مهندسی عمران شریف (زمستان ۱۳۹۶)
دوره‌ی ۲ - ۳۳، شماره‌ی ۴/۱، ص. ۷۱-۸۱

Original Article

الگوریتم جست‌وجوی گرانشی در حل مسئله‌ی بهره‌برداری بهینه از سیستم تک‌مخزن (مطالعه‌ی موردی: سد دز)

رامتین معینی* **(استادیار)**
مریم سلطانی‌نژاد (دانشجوی کارشناسی ارشد)
مریم داعی (استادیار)
دانشکده‌ی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان

در پژوهش حاضر، مسئله‌ی بهره‌برداری بهینه از سیستم سد تک مخزن بررسی شده است. تاکنون برای حل آن، روش‌های متنوعی ارائه شده است. در این میان، از الگوریتم‌های فراکاوشی به دلیل عملکرد بهتر استقبال بیشتری صورت گرفته است. یکی از جدیدترین الگوریتم‌های مذکور، الگوریتم جست‌وجوی گرانشی است که مبنای آن براساس قانون گرانش نیوتن است. در پژوهش حاضر، مسئله‌ی بهره‌برداری بهینه‌ی ساده و برقابی سد دز با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی گرانشی برای دوره‌های ۶۰ و ۲۴۰ ماهه و در دو حالت حل شده است. در حالت اول، میزان آب رها شده از مخزن و در حالت دوم میزان حجم ذخیره‌ی مخزن در انتهای هر ماه به‌عنوان متغیر تصمیم منظور شده است. مقایسه‌ی نتایج حاصل با سایر نتایج موجود از جمله نتایج حاصل از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچگان، الگوریتم هوش جمعی ذرات و الگوریتم بهینه‌سازی جفت‌گیری زنبورعسل، نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب‌تر و با سرعت همگرایی بیشتر الگوریتم جست‌وجوی گرانشی است. به‌عبارت دیگر، نتایج به‌دست آمده از الگوریتم جست‌وجوی گرانشی در بهترین حالت برای مسئله‌ی بهره‌برداری ساده و دوره‌ی زمانی ۶۰ ماهه به ترتیب ۷/۴۳٪، ۷۴/۴٪ و ۸/۷۱٪ بهتر از نتایج الگوریتم‌های بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچگان، هوش جمعی ذرات و جفت‌گیری زنبورعسل بوده است. همچنین نتایج به‌دست آمده از الگوریتم جست‌وجوی گرانشی در بهترین حالت برای مسئله‌ی بهره‌برداری برقابی و دوره‌ی زمانی ۶۰ ماهه به ترتیب ۵/۵۶٪ و ۳۴/۶۹٪ بهتر از الگوریتم‌های بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچگان و هوش جمعی ذرات بوده است. علاوه بر این، با استفاده از الگوریتم هوش جمعی ذرات برای مسائل بهره‌برداری ساده و برقابی جواب شدنی حاصل نشده است و لیکن با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی گرانشی، جواب شدنی برای مسائل حاصل شده است. همچنین در مقایسه‌ی دو حالت مذکور، با توجه به کوچک‌تر بودن فضای جست‌وجوی مسئله در حالت اول، نتایج حل حالت اول از حالت دوم مناسب‌تر بوده است.

واژگان کلیدی: بهره‌برداری بهینه از مخازن، الگوریتم جست‌وجوی گرانشی، رهاسازی، حجم ذخیره‌ی مخزن، سد دز.

r.moeini@eng.ui.ac.ir
mrym.sltn@eng.ui.ac.ir
m.daei@eng.ui.ac.ir

۱. مقدمه

امروزه با افزایش جمعیت و روند رو به رشد تقاضای مصرف آب و همچنین توزیع زمانی و مکانی غیریکنواخت منابع آب، پژوهشگران بر آن شده‌اند تا با استفاده از ابزارهای موجود، بهره‌برداری از منابع آب را بهبود بخشند. تاکنون روش‌های متعددی برای حل مسئله‌ی بهره‌برداری بهینه از سیستم منابع آب از جمله سیستم مخازن سدها ارائه شده است. روش‌های مذکور در ۴ دسته‌ی کلی ۱. برنامه‌ریزی خطی[1]، ۲. برنامه‌ریزی غیرخطی[2]، ۳. برنامه‌ریزی پویا[3] و ۴. الگوریتم‌های فراکاوشی[4] تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های برنامه‌ریزی خطی، غیرخطی و برنامه‌ریزی پویا از جمله روش‌های استفاده شده در زمینه‌ی بهره‌برداری بهینه از سیستم مخازن سدها بوده‌اند که با پیچیده‌تر شدن مسئله، حل مسئله با استفاده از روش‌های مذکور با

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۱۰/۲۶، اصلاحیه ۱۳۹۵/۱/۲۵، پذیرش ۱۳۹۵/۲/۷.

مشکلاتی روبرو شده است. روش برنامه‌ریزی خطی، روشی بسیار ساده در حل مسائل بهینه‌سازی است و زمانی استفاده می‌شود که تابع هدف و قیود مسئله خطی باشند. مثلاً در سال ۱۹۷۳، یک مدل برنامه‌ریزی خطی برای تجزیه و تحلیل مسئله‌ی بهره‌برداری از کنترل سیلاب مخازن چندگانه گسترش یافته است که در آن برنامه‌های زمانی رهاسازی به گونه‌یی تعیین شده بودند تا هزینه‌ی خسارت کل را کمینه سازند.[۱] همچنین در سال ۱۹۸۹، از ترکیب روش بهینه‌سازی احتمالاتی ضمنی همراه با برنامه‌ریزی خطی برای بهینه‌سازی بهره‌برداری ۸ سد کلرادوی شمالی استفاده شده است.[۲] در مطالعه‌ی دیگری در همان سال، از روش برنامه‌ریزی خطی برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن استفاده شده است.[۳] و لیکن بیشتر مسائل واقعی غیرخطی هستند و استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی برای حل آنها با محدودیت همراه است. لذا به استفاده از روش برنامه‌ریزی غیرخطی برای حل مسئله‌ی بهره‌برداری از مخازن توجه شده است.

از جمله مطالعات انجام شده در این زمینه، می توان به بهینه‌سازی سیستم برقابی برزیل با استفاده از مدل برنامه‌ریزی غیرخطی تولید انرژی اشاره و نتایج را با مدل برنامه‌ریزی خطی مقایسه کرد. مقایسه‌ی مذکور نشان‌دهنده‌ی بهبود نتایج در روش برنامه‌ریزی غیرخطی بوده است.[۴] همچنین در سال ۲۰۱۰، روش برنامه‌ریزی غیرخطی برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم آبی در کشور پرتقال با زمان‌بندی آبی کوتاه‌مدت استفاده شده است.[۵] با توجه به محدودیت‌های روش برنامه‌ریزی غیرخطی از جمله لزوم پیوستگی و مشتق‌پذیری تابع هدف و قیود و هزینه‌ی محاسباتی زیاد آن، به استفاده از سایر روش‌ها از جمله روش برنامه‌ریزی پویا برای حل مسئله‌ی مذکور توجه شده است. از جمله در سال ۲۰۰۳، شرایط مطلوب بهره‌برداری از مخازن در شرایط خشکسالی با استفاده از مدل برنامه‌ریزی پویا به‌دست آمده است.[۶] همچنین قابلیت‌ها و مشکلات روش برنامه‌ریزی پویا مخصوصاً در زمینه‌ی مسائل بهره‌برداری از مخازن در سال ۲۰۰۷ بررسی شده است.[۷] یکی از مشکلات روش مذکور آن بوده است که با گسسته‌سازی متغیرهای تصمیم و حالت، تعداد ترکیبات حاصل از آن به میزان چشمگیری افزایش یافته و منجر به پدید آمدن مشکل محاسباتی و یا اصطلاحا «نفرین ابعادی» شده است.[۸]

