

امکان‌سنجی به‌کارگیری مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی برای ارزیابی تصمیم‌های مبتنی بر پیوند آب - انرژی - غذا با لحاظ خسارت‌های محیط زیستی

فراز کلاه‌زری مقدم^۱، حامد کتابچی^{۲*}

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲. استادیار گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۰۸/۰۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۰۱/۱۵)

چکیده

رشد جمعیت و همراه با آن، افزایش نیازهای حیاتی، سبب به وجود آمدن مفهوم پیوند آب - انرژی - غذا و افزایش توجه به آن شده است تا بتوان با استفاده از این مفهوم، از منابع در دسترس به‌صورت بهینه استفاده کرد. یکی از مسائل مهم در استفاده بهینه از منابع که کمتر مورد توجه قرار گرفته است و به اندازه‌ای که به بحث‌های هزینه و سود پرداخته شده به آن توجه نشده، در نظر گرفتن خسارت‌های محیط زیستی است. نکته دیگر در کنار استفاده بهینه از منابع، توجه به تأمین پایدار نیازهاست تا در مدت بهره‌برداری، بخش‌های مختلف سیستم دچار اختلال نشوند. همچنین، تأثیرگذار بودن خود پیوند در تصمیم‌ها نیز مهم است، چون در صورت تأثیرگذاری اندک آن، نیازی به پیچیده کردن مدل تصمیم نخواهد بود. در مطالعه حاضر، مدل ریاضی پیوند آب - انرژی - غذا در یک منطقه مطالعاتی با دو هدف حداقل‌سازی هزینه‌ها و حداکثرسازی قابلیت اطمینان پیاده‌سازی شد و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچه‌ها، جواب‌های بهینه به دست آمد. همچنین، تأثیر در نظر گرفتن نگرش پیوند بین منابع مصرفی و تأثیر آن بر هزینه‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد در نظر گرفتن خسارت‌های محیط زیستی، بدون وضع سیاست‌های تشدید این آثار، تأثیری در تصمیم‌ها نمی‌گذارد و فقط سبب رشد هزینه‌های سیستم می‌شود. بررسی تأثیرگذاری پیوند، مشخص کرد که در نظر گرفتن پیوند، بهینه‌ترین حالت در تصمیم‌های با هدف حداقل‌سازی هزینه‌ها را دارد و سبب عملکرد بهتری در حداکثرسازی شاخص قابلیت اطمینان کلی سیستم، بدون تأثیر منفی بر سایر بخش‌ها می‌شود.

کلیدواژه‌گان: الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچه‌ها، قابلیت اطمینان، مدل ریاضی، هزینه.

مقدمه

به دلیل افزایش جمعیت و رشد اقتصادی، تقاضا برای آب، انرژی و غذا رو به فزونی است. محدودیت ذاتی این منابع نیز امکان استفاده بی حد از آنها را نخواهد داد و برای داشتن توسعه‌ای پایدار، استفاده اصولی از آنها ضروری است. هر یک از منابع آب، انرژی و غذا به طور قابل توجهی به یکدیگر وابسته‌اند و با هم تشکیل سیستمی پویا را می‌دهند و تغییرات یک بخش، تأثیر خود را بر بخش‌های دیگر می‌گذارد [۱]. در اصطلاح به این سه بخش در کنار هم پیوند یا هم‌بست آب - انرژی - غذا^۱ گفته می‌شود. هر یک از این سه بخش، علاوه بر تأثیرپذیری متقابل درون پیوند، از عوامل متعدد اقتصادی، اجتماعی، سیاسی، فناوری و محیطی در خارج پیوند نیز تأثیر می‌گیرند. مدیریت پیوند با هدف ارائه امنیت بخش‌های آب - انرژی - غذا نیاز به رویکردهای یکپارچه و یا ابزارهای تجزیه و تحلیل دارد که توانایی شناسایی تفاوت‌های میان بخش‌های مختلف، ایجاد برنامه‌ریزی مؤثر و تدوین راهبردها و سیاست‌های مدیریتی را داشته باشد [۲]. نتایج این تحلیل‌ها توسط تصمیم‌گیرندگان و ذی‌نفعان در سناریوهای تصمیم‌گیری عملی، اعمال می‌شود. نکته دیگر این است که استفاده از منابع، معمولاً با خسارت‌های محیط زیستی همراه است. خسارت‌هایی از جمله ضررهای ناشی از استفاده از کود، سموم، افت سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی و آلودگی منابع آبی زیرزمینی، آلودگی و کاهش حجم آب سطحی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در این دسته قرار دارند. از طرف دیگر، نیازهایی پایه‌ای وجود دارد که تحت هر شرایطی باید سیستم بتواند آنها را تأمین کند و در صورت عدم تأمین، پایداری سیستم دچار اختلال خواهد شد. به بیان دیگر، سود و زیان دو روی یک سکه است که باید به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی شود تا بین این دو تعادل نسبی برقرار شود. این دلیل سبب استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی برای اتخاذ تصمیم‌ها در این حوزه شده است [۳].

مدل‌های مختلفی در زمینه شبیه‌سازی پیوند آب - انرژی - غذا ارائه شده است. ولی مسئله‌ای که در ارتباط با این مدل‌ها وجود دارد، این است که این مدل‌ها توجه بیشتری به یک بخش از پیوند دارند، در صورتی که هدف از ایجاد مفهوم پیوند، نگاه یکسان به بخش‌های مختلف آن

است. همین نگاه یکسان سبب شد تا از پیاده‌سازی مدل ریاضی پیوند، به جای استفاده از مدل‌های نرم‌افزاری رایج و معطوف به یکی از بخش‌های پیوند استفاده شود [۳]. این کار سبب می‌شود تا آن‌گونه که مد نظر است به بخش‌های مختلف پرداخته شده و بر اساس الگوی مد نظر، تشریح و تعمیم آن انجام شود. در جدول ۱ خلاصه‌ای از کارهای انجام‌شده در زمینه مدل‌های پیوند آب - انرژی - غذا آورده شده است.

زانگ و وسلینوو [۳] نوعی مدل چندمتغیره اقتصادی و اجتماعی که WEFO نامیده می‌شود را معرفی کردند. هدف مدل WEFO این است که هزینه کل سیستم را به حداقل برساند. هزینه‌ها شامل مجموع هزینه انرژی تأمین‌شده، آب تأمین‌شده، تولید برق، تولید مواد غذایی و هزینه‌های کاهش گازهای گلخانه‌ای می‌شود. در مطالعه یادشده از یک منطقه با تعداد مشخص تولیدکننده و مصرف‌کننده استفاده شد و معادلات مربوط به تولید و مصرف، که همه مسائل را در قالب اقتصادی در نظر گرفته بود، بهینه شد. یوان و همکاران [۵] طی مطالعه‌ای در تایوان به بررسی پتانسیل استفاده از انرژی‌های زیستی در ارتباط با میزان تولید محصولات کشاورزی و آب در دسترس پرداختند. مطالعه یادشده، نوعی مدل بهینه‌سازی مکانی مبتنی بر پیوند آب - انرژی - غذا را پیشنهاد کرد که تجزیه و تحلیل ترکیبات بین تولید مواد غذایی، تولید انرژی زیستی و آثار محیط زیستی را بررسی می‌کند.

کارنیب [۷] طی مطالعه‌ای در لبنان، از ابزار شبیه‌سازی - بهینه‌سازی استفاده کرد. در مطالعه یادشده از Q-NEXUS که نوعی مدل ریاضی برای شبیه‌سازی پیوند است، استفاده شد. از این مدل برای دو منظور در حالت کلی استفاده می‌شود که شامل تغییر تقاضای منابع یا کاهش تلفات و تحلیل سناریوهای تغییر تکنولوژی با فناوری‌های دارای کارایی بیشتر است. تمرکز در مطالعه یادشده، روی استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی روی جریان‌های ورودی و خروجی بود تا به تصمیم‌گیری مبتنی بر پیوند آب - انرژی - غذا کمک کند. تصمیم‌ها در مطالعه یادشده از نظر انتخاب بهترین گزینه‌ها و تعیین میزان تخصیص از هر یک از بخش‌های آب - انرژی - غذا برای بخش دیگر از این سه منبع، با استفاده از خروجی Q-NEXUS بود. در مطالعه یادشده منابع آب زیرزمینی،

جدول ۱. خلاصه‌ای بر مطالعات انجام‌شده در مدل‌سازی پیوند آب - انرژی - غذا

مرجع	سال	هدف	کاربرد	بهینه‌ساز	شبیه‌ساز
[۳]	۲۰۱۷	حداقل‌سازی هزینه سیستم	منطقه مطالعاتی	زبان برنامه‌نویسی جولیا	WEFO
[۴]	۲۰۱۷	بررسی تأثیرات خشکسالی	نبراسکا در ایالات متحده	الگوریتم ژنتیک و مدل بهینه‌ساز انرژی	GIS OPTICE مدل شبیه‌ساز تولید محصول
[۵]	۲۰۱۸	تعیین توزیع مکانی محصولات و استفاده برای تولید انرژی زیستی	تایوان	بهینه‌سازی خطی	Taiwap شبیه‌ساز تغییرات اقلیمی SimaPro (برنامه ارزیابی چرخه عمر)
[۶]	۲۰۱۸	بهینه‌سازی بهره‌برداری از سد برای تعادل بین تولید انرژی و خروجی از سد هنگام سیلاب	شهر تایوان ^۱ در تایوان	الگوریتم ژنتیک چندهدفه	استفاده از منحنی‌های بهره‌برداری
[۷]	۲۰۱۷	تعیین میزان تخصیص بین بخش‌های پیوند	-	برنامه‌ای اکسلی	Q-Nexus
[۸]	۲۰۱۸	بررسی تأثیرات خشکسالی	سوئد	الگوریتم ژنتیک	GIS-OptiCE
[۹]	۲۰۱۹	حداکثرسازی قابلیت اطمینان کاربر در یک سناریوی خشکسالی	کره جنوبی و اندونزی	الگوریتم ژنتیک	WEFSiM
[۱۰]	۲۰۱۹	حداکثرسازی درآمد سیستم و حداقل‌سازی خسارت واردشده به محیط زیست	حوضه رودخانه هیبه در شمال شرق چین	-	AWEFSM
[۱۱]	۲۰۱۹	حداکثرسازی سود خالص سیستم و حداقل‌سازی خسارت واردشده به محیط زیست	شهر فوجین در مرکز چین	-	FMOP-RBI
[۱۲]	۲۰۱۹	حداکثرسازی درآمد سیستم و حداقل‌سازی خسارت واردشده به محیط زیست	شهر فوجین در مرکز چین	-	CCP ^۲
[۱۳]	۲۰۱۹	بررسی تغییرات آب‌وهوایی در آینده و تأثیر آن بر منابع و مصارف با در نظر گرفتن مفهوم پیوند آب - انرژی - غذا	شهر بروجرد استان لرستان در ایران	-	HADGEM2 Arc GIS

