



کاربرد روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به منظور سنجش اثربخشی پروژه‌های احیای تالاب‌ها جهت تأمین نیاز آب زیست‌محیطی

حمیدرضا تقوایی نجیب، محمدمسعود تجریشی، محمدرحیم مقدس

۱ و ۳- کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش مهندسی محیط‌زیست

۲- عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف

Hamidrtn1371@gmail.com

Tajrishy@sharif.edu

Moghaddas.r@gmail.com

خلاصه

نوسانات اقلیمی و عدم مدیریت درست منابع آبی در دهه‌های اخیر، موجب بحرانی شدن وضعیت دریاچه ارومیه شده و ضرورت احیای آن‌ها را دوچندان کرده است. با وقوع این وضعیت، به منظور حفظ و احیای این دریاچه، بیش از ۱۸۰ پروژه فعال در حوضه آبریز تعریف شده که سؤالاتی را در خصوص اثربخشی آن‌ها مطرح کرده است. هدف از انجام این پژوهش یافتن امتیاز اثربخشی و پایداری مجموعه پروژه‌های احیای دریاچه ارومیه و شناسایی و اولویت‌بندی مجموعه پروژه‌ها با در نظر گرفتن محدودیت‌های منابع مالی و زمانی است. بررسی این موضوع مستلزم تعریف شاخص‌های ارزیابی اثربخشی و الگوریتم ارزیابی قابل اطمینان است. در این پژوهش، دسته‌شاخص‌های ارزیابی سیدپروژه‌ها از طریق تکمیل پرسشنامه، تعریف و وزن‌دهی شد. الگوریتم ارزیابی نیز با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) تعریف گردید. در ادامه با توجه به وزن‌دهی انجام شده، امتیاز هر سیدپروژه مشخص و از نتایج حاصل، به عنوان ورودی مدل ساخته شده در نرم‌افزار CPLEX استفاده گردید. در مدل‌سازی، با توجه به تنوع خروجی تپ‌های مختلف سیدپروژه‌ها، پارامتر جدیدی با عنوان «خروجی زیست‌محیطی» تعریف گردید که به یکسان سازی خروجی‌ها می‌پردازد. در نهایت تحلیل حساسیت متغیرهای ورودی به مدل صورت پذیرفته و اولویت‌بندی پروژه‌ها و تخصیص منابع به عنوان نتایج پژوهش مشخص گردید.

کلمات کلیدی: دریاچه ارومیه، اثربخشی، شاخص، خروجی زیست‌محیطی، MCDM

۱. مقدمه

تأثیرات فعالیت‌های گسترده انسانی موجب ایجاد فشار شدید بر منابع زمین شده است. چنین شرایطی موجب می‌گردد حفاظت و احیای اکوسیستم‌های بزرگ‌مقیاس از ارزش و ضرورت بالایی برخوردار باشد. (Cui, Yang, Yang, & Zhang, ۲۰۰۹) حوضه آبریز دریاچه ارومیه بین مختصات جغرافیایی ۴۴ درجه و ۱۴ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۵۳ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. (مهندسین مشاور فرسپنداب، ۱۳۸۹) این تالاب از مهم‌ترین و با ارزش‌ترین اکوسیستم‌های طبیعی ایران است که در ابتدای دهه ۵۰ شمسی به عنوان پارک ملی و در سال ۱۳۵۵ به عنوان ذخیره‌گاه زیست‌کره از سوی سازمان یونسکو اعلام شده است. (عباسپور، ۱۳۹۴) از اواسط دهه ۷۰ شمسی، کاهش تراز سطح آب این دریاچه آغاز شد و موجب گردید که در ابتدای دهه ۹۰ شمسی، شرایط بحرانی بر این دریاچه حاکم شود. با وقوع این شرایط لزوم تأمین حقیقه زیست‌محیطی و احیای دریاچه ارومیه دوچندان گردید. بحران دریاچه ارومیه و تبعات زیست‌محیطی حاصل از آن زمینه‌ساز ایجاد مشکلات متعدد زیست‌محیطی، اقتصادی و حتی اجتماعی برای استان‌های هم‌جوار آذربایجان شرقی و غربی در وهله اول و برای کل کشور در سطحی وسیع‌تر شده

است. توفان‌های گردوغبار به‌خودی‌خود دارای آثار مخرب زیست‌محیطی فراوانی هستند که هم به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم بر انسان و محیط‌زیست انسان اثر گذارند. منابع متعدد حتی تا ۵۰ اثر مخرب را برای توفان‌های غبار برشمرده‌اند. (Goudie & Middleton, ۲۰۰۶)

در مورد روش‌های برآورد حقایق زیست‌محیطی تالاب‌ها، طبقه‌بندی زیر ارائه شده است: روش ناشی از دیدگاه هیدرولوژیکی، روش ناشی از دیدگاه اکولوژیکی و روش تلفیقی. روش‌هایی که از دیدگاه هیدرولوژیکی ناشی می‌شوند، شامل تعیین و سپس احیا و بازبایی (کامل یا بخشی از) رژیم آبی تاریخی اکوسیستم هستند. روش‌های متکی بر دیدگاه اکولوژیکی چون به برآورد نیاز اجزای اکوسیستم می‌پردازند قابل دفاع‌تر هستند. (سیم، ۱۳۸۵) احیای اکولوژیکی، یک پتانسیل برای معکوس کردن فرآیند تخریب زمین، افزایش تاب‌آوری تنوع زیستی و ارائه سرویس‌های مهم اکوسیستم است. (Souding, ۲۰۱۱).