با توجه به محدودیت‌های روش‌های ذکر شده، امروزه برخی پژوهشگران به استفاده از دسته‌ی دیگری از روش‌ها به نام الگوریتم‌های فراکاوشی توجه کرده‌اند. الگوریتم‌های فراکاوشی، دسته‌یی از روش‌ها هستند که بر مبنای روش‌های الهام گرفته از طبیعت ارائه می‌شوند. از جمله مزایای الگوریتم‌های مذکور، عدم‌نیاز به پیوستگی، مشتق‌پذیری، محدب بودن تابع هدف و محاسبات مربوط به گرادیان‌هاست. همچنین رفتار جست‌وجوی هوشمندانه مانع به دام افتادن در نقاط بهینه‌ی محلی می‌شود و به علت درگیر بودن با مجموعه‌یی از جواب‌ها، تعداد زیادی از جواب‌های بهینه را تعیین خواهند کرد.[۹] از جمله الگوریتم‌های فراکاوشی می‌توان به الگوریتم ژنتیک (GA)،[۵] الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل (HBMO)،[۶] الگوریتم بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچگان (ACO)[۷] الگوریتم هوش جمعی ذرات (PSO)[۸] و الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی (ABC)[۹] اشاره کرد. در این زمینه نیز در مطالعه‌یی در سال ۱۹۹۴، قابلیت‌های الگوریتم ژنتیک با برنامه‌ریزی پویا در تحلیل یک سیستم با ۴ مخزن مقایسه شده و نتایج حاکی از آن بوده است که الگوریتم ژنتیک در مقایسه با مدل برنامه‌ریزی پویا، قابلیت مناسبی در حل مسئله‌ی مذکور دارد.[۱۰]

همچنین در سال ۲۰۰۶، با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچگان و بهره‌گیری از شیوه‌ی وزن‌دهی و تبدیل مسائل چندهدفه به تک‌هدفه، مسئله‌ی بهره‌برداری مخزن با اهداف کشاورزی و تولید انرژی برقابی بررسی شده است.[۱۱] با استفاده از الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل (۲۰۰۷)، نیز مسئله‌ی بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن بررسی و نشان داده شده است که روش ذکر شده در مقایسه با نتایج حاصل از برنامه‌ریزی خطی سنتی توسعه یافته، نتایج بهتری را ارائه می‌دهد.[۱۲]

همچنین در سال ۲۰۰۸، الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان مقید برای حل بهینه‌ی مسائل بهره‌برداری از مخازن معرفی شده است.[۱۳] در سال ۲۰۰۹ نیز از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچگان برای حل مسئله‌ی بهره‌برداری بهینه از مخزن سد دز استفاده شده است.[۱۴] همچنین در سال ۲۰۱۰، از الگوریتم هوش جمعی ذرات برای محاسبات مربوط به طراحی بهینه‌ی سیستم مخزن ساده استفاده شده است.[۱۵] در سال ۲۰۱۱ نیز از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی تولید انرژی برقابی سد تمنگور استفاده و ذخیره‌سازی آب برای رسیدن به یک ظرفیت مناسب در بهره‌برداری مخزن مطالعه شده است.[۱۶] همچنین با استفاده از الگوریتم هوش جمعی ذرات مقید (۲۰۱۲)، حل مسئله‌ی بهره‌برداری از مخزن سد دز بررسی و نتایج حاصل با حالت نامقید مقایسه شده است.[۱۷] برخی پژوهشگران نیز الگوریتم بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچگان مقید و هوش جمعی ذرات مقید را برای بهینه‌سازی سیستم‌های چندمخزنه توسعه دادند.[۱۸و۱۹] در سال ۲۰۱۴، مسئله‌ی بهینه‌سازی تعیین خروجی مخزن با استفاده از ۴ الگوریتم مختلف حل شده و یک مقایسه بین نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک، الگوریتم هوش جمعی ذرات و الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی در یافتن سیاست بهینه برای خروجی از مخزن انجام شده و نتایج به‌دست آمده، نشان‌دهنده‌ی عملکرد مناسب‌تر الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی در برآوردن نیازها، اجتناب از هدر رفت آب و مدیریت دوره‌ی بحرانی کم آب بوده است.[۲۰]

همچنین برخی پژوهشگران سیاست بهره‌برداری کارآمد از مخزن را با استفاده از الگوریتم کلونی زنبورعسل مصنوعی تعیین کرده که براساس آن سیاست به‌دست آمده با استفاده از الگوریتم مذکور، قادر به برآوردن ۹۸٪ نیازها در کل دوره‌ی زمانی بوده است.[۲۱] در سال ۲۰۱۵ نیز با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچگان بیشینه ـ کمینه، مسئله‌ی بهره‌برداری از سیستم چند مخزنه‌ی سد گلستان و وشمگیر به‌دست آورده شده است.[۲۲] از الگوریتم هوش جمعی ذرات آموزش جامع توسعه یافته[۱۰] به منظور بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم‌های برقابی چند مخزن استفاده شده و نتایج نشان‌دهنده‌ی آن بوده است که استفاده از الگوریتم مذکور، کمک شایانی به یافتن جواب‌های مطلوب شدنی می‌کند.[۲۳] همچنین در سال ۲۰۱۶، عملکرد الگوریتم ژنتیک به منظور بهینه‌سازی سیاست بهره‌برداری از مخازن برقابی با هدف بیشینه‌سازی تولید انرژی برقابی بررسی شده و نتایج نشان داده است که استفاده از الگوریتم مذکور، باعث افزایش تولید انرژی برقابی و افزایش پایداری سیستم می‌شود.[۲۴]

یکی از مهمترین معایب الگوریتم‌های فراکاوشی این است که در حالت کلی، یک الگوریتم کامل برای حل تمامی مسائل بهینه‌سازی وجود ندارد و لذا هر یک از الگوریتم‌های پیشنهادی برای حل مسائل بهینه‌سازی خاصی در حوزه‌های مختلف استفاده می‌شود. همچنین برخی الگوریتم‌ها نظیر الگوریتم بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچگان برای حل مسائل گسسته مناسب است و حل مسائل پیوسته نظیر مسئله‌ی بهره‌برداری بهینه از مخازن، مستلزم گسسته‌سازی مسئله است و باعث ایجاد خطا می‌شود. با توجه به نکته‌ی ذکر شده، ارائه‌ی الگوریتم‌های فراکاوشی جدید برای حل مسائل بهینه‌سازی کماکان مورد توجه پژوهشگران بوده است. یکی از جدیدترین الگوریتم‌های فراکاوشی، الگوریتم جستجوی گرانشی[۱۱] است. از مزایای الگوریتم جست‌وجوی گرانشی، قابلیت استفاده‌ی آن در حل مسائل پیوسته، بالا بودن سرعت هم‌گرایی آن در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها، و ارائه‌ی جواب‌های مناسب‌تر است. از الگوریتم جست‌وجوی گرانشی در حوزه‌های مختلفی استفاده شده است، ولیکن به کاربرد آن در مهندسی عمران جز در برخی مطالعات محدود توجه نشده است.

