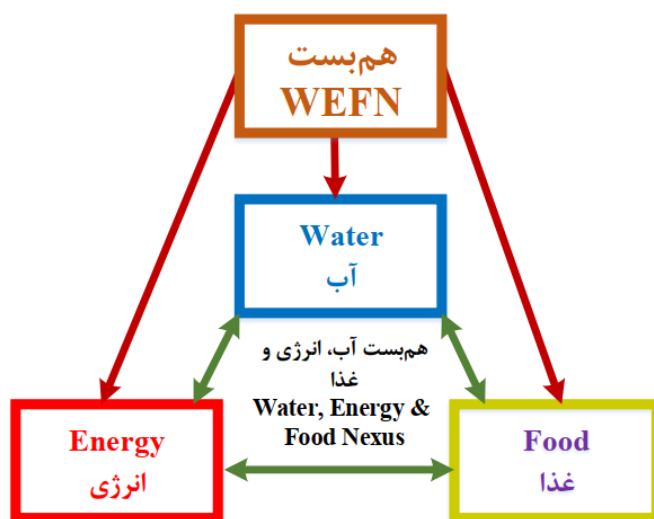
انرژی چه از نوع تجدیدپذیر و چه تجدیدنپذیر تحت تاثیر محیط‌زیست است و بر آن تاثیر می‌گذارد؛ اما رابطه بین انرژی‌های تجدیدپذیر و محیط‌زیست دوستانه‌تر است [۲۶]. محیط‌زیست تعیین‌کننده شدت نیاز به تصفیه و تهویه مطبوع است. هم‌چنین بدون نیاز به تبدیل انرژی، محیط‌زیست منبع استفاده پسیو از انرژی است [۳۸]. از طرف دیگر، گرمای ناشی از تبدیل انرژی، درنهایت در محیط‌زیست رها می‌شود. تبدیل انرژی سنتی با انتشار دی‌اکسیدکربن همراه است و آلودگی‌های شیمیایی دیگری برای محیط‌زیست به همراه دارد [۳۹].

همان‌طور که گفته شد رابطه انرژی و غذا از اولین روابطی است که با عنوان همبست در دانشگاه سازمان ملل متحد مطرح شده است. شدت مصرف انرژی در پمپاژ آب آبیاری کشاورزی، گرمایش گلخانه‌ها، فراوری مواد غذایی و حتی گرم کردن نهایی غذا، نشان‌دهنده ردپای انرژی مجازی در غذا است [۴۰]. از طرف دیگر با شروع قرن بیست و یکم، ۳۰ درصد محصول‌های کشاورزی در فن‌آوری انرژی زیستی استفاده شده است [۳۲]؛ ازاین رو غذا و انرژی تقابل تنگاتنگی در استفاده از زمین، اقتصاد و معیشت بشر پیدا کرده‌اند.

۲-۱-۱-۲- انواع همبست سه جزئی و چند جزئی

اضافه شدن یک جزء دیگر به همبست دوجزئی و تشکیل یک همبست سه گانه، بعد جدیدی از پیچیدگی روابط همبست را آشکار می کند. در همبست های بیش از دوجزئی، رابطه هم ارزی شامل مسیر می شود. این به این معنی است که جزء یکم در یک حالت به صورت مستقیم بر جز دوم تاثیر می گذارد و در حالت دیگر جزء سوم متأثر از جزء یکم، بر جزء دوم تاثیر می گذارد. همبست «آب، محیط زیست و انرژی» و همبست «آب، غذا و انرژی» در پژوهش ها و گزارش های جوامع علمی و بین المللی بیشتر مورد توجه قرار گرفته اند [۳]. سامانه هایی که در چارچوب همبست آب، محیط زیست و انرژی می گنجند، شامل سامانه های آب رسانی و تصفیه فاضلاب و سامانه های انرژی است [۴۱]. مصرف انرژی و میزان انتشار گازهای گلخانه ای در سامانه های آب رسانی، به عامل های مختلفی مانند منبع آب، کیفیت آب و شرایط جغرافیایی بستگی دارد [۴۲]. از طرفی، تولید برق نه تنها یکی از بزرگ ترین منابع انتشار گازهای آلاینده است، بلکه دومین مصرف کننده آب جهان نیز هست. نیروگاه های با سوخت زغال سنگ، ۶۰ درصد مصرف آب در بخش تولید برق را تشکیل می دهند. همچنین این همبست بسیار مناسب یک نگرش صحیح در ممیزی انرژی، آب و انتشار گازهای آلاینده و گلخانه ای در صنعت است. سامانه هایی که در چارچوب همبست آب، غذا و انرژی (شکل ۳) می گنجند، شامل مدیریت استفاده از سدها و منابع آب جاری و زیرزمینی و تقابل کشاورزی برای تامین غذا و انرژی زیستی است [۴۳-۴۵].

پراکندگی در انواع چارچوب، از یک سو باعث می شود که مطالعه های انجام گرفته برای سامانه ها و فن آوری های مختلف، با یک دیگر قابل مقایسه و جمع بندی نباشند؛ و از سوی دیگر گاهی باعث می شود که یک جزء مهم از دایره همبست خارج شود. به عنوان مثال در سامانه آب رسانی، اجزای اصلی آب، انرژی و محیط زیست در نظر گرفته شده اند که این همبست مناسب بررسی این سامانه در بخش کشاورزی نیست، زیرا باید غذا نیز جزو این همبست در نظر گرفته شود.



شکل ۳: همبست سه جزئی آب، غذا و انرژی

۲-۱-۲- محدوده‌های همبست

انسان یک موجود زنده، دارای سوخت‌وساز، هوشمند و اجتماعی است. جوامع بشری تشکیل شده از سطوح مختلف است. در کوچک‌ترین سطح این جوامع، چند نفر در کنار هم در یک خانه زندگی می‌کنند یا در یک مزرعه، کارخانه یا اداره با یک‌دیگر همکاری می‌کنند. در سطح بعدی، چند خانه، مزرعه، کارخانه یا ساختمان اداری در کنار هم شهرهای کوچک و بزرگ را تشکیل می‌دهند. گاهی ممکن است جوامع بشری در نزدیکی منابع اولیه زندگی مانند حوزه یک رودخانه به شکل چند کشور، شهر یا روستا متراکم یا پراکنده یک منطقه را تشکیل بدهند. هم‌چنین مجموعه‌ای از شهرها و روستاها در یک تقسیم‌بندی حکومتی، منطقه‌ای به نام استان یا ایالت یا کشور را تشکیل می‌دهند. کشورها در کنار یک‌دیگر قاره‌ها و پنج قاره در کنار یک‌دیگر بزرگ‌ترین جامعه بشری، یعنی جامعه جهانی را تشکیل می‌دهند. تمام جوامع بشری، از کوچک‌ترین تا بزرگ‌ترین آن، هویتی مشابه موجود زنده (انسان) دارند و دارای سوخت‌وساز هستند. این تفکر در سال ۱۹۶۵ در پژوهشی به نام «سوخت‌وساز شهرها» توسعه یافته است [۴۶].