با توجه به این که آب، خاک و زیستگاه سه المان پایه‌ای تالاب‌ها هستند، احیای تالاب‌ها نیز بر این سه محور متمرکز است. برای تعریف پروژه‌های احیای تالاب، ضروری است نحوه تعامل بین این سه المان تبیین گردد. تالاب‌ها شامل یک شبکه اکوسیستم طبیعی با روابط گوناگون میان اجزای خود هستند. یکی از این روابط، نحوه پاسخ یکپارچه این اجزا به فرآیند تخریب تالاب است. در کنار در نظر گرفتن کارکردهای اکولوژیکی تالاب، می‌توان با شناسایی و محاسبه واکنش تالاب به تغییراتی که باعث تخریب آن می‌شوند، اهداف برنامه احیا را تعریف کرد. (Zedler & Kercher, ۲۰۰۵)

باتوجه به کارکردهای اکولوژیکی تالاب و در پی تشدید بحران خشک شدن دریاچه ارومیه به علت سیاست‌های توسعه ناپایدار، پس از آغاز به کار دولت یازدهم، اولین مصوبه هیئت دولت به مسئله تشکیل کارگروه ملی نجات دریاچه ارومیه اختصاص یافت. این کارگروه پس از برگزاری جلسات متعدد کارشناسی، برنامه احیای دریاچه ارومیه را با تعریف بیش از ۱۸۰ پروژه، طرح‌ریزی نمود. مطابق با این برنامه ۱۰ ساله، نیاز آبی زیست محیطی دریاچه ارومیه برای رسیدن به تراز اکولوژیکی تأمین می‌شود.

گسترده‌گی طرح‌های در حال اجرا در قالب برنامه‌های طرح ملی نجات دریاچه ارومیه، سؤالاتی را در خصوص نتایج حاصل، اثربخشی این پروژه‌ها و نقش آن‌ها در بهبود شرایط زیست‌محیطی منطقه مطرح کرده که ضرورت پایش میزان اثربخشی طرح‌های این برنامه را دوچندان می‌نماید. در این خصوص باید توجه داشت که مفهوم پایش اثربخشی پروژه‌ها، یکی از چالش‌های جدی در علم مدیریت است؛ چرا که شاکله اصلی سنجش موفقیت یک فرآیند یا فعالیت، سنجش اثربخش بودن آن در حوزه هدف مورد نظر و دستیابی به خروجی‌های مورد انتظار است. تا کنون سنجش اثربخشی با روش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. تمامی این روش‌ها بر پایه یافتن ترکیب بهینه‌ای از سه عامل زمان، پول (هزینه) و کیفیت است که به مثلث طلایی مشهور گشته‌اند. برای نیل به این منظور و انجام فرآیند ارزیابی اثربخشی پروژه‌ها و اقدامات انجام شده، دو نگرش وجود دارد. در نگرش اول، سنجش میزان اثربخشی پروژه‌ها پس از خاتمه پروژه انجام می‌شود و در آن با به‌کارگیری شاخص‌های فنی، کیفی، اسناد هزینه کرد، تجهیزات اندازه‌گیری و خروجی‌های فعالیت، اقدام به ارزیابی موفقیت اثربخشی می‌گردد. در نگرش دوم، ارزیابی برای پروژه‌های انجام می‌شود که آغاز نشده و یا هم‌اکنون در حال اجراست تا در نهایت منجر به تدقیق مسیر، اصلاح، بازنگری و یا تقویت راهکارها شود. استفاده از مدل‌ها و برآوردهای دقیق و قابل‌اطمینان برای سنجش سطح اثربخشی احتمالی هر اقدام یا پروژه از مزایای این نگرش است. در نگاه مقایسه‌ای، لازم است با بهره‌گیری از الگوریتمی روشن‌مند، رتبه‌بندی و امتیاز آیت‌ها را بر اساس میزان اثربخشی آن‌ها به دست آورد. رویکرد اتخاذ شده در این پژوهش بر اساس نگرش دوم انتخاب گردیده است.

در این پژوهش، با در نظر گرفتن برنامه تعیین شده در طرح ملی نجات دریاچه ارومیه، مبنای دیدگاه احیای اکولوژیکی دریاچه قرار گرفته است. البته این نگرش به‌صورت مرحله‌ای به مسئله احیا توجه داشته است. به‌منظور احیای اکولوژیکی زیست‌بوم پارک ملی دریاچه ارومیه لازم است تنوع زیستی و چرخه اکولوژیکی در آن وجود و استمرار داشته باشد. در این صورت می‌توان ادعا کرد که فرآیند احیا موفق بوده است. موجود زنده شاخصی که در اکوسیستم دریاچه ارومیه شناسایی و توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست به‌عنوان گونه معیار برگزیده شده است، یک نوع سخت‌پوست به نام آرتمیآ اورمیانا است که بر اساس پژوهش نظری‌دوست و عباسپور، برای این که شرایط زیست اکولوژیکی در دریاچه ارومیه برقرار گردد و آرتمیآ بتواند حیات و نمو داشته باشد، لازم است تراز دریاچه حداقل در ارتفاع ۱۰/۱۲۷۴ متر از سطح دریای آزاد قرار گیرد. (Abbaspour & Nazaridoust, ۲۰۰۷)

لازم به ذکر است که در این پژوهش از نتایج حاصل از پژوهش امیری (۱۳۹۶) استفاده شده است. وی در مدل‌سازی اندرکنش آبخوان با آب‌های سطحی با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی، هیدروشیمیایی و ایزوتوپی نشان داد که ارتباط محسوس و معناداری بین منابع آب زیرزمینی و دریاچه ارومیه وجود ندارد (امیری و نخعی، ۱۳۹۶) در این پژوهش نیز نظر به ناچیز بودن ارتباط آبخوان با دریاچه ارومیه، این گونه فرض شده است که هر آبی که به پیکره آبی دریاچه ملحق شود، صرفاً از طریق تبخیر از دریاچه خارج می‌شود.