درخصوص مطالعات پژوهشی انجام شده با استفاده از الگوریتم مذکور در مهندسی عمران می‌توان به چند پژوهش اشاره کرد: در سال ۲۰۱۲، از الگوریتم جست‌وجوی گرانشی اصلاح شده برای آنالیز پایداری شیب استفاده شده است.[۲۵]

همچنین در پژوهش دیگری در همان سال، از الگوریتم جست‌وجوی گرانشی برای بهینه‌سازی سازه‌های نگهدارنده استفاده شده است.[۲۶] در سال ۲۰۱۳، نیز با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی گرانشی گسسته و با ارائه‌ی یک مدل، طراحی مبتنی بر قابلیت اطمینان در سازه‌های بتن مسلح شامل اندرکنش خاک و سازه‌ی بهینه شده است.[۲۷] همچنین یک روش ترکیبی براساس الگوریتم جست‌وجوی گرانشی بهبود یافته و تقاطع متعامد، برای بهینه‌سازی شکل سدهای بتنی - وزنی در سال ۲۰۱۴ ارائه شده است.[۲۸] بررسی مطالعات انجام شده نشان‌دهنده‌ی آن است که ارزیابی قابلیت‌های الگوریتم جست‌وجوی گرانشی در حل مسائل حوزه‌ی منابع آب، موضوع مطالعات جدیدی است. لذا در پژوهش حاضر، قابلیت‌های این الگوریتم در حل مسئله‌ی بهره‌برداری بهینه از سیستم تک‌مخزن بررسی شده است.

در پژوهش حاضر، از الگوریتم جست‌وجوی گرانشی برای حل مسئله‌ی بهره‌برداری بهینه‌ی ساده و برقابی سد دز برای دوره‌های ۶۰ و ۲۴۰ ماهه استفاده شده است. در حالت اول، میزان آب رها شده از مخزن سد و در حالت دوم میزان حجم ذخیره‌ی مخزن در انتهای هر ماه به‌عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است. در نهایت نتایج به‌دست آمده، با نتایج حاصل از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچگان، الگوریتم هوش جمعی ذرات و الگوریتم بهینه‌سازی جفت‌گیری زنبورعسل مقایسه شده است. ساختار پژوهش حاضر بدین صورت است که ابتدا الگوریتم جست‌وجوی گرانشی توضیح داده شده است. سپس مدل ریاضی مسئله‌ی بهره‌برداری بهینه‌ی ساده و برقابی سد دز ارائه و در ادامه، مسائل موردنظر در دو حالت مذکور حل و نتایج آن ارائه شده است.

۲. الگوریتم جست‌وجوی گرانشی

الگوریتم جست‌وجوی گرانشی، یکی از جدیدترین الگوریتم‌های فراکاوشی است که اولین بار در سال ۲۰۰۹، مطرح شده است.[۲۹] اساس الگوریتم مذکور، بر پایه‌ی قانون گرانش نیوتن است و بهینه‌یابی از طریق طرح قوانین گرانشی در یک سیستم مصنوعی با زمان گسسته انجام می‌گیرد. در ابتدا، از الگوریتم جست‌وجوی گرانشی برای انتخاب ویژگی تصاویر و از طریق یک پایگاه تصویر شامل ۱۰۰۰ تصویر با ۱۰ کلاس معنایی (مردم، ساختمان‌ها، گل‌ها و ...) استفاده و نتایج آن با الگوریتم ژنتیک و هوش جمعی مقایسه شده است که نشان‌دهنده‌ی عملکرد بالای الگوریتم جست‌وجوی گرانشی بوده است. در حالت کلی الگوریتم جستجوی گرانشی را می‌توان به این صورت توضیح داد: محیط سیستم در الگوریتم جست‌وجوی گرانشی، شامل یک دستگاه مختصات چندبعدی در فضای تعریف مسئله است که هر نقطه از فضا، جوابی از مسئله‌ی مذکور است و عامل‌های جست‌وجو کننده، مجموعه‌یی از اجرام هستند. در فیزیک برای هر جرم، ۴ ویژگی: موقعیت جرم، جرم گرانشی فعال، جرم گرانشی غیرفعال و جرم اینرسی تعریف می‌شود. موقعیت هر جرم، یک نقطه در فضاست که نشان‌دهنده‌ی جوابی از مسئله است. مقادیر اجرام گرانشی و اینرسی نیز با توجه به برازندگی هر جرم تعیین می‌شوند. با تشکیل محیط سیستم، قوانین حاکم بر سیستم مشخص می‌شود. در این الگوریتم فرض بر آن است که فقط قانون گرانش و قوانین حرکت بر محیط سیستم مسئله حاکم هستند که به این صورت تعریف شده‌اند:

۱. قانون گرانش: هر جرم در سیستم مصنوعی، تمام اجرام دیگر را به سمت خود جذب می‌کند. مقدار این نیرو با حاصل‌ضرب جرم گرانشی فعال آن جسم در جرم گرانشی غیرفعال جسم مقابل و عکس فاصله‌ی آن دو جسم متناسب است.

۲. قوانین حرکت: سرعت فعلی هر جرم با مجموع ضریبی از سرعت قبلی و تغییر سرعت آن برابر است. علاوه بر این، تغییر سرعت یا شتاب هر جرم با نیروی وارد بر آن تقسیم بر جرم اینرسی برابر است.

سیستم را می‌توان به‌صورت مجموعه‌یی از N جرم تصور کرد که موقعیت بعد d از جرم i با x_i^d نشان داده می‌شود (رابطه‌ی ۱):

$$x_i = (x_i^1, ..., x_i^d, ..., x_i^n) \quad for \quad i = 1, 2, ..., N \tag{۱}$$

در این سیستم در زمان t به جرم i از سوی جرم j در جهت بعد d نیرویی به اندازه‌ی $F_{ij}^d(t)$ وارد می‌شود. مقدار این نیرو به‌صورت رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود:

$$F_{ij}^d(t) = G(t)\frac{M_{pi}(t).M_{aj}(t)}{R_{ij}(t)^{R_{power}} + \varepsilon}(x_j^d(t) - x_i^d(t)) \tag{۲}$$

که در آن، $M_{pi}(t)$ و $M_{aj}(t)$ به ترتیب جرم گرانشی فعال جرم j و جرم گرانشی غیرفعال جرم i، $G(t)$ ثابت گرانش در زمان t، $R_{ij}(t)$ فاصله‌ی بین دو جرم i و j در زمان t، R_{power} توان فاصله‌ی بین دو جرم و ε یک عدد بسیار کوچک است. در اینجا برای تعیین فاصله بین اجرام از فاصله‌ی اقلیدسی (نرم ۲) استفاده می‌شود، لذا رابطه‌ی ۳ را خواهیم داشت:

$$R_{ij}(t) = \left|\left|x_i(t), x_j(t)\right|\right|_2 \tag{۳}$$

علاوه بر این، نیروی وارد بر جرم i در جهت بعد d در زمان t $(F_i^d(t))$ مطابق رابطه‌ی ۴، برابر مجموع ضریب‌های تصادفی نیروهایی است که K جرم برتر بر جرم وارد می‌کنند. لذا خواهیم داشت:

$$F_i^d(t) = \sum_{j \in K_{best}, j \neq i} rand_j F_{ij}^d(t) \tag{۴}$$

که در آن، $rand_j$ یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه‌ی [۱ ۰] است و سایر پارامترها پیش از این تعریف شده‌اند. در رابطه‌ی ۴، برای بهبود قدرت کشف الگوریتم، فقط به مجموعه‌ی K_{best} (شامل K عضو برتر)، اجازه‌ی تأثیرگذاری در سایر اعضا داده می‌شود، در صورتی که می‌توان مجموع تمام نیروهای وارد بر جسم را منظور کرد. در الگوریتم‌هایی که براساس جمعیت هستند، در زمان‌های اولیه لازم است که یک جست‌وجوی فراگیر و جامع انجام شود و الگوریتم باید در تکرارهای اولیه، کل فضای جست‌وجو را بررسی کند. اما با گذشت زمان، توانایی کشف الگوریتم بالا می‌رود و الگوریتم به سمت نقاط بهینه حرکت می‌کند. در حالت کلی این مفاهیم با دو واژه‌ی «اکتشاف»[۱۲] و «بهره‌برداری»[۱۳] تعریف می‌شوند که در هر الگوریتم لازم است به‌صورت مناسبی تنظیم شوند. در الگوریتم جست‌وجوی گرانشی، راهکار پیشنهادی برای تنظیم مناسب دو پارامتر مذکور، تأثیرگذاری انتخابی اجرام است. در تکرارهای اولیه‌ی الگوریتم، هنوز مسئله احتیاج به جست‌وجوی مناسب دارد، اما با پیشرفت زمان، جمعیت به نتایج بهتری خواهد رسید. بنابراین، مقدار K به‌صورت متغیر با زمان تعریف می‌شود. به این صورت که در زمان شروع، تمام اجرام در یکدیگر تأثیر می‌گذارند و با گذشت زمان، از تعداد اعضاء تأثیرگذار در جمعیت به‌صورت نسبی کاسته می‌شود، تا درنهایت فقط ۲٪ از بهترین‌های جمعیت بر سایر اعضا نیرو وارد می‌کنند. طبق قانون دوم نیوتن، هر جرم در جهت بعد dام شتابی می‌گیرد

که با نیروی وارد بر آن جرم در جهت بعد dاُم و معکوس جرم اینرسی آن متناسب است (رابطه‌ی ۵):

$$a_i^d(t) = \frac{F_i^d(t)}{M_{ii}(t)} \qquad (۵)$$

که در آن، $a_i^d(t)$ شتاب جرم i در جهت بعد d در زمان t و $M_{ii}(t)$ جرم اینرسی جسم i در زمان t است. علاوه بر این سرعت جدید هر جرم با مجموع ضریبی از سرعت فعلی جرم و شتاب جرم برابر است (رابطه‌ی ۶):

$$v_i^d(t+۱) = rand_i \times v_i^d(t) + a_i^d(t) \qquad (۶)$$

که در آن، $v_i^d(t+۱)$ سرعت جدید بعد d جرم i، $v_i^d(t)$ سرعت فعلی جرم، $a_i^d(t)$ شتاب فعلی جرم و $rand_i$ عددی تصادفی در بازه‌ی [۱ ۰] است. در نهایت، موقعیت جدید بعد d از جرم i طبق رابطه‌ی ۷ محاسبه می‌شود:

$$x_i^d(t+۱) = x_i^d(t) + v_i^d(t+۱) \qquad (۷)$$

که در آن، $x_i^d(t+۱)$ موقعیت جدید بعد d از جرم i و $x_i^d(t)$ موقعیت فعلی بعد d جرم است. در الگوریتم مذکور برای محاسبه‌ی ثابت گرانش، ابتدا یک مقدار اولیه در نظر گرفته می‌شود، سپس با گذشت زمان مقدار آن کاهش می‌یابد. مطابق با رابطه‌ی ۸، ثابت گرانش تابعی از ثابت گرانش اولیه و زمان است. در دنیای واقعی نیز این موضوع صدق می‌کند و ثابت گرانش با آهنگ بسیار کندی در طی زمان کاهش پیدا می‌کند، لذا ثابت گرانش در هر زمان مطابق رابطه‌ی ۸ محاسبه می‌شود:

$$G(t) = G_۰ e^{\frac{-\alpha t}{T}} \qquad (۸)$$

که در آن، $G_۰$ ثابت گرانش اولیه، α یک ثابت مثبت و T کل تکرارهای الگوریتم و به عبارتی طول عمر سیستم است.

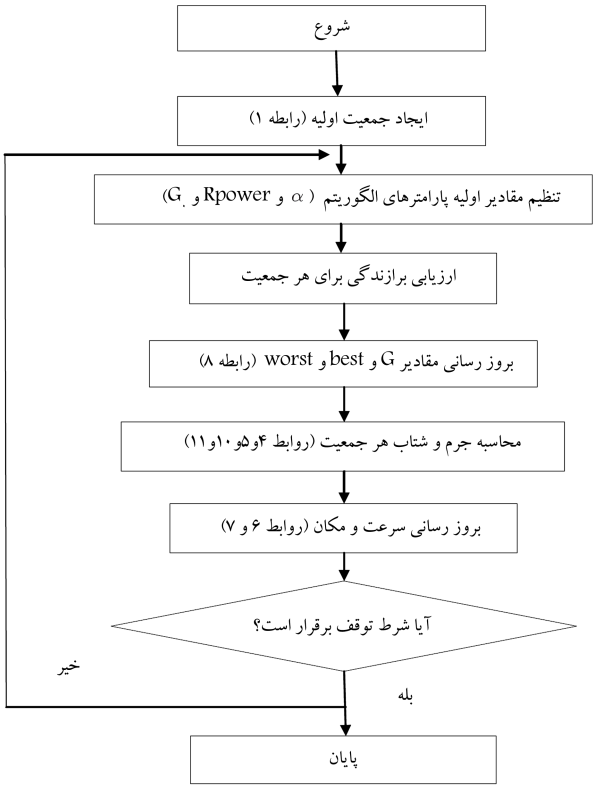
در الگوریتم جستجوی گرانشی، اجرام گرانشی و اینرسی مطابق رابطه‌ی ۹ برابر در نظر گرفته می‌شوند و برای تنظیم آنها از مقدار تابع هدف اجرام مطابق با رابطه‌ی ۱۰ استفاده می‌شود. سپس مقدار اجرام مطابق رابطه‌ی ۱۱ نرمالیزه می‌شود. در روابط ذکر شده به اجرام با برازندگی بهتر، جرم بیشتری نسبت داده می‌شود:

$$M_{ai} = M_{pi} = M_{ii} = M_i \qquad (۹)$$

$$q_i(t) = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{best(t) - worst(t)} \qquad (۱۰)$$

$$M_i(t) = \frac{q_i(t)}{\sum_{j=۱}^{N} q_j(t)} \qquad (۱۱)$$

که در آنها، M_{ai} جرم گرانشی فعال، M_{pi} جرم گرانشی غیرفعال، M_{ii} جرم اینرسی که همگی برابر با M_i در نظر گرفته شده‌اند. همچنین $q_i(t)$ مقدار تابع هدف در زمان t، $fit_t(t)$ بیانگر میزان برازندگی جرم i در زمان t و $M_i(t)$ جرم نرمالیزه شده در زمان t است. شایان ذکر است که برای الگوریتم مذکور، یک کد اولیه تهیه شده است.[۲۹] در پژوهش حاضر، به منظور حل مسائل مورد بررسی، کدهای مربوط به الگوریتم جست‌وجوی گرانشی که در محیط نرم‌افزار متلب[۱۴] نوشته شده بودند، اصلاح شده است. علاوه بر آن، برای مدل شبیه‌سازی مسائل نیز در محیط نرم‌افزار متلب کدنویسی انجام شده است. شکل ۱، گام‌های اساسی حل مسئله با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی گرانشی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. گام‌های اساسی الگوریتم جست‌وجوی گرانشی.