1. Taoyuan

2. Chance-Constrained Programming

سیستم‌ها (تفاوت درآمد و هزینه‌ها) و آثار جانبی تولید و پردازش مواد غذایی بر محیط (بیان شده به عنوان انتشار CO₂) با منطق تخصیص منابع محدود آب (از جمله آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی)، منابع انرژی (از جمله انرژی الکتریکی و انرژی فسیلی) و منابع زمین به محصولات مختلف در مناطق مختلف ایجاد کردند. این مدل برنامه‌ریزی، یک مدل چندهدفه غیرخطی است که در دسترس بودن منابع را به صورت اعداد فازی به یک چارچوب کلی تبدیل می‌کند و توانایی در نظر گرفتن طیف وسیعی از احتمالات در دسترس بودن منابع را دارد. ویکاکسونو و همکاران [۹] نوعی مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی (WEFSIM-opt) در ارتباط با پیوند آب - انرژی - غذا برای کمک به ذی‌نفعان به منظور تصمیم‌گیری آگاهانه در مورد مدیریت پایدار منابع در سطح ملی ارائه دادند. بهینه‌سازی در مطالعه یادشده با دو روش الگوریتم ژنتیک چندهدفه^۲ و الگوریتم ژنتیک تک‌هدفه^۳ به منظور به حداکثر رساندن شاخص اطمینان کاربر^۴ برای بخش‌های آب، انرژی و غذا با بهینه‌سازی شاخص اولویت و تصمیم‌گیری در خصوص تخصیص آب توسعه داده شد. لی و همکاران [۱۲] نوعی رویکرد مدل‌سازی یکپارچه را برای بهینه‌سازی پیوند آب - انرژی - غذا با هدف به حداکثر رساندن سود خالص سیستم و به حداقل رساندن آلودگی ناشی از فعالیت‌های کشاورزی برای تخصیص منابع در پیوند آب - انرژی - غذا با تأکید بر کشاورزی ارائه دادند. در مطالعه یادشده اعتقاد بر این است که عدم قطعیت‌هایی مانند تغییرات مکانی و زمانی در دسترس بودن آب و تغییرات جریان آب رودخانه به عدم اطمینان در پارامترهای مرتبط، مانند سهم آبیاری، دسترسی به انرژی، عملکرد در واحد سطح، در دسترس بودن آب‌های زیرزمینی، به دلیل روابط پیچیده اجزای پیوند آب - انرژی - غذا منجر می‌شود و نیاز به در نظر گرفتن مفهوم عدم قطعیت است. لی و همکاران [۱۱] نوعی مدل بهینه‌سازی چندهدفه فازی با فواصل زمانی تصادفی (FMOP-RBI) با عنوان WFEO-SIA برای تخصیص منابع به سوی مدیریت پایدار آب، غذا و انرژی در شرایطی که عدم اطمینان وجود دارد، ارائه دادند. هدف این مدل، به حداکثر رساندن سود کلی خالص اقتصادی (تفاوت درآمد و هزینه) و به حداقل رساندن آثار جانبی تولید مواد

سطحی و بازیافتی فاضلاب به عنوان ورودی بخش آب در نظر گرفته شدند. انواع منابع تولید انرژی، از جمله نیروگاه‌های تولید انرژی و انرژی‌های نو مد نظر قرار گرفت. همچنین، تولیدات بخش غلات به عنوان بخش غذا در نظر گرفته شد. تحقیق یادشده با هدف حداقل کردن هزینه‌های منابع مورد نیاز برای تولید مواد غذایی بیشتر انجام شد. به بیان دیگر، با تعیین بهترین تخصیص‌ها در دو بخش آب و انرژی، مقدار اضافی به دست آمده از منابع آب و انرژی بعد از رفع نیازها، به منظور تولید مواد غذایی بیشتر استفاده شد.

ین و همکاران [۶] طی تحقیقی که در کشور تایوان برای بهینه کردن تولید برق و ذخیره‌سازی نهایی مخزن انجام دادند، مخزن اصلی شهر شیمن^۱ و ۷۴۵ مخزن آب‌رسانی واقع در شهر تایوان همراه با مناطق اطراف شهری را بررسی کردند. در مطالعه یادشده نوعی طرح سه‌بعدی جامع پیشنهاد شده است که مزایای استفاده از پیوند آب - انرژی - غذا را با تلفیق بهره‌برداری مشترک کوتاه‌مدت - بلندمدت یک مخزن چندهدفه با مخزن‌های آبیاری، در پاسخ به شهرنشینی، بهینه‌سازی می‌کند. طرح شامل سه برنامه می‌شود که عبارت‌اند از: الف) بهینه‌سازی بهره‌برداری مخزن در مقیاس کوتاه‌مدت (روزانه) برای به حداکثر رساندن تولید انرژی برق‌آبی و ذخیره‌سازی نهایی مخزن در فصل‌های پر بارش، ب) شبیه‌سازی مقادیر کمبود آب در مقیاس بلندمدت (ده روزه) با در نظر گرفتن دسترسی به مخزن‌های آبیاری برای بخش‌های کشاورزی و عمومی در فصل‌های کم‌بارش و ج) ارتقای مزایای پیوند آب - انرژی - غذا در یک چشم‌انداز سالانه با تلفیق بهینه‌سازی کوتاه‌مدت و شبیه‌سازی بلندمدت در بهره‌برداری مخزن که در آن تابع هدف، تولید انرژی هیدرولیکی از تفاوت بین سطح آب مخزن و دریچه آبیگر نیروگاه برق‌آبی در نظر گرفته شد. در مطالعه یادشده بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای به حداکثر رساندن عملکرد محصول، به حداقل رساندن نیاز آب و انرژی برای آبیاری و نیز به حداقل رساندن کاربرد فصلی کود انجام شده است.

لی و همکاران [۱۰] نوعی مدل یکپارچه به نام AWEFSM برای کمک به مدیریت پایدار کشاورزی به وسیله پیوند آب - انرژی - غذا با هدف بهینه‌سازی سود خالص

2. MOGA
3. SOGA
4. User Reliability Index

1. Shihmen

روش مطالعه

روند انجام مطالعه حاضر در شکل ۱ نشان داده شده است. این مطالعه با دو هدف حداقل‌سازی هزینه‌های سیستم و حداکثرسازی قابلیت اطمینان انجام می‌شود.

بهینه‌سازی با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های سیستم

تصمیم‌گیری مبتنی بر پیوند آب - انرژی - غذا در مطالعه پیش رو برگرفته از ژانگ و وسلینوو [۳] بوده و تعمیم و بهبود پیدا کرده و در دوره‌های زمانی مشخص پایه‌ریزی شده است. برای توسعه مدل، علاوه بر انتشار گاز گلخانه‌ای، خسارت ناشی از به‌کارگیری کود^۱، سموم^۲ و خسارت ناشی از استفاده از آب زیرزمینی و آب سطحی و کاهش این منابع نیز مد نظر قرار گرفته که از آن به عنوان هزینه جبران خسارت محیط زیستی^۳ یاد می‌شود. به بیان دیگر، مجموع خسارت‌های محیط زیستی در قالب یک هزینه در نظر گرفته شده است.

تابع هدف در این مسئله تصمیم، حداقل کردن هزینه‌های سیستم (\$) با لحاظ خسارت‌های محیط زیستی است. هزینه‌ها شامل تأمین انرژی سوخت برای تولید انرژی^۴ (CE^F)، تولید انرژی^۵ (CGE^A)، تأمین آب^۶ (CW^P)، تولید غذا^۷ (CFP^V) و همچنین هزینه جبران خسارت محیط زیستی (EC) بوده که در واقع برابر مجموع خسارت‌های محیط زیستی است.

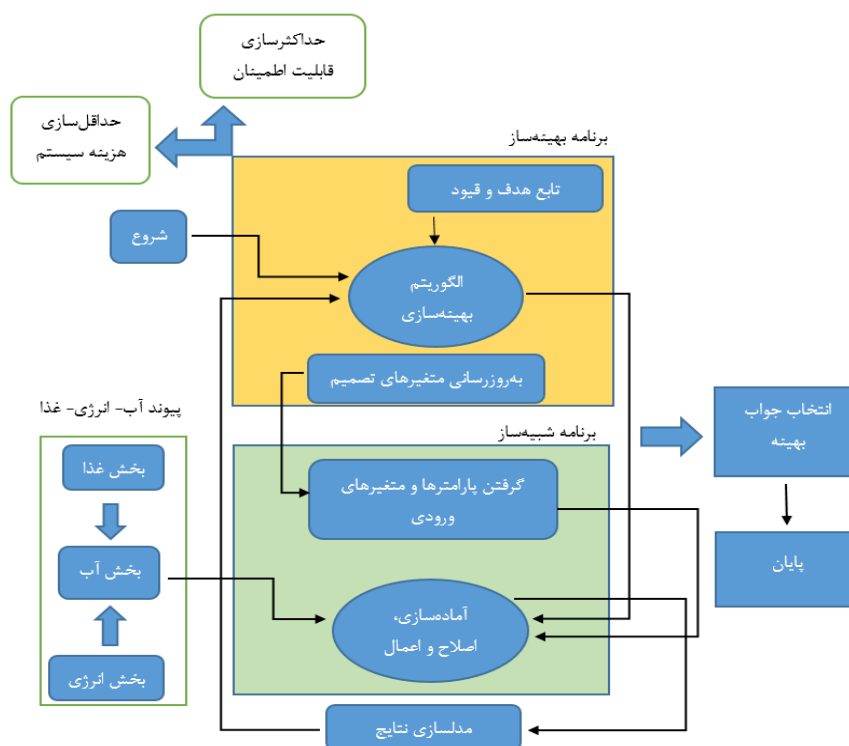
$$\min f = CW + CES + CGE + CFP + EC \quad (1)$$

متغیرهای تصمیم مسئله عبارت‌اند از: میزان برق تولیدی (X_{jt}) (PJ)، سوخت تأمین‌شده برای تولید انرژی (ES_{jt}) (PJ)، غذای تولیدشده (FO_t) ($tonne$)، آب زیرزمینی تخصیص‌یافته برای بخش غذا (GW_t^F) (m^3)، آب سطحی تخصیص‌یافته برای بخش غذا (SW_t^F) (m^3)، آب زیرزمینی تخصیص‌یافته برای بخش انرژی (GW_{jt}^e) (m^3)، آب سطحی تخصیص‌یافته برای بخش انرژی (SW_{jt}^e) (m^3)، آب بازیافتی تخصیص‌یافته برای بخش انرژی (RW_{jt}^e) (m^3) که در هر دوره زمانی تعیین می‌شوند. حروف F و e استفاده‌شده، به ترتیب نشان‌دهنده بخش انرژی و غذا هستند.