مدل‌سازی و ارزیابی راه‌کارها در نگرش همبست، در محدوده‌های مختلف انجام می‌گیرد. به‌عنوان مثال در سال‌های اخیر، ایده اصلاح الگوی مصرف در سطح ساختمان در ادبیات انرژی و معماری تحت عنوان‌هایی مانند خانه انرژی خالص صفر^۱ و خانه انرژی خالص نزدیک به صفر^۲ توسعه یافته است. در شکل متعارف، این پژوهش‌ها ترکیبی از راه‌کارهای کاربردی مانند انواع برداشت‌کننده‌های انرژی تجدیدپذیر، انواع ذخیره‌سازهای انرژی، انواع حامل‌های انرژی، بهره‌وری از انرژی پسیو، فضا، نما و پشتیبان سبز و استفاده مجدد از آب خاکستری را در چارچوب همبست ارزیابی و مدل‌سازی شده‌اند [۳۶].

در میان محدوده‌های در نظر گرفته شده در پژوهش‌های همبست، دو محدوده شهری و منطقه‌ای حوزه منابع، بیشتر مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفته است. دلیل این محبوبیت، تفاوت معنی‌دار سرانه مصرف و سرانه تولید در این دو محدوده است. شهرها، اغلب منابع آب، غذا و انرژی را از خارج مرزهای فیزیکی خود به دست می‌آورند و اثر زیست‌محیطی را ایجاد می‌کنند و فراتر از این مرزها گسترش می‌دهند [۴۶].

از طرف دیگر در جوامع انسانی، حوزه منابع، کم‌ترین سهم مصرف و بیشترین سهم تولید را دارند. هم‌چنین تناسب مفهوم مدیریت یک‌پارچه منابع آب در ترکیب با مفهوم همبست یکی دیگر از دلایل محبوبیت ارزیابی این محدوده در پژوهش‌ها است [۴۶]. تفکر مدیریت یک‌پارچه منابع آب، زاویه دید یک‌بعدی از دیدگاه منابع آب دارد؛ اما تفکر همبست سه جزئی و چهار جزئی، در حالت ایده‌آل دارای زاویه دید جمعی است. زاویه دید جمعی به معنای پایش سامانه از دیدگاه اجزا اصلی آب، محیط‌زیست، غذا و انرژی و اجزا فرعی زمین، اقتصاد و معیشت به گونه متوازن و هم‌زمان است [۴۷]. در تفکر همبست تاثیر سیاست، اقتصاد و معیشت جامعه با یک وزن و باهدف حداقل کردن وابستگی منابع (هم‌ارزی‌ها) و حداکثر کردن هم‌افزایی‌ها در مرزهای حکومتی (شهر، استان، ایالت و

^۱ Net zero energy building

^۲ Nearly zero energy building

کشور) ارزیابی و سیاست‌ها و استراتژی‌های توسعه پایدار برگزیده می‌شوند. در این تفکر، توسعه پایدار در گرو افزایش بهره‌وری و عدالت و کاهش هدررفت است [۲۹].

پژوهش‌های مفهومی همبست در محدوده‌های حکومتی منجر به اخذ سیاست‌های منزوی می‌شود که باعث غفلت از هدف اصلی یعنی توسعه پایدار می‌شود [۴۸]. ریشه این چالش را می‌توان در پیچیدگی جوامع بشری یافت. عواملی مانند اقتصاد و معیشت باعث ایجاد رابطه پیچیده‌ای بین جوامع می‌شود [۴۴]. انواع محدوده‌های همبست در شکل ۴ ارائه شده است.



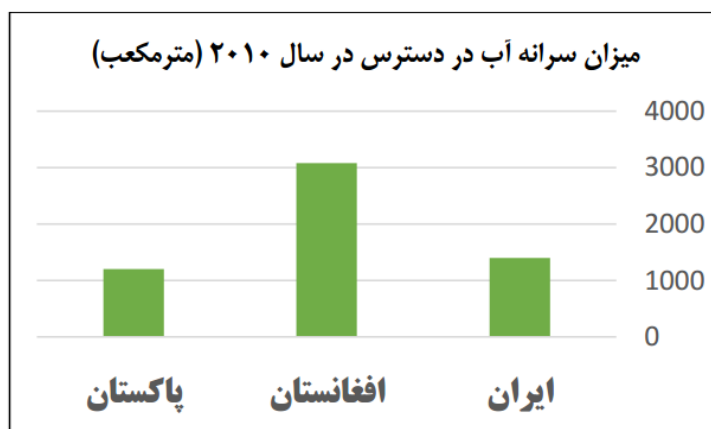
شکل ۴: انواع محدوده‌های مطالعه همبست

۲-۲- نقش همبست در سیاست

کشورهای مختلف، پتانسیل‌ها و نیازهای متفاوتی دارند و لزوماً مرزهای سیاسی بشرساخت به این تفاوت‌ها و نیازهای مشترک توجهی نداشته است. اتخاذ رویکرد همبست در نهایت این امکان را فراهم می‌آورد که این کشورها بتوانند با استفاده از منافع مشترک تعریف شده به بازتعریف مناقشات خود بپردازند و مناسبات جدیدی میان یکدیگر تعریف کنند. تدوین استراتژی در مراودات هیدروپلیتیکی با رویکرد همبست به هر کشور این فرصت را می‌دهد که به تولید تخصصی کالاها یا خدماتی بپردازد که از منظرهای مختلف شرایط مناسب آن را دارد. در نهایت، کشورهای ساحلی حوضه آبریز فرامرزی میتوانند با تبادل فرصت‌های تخصصی تولید شده در بخش‌های مختلف شامل انرژی، کشاورزی، خدمات و غیره، وابستگی و تعاملات پایداری را میان خود ایجاد نمایند و فضای بیشتری برای چانه‌زنی بوجود آورند.

روابط سیاسی بین ایران و افغانستان را می‌توان به عنوان یک نمونه از اهمیت همبست در سیاست و روابط بین دو کشور دانست. کشور افغانستان در منطقه امنیتی آسیا، یکی از ضعیف‌ترین واحدهای سیاسی و حاکمیتی است. در بعد اقتصادی، این کشور به شدت وابسته به کمک‌های خارجی است. چنین کشوری که میان کشورهای قدرتمند قرار گرفته است، نیاز به یک ابزار استراتژیک مانند آب دارد تا بتواند در مذاکرات و چانه‌زنی‌ها از آن بهره گیرد. این کشور در صدد است تا از تنها مؤلفه‌ای که در مقابل ایران برتری دارد، مسأله آب، بیشترین بهره‌ی سیاسی را ببرد.