۳. مسئله‌ی بهره‌برداری بهینه از سیستم تک‌مخزن

به منظور حل مسئله‌ی بهره‌برداری بهینه از مخزن سد، در ابتدا باید مدل ریاضی مسئله تعریف شود. مدلسازی ریاضی نیازمند تعریف متغیر تصمیم، تابع هدف و قیود مسئله است. در بخش کنونی، دو مسئله‌ی بهره‌برداری ساده و برقابی مدلسازی شده است. برای حل مسائل مذکور، ابتدا آب رها شده از مخزن (حالت اول) و سپس حجم ذخیره‌ی مخزن در انتهای هر ماه (حالت دوم) به‌عنوان متغیر تصمیم مسئله منظور شده است. در مسئله‌ی بهره‌برداری ساده، تابع هدف کمینه‌سازی میزان کمبود اعمال شده به یک نیاز مشخص است. و لیکن در مسئله‌ی بهره‌برداری برقابی، تابع هدف، کمینه‌سازی توان تولیدی نیروگاه نسبت به ظرفیت نصب نیروگاه است. توابع هدف مسائل بهره‌برداری ساده و برقابی به ترتیب در ادامه ارائه شده است. تابع هدف مسئله‌ی بهره‌برداری ساده به‌صورت رابطه‌ی ۱۲ تعریف می‌شود:[۱۳،۱۴و۱۷]

$$F = \text{minimize} \sum_{t=۱}^{NT} [\frac{D(t) - r(t)}{D_{\max}}]^۲ \qquad (۱۲)$$

که در آن، NT کل دوره‌های زمانی، $D(t)$ میزان نیاز در دوره‌ی زمانی t (میلیون مترمکعب، MCM)، $r(t)$ میزان رهاسازی از مخزن در دوره‌ی زمانی t (MCM) و $D_{\max}$ بیشینه‌ی نیاز کل دوره‌های زمانی (MCM) هستند. همچنین تابع هدف مسئله‌ی بهره‌برداری برقابی نیز به‌صورت رابطه‌ی ۱۳ تعریف می‌شود:[۱۳،۱۴و۱۷]

$$F = \text{minimize} \sum_{t=۱}^{NT} [۱ - \frac{P(t)}{power}] \qquad (۱۳)$$

که در آن، $P(t)$ توان تولیدی نیروگاه در دوره‌ی زمانی tاُم (مگاوات) و power ظرفیت نصب نیروگاه (مگاوات) است. مقدار توان تولیدی نیروگاه در دوره‌ی زمانی

tاُم به‌صورت روابط ۱۴ و ۱۵ محاسبه می‌شوند:

$$P(t) = \min[(\frac{g \times \eta \times R(t)}{PF}) \times (\frac{h(t)}{۱۰۰۰}), power] \quad (۱۴)$$

$$h(t) = (\frac{H(t) + H(t+۱)}{۲}) - TWL \quad (۱۵)$$

که در آنها، g شتاب ثقل (مترمربع بر ثانیه)، η بازدهی نیروگاه، PF ضریب کارکرد نیروگاه، $h(t)$ بار آب مؤثر در نیروگاه در دوره‌ی زمانی tاُم (متر)، TWL تراز پایاب نیروگاه از سطح دریا (متر) و $Power$ نشانگر ظرفیت نصب نیروگاه است.

در ادامه، به منظور تکمیل مدل‌سازی، قیدهای مسائل نیز تعریف شده‌اند. مهمترین قید حاکم بر این دو مسئله، قید پیوستگی است که به‌صورت رابطه‌ی ۱۶ تعریف می‌شود:

$$s(t+۱) = s(t) + I(t) + r(t) - l(t) \quad (۱۶)$$

که در آن، $s(t)$ حجم مخزن در ابتدای دوره‌ی زمانی t (MCM)، $I(t)$ میزان جریان ورودی به مخزن در دوره‌ی زمانی t (MCM)، $r(t)$ میزان آب رها شده از مخزن در دوره‌ی زمانی t (MCM)، $l(t)$ میزان تلفات در دوره‌ی زمانی t (MCM) است. سایر قیود حاکم بر مسئله (روابط ۱۷ و ۱۸) عبارت‌اند از:

$$r_{\min} \le r(t) \le r_{\max} \quad (۱۷)$$

$$s_{\min} \le s(t) \le s_{\max} \quad (۱۸)$$

که در آنها، $r_{\min}$ کمینه‌ی میزان رهاسازی از مخزن (MCM)، $r_{\max}$ بیشینه‌ی میزان رهاسازی از مخزن (MCM)، $s_{\min}$ کمینه‌ی حجم مجاز مخزن (MCM) و $s_{\max}$ بیشینه‌ی حجم مجاز مخزن (MCM) هستند.

مسائل بهینه‌سازی تعریف شده، مسائل مقید هستند. برای اعمال قیود مسائل مقید می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده کرد. در پژوهش حاضر، به منظور اعمال قیود مسئله از روش ضریب جریمه‌ی ثابت استفاده شده است که در آن زمانی که جواب مسئله نشدنی باشد، مقدار تخلف از قیدها محاسبه و در یک مقدار ثابت (ضریب جریمه) ضرب و در نهایت با تابع هدف مسئله جمع می‌شود. لذا تابع هدف جدید مسئله در این حالت به‌صورت رابطه‌ی ۱۹ تعریف می‌شود:

$$F_p = \begin{cases} F \;\; if \;\; solution \;\; is \;\; feasible \\ F + \alpha_p \times \sum_{t=۱}^{NT} CSV_t \quad OW \end{cases} \quad (۱۹)$$

که در آن، F مقدار واقعی تابع هدف، F_p مقدار تابع هدف جریمه‌دار، CSV_t مقدار تخلف از قیود در دوره‌ی زمانی tاُم و α_p ضریب جریمه است که مقدار مطلوب آن با سعی و خطا به‌دست می‌آید. در پژوهش حاضر، مقدار این ضریب برای مسئله‌ی ساده و برقابی در هر دو حالت ۱۰۰۰۰۰ است.

۴. مسئله‌ی نمونه‌ی مورد مطالعه

برای مطالعه‌ی موردی در پژوهش حاضر، مسئله‌ی بهره‌برداری ساده و برقابی از مخزن سد دز با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی گرانشی بررسی و در دو حالت حل شده است. سد دز یکی از بلندترین سدهای ساخته شده در جنوب غربی ایران است که بر روی رودخانه‌ی دز در استان خوزستان و در ۲۵ کیلومتری شمال شهر دزفول احداث شده است. رودخانه‌ی دز از ارتفاعات غربی زاگرس سرچشمه می‌گیرد و در ۴۵ کیلومتری شمال اهواز به رودخانه‌ی کارون می‌رسد. بدنه‌ی سد از نوع بتنی دو قوسی و ارتفاع آن از پی ۲۰۳ متر و از کف رودخانه ۱۰۹ متر است. عرض بدنه‌ی سد در پی ۲۷ متر، در تاج ۴/۵ متر، طول تاج ۲۱۲ متر و رقوم تاج سد ۳۵۴ متر از سطح دریاست. مساحت دریاچه در رقوم ذکر شده، ۶۵ کیلومترمربع است.[۳۰] شکل ۲، موقعیت جغرافیایی حوضه‌ی آبریز سد را نشان می‌دهد. مسائل موردنظر برای دوره‌های ۶۰ و ۲۴۰ ماهه حل شده و بنابراین در مسائل ذکر شده به ترتیب ۶۰ و ۲۴۰ متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است. در هر دو حالت حل شده، حجم ذخیره‌ی مخزن در ابتدا معلوم و برابر با ۱۴۳۰ میلیون مترمکعب در نظر گرفته شده است. مقادیر بیشینه و کمینه‌ی حجم مخزن به ترتیب برابر ۳۳۴۰ و ۸۳۰ میلیون مترمکعب و همچنین مقادیر بیشینه و کمینه‌ی میزان خروجی از مخزن نیز به ترتیب برابر ۱۰۰۰ و صفر میلیون مترمکعب در نظر گرفته شده‌اند. مقادیر نیاز و جریان ورودی به مخزن در دوره‌ی ۲۰ ساله، مطابق شکل ۳ است.