۲. پیشینه پژوهش

پورزاهدی و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهشی به منظور استخراج پروژه‌های اولویت‌دار برای سرمایه‌گذاری، اقدام به مدل‌سازی ریاضی مبتنی بر تأمین نیاز آب زیست‌محیطی دریاچه با تمرکز بر پروژه‌های کاهش مصرف آب کشاورزی و انتقال آب نموده است. (مرکز تاب‌آوری دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۷) ایشان در این مدل‌سازی با شناسایی و احصاء کلیه پارامترهای اثرگذار از بالادست حوضه آبریز تا زمان تحویل به دریاچه، تلاش کرده است کلیه تلفات را در نظر بگیرد. همچنین در این پژوهش، مدل‌های رفتاری جامعه پیرامون، به همراه کاربردی نمودن تأثیرات پروژه‌های مختلف در میزان اثربخشی اقدامات، منظور گردیده است.

وانگ و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی اقدام به مطالعه موردی طراحی سیستم شاخص‌ها برای انتخاب پروژه‌ها در یک پارک صنعتی اکولوژیک نموده‌اند. آن‌ها پس از استخراج شاخص‌های انتخاب پروژه، با استفاده از روش آنالیز طبقه‌بندی فازی، اقدام به سنتز، ساده‌سازی و دسته‌بندی شاخص‌ها از بانک شاخص‌ها نموده‌اند. در ادامه با به‌کارگیری روش تحلیل سلسله مراتبی فازی، وزن‌دهی دسته شاخص‌ها صورت پذیرفت. سپس راستی آزمایی مؤثر بودن سیستم تعریف‌شده، با انجام مطالعات موردی میدانی تأیید گردید. (Wang et al., 2017)

شادکام (۲۰۱۷) در پژوهش خود با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره نسبت به معرفی سیستم سنجش کیفی برنامه احیا اقدام نمود. وی با استفاده از نظر مجموعه خبرگان متشکل از دانش‌های مختلف به امتیازدهی هر یک از این راهکارها پرداخته و در انتها جدول اولویت‌بندی شده راهکارها بر اساس امتیاز دریافتی از خبرگان را آورده است. (Shadkam, 2017)

فرآیند تحلیل سلسله مراتبی در دهه ۸۰ میلادی توسعه داده شد. فرآیند تحلیل سلسله مراتبی نوعی روش حاصل جمع وزن‌دار است و به‌طور گسترده توسط تصمیم‌گیرندگان و محققان در حوزه‌های مختلف نظیر برنامه‌ریزی، انتخاب گزینه از بین گزینه‌های مختلف، بهینه‌سازی، حل چالش‌ها تخصیص منابع مورد استفاده قرار گرفته است. (Vaidya & Kumar, 2006)

۳. مواد و روش‌ها

بر اساس نقشه راه نجات دریاچه ارومیه، سالانه می‌بایست مقادیر مشخصی آب به واسطه اجرای پروژه‌ها به دریاچه ارومیه برسد. آب‌رسانی یا نتیجه حاصل از اجرای پروژه‌ها را بر اساس نوع خروجی آن‌ها بر حسب مترمکعب آب تحویلی به دریاچه یا هکتار سطوح پرپتانسیل گردوغبار تثبیت‌شده اندازه‌گیری می‌کنند. با توجه به پیچیدگی و تعدد اقدامات و فعالیت‌های احیای دریاچه ارومیه، دستیابی به سطح اثربخشی این اقدامات مستلزم شناسایی و طبقه‌بندی پروژه‌ها است. بر همین اساس، اندازه‌گیری نتایج حاصل از اجرای پروژه‌ها از طریق واحدهایی تحت عنوان «سبد پروژه^۱» انجام می‌شود. کلیه پروژه‌هایی که در تأمین و انتقال آب به صورت مرتبط با یکدیگر عمل می‌کنند، در یک «سبد پروژه» دیده می‌شوند. کلیه پروژه‌های تعریف شده در طرح ملی نجات دریاچه ارومیه ذیل ۳۶ سبد پروژه طبقه‌بندی می‌شوند که در چهار دسته کلی ۱- سبد پروژه جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب و انتقال پساب (به تفکیک ۱۸ شهر تعریف شده) ۲- سبد پروژه تثبیت ریزگرد و احیای اکولوژیک ۳- سبد پروژه انتقال بین حوضه‌ای (شامل دو پروژه انتقال آب از سد کانی سب و سد سیلوه) ۴- سبد پروژه صرفه‌جویی در مصرف آب کشاورزی (به تفکیک ۹ زیرحوضه آبریز دریاچه ارومیه) تقسیم‌بندی می‌شوند. با توجه به داده‌های موجود، جدول ۱ برای هر یک از سبد پروژه‌های فوق تکمیل گردید.