غذایی در محیط زیست (انتشار CO_2 و کیفیت آب) در یک سیستم کشاورزی - آبی است. گودرزی و همکاران [۱۳] طی مطالعه‌ای در بروجرد واقع در استان لرستان، تأثیر تغییرات آب‌وهوایی با استفاده از مدل HADGEM2 در برنامه‌ریزی‌های آینده و تأثیر آن بر منابع را بررسی کردند. در مطالعه یادشده با استفاده از Arc GIS پتانسیل‌های موجود در بخش آب، انرژی و غذا شناسایی شد و به پتانسیل‌هایی که کمتر مورد توجه قرار گرفته بودند، مانند انرژی حاصل از پسماند و بیوگاز، آب حاصل از تصفیه فاضلاب و آب باران، کشت در پشت بام منازل به منظور رفع نیازها توجه شد و در قالب مفهوم آب - انرژی - غذا مورد استفاده قرار گرفت.

نگاه به تحقیقات یادشده و خلاصه‌شده در جدول ۱ بیان می‌کند که بیشتر تحقیق‌های یادشده از مدل‌های شبیه‌سازی که به صورت بسته نرم‌افزاری بودند، در بخش شبیه‌سازی استفاده کرده‌اند. در ارتباط با پیوند آب - انرژی - غذا، کارهای مختلفی در مناطق مختلف انجام شده است و در غالب آنها، جهت‌گیری پیوند به سمت یکی از بخش‌ها بوده و بیشتر روی یک بخش از پیوند تمرکز دارد. از جمله در تحقیق یوان و همکاران [۵] بیشتر روی بخش انرژی تمرکز شده و یا در تحقیق کامپانا و همکاران [۸] تمرکز بیشتر روی بخش غذاست. چنین جهت‌گیری‌هایی به خلاف مفهوم پیوند در سیستم‌های طبیعی - انسانی است و سبب تصمیم‌گیری‌های یک‌سویه می‌شود. در مطالعات یادشده، بررسی مسائل مختلف و بهینه‌سازی آنها مد نظر بوده است و کمتر به مسائل محیط زیستی پرداخته شده است. روند کارهای انجام‌شده اخیر نشان‌دهنده اهمیت یافتن بحث‌های محیط زیستی در کنار سود حاصل از سیستم است و ضرورت در نظر گرفتن مسائل مختلف محیط زیستی را بیش از پیش نشان می‌دهد. در تحقیق حاضر از مدل ریاضی پیوند آب - انرژی - غذا هم‌زمان با لحاظ خسارت‌های محیط زیستی استفاده شده و از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچه‌ها به عنوان ابزار بهینه‌سازی در این زمینه بهره گرفته شده است [۱۴]. همچنین، از مفهوم قابلیت اطمینان استفاده شده تا میزان تأمین شدن نیازها پس از تشکیل پیوند مشخص شود. نتایج به‌دست آمده از مطالعه حاضر سبب شناخت پتانسیل استفاده از این منابع شده و راهنمایی برای اتخاذ تصمیم‌ها می‌شود.

1. Fertilization
2. Pesticides
3. Environmental Compensation
4. Cost of Energy Supply
5. Cost of Generating Energy
6. Cost of Water
7. Cost of Food Production



شکل ۱. روند انجام تحقیق

که CGW_t^F هزینه‌های آب‌های زیرزمینی تأمین شده برای تولید مواد غذایی در دوره برنامه‌ریزی t ($\$/m^3$) است. CSW_t^F هزینه‌های آب سطحی تأمین شده برای تولید مواد غذایی در دوره برنامه‌ریزی t ($\$/m^3$)، CGW_{jt}^e هزینه‌های آب‌های زیرزمینی تأمین شده به نیروگاه z ام در دوره برنامه‌ریزی t ($\$/m^3$)، CSW_{jt}^e هزینه‌های آب سطحی تأمین شده به نیروگاه z ام در دوره برنامه‌ریزی t ($\$/m^3$) و CRW_{jt}^e هزینه‌های آب بازیافتی تأمین شده به نیروگاه z ام در دوره برنامه‌ریزی t ($\$/m^3$) است.

مدل‌سازی بخش انرژی

بخش انرژی شامل قسمت تأمین سوخت و قسمت تولید انرژی است. هزینه این بخش از پیوند نیز شامل هزینه تأمین سوخت برای تولید انرژی (CES) و هزینه تولید انرژی (CGE) می‌شود. هزینه تأمین سوخت برای تولید انرژی به صورت رابطه ۳ است که مجموع حاصل ضرب تأمین سوخت برای هر نیروگاه در هزینه واحد تأمین سوخت در دوره‌های مختلف است.

$$CES = \sum_{j=1}^m \sum_{t=1}^k (ES_{jt} \cdot ESC_{jt}) \quad (3)$$

مدل‌سازی بخش آب

در محاسبه هزینه‌های بخش آب، بهره‌برداری‌هایی که از بخش آب می‌شود، مدنظر است. بهره‌برداری از بخش آب شامل استفاده از آب در بخش غذا و به‌کارگیری در بخش انرژی است. استفاده از آب در بخش غذا شامل آب سطحی و آب زیرزمینی استفاده‌شده در تولید غذا است و استفاده از بخش آب در بخش انرژی نیز شامل آب سطحی، آب زیرزمینی و آب بازیافتی استفاده‌شده در تولید انرژی می‌شود. هزینه‌های بخش آب یا CW برای تولید برق و تولید مواد غذایی (کشاورزی)، به صورت رابطه ۲ محاسبه می‌شود که بر اساس آب مصرفی هر بخش و قیمت واحد آن در دوره‌های مختلف است.

$$\begin{aligned} CW &= \sum_{t=1}^K GW_t^F \cdot CGW_t^F + SW_t^F \cdot CSW_t^F \\ &+ \sum_{j=1}^m \sum_{t=1}^K (GW_{jt}^e \cdot CGW_{jt}^e \\ &+ SW_{jt}^e \cdot CSW_{jt}^e + RW_{jt}^e \cdot CRW_{jt}^e) \end{aligned} \quad (2)$$

که CEA_t خسارت انتشار CO_2 در تولید برق در دوره برنامه‌ریزی t ($\$/kg$)، CFA_t خسارت انتشار CO_2 برای تولید مواد غذایی در دوره برنامه‌ریزی t ($\$/tonne$)، CC_{jt} واحد انتشار CO_2 در هر واحد تولید برق در دوره برنامه‌ریزی t ($million\ kg/PJ$) و FF_t واحد انتشار CO_2 در هر واحد تولید مواد غذایی در دوره برنامه‌ریزی t ($tonne/tonne$) است. همچنین، مقدار کود مورد نیاز برای هر تن ماده غذایی ($Kg/tonne$)، D_{fer} خسارت ناشی از مصرف واحد کود ($\$/tonne$)، R_{pes} مقدار سموم استفاده‌شده به ازای هر تن ماده غذایی ($Kg/tonne$)، D_{pes} خسارت ناشی از استفاده از سموم استفاده‌شده به ازای مصرف واحد ($\$/tonne$)، EDD مقدار خسارت محیط زیستی به ازای هر مترمکعب برداشت آب زیرزمینی ($\$/m^3$)، GV مقدار آب زیرزمینی برداشت‌شده (m^3)، RSW مقدار خسارت محیط زیستی به ازای هر مترمکعب برداشت از آب سطحی ($\$/m^3$) و SV حجم آب سطحی استفاده‌شده (m^3) است.

قیود و محدودیت‌های مسئله

این مسئله محدودیت‌هایی دارد که عبارت‌اند از: محدودیت نخست: برق تولیدشده در هر نیروگاه طی هر دوره برنامه‌ریزی نباید بزرگ‌تر از مقادیر سوخت تبدیل‌شده باشد (رابطه ۷).

$$X_{jt} \cdot FE_{jt} \leq ES_{jt} \quad \forall j, t \tag{7}$$

که FE_{jt} واحد سوخت حمل‌شده به ازای واحد انرژی تولیدشده، برای تبدیل به انرژی در نیروگاه j ام در دوره t (PJ/PJ) و ES_{jt} سوخت تأمین‌شده برای تولید انرژی در نیروگاه j ام در دوره t است.

محدودیت دوم: سوخت‌های فسیلی عرضه‌شده مانند زغال‌سنگ و گاز طبیعی نباید بیشتر از مقدار در دسترس بودن آنها طی دوره‌های برنامه‌ریزی باشد (رابطه ۸).

$$ES_{jt} \leq AV_{jt} \quad \forall j, t \tag{8}$$

که AV_{jt} در دسترس بودن منبع سوخت j ام در دوره برنامه‌ریزی t (PJ) است.

محدودیت سوم: انرژی مصرف‌شده برای تولید مواد غذایی نباید بیش از حداکثر مجاز برق برای تولید مواد غذایی باشد (رابطه ۹).