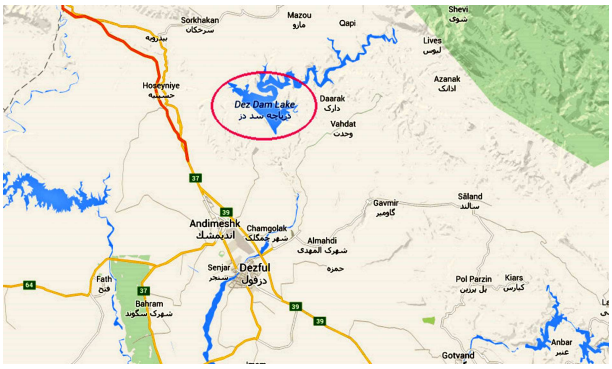
علاوه بر این، نیروگاه سد دز از ۸ واحد ۸۰/۸ مگاواتی تشکیل شده است، که در طول روز در حدود ۱۰ ساعت کار می‌کند. لذا ضریب کارکرد نیروگاه برابر ۰/۴۱۷ است. همچنین ظرفیت نصب نیروگاه برابر با ۶۵۰ مگاوات، بازده نیروگاه برابر ۹۰٪ و تراز پایاب نیروگاه سد دز ۱۷۲ متر بالاتر از سطح دریا در نظر گرفته شده است. برای تعریف بار آب مؤثر در توربین‌ها با استفاده از مقادیر حجم ـ ارتفاع مخزن، یک چند جمله‌یی درجه ۳ بر مقادیر برازش داده شده است که به‌صورت رابطه‌ی ۲۰ بیان می‌شود:

$$H(t) = a + b \times s(t) + c \times s(t)^{۲} + d \times s(t)^{۳} \quad (۲۰)$$

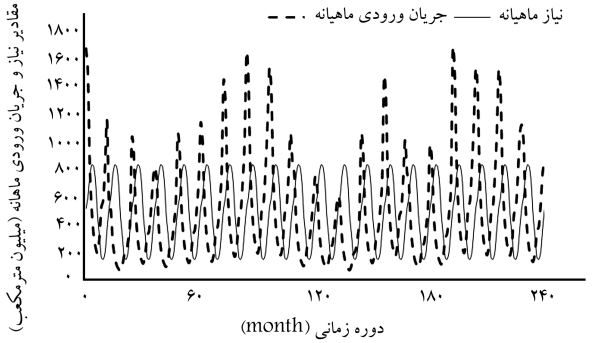
$$a = ۲۴۹/۸۳۳۶۴, b = ۰/۰۵۸۷۲۰۵ \quad (۲۱)$$

$$c = -۱/۳۷ \times ۱۰^{-۵}, d = ۱/۵۲۶ \times ۱۰^{-۹} \quad (۲۲)$$

همچنین در حل مسائل مذکور، مقادیر تلفات صفر منظور شده است.



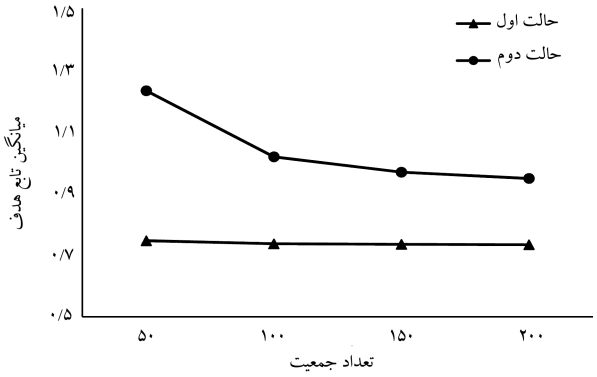
شکل ۲. موقعیت جغرافیایی حوضه‌ی آبریز سد دز.



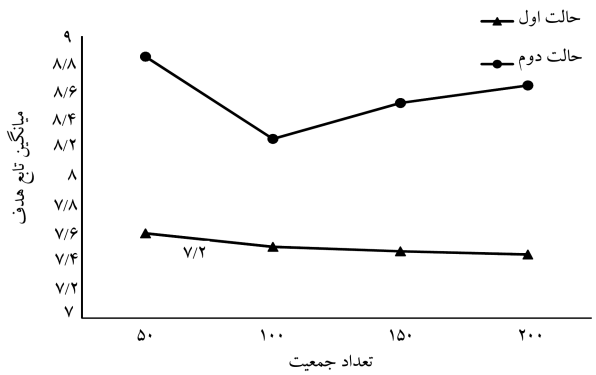
شکل ۳. مقادیر نیاز و جریان ورودی به مخزن سد دز در دوره‌ی ۲۴۰ ماهه.

۵. نتایج و بحث

در بخش حاضر، مسائل ساده و برقابی نمونه‌ی مورد مطالعه، با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی گرانشی در دو حالت تعریف شده برای دوره‌های زمانی ۶۰ و ۲۴۰ ماهه حل و نتایج بررسی و تجزیه و تحلیل شده‌اند. الگوریتم جست‌وجوی گرانشی شامل پارامترهایی است که لازم است برای تعیین مقادیر مناسب آنها آنالیز حساسیت برای آنها انجام شود. در ادامه، نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای مختلف الگوریتم مذکور برای دوره‌ی زمانی ۶۰ ماهه ارائه شده است. به منظور نشان دادن تأثیر تعداد اجرام در مقادیر تابع هدف، مسئله‌ی بهره‌برداری ساده و برقابی در هر دو حالت برای دوره‌ی ۶۰ ماهه و به ازاء تعداد اجرام مختلف حل شده است. شکل‌های ۴ و ۵، مقادیر میانگین تابع هدف را به ترتیب برای مسئله‌ی بهره‌برداری ساده و برقابی به ازاء تعداد اجرام در دو حالت مختلف نشان می‌دهند. بررسی نتایج شکل ۴ نشان‌دهنده‌ی آن است که در مسئله‌ی بهره‌برداری ساده با افزایش تعداد اجرام، مقادیر تابع هدف بهبود پیدا کرده است. و لیکن بررسی نتایج شکل ۵ نشان‌دهنده‌ی آن است که در مسئله‌ی بهره‌برداری برقابی در حالت اول با افزایش تعداد اجرام، مقادیر میانگین تابع هدف کاهش یافته‌اند. ولیکن در حالت دوم، مقادیر تابع هدف ابتدا کاهش و سپس افزایش یافته‌اند. برای سایر پارامترها نیز آنالیز حساسیت انجام شده است. شکل‌های شکل‌های ۶ و ۷، به ترتیب مقادیر میانگین تابع هدف در دو حالت به ازاء مقادیر مختلف α را برای مسئله‌ی ساده و برقابی نشان می‌دهند.

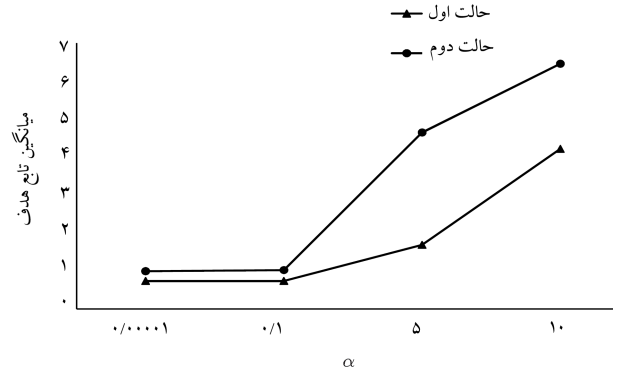


شکل ۴. مقادیر میانگین تابع هدف برای مسئله‌ی بهره‌برداری ساده‌ی ۶۰ ماهه به ازاء تعداد اجرام مختلف و ۱۰ بار اجرا.