بنابر برآوردهای ارائه شده توسط وزارت انرژی و آب افغانستان در سال ۲۰۱۴، سرانه میزان آب در دسترس در سال ۲۰۱۰ در این کشور حدود ۳۰۸۰ متر مکعب بوده است که این میزان در حوضه هیرمند ۵۳۷۳ متر مکعب بوده است. میزان سرانه آب در دسترس در افغانستان در مقایسه با سرانه آب در دسترس با ایران ۱۴۰۰ و پاکستان ۱۲۰۰ متر مکعب، قابل توجه است.



شکل ۵: میزان سرانه آب در دسترس در کشورهای ایران، افغانستان و پاکستان

از طرفی کشور افغانستان در زمینه انرژی شرایط بسیار وخیمی دارد. در خصوص امنیت انرژی در افغانستان ذکر این نکته ضروری است که تنها حدود ۳۰ درصد از مردم افغانستان به برق دسترسی دارند. حدود ۲۲ درصد از مصرف برق افغانستان (از کل ۳۰ درصد دسترسی به برق در افغانستان) از تولید داخل این کشور و بیش از ۷۸ درصد از انرژی برق افغانستان از طریق واردات از کشورهای دیگر تأمین می‌شود. دولت افغانستان در صدد است که با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به ویژه تولید انرژی برقابی ۹۵ درصد از نیاز خود را تولید نماید که این به‌طور مستقیم بر کنترل منابع آب فرامرزی این کشور اثرگذار است. از آنجایی که تقریباً تمام رودخانه‌های بزرگ این کشور با کشورهای مجاور مشترک هستند، کنترل آب در افغانستان به واسطه ساخت سدهای تولیدکننده انرژی برقابی، میتواند بطور جد امنیت آبی کشورهای همجوار با آن را تحت تأثیر قرار دهد.

انتقال انرژی از ایران میتواند به عنوان یک استراتژی مناسب برای همبست مسائل آب و انرژی در سیاستگذاری‌های کلان روابط دو کشور ایران و افغانستان قرار گیرد. برتری دیگر ایران دسترسی به آب‌های آزاد است. با توجه به رشد تولید ناخالص داخلی افغانستان، این کشور طی سالهای اخیر نیاز روزافزون به ارتباط بیشتر با دنیای اطراف دارد و از این رو راههای ارتباطی آن با سایر کشورها از اهمیت دو چندانی برخوردار خواهد بود. بنابراین ایجاد راهکاری تحت عنوان مدل همبست آب، انرژی و ترانزیت می‌تواند بهینه‌ترین حالت برای استفاده از منابع را بین دو کشور فراهم کند.



شکل ۶: برخی از نیازهای دو کشور ایران و افغانستان برای همکاری در راستای شکل‌دهی به تعاملات پایدار [۱۲]

فصل ۳: مدل سازی ها و پلتفرم های توسعه مدل

۳-۱- چالش‌های مهم مدل همبست

چالش‌های مهم برای مدلسازی و در نهایت بهینه‌سازی WEFN در سه حوزه وجود دارند:

- (۱) چالش‌های چند مقیاسی (از لحاظ مقیاس زمانی و مکانی)
- (۲) چالش با تعریف مناسب مرز سیستم (در نظر گرفتن سیستم با اثرات اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی)
- (۳) چالش‌های مرتبط با ذینفعان متعدد و اهداف متفاوت و اغلب رقابتی [۴۴]

۳-۲- چارچوب ایجاد یک مدل همبستی آب، انرژی، غذا و محیط زیست

برای ایجاد یک مدل نکسوس گام‌های مختلفی وجود دارد که باید طی شود تا در نهایت به یک راه‌حل منتهی شود. اولین گام مطالعه و گردآوری مقالات و کتب مربوط به بخش‌های آب، انرژی، غذا و محیط زیست است. در این گام می‌توان از تجربه سایر کشورها که قبلاً در این زمینه کار کرده‌اند استفاده نمود. بعد از شناخت پیدا کردن از آخرین راهکارهای نکسوس، در گام بعدی مرزهای سیستم مورد مطالعه مشخص می‌شوند و اطلاعات مربوط به این حوزه در بخش‌های آب-انرژی-غذا و محیط‌زیست گردآوری می‌شود. در گام سوم با استفاده از داده‌های موجود، مدل‌سازی بخش تقاضا و عرضه هر یک از بخش‌ها صورت می‌گیرد و نهایتاً این مدل‌ها در قالب نکسوس در کنار یک‌دیگر قرار گرفته و مدل نهایی ارائه می‌شود. بعد از این گام می‌توان با طرح سناریوهای مختلف خروجی‌هایی که سیستم می‌تواند داشته باشد مورد ارزیابی قرار داد. دیاگرام شکل ۷ چارچوب کلی ایجاد این مدل همبستی را مرحله‌به‌مرحله نمایش می‌دهد. در ادامه این فصل به توضیح پلتفرم‌های WEAP^۱ و LEAP^۲ پرداخته شده است.

^۱ Water Evaluation and Planning System

^۲ Long-Range Energy Alternatives Planning System

چارچوب ایجاد یک مدل نکسوس آب-انرژی-غذا-محیط زیست					
بررسی و شناخت حوزه های آبریز منطقه		ترسیم سیستم مرجع آب-انرژی-غذا حوزه و مشخص کردن مرز سیستم یکپارچه		گردآوری و بررسی مطالعات انجام شده در ارتباط با آب-انرژی-غذا و محیط زیست داخلی و سایر کشورها	
گردآوری و پردازش داده های غذا	گردآوری و پردازش داده های انرژی	گردآوری و پردازش داده های محیط زیست	گردآوری و پردازش داده های آب		
طراحی و توسعه مدل غذا-محیط زیست		طراحی و توسعه مدل انرژی-محیط زیست		طراحی و توسعه مدل آب-محیط زیست	
مدلسازی تقاضای غذا	مدلسازی تقاضای انرژی	مدلسازی عرضه انرژی	مدلسازی تقاضای آب	مدلسازی عرضه آب	
اتصال مدل های انرژی-محیط زیست و آب-محیط زیست و غذا از قسمت تولباکس NEXUS					
طرح و مدلسازی سناریو مرجع و اجرای مدل یکپارچه و استخراج و تصحیح نتایج در سناریو مرجع					
طراحی سناریوهای محتمل افزایش کارایی سیستم انرژی و سیستم آب و غذا و کاهش انتشارات جوی، توسعه و برنامه ریزی			تحلیل هزینه فایده و راهکارهای بهبود		

شکل ۷: چارچوب ایجاد یک مدل همبست آب، انرژی، غذا و محیط زیست

۳-۳- شاخص های بهره‌وری

یکی از روش های بررسی اثر آب و انرژی بر غذا، توسعه شاخص های بهره‌وری آب و انرژی است. بدین صورت که مدل آب و انرژی با توجه به توابع هدف و پلتفرم های موجود توسعه داده می شوند و در نهایت میزان آب و انرژی در دسترس برای محاسبه شاخص ها استفاده می شود.