که ES_{jt} سوخت تأمین‌شده برای منبع انرژی j ام، ESC_{jt} متوسط هزینه تأمین سوخت برای منبع انرژی j ام برای دوره برنامه‌ریزی t ($million\ \$/PJ$)، m تعداد منبع‌های سوخت و نیروگاه‌ها و k تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی است. هزینه تولید انرژی به صورت رابطه ۴ محاسبه می‌شود که مجموع هزینه ثابت و متغیر نیروگاه در دوره‌های مختلف زمانی است.

$$CGE = \sum_{j=1}^m FC_j + \sum_{j=1}^m \sum_{t=1}^k (X_{jt} \cdot PC_{jt}) \tag{4}$$

که FC_j هزینه ثابت برای نیروگاه j ام ($million\ \$$) و PC_{jt} متوسط هزینه بهره‌برداری برای واحد تولید انرژی الکتریکی در نیروگاه j ام در دوره t ($million\ \$/PJ$) است.

مدل‌سازی بخش غذا

هزینه‌های تولید غذا به صورت مجموع حاصل ضرب هزینه هر واحد تولید غذا در میزان غذای تولیدی است (رابطه ۵).

$$CFP = \sum_{t=1}^k CFO_t \cdot FO_t \tag{5}$$

که CFO_t هزینه واحد تولید مواد غذایی در دوره برنامه‌ریزی t ($million\ \$/tonne$) و FO_t غذای تولیدشده در دوره t است.

مدل‌سازی بخش خسارت‌های محیط زیستی

خسارت‌های محیط زیستی به‌صورت رابطه ۶ محاسبه می‌شود که مجموع خسارت انتشار گازهای گلخانه‌ای تولیدی در بخش غذا و انرژی، خسارت واردشده به آبخوان و آب سطحی در نتیجه برداشت آب و خسارت واردشده به محیط زیست بر اثر استفاده از کود و سموم در تولید غذا و انتشار گاز گلخانه‌ای ناشی از آنهاست. این مجموع خسارت به عنوان یک هزینه برای جبران آن در تابع هدف در نظر گرفته می‌شود.

$$EC = \sum_{j=1}^m \sum_{t=1}^K (CEA_t \cdot CC_{jt} \cdot X_{jt} + \sum_{t=1}^K CFA_t \cdot FO_t \cdot FF_t + \sum_{t=1}^K FO_t \cdot R_{fer} \cdot D_{fer}) \tag{6}$$

$$+ \sum_{t=1}^K FO_t \cdot R_{pes} \cdot D_{pes} + EDD \cdot GV + RSW \cdot SV$$

$$(1 - \mu_j) \cdot (GW_{jt}^e + SW_{jt}^e + RW_{jt}^e) \geq \alpha_j \cdot X_{jt} \quad \forall j, t \quad (13)$$

که μ_j عامل تلفات تحویل آب به نیروگاه z ام و α_j تقاضای آب واحد برای هر واحد تولید برق در نیروگاه z ام (m^3/PJ) است.

محدودیت هشتم: آب‌های زیرزمینی تهیه‌شده نمی‌توانند از حداکثر مقدار آب زیرزمینی قابل برداشت (برداشت مجاز) در دوره برنامه‌ریزی t بیشتر باشند (رابطه ۱۴).

$$GW_t^F + \sum_{j=1}^m GW_{jt}^e \leq SY_t \quad \forall t \quad (14)$$

آب‌های سطحی تأمین‌شده نمی‌توانند بیش از حداکثر مقدار آب سطحی موجود باشند (رابطه ۱۵).

$$SW_t^F + \sum_{j=1}^m SW_{jt}^e \leq ASW_t \quad \forall t \quad (15)$$

آب بازیافتی عرضه‌شده نمی‌تواند بیش از حد مجاز آب قابل بازیافت باشد (رابطه ۱۶).

$$\sum_{j=1}^m RW_{jt}^e \leq ARW_t \quad \forall t \quad (16)$$

که SY_t حداکثر عملکرد قابل دسترس در آب زیرزمینی (m^3)، ASW_t حداکثر مقدار آب سطحی در دسترس (m^3) و ARW_t حداکثر مقدار آب بازیافت‌شده در دسترس (m^3) است.

محدودیت نهم: غذای تولیدی باید نیازهای اجتماعی و اقتصادی غذا را برآورده سازد (رابطه ۱۷).

$$FO_t \geq D_t^F \quad \forall t \quad (17)$$

که در آن D_t^F نیاز غذایی در دوره برنامه‌ریزی t ($tonne$) است.

محدودیت دهم: مقادیر تولیدشده CO_2 نباید بیشتر از حداکثر انتشار CO_2 طی دوره‌های برنامه‌ریزی باشد. ϕ_{jt} میانگین بازده نیروگاه‌ها در جلوگیری از انتشار CO_2 در زمان t در نیروگاه z ام و $TMCC$ حداکثر CO_2 قابل انتشار ($tonne$) است (رابطه ۱۸).

$$\sum_{j=1}^m \sum_{t=1}^k X_{jt} \cdot CC_{jt} \cdot (1 - \phi_{jt}) + \sum_{t=1}^k FO_t \cdot FF_t \leq TMCC \quad (18)$$

$$ER_t^F \cdot FO_t \leq AER_{tMAX}^F \quad \forall t \quad (9)$$

که AER_{tMAX}^F حداکثر برق موجود برای تولید مواد غذایی در دوره برنامه‌ریزی t (PJ) است و ER_t^F نیاز انرژی واحد برای تولید مواد غذایی در دوره برنامه‌ریزی t ($PJ/tonne$) است.

محدودیت چهارم: برق مصرفی برای جمع‌آوری، تصفیه و تحویل آب نباید بیشتر از حداکثر مقدار مجاز باشد (رابطه ۱۰).

$$ER_t^W \cdot (GW_t^F + SW_t^F + \sum_{j=1}^m (GW_{jt}^e + SW_{jt}^e + RW_{jt}^e)) \leq AER_{tMAX}^W \quad \forall t \quad (10)$$

که AER_{tMAX}^W حداکثر انرژی (یا برق) موجود برای جمع‌آوری، تصفیه و تحویل آب در دوره برنامه‌ریزی t (PJ) است و ER_t^W نیاز انرژی واحد برای جمع‌آوری آب، تصفیه و تحویل در دوره برنامه‌ریزی t (PJ/m^3) است.

محدودیت پنجم: قید مربوط به بخش انرژی با کسر تلفات از آن به صورت رابطه ۱۱ تغییر می‌کند.

$$(1 - \psi) \sum_{j=1}^m X_{jt} - ER_t^F \cdot FO_t - ER_t^W \cdot (GW_t^F + SW_t^F + \sum_{j=1}^m (GW_{jt}^e + SW_{jt}^e + RW_{jt}^e)) \geq D_t^e, \quad \forall t \quad (11)$$

که D_t^e نیازمندی‌های اقتصادی و اجتماعی در دوره برنامه‌ریزی t (PJ) و ψ تلفات شبکه توزیع برق است.

محدودیت ششم: آب عرضه‌شده باید نیازهای آب برای تولید مواد غذایی را برآورده کند (رابطه ۱۲).

$$(1 - \delta) \cdot (GW_t^F + SW_t^F) \geq WF_t \cdot FO_t \quad \forall t \quad (12)$$

که δ عامل تلفات تحویل آب به زیرسیستم غذاست، GW_t^F آب زیرزمینی تأمین‌شده برای تولید مواد غذایی در دوره برنامه‌ریزی، SW_t^F آب سطحی تأمین‌شده برای تولید مواد غذایی در دوره برنامه‌ریزی t و WF_t مصرف آب واحد در واحد تولید مواد غذایی در دوره برنامه‌ریزی t ($m^3/tonne$) است.

محدودیت هفتم: الزامات آب برای تولید برق باید تأمین شود (رابطه ۱۳).

می‌شود. N بیان‌کننده تعداد بخش‌های هر بخش از پیوند است (رابطه ۲۸).

$$RI_{tot} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N URI_{(n)} \quad (28)$$

در این حالت، تابع هدف حداکثرسازی مجموع شاخص‌های اطمینان کلی در هر بخش است که مطابق رابطه ۲۹ تعریف می‌شود که برابر با مجموع شاخص‌های اطمینان کلی بخش آب $(RI(W)_{tot})$ ، بخش انرژی $(RI(X)_{tot})$ ، بخش غذا $(RI(FO)_{tot})$ و بخش تأمین سوخت $(RI(ES)_{tot})$ است.

$$\max f = RI(W)_{tot} + RI(FO)_{tot} + RI(X)_{tot} + RI(ES)_{tot} \quad (29)$$

برای محاسبه قابلیت اطمینان کاربر، از روابط ۳۰-۳۴ استفاده می‌شود. در پایان بعد از محاسبه، شاخص اطمینان کلی در هر بخش محاسبه می‌شود. شاخص قابلیت اطمینان کاربر برای بخش آب به صورت روابط ۳۰ و ۳۱ محاسبه می‌شود. رابطه ۳۰ قابلیت اطمینان کاربر برای آب تخصیصی به بخش غذا و رابطه ۳۱ قابلیت اطمینان کاربر برای آب تخصیصی به بخش انرژی است [۱۵]. صورت کسر در رابطه ۳۰ شامل آب زیرزمینی و سطحی تخصیص‌یافته به بخش غذا با اعمال تلفات و مخرج کسر نیاز بخش غذا به آب می‌شود. نیاز بخش غذا به آب از حاصل ضرب نیاز غذایی که باید تولید شود در مقدار آب مورد نیاز برای تولید هر واحد ماده غذایی به دست می‌آید. صورت کسر در رابطه ۳۱ شامل آب زیرزمینی تخصیص‌یافته به بخش انرژی، آب سطحی تخصیص‌یافته به بخش انرژی و آب بازیافتی تخصیص‌یافته به بخش انرژی با در نظر گرفتن تلفات تحویل آب به بخش انرژی، و مخرج کسر نیاز بخش انرژی به آب می‌شود که حاصل ضرب واحد آب مورد نیاز برای تولید هر واحد انرژی در نیاز انرژی، که باید تولید شود، به دست می‌آید. نیاز انرژی نیز شامل مجموع نیاز انرژی بخش اجتماعی، نیاز انرژی بخش غذا و نیاز انرژی بخش آب می‌شود. T نشان‌دهنده دوره‌های زمانی است.

$$URI(WF) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(\frac{(GW_t^F + SW_t^F) \cdot (1 - \delta)}{WF_t \cdot DF_t} \right) \quad (30)$$

محدودیت یازدهم: همه متغیرهای تصمیم مثبت هستند (روابط ۱۹-۲۶).