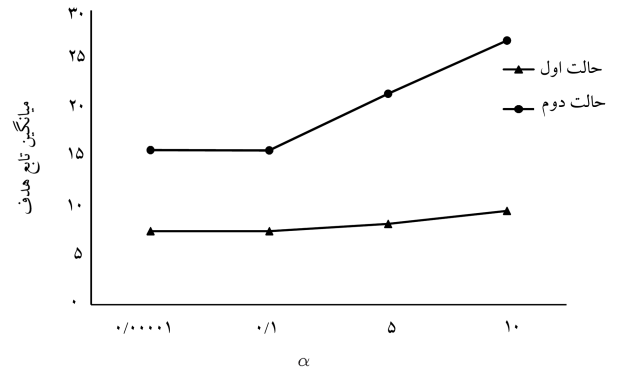


شکل ۵. مقادیر میانگین تابع هدف برای مسئله‌ی بهره‌برداری برقابی ۶۰ ماهه به ازاء تعداد اجرام مختلف و ۱۰ بار اجرا.

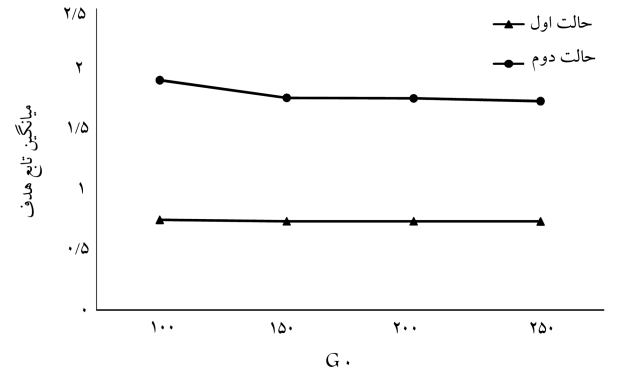
نتایج آنالیز حساسیت نسبت به پارامتر ثابت α نشان‌دهنده‌ی آن است که با کاهش مقدار α از ۱۰ تا ۱، مقادیر تابع هدف با شدت بیشتری کاهش یافته و از ۱ تا ۰/۰۰۰۰۱، کاهش مقدار تابع هدف با شدت کمتری بوده است، تا اینکه در مقدار ۰/۰۰۰۰۱ به بهترین مقدار رسیده است. این روند در هر دو حالت و برای هر دو مسئله‌ی ساده و برقابی صدق می‌کند. از طرفی شدت تغییرات مقدار میانگین تابع هدف در حالت اول نسبت به حالت دوم کمتر بوده است. درخصوص پارامتر G_0 نیز آنالیز حساسیت انجام شده است که شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب مقادیر میانگین



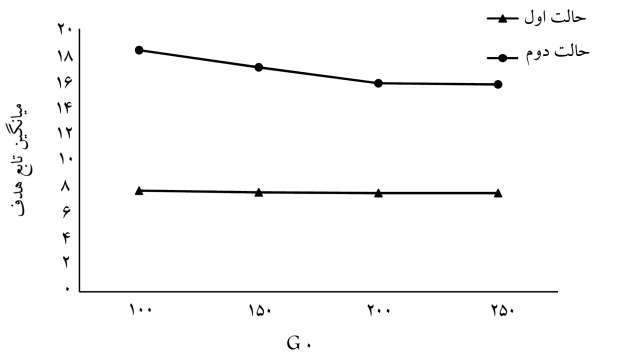
شکل ۶. مقادیر میانگین تابع هدف برای مسئله‌ی بهره‌برداری ساده‌ی ۶۰ ماهه به ازاء مقادیر مختلف α و ۱۰ بار اجرا.



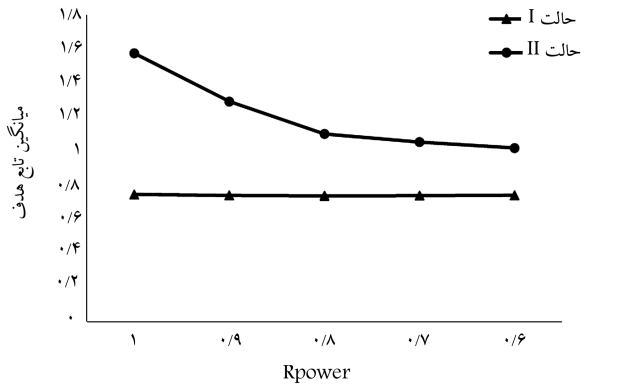
شکل ۷. مقادیر میانگین تابع هدف برای مسئله‌ی بهره‌برداری برقابی ۶۰ ماهه به ازاء مقادیر مختلف α و ۱۰ بار اجرا.



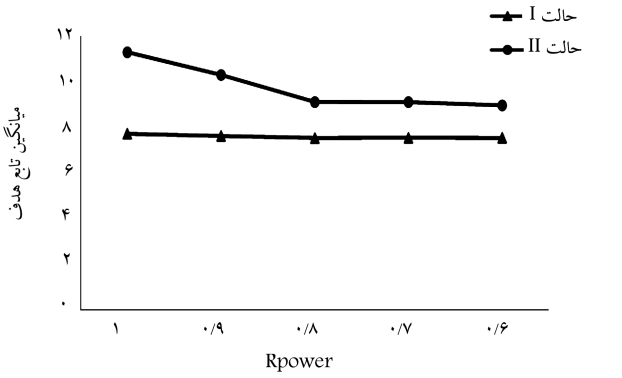
شکل ۸. مقادیر میانگین تابع هدف برای مسئله‌ی بهره‌برداری ساده‌ی ۶۰ ماهه به ازاء مقادیر مختلف G_0 و ۱۰ بار اجرا.



شکل ۹. مقادیر میانگین تابع هدف برای مسئله‌ی بهره‌برداری برقابی ۶۰ ماهه به ازاء مقادیر مختلف G_0 و ۱۰ بار اجرا.



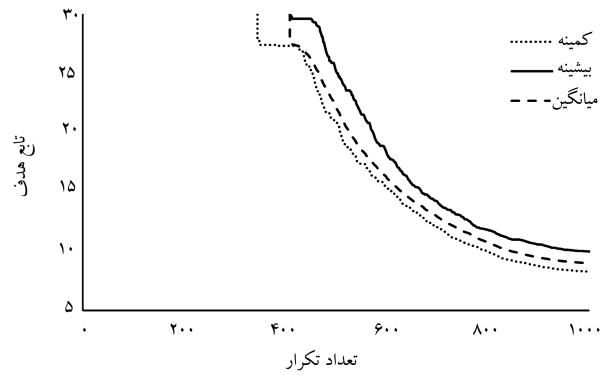
شکل ۱۰. مقادیر میانگین تابع هدف برای مسئله‌ی بهره‌برداری ساده‌ی ۶۰ ماهه به ازاء مقادیر مختلف R_{power} و ۱۰ بار اجرا.