۳-۳-۱- شاخص بهره‌وری آب

بر اساس این شاخص، میزان عمل کرد گیاه (تن در هکتار) بر میزان آب تحویلی به گیاه (مترمکعب در هکتار) در هر کدام از شبکه های آبیاری محاسبه می شود:

$$WP_t = \frac{Y_{c,t}}{w_{c,t}}$$

که در آن WP_t شاخص بهره‌وری آب، $Y_{c,t}$ عمل کرد گیاه c در زمان t (تن در هکتار) و $w_{c,t}$ میزان آب کاربردی در واحد هکتار برای گیاه c در زمان t (مترمکعب در هکتار) می باشد.

۳-۳-۲- شاخص بهره‌وری انرژی

بر اساس این شاخص، میزان عمل کرد گیاه (تن در هکتار) بر اثر میزان انرژی مصرفی محاسبه می شود:

$$EP_t = \frac{Y_{c,t}}{E_{c,t}}$$

که در آن EP_t شاخص بهره‌وری انرژی، $Y_{c,t}$ عمل کرد گیاه c در زمان t (تن در هکتار) و $E_{c,t}$ میزان انرژی مصرفی در واحد هکتار برای گیاه c در زمان t (مترمکعب در هکتار) می‌باشد.

۳-۳-۳- شاخص ترکیبی همبست آب، غذا و انرژی

این شاخص به تصمیم‌گیرنده در مورد کارایی و اثربخشی سیاست مدیریتی مورد نظر طبق دیدگاه آب، غذا و انرژی کمک خواهد کرد. شاخص ترکیبی پیوند آب، غذا و انرژی طبق رابطه تعریف شده است:

$$WFENI_t = \frac{\sum_{i=1}^n w_i X_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

$$X_i = \frac{Max(x_i) - x_i}{Max(x_i) - Min(x_i)}$$

$WFENI_t$ شاخص ترکیبی پیوند آب، غذا و انرژی، n تعداد شاخص‌های Nexus، w_i وزن در نظر گرفته شده برای هر شاخص، x_i مقدار واقعی شاخص مورد نظر، X_i شاخص نرمال شده و $Max(x_i)$ و $Min(x_i)$ بیشترین و کمترین مقدار شاخص مورد نظر می‌باشد.

۳-۴- مدل‌سازی ریاضی

علاوه بر شاخص‌های بهره‌وری که در بالا توضیح داده شد، برخی مقالات سناریوهای خود را بر اساس توابع هدف اقتصادی و محیط‌زیستی که خود توسعه داده‌اند، بررسی می‌کنند. روش کار یکی از این مقالات در ادامه توضیح داده شده است.

۳-۴-۱- تابع هدف و محدودیت‌ها از بعد اقتصادی

از منظر اقتصادی هزینه کل سیستم می‌بایست به حداقل برسد. این هزینه سیستم شامل مجموع هزینه تأمین انرژی، تولید برق، تأمین آب و تولید مواد غذایی می‌شود. رابطه زیر، یک تابع هدف اقتصادی را نشان می‌دهد.

$$\min C_T = W_1 C_{Energy} + W_2 C_{elec-gen} + W_3 C_{water} + W_4 C_{food}$$

در رابطه فوق C_T هزینه کل، C_{Energy} هزینه‌های تأمین انرژی برای تولید برق (که خود شامل هزینه‌های انرژی تجدیدپذیر و غیرقابل تجدیدپذیر در نیروگاه‌های مختلف در دوره برنامه‌ریزی است)، $C_{elec-gen}$ هزینه‌های تولید برق (شامل مجموع هزینه‌های ثابت نیروگاه‌ها و هزینه‌های عملیاتی نیروگاه‌ها در دوره برنامه‌ریزی است) و C_{Water}

هزینه تأمین آب می‌باشد، که خود به دو دسته هزینه‌های تأمین آب برای تولید انرژی و هزینه‌های تأمین آب برای تولید غذا تقسیم می‌شود. هزینه‌های تأمین آب برای تولید انرژی شامل مجموع هزینه‌های تأمین آب زیرزمینی (شامل پمپاژ، جمع‌آوری و انتقال) مجموع هزینه‌های تأمین آب سطحی (شامل جمع‌آوری و انتقال) به‌علاوه مجموع هزینه‌های آب بازیافتی است و مجموع هزینه‌های تأمین آب برای تولید غذا شامل مجموع هزینه‌های تأمین آب زیرزمینی (شامل پمپاژ، جمع‌آوری و انتقال)، مجموع هزینه‌های تأمین آب سطحی (شامل جمع‌آوری و انتقال) می‌باشد. C_{food} مجموع هزینه‌های تولید غذا (شامل مجموع هزینه‌های تولید، بسته‌بندی، فرآوری انواع محصولات زراعی، باغی، دامی و شیلات در دوره برنامه‌ریزی است). W وزن هر هدف را نشان می‌دهد که مجموع وزن‌ها باید برابر یک باشد.

محدودیت‌های زیادی را برای این تابع هدف می‌توان در نظر گرفت، از جمله توازن جرمی سوخت‌های فسیلی، محدودیت‌های موجودیت انرژی فسیلی، تقاضای انرژی برای تولید مواد غذایی، تقاضای انرژی برای جمع‌آوری، تصفیه و تحویل آب، محدودیت‌های تقاضای برق، محدودیت‌های تقاضای آب برای تولید مواد غذایی، محدودیت‌های تقاضای آب برای تولید برق، محدودیت‌های دسترسی به منابع آب محدودیت‌های تقاضای غذا و ... می‌باشد.

۳-۴-۲- تابع هدف و محدودیت‌ها از بعد زیست‌محیطی

اهداف زیست‌محیطی شامل افزایش کیفیت فاضلاب ورودی از واحدهای شهری و صنعتی به اکوسیستم یا به عبارت دیگر کاهش ردپای آب خاکستر و حفظ جریان‌های آب موردنیاز محیط‌زیست در نظر گرفته شده است.

$$\min E = W_1 E_{EnvDeficit} + W_2 E_{GWF}$$

در رابطه فوق $E_{EnvDeficit}$ بیان‌گر مقدار کمبود جریان‌های آب لازم برای محیط‌زیست و E_{GWF} بیان‌گر ردپای آب خاکستری است. از نظر محدودیت، مقدار کمبود جریان‌های محیط‌زیست باید کم‌تر از مقدار جریان‌های مورد نیاز محیط‌زیست باشد.