$$X_{jt} \geq 0 \quad \forall j, t \quad (19)$$

$$ES_{jt} \geq 0 \quad \forall j, t \quad (20)$$

$$FO_t \geq 0 \quad \forall t \quad (21)$$

$$GW_t^F \geq 0 \quad \forall t \quad (22)$$

$$SW_t^F \geq 0 \quad \forall t \quad (23)$$

$$GW_{jt}^e \geq 0 \quad \forall j, t \quad (24)$$

$$SW_{jt}^e \geq 0 \quad \forall j, t \quad (25)$$

$$RW_{jt}^e \geq 0 \quad \forall j, t \quad (26)$$

بهینه‌سازی با هدف حداکثرسازی قابلیت اطمینان

هر سیستم طبیعی یا مصنوعی که بهره‌برداری می‌شود، به دلیل محدودیت‌هایی ذاتی و غیرذاتی، توانایی تأمین پایدار و مداوم نیازهای بهره‌بردار را ندارد و گاهی کمتر از مقدار مورد انتظار، نیازها را تأمین می‌کند. همین عامل سبب می‌شود تا به منظور برنامه‌ریزی برای آینده، همیشه امکان تأمین نشدن نیازها و کاهش امنیت تأمین آنها وجود داشته باشد. به همین دلیل، شاخص‌هایی برای تعیین میزان اطمینان از تأمین نیازها شکل گرفت. یکی از این شاخص‌ها، قابلیت اطمینان کاربر (URI) است که به عنوان شاخصی برای اندازه‌گیری درصد تأمین نیازها در هر بخش در نظر گرفته می‌شود. مقدار شاخص از صفر تا یک متغیر است و شاخص قابلیت اطمینان یک نشان می‌دهد که منابع مرتبط به طور کامل، بدون کمبود، عرضه می‌شود. T بیان‌کننده تعداد دوره‌های زمانی، $Sup_{act}(t)$ تأمین نیاز واقعی در دوره زمانی t و $Dem_{act}(t)$ نیاز واقعی (تقاضا) در دوره زمانی t است (رابطه ۲۷) [۱۵].

$$URI = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(\frac{Sup_{act}(t)}{Dem_{act}(t)} \right) \quad (27)$$

علاوه بر این شاخص، شاخص دیگری وجود دارد که شاخص اطمینان کلی (RI_{tot}) نامیده می‌شود. گاهی تأمین نیازها از چند بخش صورت می‌گیرد که در این حالت متوسط شاخص‌های به‌دست‌آمده مد نظر قرار می‌گیرد. در این حالت، شاخص اطمینان کلی استفاده

$$URI(WE) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(\frac{(GW_{(t,1)}^e + SW_{(t,1)}^e + RW_{(t,1)}^e) \cdot (1 - \mu_1) + \alpha_2 \cdot (D_t^e + ER_t^F \cdot DF_t + ER_t^W \cdot (WF_t \cdot DF_t + \alpha_2 \cdot (D_t^e)))}{(GW_{(t,2)}^e + SW_{(t,2)}^e + RW_{(t,2)}^e) \cdot (1 - \mu_2)} \right) \quad (31)$$

شاخص قابلیت اطمینان کاربر برای بخش تولید انرژی به صورت رابطه ۳۳ محاسبه می‌شود که صورت کسر، انرژی تولیدی هر دو نیروگاه با در نظر گرفتن تلفات شبکه توزیع و مخرج کسر نیاز انرژی است که باید تأمین شود.

$$URI(X) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(\frac{(X(t,1) + X(t,2)) \cdot (1 - \psi)}{D_t^e + ER_t^F \cdot DF_t + ER_t^W \cdot (WF_t \cdot DF_t + \alpha_2 \cdot (D_t^e))} \right) \quad (33)$$

تأمین سوخت صورت گیرد، در مقدار واحد سوخت حمل شده برای تولید واحد انرژی است. برای اعمال نیاز حداکثری در بخش انرژی از ضریب انرژی حمل شده در نیروگاه با سوخت گاز طبیعی استفاده شده است.

$$URI(ES) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(\frac{ES(t,1) + ES(t,2)}{(D_t^e + ER_t^F \cdot DF_t + ER_t^W \cdot (WF_t \cdot DF_t + \alpha_2 \cdot (D_t^e))) \cdot FE_{(t,1)}} \right) \quad (34)$$

رویکرد بهینه‌سازی

امروزه در بسیاری از مسائل برای اتخاذ تصمیم‌های درست و در نظر گرفتن و پوشش محدودیت و شروط مختلف از ابزارهای بهینه‌سازی استفاده می‌شود تا از بین جواب‌های مختلف بتوان بهترین حالت را پیدا کرد. کتابچی و عطایی آشتیانی [۱۵] طی پژوهشی، روش بهینه‌سازی پیوسته جامعه مورچه‌ها را یکی از روش‌های موفق بهینه‌سازی معرفی کردند که توانسته است جواب‌های بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها، در کنار تنظیمات ساده آن، ارائه دهد. این روش الهام گرفته از پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر رسیدن به غذا توسط مورچه‌هاست. مورچه‌ها مسیرهای تصادفی را برای پیدا کردن غذا طی کرده و در مسیرشان برای پیدا کردن غذا از خود ماده‌ای به نام فرومون ترشح می‌کنند. با رفت و برگشت روی مسیر رسیدن به غذا، میزان فرومون روی آن بیشتر می‌شود و سایر مورچه‌ها نیز با برخورد تصادفی به این مسیر، آن را انتخاب می‌کنند. فرومون خاصیت تبخیرشوندگی دارد و مسیرهای با درصد فرومون بیشتر به معنای کوتاه بودن آن مسیر است. ایده اصلی در ساختار حل الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچه‌ها، انتخاب

شاخص قابلیت اطمینان کاربر برای بخش غذا به صورت رابطه ۳۲ در نظر گرفته می‌شود. مخرج کسر نیاز غذایی در هر دوره است که باید تأمین شود.

$$URI(FO) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(\frac{FO(t)}{DF_t} \right) \quad (32)$$

شاخص قابلیت اطمینان کاربر برای بخش تأمین سوخت به صورت رابطه ۳۴ است که صورت کسر، تأمین سوخت انجام گرفته برای هر دو نیروگاه و مخرج کسر، حاصل ضرب نیاز انرژی که باید تولید شود و متناسب با آن

شاخص اطمینان کلی برای بخش آب مطابق رابطه ۳۵ بوده که میانگینی از شاخص‌های قابلیت اطمینان کاربر در بخش‌های مختلف آب شامل آب تخصیصی به بخش غذا و انرژی است که شامل دو بخش می‌شود.

$$RI(W)_{tot} = \frac{URI(WF) + URI(WE)}{2} \quad (35)$$

شاخص اطمینان کلی برای بخش غذا به صورت رابطه ۳۶ است که چون بخش غذا، فقط یک بخش است، مقدار آن برابر شاخص قابلیت اطمینان کاربر در بخش غذاست.

$$RI(FO)_{tot} = URI(FO) \quad (36)$$

شاخص اطمینان کلی برای بخش تولید انرژی به صورت رابطه ۳۷ است.

$$RI(X)_{tot} = URI(X) \quad (37)$$

شاخص اطمینان کلی برای تأمین سوخت نیز مطابق رابطه ۳۸ است.

$$RI(ES)_{tot} = URI(ES) \quad (38)$$

استفاده می‌شود. رابطه بین آب و انرژی دوطرفه است و به همدیگر وابسته‌اند، ولی رابطه بین آب و غذا و رابطه بین انرژی و غذا یک‌طرفه بوده و فقط بخش غذا وابسته به دو بخش دیگر است.

برای پیاده‌سازی رویکرد توسعه‌یافته در مطالعه حاضر، مقادیر جدول ۲ که مربوط به بخش‌های آب، انرژی، غذا و هزینه‌های ناشی از تولید و خسارت‌های محیط زیستی است، استفاده شده است. در ستون مربوط به مقادیر، در سه دوره زمانی پنج‌ساله به مقادیر اشاره شده است. مقادیر مربوط به پارامتر z مقادیر در هر نیروگاه است. در تحقیق حاضر ۱۳ متغیر تصمیم در هر دوره زمانی وجود دارد که با احتساب سه دوره، در مجموع در تحقیق حاضر ۳۹ متغیر تصمیم محاسبه شد.

برای برآورد شاخص قابلیت اطمینان، باید مقدار نیاز از هر بخش (به طور مثال بخش آب) در بخش دیگر (به طور مثال بخش غذا) محاسبه شود. برای تعیین مقدار نیازها در هر یک از بخش‌ها، نیاز هر بخش در میزان نیاز واحد ضرب شده تا نیاز مربوط به آن بخش تعیین شود. در جدول ۳ مقدار نیاز هر بخش در بخش دیگر محاسبه شده است.

حدود تعریف‌شده برای هر دو مسئله بهینه‌سازی به صورت جدول ۴ در نظر گرفته شد. از آنجا که همه متغیرها مثبت در نظر گرفته شده‌اند، بنابراین حد پایین آنها صفر در نظر گرفته شد.

احتمالی جواب‌ها، مبتنی بر فرمون است. از این‌رو، تابع چگالی احتمال برای تعیین اطلاعات فرمون و به‌روزرسانی آن با توجه به بهترین جواب هر نسل استفاده می‌شود. در تحقیق حاضر نیز از همین الگوریتم برای بهینه‌سازی مسئله، در محیط نرم‌افزار ریاضی متلب استفاده خواهد شد. جزئیات بیشتر در مورد الگوریتم این روش، در پژوهش کتابچی و عطایی آشتیانی [۱۵] در دسترس است.