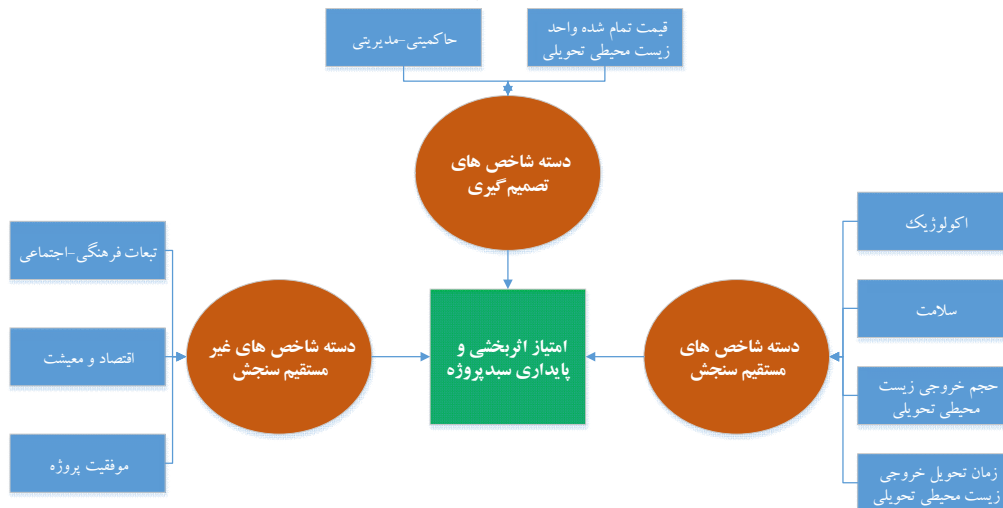
جدول ۱- داده‌های موجود برای هر سبد پروژه

ردیف	سبد پروژه	اعتبار مورد نیاز (میلیون ریال)	میزان خروجی زیست‌محیطی تحویلی (میلیون مترمکعب/کیلومتر مربع)	نحوه تحویل خروجی (دفعی/تدریجی)	زمان تحویل خروجی (مستمر/دوره‌ای)
۱	A				
۲	B				
۳	C				

باتوجه به گستردگی متغیرها و شاخص‌های ارزیابی اثربخشی و پایداری پروژه‌ها، کلیه شاخص‌ها در ۹ دسته طبقه‌بندی شدند. در گام بعدی، پرسشنامه‌ها به همراه جدول راهنما و پیوست‌های فنی در اختیار خبرگان قرار گرفت و وزن‌دهی و کمی‌سازی شاخص‌های کیفی توسط ایشان صورت پذیرفت. به منظور فراهم آوردن امکان نظردهی همگن خبرگان، معیار امتیازدهی بین اعداد ۱ تا ۱۰ برای هر یک از دسته‌های شاخص‌های کیفی ارائه شد. با

^۱ Portfolio

توجه به تخصصی بودن فرم‌ها، در مجموع ۲۶ نفر از خبرگان متخصص و آگاه به برنامه احیای تالاب برای تکمیل فرم‌ها انتخاب شدند. این تعداد پرسش نامه قابل قبول بوده و خطای آن کمتر از ۵ درصد برآورد می‌شود. طبقه‌بندی انجام شده برای دسته‌شاخص‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ - دسته‌شاخص‌های اثربخشی و پایداری پروژه‌ها

اعداد درج شده در پرسشنامه‌ها، جمع‌بندی و پس از کنترل ثبات^۱ اطلاعات ورودی و همخوانی آن‌ها، فرم‌های منتخب (با خطای کمتر از ۱۰ درصد ناهمخوانی) در برنامه نوشته شده بر اساس روش AHP^۲ وارد شده و وزن دسته‌شاخص‌ها استخراج گردید. کلیه داده‌های خروجی هر یک از دسته شاخص‌ها برای هر سبدپروژه، نرمالیزه شده و از ۱۰ امتیاز داده شد. در نهایت مجموعه امتیاز اثربخشی و پایداری سبدپروژه‌ها از ۱۰۰ محاسبه شد. در مرحله بعدی، ساخت مدل تخصیص منابع بهینه بودجه در نرم‌افزار CPLEX صورت پذیرفت. ورودی‌های مدل به ترتیب شامل اطلاعات پایه سبدپروژه (شامل ویژگی‌ها، حجم آب کل تحویلی و زمان مورد نیاز برای به ثمر رسیدن، امتیاز شاخص‌های کلیدی مستخرج از فرآیند MCDM برای هر سبدپروژه)، بودجه و بازه زمانی هزینه‌کرد مورد نظر است. پس از ورود داده‌های اشاره شده، بهینه‌سازی بر اساس تابع هدف تعریف شده انجام و در نهایت خروجی مدل شامل لیست پروژه‌های اثربخش، مبلغ قابل تخصیص، حجم آب تحویلی و امتیاز اثربخشی به دست آمد. تابع هدف تعریف شده در نرم‌افزار و شرایط آن به شرح زیر است:

$$f(Y_i, X, T) = (B_i, V_i, E_i) \quad (1)$$

که در آن f تابع هدف، Y_i اطلاعات ورودی سبد پروژه i ام، X بودجه کل و T بازه زمانی ورودی به مدل است. در طرف دوم رابطه، B_i مبلغ قابل تخصیص به پروژه i ام، V_i حجم آب تحویلی پروژه i ام و E_i امتیاز اثربخشی نهایی پروژه i ام هستند. رابطه‌های (۲) و (۳) تابع هدف و رابطه (۴) شرایط مورد نیاز برای حل مسئله را نشان می‌دهند.