۳-۵- پلتفرم‌های توسعه مدل

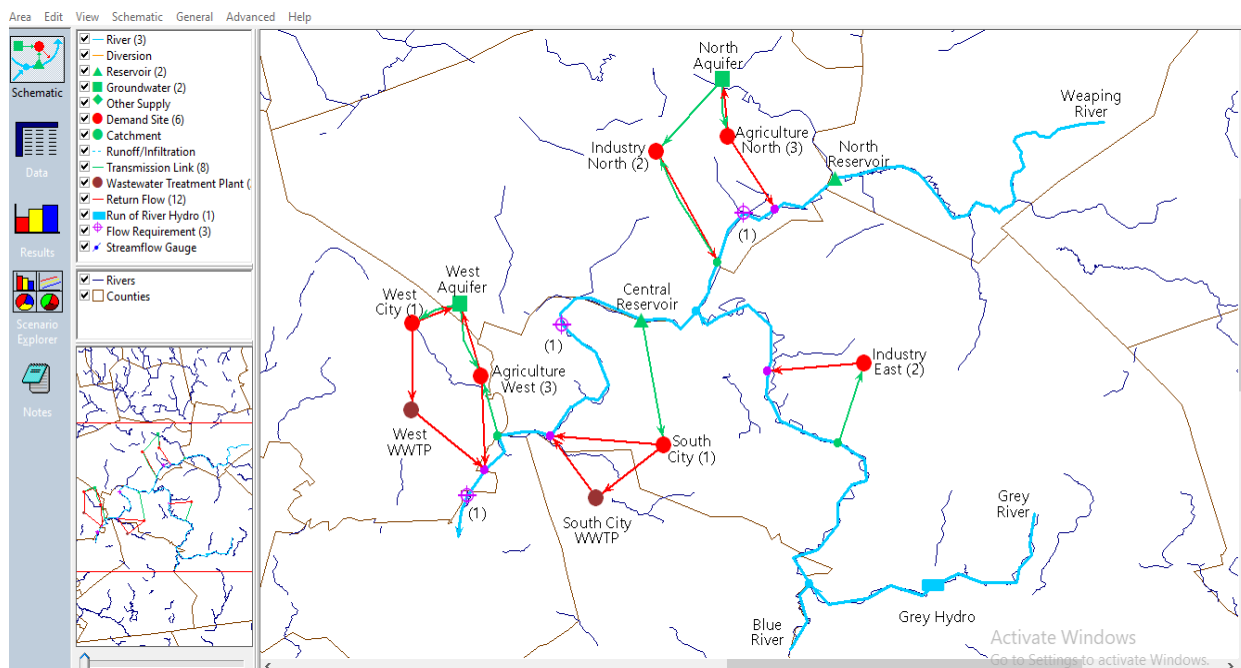
پلتفرم‌های LEAP و WEAP بهترین ابزار برای طراحی و توسعه مدل‌های Nexus می‌باشد. اولین مدل همبست مقیاس بزرگ برای استان خوزستان با همکاری پژوهشگاه نیرو محقق شد که علیرغم نخستین بودن، دارای کارکرد قابل قبولی برای برنامه‌ریزی ارزیابی راه‌حل‌ها بوده است.

- مدل برنامه‌ریزی و ارزیابی منابع آب WEAP (Water Evaluation and Planning System)

یک پلتفرم مدل‌سازی است که قادر به ارزیابی یک پارچه‌ای از اقلیم، هیدرولوژی، کاربری اراضی، تاسیسات آبیاری و اولویت‌های مدیریت آب حوضه آبریز می‌باشد. ابزار WEAP با پشتیبانی سازمان ملل، توسط SEI^۱ طراحی و ساخته شده است و از سابقه توسعه و کاربرد ۳۵ ساله برخوردار است. این نرم افزار کاملاً اعتبارسنجی شده و از نظر علمی و فنی مورد تأیید معتبرترین نهادهای علمی مرتبط می‌باشد و از جمله پرکاربردترین نرم‌افزارها در حوزه برنامه‌ریزی آب می‌باشد. ویژگی‌های منحصر به فرد این نرم‌افزار عبارتند از:

- ✓ امکان مدل‌سازی در سطح حوزه آبریز، استانی، ملی و بین‌المللی سیستم آب
 - ✓ مدل‌سازی GIS، اینترفیس گرافیکی برای سوار کردن اجزای سیستم عرضه و تقاضای آب
 - ✓ شبیه‌سازی فیزیکی عرضه و تقاضای آب کشور
 - ✓ مدل‌سازی و شبیه‌سازی از طریق متغیرهای کاربر آفرین، معادلات مدل‌سازی و اتصال به نرم‌افزارهای داده‌پرداز نظیر Excel، برنامه‌نویسی از طریق زبان‌های VB و Java Script و اتصال به سایر مدل‌ها
 - ✓ قابلیت‌های مدیریت سناریو
 - ✓ ماژول‌های آب زیرزمینی، کیفیت آب، سدهای آبی و تولید برق آبی و انجام تحلیل‌های مالی
- مدل WEAP از یک مدل برنامه‌ریزی خطی استاندارد برای حل مسائل تخصیص آب در هر گام زمانی استفاده می‌کند که تابع هدف آن حداکثر کردن درصد تامین نیازهای مراکز تقاضا با توجه به اولویت عرضه و تقاضا، تعادل جرمی و سایر قیود می‌باشد. تمامی قیود به طور متناوب برای هر گام زمانی و با توجه به اولویت عرضه و تقاضا، تعریف می‌شود. مدل WEAP در هر گام زمانی معادلات تعادل جرمی آب را برای هر گره و شاخه محاسبه می‌کند. شکل ۸ نمونه‌ای از محیط نرم‌افزار توسعه یافته WEAP را نمایش می‌دهد.

^۱ Software Engineering Institute



شکل ۸: محیط نرم‌افزار توسعه یافته شده برای مدل خطی WEAP

• سیستم برنامه‌ریزی گزینه‌های انرژی در بلندمدت (LEAP(Long-Range Energy Alternatives Planning System))

سیستم برنامه‌ریزی گزینه‌های انرژی در بلندمدت (لیپ)، ابزار مدل‌سازی جامع انرژی-اقتصاد-محیط‌زیست بر اساس سناریوهاست. سناریوها بر اساس چگونگی ساختار مصرف، تبدیل و تولید انرژی در منطقه یا اقتصاد خاصی تحت دامنه گسترده‌ای از گزینه‌های جمعیتی، توسعه اقتصادی، فناوری، قیمت و امثال آن طراحی می‌شوند. به خاطر ساختار داده‌های انعطاف‌پذیر، لیپ امکان تجزیه و تحلیل قدرت‌مند مشخصه‌های فناوری و جزئیات مصارف نهایی را بر اساس انتخاب کاربران فراهم می‌کند. جریان محاسبات در شکل ارائه شده است. با استفاده از نرم‌افزار لیپ، کاربران می‌توانند شبیه‌سازی ساختار داده‌های بسیار پیچیده‌ای را ایجاد نمایند. بر خلاف مدل‌های اقتصاد کلان، لیپ سعی نمی‌کند اثر سیاست‌های انرژی را بر روی اشتغال یا تولید ناخالص داخلی تخمین بزند، اگرچه این چنین ایده‌هایی امکان ساخته شدن در پیوند با لیپ را دارند. هم‌چنین، ویرایش جدید مدل‌سازی لیپ به طور خودکار ساختار بهینه مولفه‌های عرضه تحت سناریوها را تولید می‌نماید. امتیازات اصلی لیپ، انعطاف‌پذیری و کاربرد آسان آن می‌باشد، که این امکان را فراهم می‌کند تا تصمیم‌گیران به راحتی ایده مورد نظر خود را در یک محیط و بستر مجازی (که نماینده سیستم انرژی است) بدون ذخیره مدل‌های بسیار پیچیده ارزیابی نمایند. شکل ۹ محیط کاربری نرم‌افزار LEAP را نشان می‌دهد.