مطالعه موردی

در تحقیق حاضر برای مدل‌سازی پیوند آب - انرژی - غذا از یک منطقه مطالعاتی که برگرفته از ژانگ و وسلینوو [۳] است، استفاده می‌شود و تصمیم‌های لازم برای پوشش موارد و الزامات مد نظر در این مطالعه مد نظر قرار می‌گیرد. این منطقه شامل بخش تولید انرژی، تولید غذا و بخش آب می‌شود که با هم در ارتباط هستند و به هم وابسته‌اند. بخش تولید انرژی این منطقه، شامل دو نیروگاه تولید انرژی شامل نیروگاه گاز طبیعی و زغال‌سنگ می‌شود که از منابع آب سطحی، آب زیرزمینی، آب بازیافتی نیازهای آبی خود را تأمین می‌کنند. در منطقه یادشده منابع آبی در دسترس شامل آب سطحی، زیرزمینی و بازیافتی می‌شود. تأمین آب برای بخش غذا در منطقه از منابع آب زیرزمینی و سطحی انجام می‌گیرد و به دلیل ملاحظات ایمنی سلامت انسان‌ها از آب بازیافتی در تولید غذا استفاده نشده است. برق تولیدی هم در بخش غذا و آب و هم در بخش نیاز اجتماعی

جدول ۲. پارامترهای استفاده‌شده در مدل

پارامتر	توضیح	مقادیر سه دوره زمانی	واحد
SY	حداکثر مقدار آب زیرزمینی قابل برداشت	۰/۱۷۴ ۰/۱۸۱ ۰/۱۸۹	میلیارد مترمکعب
ASW	حداکثر مقدار آب سطحی در دسترس	۰/۱۰۲ ۰/۱۱۴ ۰/۱۲۱	میلیارد مترمکعب
ARW	حداکثر مقدار آب بازیافتی در دسترس	۰/۰۹ ۰/۱۰۲ ۰/۱۱۴	میلیارد مترمکعب
AV	مقدار زغال‌سنگ و گاز طبیعی در دسترس	۲۴۰ ۲۶۵ ۲۸۵ ۱۰۵ ۱۱۷ ۱۲۹	پتاژول نیروگاه با سوخت زغال‌سنگ نیروگاه با سوخت گاز طبیعی
ESC	هزینه متوسط تأمین زغال‌سنگ و گاز طبیعی	۳/۲۲ ۳/۰۷ ۲/۸۶ ۵/۲۶ ۴/۹۸ ۴/۷۳	میلیون دلار بر پتاژول نیروگاه با سوخت زغال‌سنگ نیروگاه با سوخت گاز طبیعی
CGW^F	هزینه تأمین آب زیرزمینی برای تولید غذا	۰/۷۵ ۰/۶۴ ۰/۵۲	دلار بر مترمکعب
CSW^F	هزینه تأمین آب سطحی برای تولید غذا	۰/۰۹ ۰/۶۸ ۰/۵۹	دلار بر مترمکعب
CGW^e	هزینه تأمین آب زیرزمینی برای تولید انرژی	۰/۷۹ ۰/۶۶ ۰/۵۵ ۰/۶۹ ۰/۵۸ ۰/۴۶	دلار بر مترمکعب نیروگاه با سوخت زغال‌سنگ نیروگاه با سوخت گاز طبیعی
CSW^e	هزینه تأمین آب سطحی برای تولید انرژی	۰/۷۳ ۰/۵۸ ۰/۴۸ ۰/۸۳ ۰/۷ ۰/۵۵	دلار بر مترمکعب نیروگاه با سوخت زغال‌سنگ نیروگاه با سوخت گاز طبیعی
CRW^e	هزینه تأمین آب بازیافتی برای تولید انرژی	۱/۱۹ ۱/۱۵ ۱/۱ ۱/۲۳ ۱/۱۸ ۱/۱۴	دلار بر مترمکعب نیروگاه با سوخت زغال‌سنگ نیروگاه با سوخت گاز طبیعی
DF	نیاز غذایی	۶۷۰۰۰ ۷۱۰۰ ۷۵۰۰۰	تن

ادامه جدول ۲. پارامترهای استفاده شده در مدل

پارامتر	توضیح	مقادیر سه دوره زمانی	واحد
DE	نیاز انرژی	۱۰۵ ۱۱۵ ۱۲۶	پتاژول
CFO	هزینه تولید غذا	۱۴۹/۵ ۱۶۵/۵ ۱۸۰	دلار بر تن
FC	هزینه ثابت بهره‌برداری از نیروگاه	۶۵ ۶۵ ۶۵ نیروگاه با سوخت زغال سنگ ۷۵ ۷۵ ۷۵ نیروگاه با سوخت گاز طبیعی	میلیون دلار
PC	متوسط هزینه بهره‌برداری برای تولید انرژی	۰/۱۶ ۰/۱۸ ۰/۲۲ نیروگاه با سوخت زغال سنگ ۰/۵۲ ۰/۵۵ ۰/۵۸ نیروگاه با سوخت گاز طبیعی	میلیون دلار بر پتاژول
CFA	هزینه جلوگیری از انتشار CO2 در بخش غذا	۱۰/۸ ۱۱/۹ ۱۳/۱	دلار بر تن
FF	واحد CO2 منتشرشده در بخش غذا	۰/۴۸ ۰/۴۸ ۰/۴۸	تن بر تن
CEA	هزینه جلوگیری از انتشار CO2 در بخش انرژی	۱۲/۶ ۱۴/۵ ۱۶/۲	دلار بر تن
FE	مقدار سوخت حمل شده برای تولید انرژی	۳/۲ ۳ ۳/۸ نیروگاه با سوخت زغال سنگ ۲/۶ ۲/۴ ۲/۳ نیروگاه با سوخت گاز طبیعی	پتاژول
CC	واحد CO2 منتشرشده در بخش انرژی	۲۶۱/۰۳ ۲۵۴/۸۹ ۲۴۷/۰۸	میلیون کیلوگرم بر پتاژول
TMCC	حداکثر CO2 قابل انتشار	۱۵/۲	میلیون تن
ER ^F	مقدار انرژی تخصیصی به بخش تولید غذا	۲/۵۲ ۲/۶۴ ۲/۷۵	گیگاژول بر تن
AER ^F _{max}	حداکثر انرژی قابل تخصیص به بخش غذا	۰/۲۳ ۰/۲۵ ۰/۲۷	پتاژول
ER ^W	مقدار انرژی تخصیص داده شده به بخش آب	۰/۹۴ ۱ ۱/۰۳	ژول بر مترمکعب
AER ^W _{max}	حداکثر انرژی قابل تخصیص به بخش آب	۱ ۱/۱۵ ۱/۲۵	پتاژول
R _{fer}	مقدار کود مصرفی در تولید غذا	۱۲۹	تن بر تن
D _{fer}	خسارت محیط زیستی ایجادشده ناشی از مصرف کود	۰/۷۷	دلار بر تن
R _{pes}	مقدار آفت کش مصرفی در تولید غذا	۱/۱۴	کیلوگرم بر تن
D _{pes}	خسارت محیط زیستی ایجادشده ناشی از مصرف آفت کش	۰/۷۷	دلار بر تن
EDD	خسارت ناشی از برداشت آب زیرزمینی	۰/۰۰۰۱	دلار بر مترمکعب
RSW	خسارت ناشی از برداشت از آب سطحی	۰/۰۰۰۵	دلار بر مترمکعب
WF	نیاز آبی برای تولید غذا	۲۴۹۷ ۲۵۶۲ ۲۶۳۰	مترمکعب بر تن
φ	میانگین بازده نیروگاه‌ها در جلوگیری از انتشار CO2	۰/۸ نیروگاه با سوخت زغال سنگ ۰/۸۵ نیروگاه با سوخت گاز طبیعی	درصد
ψ	تلفات شبکه انتقال برق	۰/۰۳	درصد
δ	تلفات آب تحویل شده به بخش غذا	۰/۱۵	درصد
μ	تلفات آب تحویل شده به نیروگاه	۰/۱ نیروگاه با سوخت زغال سنگ ۰/۱۵ نیروگاه با سوخت گاز طبیعی	درصد
α	مقدار آب مورد نیاز برای تولید واحد انرژی	۳۴۶۹۹۸ نیروگاه با سوخت زغال سنگ ۴۶۲۶۶۵ نیروگاه با سوخت گاز طبیعی	مترمکعب بر پتاژول

جدول ۳. نیاز بخش‌های پیوند آب - انرژی - غذا

نیاز	دوره اول	دوره دوم	دوره سوم
آب زیرزمینی برای تولید غذا (میلیارد مترمکعب)	۰/۱۶	۰/۱۸	۰/۱۹۷
آب سطحی برای تولید غذا (میلیارد مترمکعب)	۰/۱۶	۰/۱۸	۰/۱۹۷
آب زیرزمینی برای تولید انرژی (میلیارد مترمکعب)	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۶
آب سطحی برای تولید انرژی (میلیارد مترمکعب)	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۶
آب زیرزمینی برای تولید انرژی (میلیارد مترمکعب)	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۶
آب سطحی برای تولید انرژی (میلیارد مترمکعب)	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۶
آب بازیافتی برای تولید انرژی (میلیارد مترمکعب)	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۶
سوخت مورد نیاز برای تولید انرژی در نیروگاه‌ها (پتاژول)	۱۰۵	۱۱۵	۱۲۶
غذای مورد نیاز (تن)	۶۷۰۰۰	۷۱۰۰۰	۷۵۰۰۰

جدول ۴. حد بالا و پایین متغیرهای تصمیم

متغیر مد نظر	دوره اول		دوره دوم		دوره سوم	
	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا
X (پتاژول)	۰	۹۰	۰	۸۰	۰	۹۰
برای نیروگاه با سوخت زغال سنگ						
ES (پتاژول)	۰	۲۸۵	۰	۲۴۰	۰	۲۴۰
برای نیروگاه با سوخت گاز طبیعی						
GW^F (مترمکعب)	۰	189×10^6	۰	181×10^6	۰	174×10^6
SW^F (مترمکعب)	۰	121×10^6	۰	113×10^6	۰	102×10^6
GW^e (مترمکعب)	۰	189×10^6	۰	181×10^6	۰	174×10^6
SW^e (مترمکعب)	۰	121×10^6	۰	113×10^6	۰	102×10^6
RW^e (مترمکعب)	۰	113×10^6	۰	102×10^6	۰	90×10^6
FO (تن)	۰	۶۷۰۰۰	۰	۷۱۰۰۰	۰	۷۵۰۰۰

نتایج و بحث

برای صحت‌سنجی مدل، مقایسه‌ای بین نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچه‌ها و نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش ژانگ و وسلینوو [۳] در شرایط پایه مدل و بدون اعمال تصمیم‌های این مطالعه، انجام شد تا صحت مدل توسعه داده‌شده در مطالعه حاضر از طریق نزدیک شدن به جواب‌های مطلق ارزیابی شود. همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، مدل تا حد زیادی توانسته است نقاط حدی را پوشش دهد. برای بررسی میزان برآورد میزان تطابق بین مطالعه حاضر و نتایج پژوهش ژانگ و وسلینوو [۳] از پارامتر میزان همبستگی^۱ استفاده شد. در این حالت مقدار همبستگی برابر ۰/۹۷۶ به دست آمد که مقدار قابل قبولی است که به معنای صحت مدل توسعه داده‌شده و توانایی آن در یافتن جواب‌های مد نظر و پیروی از رفتار مسئله است و می‌تواند برای اهداف مطالعه حاضر استفاده شود.