$$\text{Max}(z) = \text{تابع هدف} \quad (2)$$

$$z = \sum_{i=1}^n P_i x_i + \sum_{j=1}^{n'} P'_j y_j \quad (3)$$

$$\text{شرایط} - \begin{cases} \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{j=1}^{n'} a'_j y_j \leq B \\ y_j \leq 1, \quad y_j \geq 0, \quad \forall j = 1, \dots, n', \quad x_i \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (4)$$

در روابط بالا، P_i اثربخشی اجرای پروژه i ام، P'_j اثربخشی اجرای پروژه j ام، y_j میزان اجرای پروژه j ام، a_i هزینه اجرای کامل پروژه i ام، a'_j هزینه اجرای کامل پروژه j ام و B بودجه کل ورودی به مدل است. x_i نیز در رابطه (۵) تعریف شده است:

^۱ Consistency Check

^۲ Analytical Hierarchy Process

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{پروژه ۱۰۰ درصد تکمیل گردد} \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

(۵)

نوع پروژه‌های اجرایی و در نتیجه متنوع شدن نوع خروجی‌های مورد انتظار از آن‌ها (به دو صورت مترمکعب آب تحویلی و هکتار تثبیت‌شده سطح پرتانسیل ریزگرد)، موجب ایجاد پیچیدگی در مدل‌سازی می‌شود. به منظور فائق آمدن بر این پیچیدگی، متغیر واسطی به نام خروجی زیست‌محیطی تحویلی (Z) تعریف و در مدل وارد شده است. خروجی زیست‌محیطی (متغیر Z) رابطه‌ای میان این دو نوع خروجی پروژه‌ها ایجاد می‌کند و به عنوان پارامتر تابع هدف مدل تعریف می‌شود که می‌بایست با رعایت شرایط تعریف شده، بیشینه گردد.

ارزش‌گذاری ریالی هر یک از خروجی‌های زیست‌محیطی تحویلی نیز در متغیر Z در نظر گرفته می‌شود. برای یافتن رابطه مناسب برای تبدیل خروجی پروژه‌هایی از جنس هکتار تثبیت‌شده سطح پرتانسیل ریزگرد به پارامتر Z، از رابطه موجود میان تراز سطح آب دریاچه، حجم آب دریاچه و میزان سطوح پرتانسیل غبار شناسایی‌شده استفاده شده است. این رابطه از تلفیق رابطه تراز-سطح-حجم دریاچه (مورد استفاده شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی)، رابطه میان سطوح پرتانسیل گردوغبار و تراز سطح آب دریاچه ارومیه (به دست آمده در پژوهش مرکز سنجش از دور دانشگاه صنعتی شریف (۱۳۹۶)) و قیمت میانگین تثبیت ریزگرد، استخراج گردیده است. لازم به ذکر است که مجموع سطوح پرتانسیل ریزگرد در پژوهش مرکز سنجش از دور دانشگاه ۳۰۰ کیلومتر مربع برآورد شده است که در تراز ۱۲۷۱/۸ متر، بیش از ۹۰ درصد آن به زیر آب خواهد رفت. برای تبدیل خروجی پروژه‌هایی از جنس مترمکعب آب تحویلی به پارامتر Z، این پارامتر معادل ۱ مترمکعب آب با قیمت میانگین در نظر گرفته شد. قیمت میانگین از تقسیم هزینه کل پروژه‌ها بر کل حجم آب تحویلی به دریاچه ارومیه از محل پروژه‌ها به دست می‌آید.

$$Z = (\text{قیمت میانگین تثبیت}/\text{۱ha}) * a = (\text{قیمت میانگین آبرسانی}/\text{۱m}^3)$$

که در این رابطه، a ضریب تبدیل خروجی هکتار سطح تثبیت شده پرتانسیل ریزگرد با واحد قیمت به خروجی مترمکعب آب تحویلی با واحد قیمت و برابر با ۱/۲۰ است.

۴. نتایج پژوهش

نتایج خروجی وزن‌دهی دسته‌شاخص‌های اثربخشی و پایداری پروژه‌ها بر اساس پرسشنامه‌های تأیید شده در جدول ۲ نشان داده شده است. بر این اساس، دسته‌شاخص سلامت با امتیاز ۱۸/۲ بیشترین و دسته‌شاخص زمان تحویل با ۳/۶ کم‌ترین وزن را به خود اختصاص داده‌اند. قیمت تمام‌شده واحد زیست‌محیطی تحویلی و اقتصاد و معیشت نیز از دیگر دسته‌شاخص‌های با وزن بالا هستند.

جدول ۲- نتایج خروجی وزن دسته‌شاخص‌های اثربخشی و پایداری پروژه‌ها

اکولوژیکی	اقتصاد و معیشت	سلامت	حاکمیتی- مدیریتی	تبعات فرهنگی و اجتماعی	موفقیت پروژه	قیمت تمام‌شده واحد زیست‌محیطی تحویلی	حجم خروجی زیست‌محیطی تحویل	زمان
۷/۴	۱۴/۱	۱۸/۲	۷/۱	۷/۷	۶/۸	۱۵/۸	۱۹/۳	۳/۶

حال پس از مشخص شدن وزن‌دهی، امتیاز میانگین داده شده توسط خبرگان به هر سبد پروژه و محاسبه شاخص‌های کمی، می‌توان امتیاز اثربخشی و پایداری سبد پروژه‌ها را محاسبه کرد. نتایج حاصل در جدول ۳ نمایش داده شده است.