شکل ۹: تصویری از محیط کاربری نرم‌افزار LEAP

گستره خدمات لپ را می‌توان به اجمال در ادامه تعریف کرد: به عنوان پایگاه داده، سیستم فراگیری برای طبقه‌بندی و نگهداری داده‌ها فراهم می‌کند. به عنوان ابزار پیش‌بینی، کاربران را قادر می‌سازد که عرضه و تقاضای انرژی را در افق برنامه‌ریزی پیش‌بینی نمایند. به عنوان ابزار تجزیه و تحلیل سیاست‌های انرژی، تاثیرات فیزیکی، اقتصادی و زیست‌محیطی برنامه‌های انرژی جایگزین، سرمایه‌گذاری و اقدامات بهینه‌سازی را فراهم می‌کند. از نرم‌افزار لپ برای پیش‌بینی عرضه-تقاضا به منظور شناسایی الگوهای آتی، شناسایی پتانسیل صرفه‌جویی، ارزیابی تاثیرات زیست‌محیطی، سیاست‌های انرژی استفاده می‌شود. همچنین برای آزمودن گستره‌ای از پروژه‌ها (اعم از توسعه سیستم، تغییر ترکیب حامل‌ها، بهینه‌سازی انرژی در بخش نهایی) و برنامه‌ها و فناوری‌ها، طراحی و ارزیابی سیاست‌های انرژی و محیط‌زیست به تصمیم‌گیران یاری می‌رساند. منطق فرمولاسیون مدل‌ساز لپ بسیار ساده و مبتنی بر محاسبات سلسله‌مراتبی و سیستماتیک است.

فصل ۴: جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

۱-۴- جمع‌بندی

در این نوشتار تلاش شد تا مبانی و مفاهیم نکسوس به صورت اجمالی شرح داده شود. همان‌طور که گفته شد، با توجه به بحران‌های اخیر در زمینه رشد جمعیت و تغییرات اقلیمی، اهمیت نکسوس به صورت روزافزون افزایش می‌یابد. کشور ایران نیز به دلیل قرارگرفتن در گلوگاه اثرپذیری از تغییرات اقلیمی، با چالش‌های انرژی، آب و محیط‌زیست مواجه شده است. عمده این معضلات متأثر از نگاه بخشی به آب، انرژی و حتی در داخل خود سیستم آب و سیستم انرژی می‌باشد. رویکرد نکسوس (همبست)، با ایجاد یک پارچگی در رویکردها، پیامدهای تصمیم در هرکدام از سیستم‌های انرژی، آب را بر محیط‌زیست، تولید غذا، امنیت انرژی، امنیت آب و اقلیم و اکوسیستم ارزیابی نموده و بهترین مکانیسم را برای تخصیص منابع ایجاد می‌نماید.

۱-۴- راه‌حلی برای چالش همبست سه‌گانه

۱-۱-۴- کشاورزی شهری و گل‌خانه‌های تاریک ارژتیک

کشاورزی شهری به‌عنوان تولید محصول در خانه یا در مناطق شهری یا اطراف شهرها تعریف می‌شود. به‌دلیل این‌که در اکثر موارد، این فعالیت‌ها غیررسمی است، توصیف آن با داده‌ها و روندهای دقیق بسیار دشوار است. هم‌چنین کشاورزی شهری از آب شهر و حتی آب‌های باز یافتی استفاده می‌کند؛ بنابراین نقش مهمی در مدیریت منابع طبیعی برای دستیابی به توسعه پایدار شهری دارد. کشاورزی شهری از منابع شهری (زمین، انرژی، زباله‌های آلی و آب) استفاده می‌کند و غذای ساکنان شهر را تامین می‌کند، کشاورزی شهری به‌شدت تحت‌تاثیر شرایط احتمالی مانند (سیاست‌ها، رقابت بر سر زمین، بازار، روند قیمت و استانداردهای کیفیت) است و نقش مهمی در شرایط اجتماعی اقتصادی (تاثیر بر امنیت غذایی، فقر، سلامتی و محیط‌زیست) ساکنان شهری ایفا می‌کند. مزایای کشاورزی شهری در جدول ۱ ارائه شده است. یکی از راه‌های ایجاد امنیت پایدار غذایی، کشاورزی شهری است. راه دیگر ایجاد امنیت پایدار غذایی، به‌کارگیری انواع مختلف گل‌خانه‌های مدرن است.

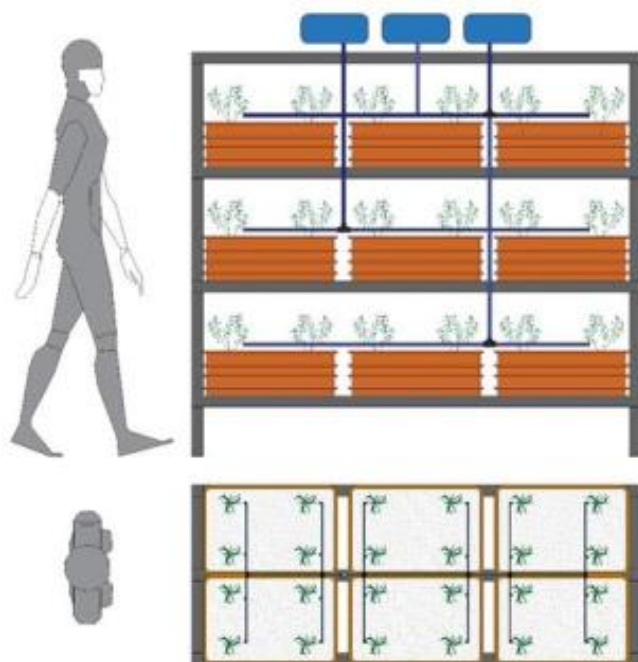
جدول ۱: مزایای کشاورزی شهری [۴۹]