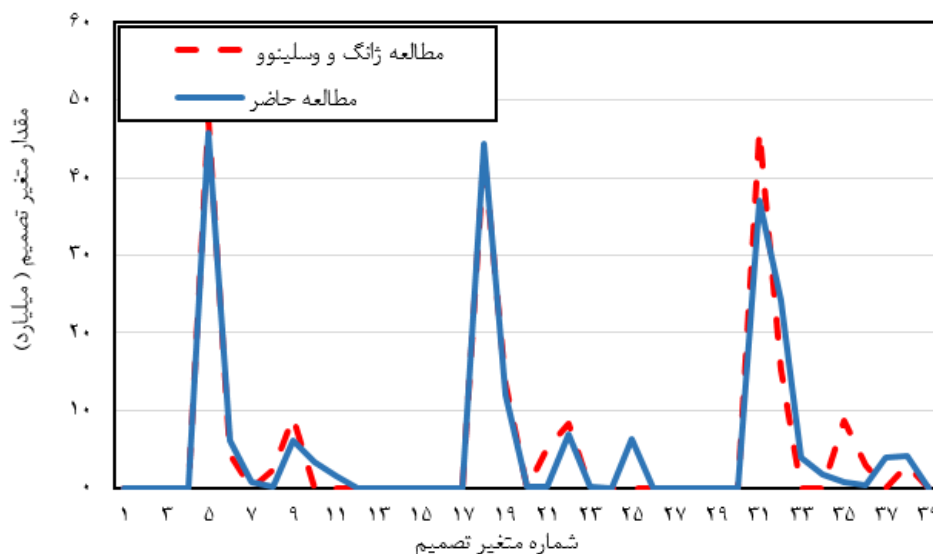
حداقل‌سازی هزینه‌ها

در توسعه مدل، تلفات شبکه انتقال و خسارت‌های محیط زیستی مد نظر قرار گرفته است. برای مشخص شدن تأثیر این دو تغییر در مدل، هزینه‌های سیستم در دو حالت یادشده مد نظر قرار گرفت. در شکل ۳ میزان تغییرات

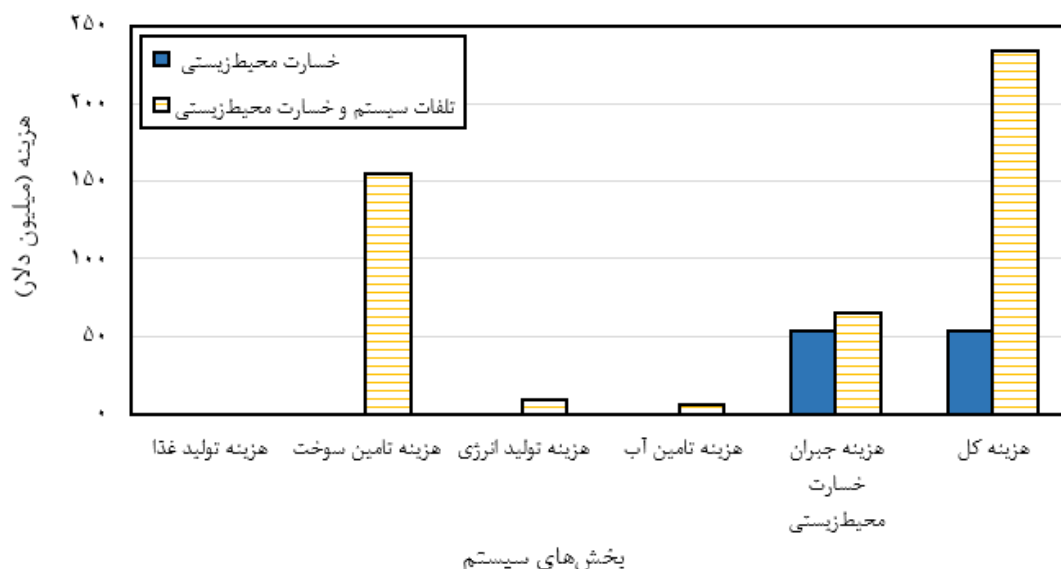
هزینه بخش‌های سیستم در نتیجه اضافه کردن این دو تغییر مشخص شده است.

با توجه به شکل ۳، در حالت اعمال خسارت محیط زیستی، افزایش هزینه در همه بخش‌ها به‌جز بخش خسارت محیط زیستی صفر بوده و فقط هزینه‌های بخش خسارت محیط زیستی تغییر کرده است، ولی در حالت افزودن تلفات شبکه انتقال برق، به دلیل کاهش در میزان برق در دسترس، میزان تولید انرژی و متناسب با آن میزان تأمین گاز و زغال سنگ برای تولید انرژی، افزایش یافته و سبب افزایش هزینه‌های این دو بخش می‌شود. میزان تغییرات هزینه بخش‌های مختلف به صورت جدول ۵ است که در بخش خسارت محیط زیستی شاهد افزایش ۴/۷ درصدی فقط در بخش خسارت محیط زیستی بوده و در بقیه بخش‌ها تغییری در متغیر تصمیم‌ها ایجاد نشده است. ولی با اعمال تلفات و افزایش تولید در بخش تولید انرژی، هزینه بخش تأمین سوخت ۴/۵ درصد رشد داشته و هزینه تأمین آب برای استفاده در بخش تولید انرژی ۱/۱ درصد افزایش یافته است. افزایش تولید انرژی همراه با افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای بوده که سبب رشد ۵/۷ درصدی در هزینه‌های این بخش شده است.

1. Correlation



شکل ۲. صحت‌سنجی مدل توسعه‌یافته مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچه‌ها



شکل ۳. مقایسه میزان افزایش هزینه‌ها در بخش‌های مختلف سیستم

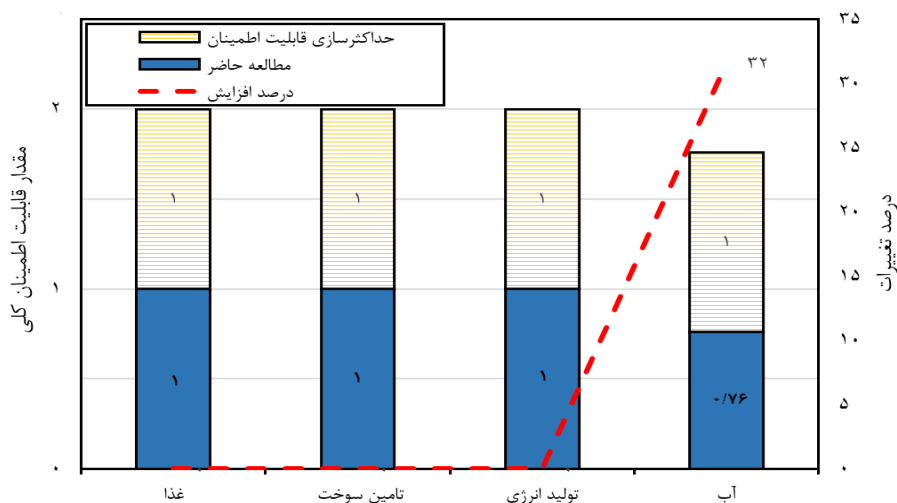
جدول ۵. تغییرات هزینه بخش‌های سیستم در حالت اعمال تلفات شبکه توزیعی و خسارت محیط زیستی

هزینه	خسارت محیط زیستی	تلفات سیستم و خسارت محیط زیستی
میزان تغییر هزینه تولید غذا (/.)	۰/۰	۰/۰
میزان تغییر هزینه تامین سوخت (/.)	۰/۰	۴/۵
میزان تغییر هزینه تولید انرژی (/.)	۰/۰	۳/۸
میزان تغییر هزینه تامین آب (/.)	۰/۰	۱/۱
میزان تغییر هزینه جبران خسارت محیط زیستی (/.)	۴/۷	۵/۷
میزان تغییر هزینه کل (/.)	۱/۰	۴/۳

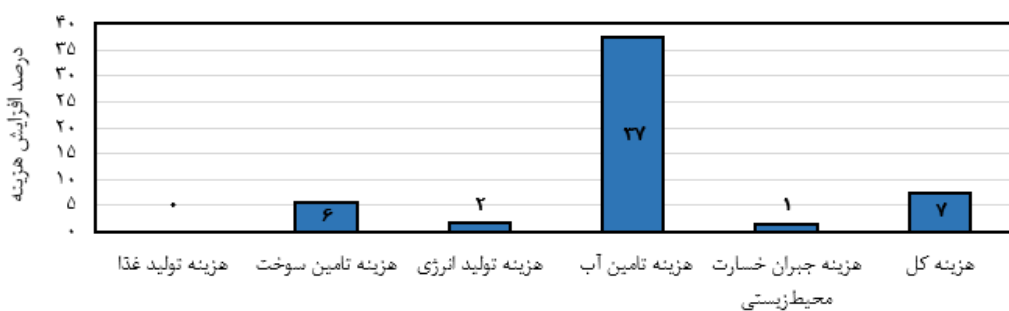
قابلیت اطمینان آنها رخ نداده است، از تولید و عرضه از منابع دیگر و تغییر در متغیرهای تصمیم ناشی می‌شود. بخش تأمین سوخت با وجود عدم تغییر در میزان قابلیت اطمینان، افزایش ۶ درصدی در هزینه‌ها را به دنبال داشته است که به دلیل تغییر مقدار متغیر تصمیم‌ها و تأمین سوخت بیشتر برای نیروگاه با سوخت گاز طبیعی است. افزایش تولید انرژی از نیروگاه با سوخت گاز طبیعی سبب رشد ۲ درصدی در بخش تولید انرژی نیز شده است.