جدول ۳- امتیاز اثربخشی و پایداری سبد پروژه‌ها

ردیف	سبد پروژه	امتیاز اثربخشی (۱۰۰)	ردیف	سبد پروژه	امتیاز اثربخشی (۱۰۰)
۱	جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب و انتقال پساب شهر تبریز	۴۹/۶۳۸	۱۹	انتقال بین حوضه‌ای از حوضه آبریز زاب (سد کانی سیب)	۶۵/۱۰۶
۲	جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب و انتقال پساب شهر مراغه	۴۱/۳۵۹	۲۰	انتقال بین حوضه‌ای از سید سلوه	۴۴/۹۲۷
۳	جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب و انتقال پساب شهر عجب‌شیر	۴۲/۹۲۷	۲۱	کاهش ۴۰ درصد مصرف آب کشاورزی حوضه آبریز آجی‌چای	۴۸/۳۲۶
۴	جمع‌آوری و تصفیه فاضلاب و انتقال پساب شهر ملکان	۳۹/۹۹۶	۲۲	کاهش ۴۰ درصد مصرف آب کشاورزی حوضه آبریز	۴۵/۲۳۷

^۱ Environmental Output

ردیف	سبد پروژه	امتیاز اثربخشی (۱۰۰)	ردیف	سبد پروژه	امتیاز اثربخشی (۱۰۰)
	قلعه چای، صوفی چای و لیلان چای				
۵	جمع آوری و تصفیه فاضلاب و انتقال پساب شهر اسکو-خسروشاه	۴۱/۴۴۱	۲۳	کاهش ۴۰ درصد مصرف آب کشاورزی حوضه آبریز زولاچای	۳۶/۱۱۸
۶	جمع آوری و تصفیه فاضلاب و انتقال پساب شهر سردرود	۳۹/۵۲۷	۲۴	کاهش ۴۰ درصد مصرف آب کشاورزی شهرستان‌های تسوج، صوفیان و شبستر	۳۸/۳۹۷
۷	جمع آوری و تصفیه فاضلاب و انتقال پساب شهر آذرشهر	۴۸/۰۱۸	۲۵	کاهش ۴۰ درصد مصرف آب کشاورزی حوضه آبریز گذار چای	۳۶/۵۵۷
۸	جمع آوری و تصفیه فاضلاب و انتقال پساب شهر ارومیه	۴۹/۸۸۷	۲۶	کاهش ۴۰ درصد مصرف آب کشاورزی حوضه آبریز مهاباد چای	۳۷/۲۵۳
۹	جمع آوری و تصفیه فاضلاب و انتقال پساب شهر بوکان	۴۴/۴۶۹	۲۷	کاهش ۴۰ درصد مصرف آب کشاورزی حوضه آبریز زرینه رود	۵۴/۱۲۱
۱۰	جمع آوری و تصفیه فاضلاب و انتقال پساب شهر سلماس	۴۴/۲۵۳	۲۸	کاهش ۴۰ درصد مصرف آب کشاورزی حوضه آبریز سیمینه رود	۳۸/۱۸۸
۱۱	جمع آوری و تصفیه فاضلاب و انتقال پساب شهر شاهین دژ	۴۱/۳۴۸	۲۹	کاهش ۴۰ درصد مصرف آب کشاورزی حوضه آبریز نازلو چای، روضه چای، شهر چای و باراندوز	۴۹/۰۲۷
۱۲	جمع آوری و تصفیه فاضلاب و انتقال پساب شهر گلستان	۴۲/۹۵۴	۳۰	تثبیت ریزگرد شمال شرق دریاچه ارومیه	۴۸/۱۸۰
۱۳	جمع آوری و تصفیه فاضلاب و انتقال پساب شهر مهاباد	۵۰/۰۷۵۹	۳۱	پروژه تثبیت ریزگرد شرق دریاچه ارومیه	۴۸/۲۶۶
۱۴	جمع آوری و تصفیه فاضلاب و انتقال پساب شهر میاندوآب	۴۸/۲۲۶	۳۲	تثبیت ریزگرد جنوب دریاچه ارومیه و احیای اکولوژیک	۴۹/۰۶۶
۱۵	جمع آوری و تصفیه فاضلاب و انتقال پساب شهر نقده	۶۰/۲۵۷	۳۳	تثبیت ریزگرد جنوب و جنوب غرب دریاچه ارومیه	۵۰/۳۷۲
۱۶	جمع آوری و تصفیه فاضلاب و انتقال پساب شهر تکاب	۴۱/۹۷۰	۳۴	تثبیت ریزگرد غرب دریاچه ارومیه	۴۷/۹۱۵
۱۷	جمع آوری و تصفیه فاضلاب و انتقال پساب شهر اشونیه	۴۳/۵۶۴	۳۵	تثبیت ریزگرد شمال غرب دریاچه ارومیه	۴۷/۹۵۳
۱۸	جمع آوری و تصفیه فاضلاب و انتقال پساب شهر سقز	۴۵/۷۸۵	۳۶	تثبیت ریزگرد جنوب شرق دریاچه ارومیه	۵۱/۸۰۷

مدل سازی برای یافتن سبد پروژه‌های بهینه با بیشترین آب رسانی، کم‌ترین هزینه و تبعات فرهنگی و اجتماعی و دارای پشتوانه فنی، اکولوژیکی و قانونی، صورت پذیرفت. بودجه ورودی به مدل در نرم‌افزار بر اساس ۵ سناریو طبقه‌بندی شد. سناریو اول منطبق با بودجه‌ای است که - به صورت تقریبی - تاکنون هر ساله به برنامه احیای دریاچه ارومیه پرداخت شده است (۳۰۰۰ میلیارد ریال). سناریو دوم مربوط به حداقل بودجه‌ای است که مورد انتظار ستاد احیای دریاچه ارومیه است (۱۰۰۰۰ میلیارد ریال). سناریو سوم شامل بودجه‌ای است که بر اساس برنامه احیای تالاب می‌بایست سالانه به برنامه اختصاص یابد (۲۳۰۰۰ میلیارد ریال). در سناریو چهارم بودجه ۵۰۰۰۰ میلیارد ریال در نظر گرفته شده و در سناریو پنجم، بودجه با در نظر گرفتن میزان کسری بودجه مجموع چهار سال ابتدایی اجرای برنامه احیا بوده است (۸۶۰۰۰ هزار میلیارد ریال). جدول ۴ نتایج حاصل از مدل را نمایش می‌دهد.