مزایا	
<ul style="list-style-type: none"> * کاهش نیاز به آب * کاهش مصرف انرژی * تولید بیش تر در واحد سطح * تامین غذای سالم * کاهش رد پای کربن و تاثیر بر کیفیت هوا * کاهش نیاز به سوخت های فسیلی * فرصتی برای مناظر شهری جدید * مقاومت در برابر آفت ها و بیماری ها * مقاومت در برابر تغییر اقلیمی 	محیط زیستی
<ul style="list-style-type: none"> * افزایش امنیت غذایی * ایجاد فرصت های شغلی * رفاه * زیبایی بصری 	اجتماعی
<ul style="list-style-type: none"> * فرصت اقتصادی در شرایط کمبود زمین قابل کشت * کاهش هزینه انرژی * کاهش قیمت مواد غذایی * رشد اقتصادی جامعه 	اقتصادی

برای رفع مشکل امنیت غذا، انرژی، آب و محیط زیست، راه حلی به نام گل خانه تاریک انرژی^۱ پیشنهاد شده است. در این راه کار از یک سامانه مهندسی بسته و کنترل شده برای رشد محصول استفاده شده است. واضح است که گیاه برای رشد به نور نیاز دارد. در روش های سنتی تولید محصول، نور مورد نیاز گیاه از طریق خورشید تامین می شود. نور خورشید از سه بخش فرابنفش، مرئی و مادون قرمز تشکیل شده است؛ اما گیاه برای فتوسنتز فقط به بخش مرئی تابش خورشید نیاز دارد و قسمت مادون قرمز این تابش باعث افزایش دمای گیاه، تعرق بیشتر و در نتیجه نیاز بیشتر به آب می شود. در صورتی که نور خورشید فیلتر شود و فقط بخش مرئی آن در اختیار گیاه قرار بگیرد، مصرف آب گیاه بیش از ۹۰ درصد کاهش پیدا می کند [۵۰]. در راه کار پیشنهاد شده، نور مصنوعی به گیاه تابیده می شود. طرح الگوی سامانه گل خانه تاریک انرژی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشخص است، گل خانه تاریک انرژی، یک سامانه هوشمند طبقاتی برای رشد گیاه به صورت کنترل شده در طبقه های مختلف است. در این سامانه پارامترهایی مانند دما، رطوبت هوا، رطوبت خاک، شدت نور، طول دوره

^۱ Energetic Dark Greenhouse

نوری، میزان و غلظت ماده غذایی، غلظت دی‌اکسیدکربن و اکسیژن، برای رسیدن به محصولی مطلوب کنترل می‌شود.



شکل ۱۰: طرح‌واره گل‌خانه تاریک انرژی‌تیک

- [۱] C. Zhang, X. Chen, Y. Li, W. Ding, and G. Fu, "Water-energy-food nexus: Concepts, questions and methodologies," *Journal of Cleaner Production*, vol. 195, pp. 625-639, 2018.
- [۲] National N. I. Council, *Global Trends 2030: Alternative Worlds: a Publication of the Intelligence Council*. US Government Printing Office, 2012
- [۳] H. Hoff, "Understanding the Nexus. Background paper for the Bonn2011 Nexus conference: The Water, Energy and Food Security Nexus," 2011
- [۴] H. Leck, D. Conway, M. Bradshaw, and J. Rees, "Tracing the water–energy–food nexus: Description, theory and practice," *Geography Compass*, vol. 9, no. 8, pp. 445-460, 2015
- [۵] م. میرابی and م. کرابی, "مدل سازی یکپارچه در مدیریت بهینه منابع آب، انرژی و غذا با رویکرد همبست," presented at the "پازدهمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۱۳۹۸.
- [۶] س. ز. قریشی، ح. میان آبادی، and ع. پرورش ریزی, "تحلیل ماتریس همبست تعاملات آب‌های فرامرزی در حوضه آبریز هیرمند," *تحقیقات آب و خاک ایران*, vol. 52, no. 1, pp. 273-30, ۲۰۲۱
- [۷] م. منعم، م. دلاور، and س. حسینی, "کاربرد و ارزیابی پیوند آب، غذا و انرژی (نکسوس) در مدیریت شبکه های آبیاری مطالعه موردی شبکه آبیاری زاینده رود," *مجله آبیاری و زهکشی ایران*, vol. 14, no. 1, pp. ۱۳۹۹.
- [۸] C. A. Scott, S. Vicuña, I. Blanco-Gutiérrez, F. Meza, and C. Varela-Ortega, "Irrigation and Earth efficiency and water-policy implications for river basin resilience," *Hydrology and System Sciences*, vol. 18, no. 4, pp. 1339-1348, 2014
- [۹] پ. یوسفی and ب. حصاری, "مروری بر رویکرد همبست آب - غذا - انرژی: روش ها و چالش ها," presented at the هشتمین کنفرانس ملی مدیریت منابع آب ایران، ۱۳۹۹.
- [۱۰] T. Gardner-Outlaw and R. Engelman, "Population Action International," ed: USA
- [۱۱] ع. اکرم، پیوند آب و انرژی در صنعت: مبانی، روش‌ها، و کاربردها (no. 0). دانشگاه صنعتی شریف، موسسه انتشارات علمی، ۱۳۹۷.
- [۱۲] ح. برجسته، س. ز. قریشی، and ح. میان آبادی, "تبیین کارکرد رویکرد همبست در هیدروپلیتیک آب‌های فرامرزی," *اکوهیدرولوژی*, vol. 7, no. 3, pp. 757-773, 2020
- [۱۳] K. Madani, A. AghaKouchak, and A. Mirchi, "Iran's socio-economic drought: challenges of a water-bankrupt nation," *Iranian studies*, vol. 49, no. 6, pp. 997-1016, 2016