حداکثرسازی قابلیت اطمینان

حداکثرسازی قابلیت اطمینان، سبب افزایش استفاده از منابع در دسترس و افزایش تخصیص‌ها برای رفع هر چه بیشتر نیازها می‌شود. همین امر سبب افزایش هزینه‌های سیستم می‌شود و رشد هزینه‌ها را به دنبال دارد. حداکثرسازی قابلیت اطمینان رشد ۳۱/۶ درصدی در تأمین نیازهای بخش آب و رشد ۳۷ درصدی در هزینه‌های این بخش را به دنبال داشته است. تغییر در مقدار هزینه‌های بخش‌های سیستم در حالتی که تغییری در



شکل ۴. میزان شاخص قابلیت اطمینان کلی



شکل ۵. درصد افزایش هزینه بخش‌های سیستم در حالت حداکثرسازی قابلیت اطمینان

همان‌طور که از تغییرات هزینه‌ها در جدول ۶ مشخص است، حذف پیوند و در نظر گرفتن قسمتی خاصی از سیستم به‌تنهایی و تصمیم‌گیری براساس آنها، در هر حالتی سبب افزایش هزینه‌های سیستم نسبت به حالت پیوند شده است و در همه سناریوهای در نظر گرفته‌شده، حداقل در یک بخش شاهد افزایش هزینه بوده که به دلیل عدم تأثیرگذاری و عدم تأثیرپذیری بخش‌ها از همدیگر در

نتایج تصمیم‌گیری بدون در نظر گرفتن پیوند بین اجزای سیستم

در این حالت برای بررسی تأثیرگذار بودن پیوند در تصمیم‌گیری‌ها و هزینه سیستم، بخش‌های پیوند حذف شده تا تصمیم‌گیری فقط براساس یک بخش باشد. در جدول ۶ درصد تغییرات هزینه بخش‌های سیستم و هزینه کلی سیستم بیان شده است.

هزینه سیستم را می‌سازد. اما در ارتباط با قابلیت اطمینان در حالت پیوند و غیرپیوند می‌توان به نتایج جدول ۷ مراجعه کرد.

حالت حذف پیوند است و هر بخش بدون در نظر گرفتن سایر بخش‌ها عمل می‌کند. پس می‌توان گفت که حالت پیوند، بهینه‌ترین حالت برای تصمیم‌گیری است و کمترین

جدول ۶. تغییرات هزینه بخش‌های سیستم در حالت حذف پیوند

حذف بخش	فقط بخش	حذف بخش	فقط بخش	حذف بخش	فقط بخش	حذف بخش
غذا	غذا	انرژی	انرژی	آب	آب	آب
۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	میزان تغییر هزینه تولید غذا (%)
۱۴/۵	۱۴/۵	۰/۰	۰/۰	۱۴/۵	۰/۰	میزان تغییر هزینه تأمین سوخت (%)
۴/۵	۴/۵	۰/۰	۰/۰	۰/۱	۰/۱	میزان تغییر هزینه تولید انرژی (%)
۱۹/۸	۱۹/۸	۱۵/۷	۱۵/۷	۰/۰	۱۵/۷	میزان تغییر هزینه تأمین آب (%)
۲/۵	۲/۵	۱/۰	۱/۰	۰/۳	۱/۰	میزان تغییر هزینه جبران خسارت محیط زیستی (%)
۱۰/۸	۱۰/۸	۱/۷	۱/۷	۹/۴	۱/۷	میزان تغییر هزینه کل (%)

جدول ۷. تغییرات قابلیت اطمینان کلی بخش‌های سیستم در حالت حذف پیوند

حذف بخش غذا	فقط بخش	حذف بخش	فقط بخش	حذف بخش	فقط بخش	
غذا	انرژی	انرژی	آب	آب	آب	
۰	-۲۴	۰	-۲۴	۰	۰	میزان تغییر شاخص اطمینان کلی برای بخش آب (%)
۰	۰	۰	۰	۰	۰	میزان تغییر شاخص اطمینان کلی برای بخش تأمین سوخت (%)
۰	۰	۰	۰	۰	۰	میزان تغییر شاخص اطمینان کلی برای بخش غذا (%)
۰	۰	۰	۰	۰	۰	میزان تغییر شاخص اطمینان کلی برای بخش تولید انرژی (%)

محیط زیستی آن توسعه پیدا کرد تا رفتار بخش‌های پیوند در این حالت ارزیابی شود. از مفهوم قابلیت اطمینان به منظور میزان تأمین نیازها استفاده شد و با حداکثرسازی این مفهوم میزان پتانسیل توسعه منطقه ارزیابی شد. در حالت حداقل‌سازی هزینه سیستم، نتایج نشان‌دهنده این است که در نظر گرفتن خسارت‌های محیط زیستی فقط به افزایش ۴/۷ درصدی هزینه بخش خسارت محیط زیستی و افزایش ۱ درصدی هزینه کلی سیستم منجر می‌شود و تأثیری در متغیرهای تصمیم ندارد. ولی اعمال قید تلفات شبکه توزیع، سبب افزایش ۳/۸ درصدی هزینه تولید انرژی، ۴/۵ درصدی هزینه تأمین سوخت، ۱/۱ درصدی هزینه بخش آب، ۵/۷ درصدی هزینه خسارت بخش محیط زیستی و ۴/۳ درصدی هزینه کلی سیستم شد. در حالت حداکثرسازی قابلیت اطمینان، رشد ۳۱/۶ درصد در

در حالت حذف پیوند، تغییرات قابلیت اطمینان بخش‌ها نسبت به حالت پیوند، یا بی‌تأثیر بوده یا کاهش یافته است. پس می‌توان نتیجه گرفت که حالت پیوند، عملکرد بهتری نسبت به سایر حالت‌ها از خود نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر از یک مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی به منظور بهینه کردن مقادیر تولید و تخصیص در بخش‌های آب، انرژی و غذا به منظور حداقل‌سازی هزینه سیستم با در نظر گرفتن خسارت‌های محیط زیستی و حداکثرسازی قابلیت اطمینان در محدوده مطالعاتی مد نظر استفاده شد. از مدل ریاضی پیوند آب - انرژی - غذا به جای بسته‌های نرم‌افزاری برای شبیه‌سازی منطقه استفاده شد و بخش

- through multi-objective reservoir optimization schemes. *Science of The Total Environment*. 2018; 633: 341-51.
- [7]. Karnib A. Water, energy and food nexus: The Q-Nexus model. 10th World Congress on Water Resources and Environment. 2017.
- [8]. Campana P, Zhang PE, Yao J, Andersson T, Landelius S, Melton T, et al. Managing agricultural drought in Sweden using a novel spatially-explicit model from the perspective of water-food-energy nexus. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 197: 1382-1393.
- [9]. Wicaksono A, Jeong G, Kang D. Water – energy – food nexus simulation: an optimization approach for resource security. *Water*. 2019; 11: 667-684.
- [10]. Li M, Fu M, Singh Q, Ji VP, Liu Y, Zhang D, et al. An optimal modelling approach for managing agricultural water-energy- food nexus under uncertainty. *Science of The Total Environment*. 2019; 651: 1416-1434.
- [11]. Li D, Fu M, Singh Q, Liu VP, Fu T. Stochastic multi-objective modeling for optimization of water-food-energy nexus of irrigated agriculture. *Advances in Water Resources*. 2019; 127: 209-224.
- [12]. Li M, Singh VP, Fu Q. Optimization of agricultural water – food – energy nexus in a random environment: An integrated modelling approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2019; 4: 1-17.
- [13]. Goodarzi M, Piryaei R, mousavi M. Climatic changes and the application of an urban WEF NEXUS approach to the utilization of the existing resources in Boroujerd. *Iranian Journal of Ecohydrology*. 2019; 3: 569-584. [persian]
- [14]. Ketabchi H, Ataie-Ashtiani B. Evolutionary algorithms for the optimal management of coastal groundwater: A comparative study toward future challenges. *Journal of Hydrology*. 2015; 520: 193-213.
- [15]. Wicaksono A, Katolik U. A development of system dynamics model for simulation of water, energy, and food nexus. 12th International Conference on Hydroinformatics. 2018.
- بخش تأمین آب رخ داده و سایر بخش‌ها در حالت حداکثر مقدار قابلیت اطمینان بودند. نتایج به‌دست‌آمده از حذف پیوند، نشان‌دهنده افزایش هزینه بخش‌های سیستم در حالت حداقل‌سازی هزینه و کاهش قابلیت اطمینان در حالت حداکثر‌سازی قابلیت اطمینان بخش‌های سیستم هستند که خود دلیلی برای تأثیر مثبت در نظر گرفتن پیوند آب - انرژی - غذاست. این مدل ریاضی تصمیم‌پتانسیل افزودن مسائل و مباحث مختلف را دارد و امکان بررسی آثار تصمیم‌ها و سیاست‌های مختلف را دارد و می‌توان مفاهیم مختلف را در کنار پیوند آب - انرژی - غذا اضافه کرد. همچنین، می‌توان آن را در مناطق مختلف کشور با شرایط مختلف در دسترس بودن منابع مصرفی پیاده‌سازی کرد.

منابع

- [1]. Ghafoori Kharanagh S, Banihabib M, Javadi S. challenges and solutions for the groundwater governance in Yazd-Ardakan plain using DPSIR. *Iranian Journal of Ecohydrology*. 2019; 4: 1029-1043. [persian]
- [2]. Zhang C, Chen X, Li Y, Ding W, Fu G. Water-energy-food nexus: concepts, questions and methodologies. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 195: 625-639.
- [3]. Zhang X, Vesselinov VV. Integrated modeling approach for optimal management of water, energy and food security nexus. *Advances in Water Resources*. 2017; 101: 1-10.
- [4]. Zhang J, Campana J, Yao PE, Zhang T, Lundblad Y, Melton A, et al. The water-food-energy nexus optimization approach to combat agricultural drought: A case study in the United States. *Applied Energy*. 2017: 1-16.
- [5]. Yuan KY, Lin YC, Chiueh PT, Lo SL. Spatial optimization of the food, energy, and water nexus: A life cycle assessment-based approach. *Energy Policy*. 2018; 119: 502-514.
- [6]. Uen TS, Chang FJ, Zhou Y, Tsai WP. Exploring synergistic benefits of water-food-energy nexus