جدول ۴- خروجی مدل بهینه‌سازی بر اساس داده‌های پژوهش

ردیف	سناریو	بودجه (میلیارد ریال)	خروجی زیست‌محیطی تحویلی	میزان آب قابل تحویل (میلیون مترمکعب)	میزان سطح پرمپتانسیل گردوغبار تثبیت شده (کیلومتر مربع)
۱	اول	۳۰۰۰	۲۶۳	۹۷/۳	۱۶۹/۱۱
۲	دوم	۱۰۰۰۰	۷۸۸	۴۹۴/۴	۳۰۰
۳	سوم	۲۳۰۰۰	۹۷۰	۶۷۶/۱۱	۳۰۰
۴	چهارم	۵۰۰۰۰	۱۸۹۰	۱۵۹۶/۲۴	۳۰۰
۵	پنجم	۸۶۰۰۰	۲۴۹۳	۲۱۹۹/۱	۳۰۰

حال لازم است برای صحت‌سنجی مدل و تعیین دامنه کارایی آن، به تحلیل حساسیت پارامترهای مدل پرداخته شود. مدل ساخته شده نسبت به بودجه ورودی بسیار حساس است. البته این بودجه تابعی از مجموعه پروژه‌های ورودی است و هر چه کوچک‌تر باشد، میزان حساسیت مدل به پارامتر بودجه افزایش می‌یابد. بررسی حساسیت مدل به پارامتر امتیاز اثربخشی و پایداری سبد پروژه‌ها در دو حالت تغییرات کلی و جزئی، صورت پذیرفته است. برای این منظور، مطابق جدول شماره ۵ ابتدا تغییر جزئی در نتایج ایجاد شد. این تغییرات در امتیازات دو دسته‌شاخص که حائز بیشترین امتیاز بودند (دسته‌شاخص سلامت و دسته‌شاخص حجم خروجی زیست‌محیطی) به میزان مجموعاً ۵/۷ واحد کم و به شاخص زمان تحویل که کم‌ترین امتیاز را داشت، اضافه گردید. در ادامه نتایج مدل برای سه بودجه ۳۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۲۳۰۰۰ میلیارد ریالی مورد بررسی قرار گرفت که تغییر جدی در نتایج خروجی دیده نشد. با توجه به این که در مدل، امتیاز اثربخشی در بودجه مورد نیاز برای انجام پروژه ضرب می‌شود، تغییرات بسیار جزئی، تأثیری در نتایج مدل نخواهند داشت.

جدول ۵- اوزان دسته شاخص ها بر اساس تغییرات جزئی

اکولوژیکی	اقتصاد و معیشت	سلامت	حاکمیتی - مدیریتی	تبعات فرهنگی و اجتماعی	موفقیت پروژه	قیمت تمام شده واحد زیست‌محیطی تحویلی	حجم خروجی زیست‌محیطی تحویل	زمان
۷/۴	۱۴/۱	۱۵	۷/۱	۷/۷	۶/۸	۱۵/۸	۱۷/۸	۹/۶

حالت دومی که مورد ارزیابی و تحلیل حساسیت قرار گرفت، بررسی این سناریو بود که در صورت اعمال تغییرات گسترده در اوزان شاخص های مدل، خروجی چگونه خواهد بود؟ برای پاسخ به این پرسش تغییرات گسترده‌ای در وزن شاخص‌ها مطابق با جدول ۶ اعمال گردید.

جدول ۶- اوزان دسته شاخص ها بر اساس تغییرات کلی

اکولوژیکی	اقتصاد و معیشت	سلامت	حاکمیتی - مدیریتی	تبعات فرهنگی و اجتماعی	موفقیت پروژه	قیمت تمام شده واحد زیست‌محیطی تحویلی	حجم خروجی زیست‌محیطی تحویل	زمان
۵	۵	۵	۵	۵	۵	۵	۶۰	۵

منطق اعمال این تغییرات، این بود که برای ارزیابی حساسیت مدل، حالتی تعریف گردد که بیشترین خروجی زیست‌محیطی به دریاچه و مجموعه اکوسیستم آن تحویل گردد. همانطور که در جداول و خروجی‌های مدل در سناریو تغییرات گسترده مشاهده می‌شود، خروجی مدل در این حالت در مقایسه با حالت اصلی پژوهش که برگرفته از نظر خبرگان بوده، تغییرات محسوسی دارد و بنابراین مدل نسبت به تغییرات عمده اوزان شاخص ها حساس است. در مقام مقایسه دو جدول ۴ و جدول ۷، خروجی مدل بر اساس بودجه ۳۰۰۰ میلیارد ریالی و با تغییر ضرایب، میزان آب ورودی به پیکره دریاچه بیش از دو برابر افزایش می‌یابد.