- <https://www.fao.org> (accessed [١٤]
- E. Corbera, L. Calvet-Mir, H. Hughes, and M. Paterson, "Patterns of authorship in the [١٥]
 .IPCC Working Group III report," *Nature Climate Change*, vol. 6, no. 1, pp. 94-99, 2016
- .I. Sachs and D. Silk, "Food and energy: strategies for sustainable development," 1990 [١٦]
- A. G. Litvin-Zabal, "Quantifying the effects of light quantity and quality on culinary herb [١٧]
 .State University, 2019 physiology," Iowa
- M. A. Curran, "Environmental life-cycle assessment," *The International Journal of Life [١٨]
 .Cycle Assessment*, vol. 1, no. 3, pp. 179-179, 1996
- pp. 545- ,J. A. Allan, "Virtual water: a strategic resource," *Ground water*, vol. 36, no. 4 [١٩]
 .547, 1998
- J. A. Allan, "Virtual water-the water, food, and trade nexus. Useful concept or misleading [٢٠]
 .metaphor?," *Water international*, vol. 28, no. 1, pp. 106-113, 2003
- for sustainable S. Lundie, G. M. Peters, and P. C. Beavis, "Life cycle assessment [٢١]
 .metropolitan water systems planning," ed: ACS Publications, 2004
- W. E. F. W. Initiative, *Water security: the water-food-energy-climate nexus*. Island Press, [٢٢]
 .2012
- M. Howells *et al.*, "Integrated analysis of climate change, land-use, energy and water [٢٣]
 .strategies," *Nature Climate Change*, vol. 3, no. 7, pp. 621-626, 2013
- C. Ringler, A. Bhaduri, and R. Lawford, "The nexus across water, energy, land and food [٢٤]
 in (WELF): potential for improved resource use efficiency?," *Current Opinion
 .Environmental Sustainability*, vol. 5, no. 6, pp. 617-624, 2013
- [Online]. Available: [https://www.irena.org/publications/2015/Jan/Renewable-Energy-in-](https://www.irena.org/publications/2015/Jan/Renewable-Energy-in-the-Water-Energy--Food-Nexus) [٢٥]
[the-Water-Energy--Food-Nexus](https://www.irena.org/publications/2015/Jan/Renewable-Energy-in-the-Water-Energy--Food-Nexus)
- I. Chirisa and E. Bandaiko, "African cities and the water-food-climate-energy nexus: An [٢٦]
 agenda for sustainability and resilience at a local level," in *Urban forum*, 2015, vol. 26, no.
 .4: Springer, pp. 391-404
- A. Karabulut *et al.*, "Mapping water provisioning services to support the ecosystem–water– [٢٧]
 nexus in the Danube river basin," *Ecosystem services*, vol. 17, pp. 278-292, food–energy
 .2016
- E. Martinez-Hernandez, M. Leach, and A. Yang, "Understanding water-energy-food and [٢٨]
 .ecosystem interactions using the nexus simulation tool NexSym," *Applied Energy*, vol
 .pp. 1009-1021, 2017 ,٢٠٩
- M. Kurian, "The water-energy-food nexus: trade-offs, thresholds and transdisciplinary [٢٩]
 approaches to sustainable development," *Environmental Science & Policy*, vol. 68, pp. 97-
 .106, 2017

- S. Janzen, and V. Vannozzi Brito, "The forest–water ,E. Springgay, S. Casallas Ramirez [٣٠]
 .nexus: An international perspective," *Forests*, vol. 10, no. 10, p. 915, 2019
- M. J. Amores, M. Meneses, J. Pasqualino, A. Antón, and F. Castells, "Environmental [٣١]
 assessment of urban water cycle on Mediterranean conditions by LCA approach," *Journal
 .of cleaner production*, vol. 43, pp. 84-92, 2013
- FAO, "The water-energy-food nexus: A new approach in support of food security and [٣٢]
 .sustainable agriculture," ed, 2014
- D. Vanham, T. Mak, and B. Gawlik, "Urban food consumption and associated water [٣٣]
 resources: The example of Dutch cities," *Science of the total environment*, vol. 565, pp.
 .232-239, 2016
- P. A. Malinowski, A. S. Stillwell, J. S. Wu, and P. M. Schwarz, "Energy-water nexus: [٣٤]
 energy savings and implications for sustainable integrated water management in Potential
 urban areas from rainwater harvesting and gray-water reuse," *Journal of Water Resources
 .Planning and Management*, vol. 141, no. 12, p. A4015003, 2015
- requirements for water production, treatment, end use, reclamation, A. Plappally, "Energy [٣٥]
 and disposal," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 7, pp. 4818-4848,
 .2012
- T. Al-Ansari, A. Korre, Z. Nie, and N. Shah, "Development of a life cycle assessment tool [٣٦]
 for the assessment of food production systems within the energy, water and food nexus,"
 .*Sustainable production and consumption*, vol. 2, pp. 52-66, 2015
- Y. Virtanen *et al.*, "Carbon footprint of food—approaches from national input–output [٣٧]
 and a LCA of a food portion," *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, no. 16, statistics
 .pp. 1849-1856, 2011
- B. Kılış and Ş. Kılış, "Hydrogen economy model for nearly net-zero cities with exergy [٣٨]
 .٢٠١٨ ,١٢٢٢ .rationale and energy-water nexus," *Energies*, vol. 11, no. 5, p
- T. Sueyoshi, Y. Yuan, and M. Goto, "A literature study for DEA applied to energy and [٣٩]
 .environment," *Energy Economics*, vol. 62, pp. 104-124, 2017
- S. Sala, S. J. McLaren, B. Notarnicola, E. Saouter, and U. Sonesson, "In quest of reducing [٤٠]
 the environmental impacts of food production and consumption," *Journal of cleaner
 .production*, vol. 140, pp. 387-398, 2017
- E. Marinelli *et al.*, "Water-Energy-Food-Climate Nexus in an Integrated Peri-Urban [٤١]
 Wastewater Treatment and Reuse System: From Theory to Practice," *Sustainability*, vol.
 13, no. 19, p. 10952, 2021.
- G. Venkatesh, A. Chan, and H. Brattebø, "Understanding the water-energy-carbon nexus [٤٢]
 comparison of four city case studies and the relevant influencing :in urban water utilities
 .factors," *Energy*, vol. 75, pp. 153-166, 2014

- M. Basheer, K. G. Wheeler, L. Ribbe, M. Majdalawi, G. Abdo, and E. A. Zagona, "Quantifying and evaluating the impacts of cooperation in transboundary river basins on the Water-Energy-Food nexus: The Blue Nile Basin," *Science of the Total Environment*, vol. 630, pp. 1309-1323, 2018 [٤٣]
- D. J. Garcia and F. You, "The water-energy-food nexus and process systems engineering: A new focus," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 91, pp. 49-67, 2016 [٤٤]
- M. Li, V. P. Singh, Q. Fu, D. Liu, T. Li, and Y. Zhou, "Optimization of agricultural water–food–energy nexus in a random environment: an integrated modelling approach," *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, vol. 35, no. 1, pp. 3-19, 2021 [٤٥]
- T. Silalertruksa and S. H. Gheewala, "Land-water-energy nexus of sugarcane production in Thailand," *Journal of Cleaner Production*, vol. 182, pp. 521-528, 2018 [٤٦]
- stakeholder development of a serious game to explore the water--J. Sušnik *et al.*, "Multi energy-food-land-climate nexus: The SIM4NEXUS approach," *Water*, vol. 10, no. 2, p. 139, 2018 [٤٧]
- A. M. Hamiche, A. B. Stambouli, and S. Flazi, "A review of the water-energy nexus," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 65, pp. 319-331, 2016 [٤٨]
- L. J. Pearson, L. Pearson, and C. J. Pearson, "Sustainable urban agriculture: stocktake and opportunities," *International journal of agricultural sustainability*, vol. 8, no. 1-2, pp. 7-20, 2019 [٤٩]
- T. Kozai, "Resource use efficiency of closed plant production system with artificial light: Concept, estimation and application to plant factory," *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, vol. 89, no. 10, pp. 447-461, 2013 [٥٠]