جدول ۷- خروجی مدل بهینه‌سازی بر اساس حساسیت پارامتر امتیاز اثربخشی پروژه (تغییرات گسترده)

ردیف	سناریو	بودجه (میلیارد ریال)	خروجی زیست‌محیطی تحویلی	میزان آب قابل تحویل (میلیون مترمکعب)	میزان سطح پرتانسیل گردوغبار تثبیت شده (کیلومتر مربع)
۱	اول	۳۰۰۰	۲۶۱/۳	۲۰۱/۲	۷۲/۱۳
۲	دوم	۱۰۰۰۰	۴۶۴/۲	۳۸۴/۱	۹۶/۱۸
۳	سوم	۲۳۰۰۰	۹۳۵/۷	۸۵۳/۹	۹۸/۱

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش در گام اول پروژه‌ها دسته‌بندی، سپس دسته‌شاخص‌های ارزیابی تعریف و با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی نسبت به یکدیگر وزن‌دهی شدند. در ادامه امتیاز اثربخشی و پایداری هر پروژه استخراج و مدل تخصیص منابع بر اساس اثربخشی طراحی و در نرم‌افزار CPLEX اجرا شد. خروجی مدل بهینه‌سازی در پنج سناریوی بودجه‌ای مختلف بر اساس میزان سطح پرتانسیل گردوغبار تثبیت شده، میزان آب قابل تحویل و خروجی زیست‌محیطی تحویلی به دست آمد. در نهایت تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای ورودی مدل انجام پذیرفت. پژوهش حاضر قابلیت استفاده و الگوبرداری در مدیریت کلان و تخصیص منابع بر مبنای دریافت بیشترین اثربخشی برای پروژه‌های بزرگ زیست‌محیطی را دارد.



۶. قدردانی

در پایان از کلیه پژوهشگران و کارشناسان محترمی که در انجام این پژوهش سهمی داشتند، کمال تشکر و قدردانی می‌شود.

۷. مراجع

Abbaspour, M., & Nazaridoust, A. (۲۰۰۷). Determination of environmental water requirements of Lake Urmia, Iran: An ecological approach. *International Journal of Environmental Studies*, ۶۴(۲), ۱۶۱-۱۶۹. <https://doi.org/10.1080/00207230701238416>

Cui, B., Yang, Q., Yang, Z., & Zhang, K. (۲۰۰۹). Evaluating the ecological performance of wetland restoration in the Yellow River Delta, China, ۳۵, ۱۰۹۰-۱۱۰۳. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.03.022>

Goudie, A., Middleton (۲۰۰۶). *Desert Dust in the Global System*, Springer.

Hartwich, F. (۱۹۹۹). Weighting of Agricultural Research Results: Strength and Limitations of the Analytic Hierarchy Process (AHP), ۱-۱۸.

Shadkam, S. (۲۰۱۷) *Preserving Urmia Lake in a changing world*. Wageningen University, Netherlands.

Vaidya, O. S., & Kumar, S. (۲۰۰۶). Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of Operational Research*, ۱۶۹(۱), ۱-۲۹. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.028>

Suding, K. N. ۲۰۱۱. Toward an era of restoration in ecology: successes, failures, and opportunities ahead. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* ۴۲:۴۶۵-۴۸۷

Zedler, J. B., & Kercher, S. (۲۰۰۵). *WETLAND RESOURCES: Status, Trends, Ecosystem Services, and Restorability*, ۳۹-۷۴. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.30.0504.144248>

Wang, Q., Lu, S., Yuan, X., Zuo, J., Zhang, J., & Hong, J. (۲۰۱۷). The index system for project selection in ecological industrial park: A China study. *Ecological Indicators*, ۷۷, ۲۶۷-۲۷۵. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.01.032>

امیری، وهاب، نخعی، محمد، ۱۳۹۶، مدلسازی و تعیین جبهه آب شور در آبخوان غرب دریاچه ارومیه با استفاده از روشهای ژئوفیزیکی، هیدروشیمیایی، و ایزوتوپی، دانشگاه خوارزمی.

پورزاهدی، حسین، کرمانشاه، محمد (۱۳۹۷) مدلسازی اولویت بندی تخصیص منابع پروژه‌های کاهش ۴۰ درصدی مصرف آب کشاورزی.

ستاد احیای دریاچه ارومیه، ۱۳۹۶، نقشه راه برنامه احیای دریاچه ارومیه.

سیمام، سمیه و مسعود تجریشی، ۱۳۸۵، برآورد نیاز آب زیست محیطی تالاب شادگان، هفتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده عمران.

عباسپور، مجید؛ زهرا عابدی؛ علیرضا وفایی نژاد و رؤیا طباطبایی یزدی، ۱۳۹۴، بررسی مدل DPSIR بر اکوسیستم دریاچه ارومیه، دومین همایش یافته‌های نوین در محیط‌زیست و اکوسیستم‌های کشاورزی، تهران، پژوهشکده انرژی‌های نو و محیط‌زیست دانشگاه تهران.



دوازدهمین کنگره ملی مهندسی عمران

۱۳۹۹ خرداد ۸ و ۷

دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران



مرکز تحقیقات سنجش از دور دانشگاه صنعتی شریف. (۱۳۹۶). بررسی تأثیر تغییرات تراز دریاچه ارومیه بر کاهش سطوح با پتانسیل تولید غبار.

مهندسین مشاور فرسپندآب، فروردین ۱۳۸۹، گزارش بهنگام سازی بیلان آب محدوده های مطالعاتی حوزه آبریز دریاچه ارومیه، گزارش کلی.