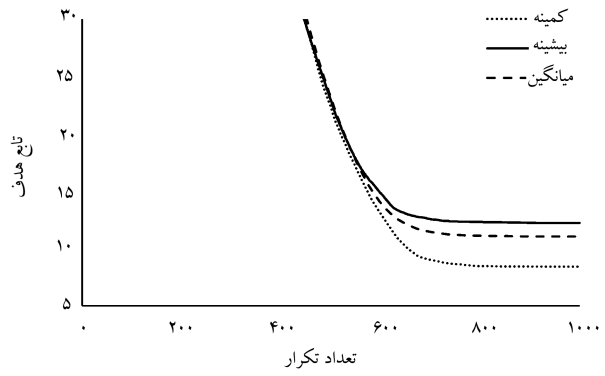
شکل ۱۱. مقادیر میانگین تابع هدف برای مسئله‌ی بهره‌برداری برقابی ۶۰ ماهه به ازاء مقادیر مختلف R_{power} و ۱۰ بار اجرا.

تابع هدف در دو حالت را برای مسئله‌ی ساده و برقابی ارائه می‌کند. آنالیز حساسیت نسبت به پارامتر G_0 نشان‌دهنده‌ی آن است که با افزایش مقدار G_0 از ۱۰۰ تا ۲۵۰، مقدار تابع هدف کاهش می‌یابد تا اینکه در مقدار ۲۵۰ به مقدار بهینه می‌رسد. در حالت کلی، شدت تغییرات مقدار تابع هدف نسبت به تغییرات G_0 کم است و تغییر این پارامتر، تأثیر قابل ملاحظه‌یی در مقدار میانگین تابع هدف ندارد.

در نهایت آنالیز حساسیت نسبت به پارامتر R_{power} انجام شده است. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، مقادیر میانگین تابع هدف در دو حالت به ازاء مقادیر مختلف



شکل ۱۲. مقادیر میانگین، کمینه و بیشینه‌ی تابع هدف برای مسئله‌ی بهره‌برداری ساده‌ی ۲۴۰ ماهه و ۱۰ بار اجرا (حالت اول).



شکل ۱۳. مقادیر میانگین، کمینه و بیشینه‌ی تابع هدف برای مسئله‌ی بهره‌برداری ساده‌ی ۲۴۰ ماهه و ۱۰ بار اجرا (حالت دوم).

R_{power} برای مسئله‌ی ساده و برقابی ارائه شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در حالت اول، با کاهش پارامتر R_{power} از مقدار ۱، مقادیر تابع هدف ابتدا کاهش یافته و در مقدار ۰/۸ به کمترین مقدار رسیده و سپس افزایش یافته است. تأثیر پارامتر مذکور در مقدار تابع هدف در حالت دوم مشهودتر است. شایان ذکر است که در حالت دوم و در هر دو مسئله‌ی ساده و برقابی، با کاهش پارامتر مذکور از مقدار ۱، زمانی که مقدار R_{power} برابر با ۰/۶ است، تابع هدف به کمترین مقدار خود رسیده است.

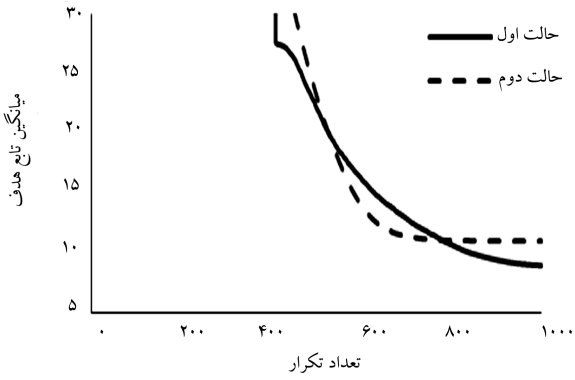
در پژوهش حاضر، پارامترهای ثابت استفاده شده در الگوریتم GSA با استفاده از آنالیز حساسیت تعیین و مسئله‌ی بهره‌برداری ساده در هر دو حالت و دوره‌های زمانی ۶۰ و ۲۴۰ ماهه با استفاده از مقادیر این پارامترها حل شده است. برای حل مسائل مذکور، α برابر با ۰/۰۰۰۰۱، G_0 برابر با ۲۵۰، تعداد اجرام ۱۰۰ و تعداد تکرار ۱۰۰۰ است. همچنین در حالت اول R_{power} برابر ۰/۸ و در حالت دوم برابر با ۰/۶ است. نتایج مربوط به مسئله‌ی بهره‌برداری ساده در جدول ۱ ارائه شده است. مقایسه‌ی نتایج نشان‌دهنده‌ی آن است که برای هر دو مسئله، مقادیر کمینه، بیشینه، میانگین جواب‌ها و انحراف معیار نرمال‌سازی شده در حالت اول از حالت دوم مناسب‌تر است. در حالت اول و در دوره‌های زمانی ۶۰ و ۲۴۰ ماهه بهترین جواب به ترتیب برابر با ۰/۷۳۶ و ۸/۲۴۹ است. ولیکن در حالت دوم حل مسئله، بهترین جواب دوره‌های زمانی ۶۰ و ۲۴۰ ماهه به ترتیب برابر با ۰/۹۵۱ و ۸/۴۰۸ است. علت بیشتر بودن جواب حالت دوم آن است که در حالت دوم، محدوده‌ی تغییرات متغیر تصمیم بیشتر از حالت اول است. همچنین شکل‌های ۱۲ و ۱۳، به

جدول ۱. نتایج به‌دست آمده برای مسئله بهره‌برداری ساده و ۱۰ بار اجرا.

دوره‌ی زمانی (ماه)	حالت	مقدار تابع هدف			انحراف معیار	تعداد
		کمینه	بیشینه	میانگین	نرمال‌سازی شده	جواب شدنی
۶۰	اول	۰٫۷۳۶	۰٫۷۴۳	۰٫۷۳۹	۰٫۰۰۴	۱۰
	دوم	۰٫۹۵۱	۱٫۰۶۵۲	۱٫۰۱۹	۰٫۰۳۹	۱۰
۲۴۰	اول	۸٫۲۴۹	۹٫۹۸۰	۸٫۹۹۹	۰٫۰۶۶	۱۰
	دوم	۸٫۴۰۸	۱۲٫۲۳۰	۱۱٫۰۳۸	۰٫۱۱۴	۱۰

جدول ۲. نتایج به‌دست آمده برای مسئله بهره‌برداری برقابی و ۱۰ بار اجرا.

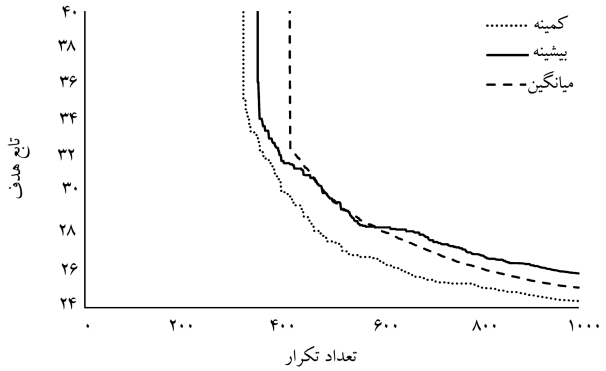
دوره‌ی زمانی (ماه)	حالت	مقدار تابع هدف			انحراف معیار	تعداد
		کمینه	بیشینه	میانگین	نرمال‌سازی شده	جواب شدنی
۶۰	اول	۷٫۵۰۲	۷٫۵۸۳	۷٫۵۴۶	۰٫۰۰۳۴	۱۰
	دوم	۸٫۸۳	۹٫۲۷۴	۸٫۹۷۵	۰٫۰۱۶۹	۱۰
۲۴۰	اول	۲۴٫۶۳۸	۲۶٫۰۵۹	۲۵٫۵۴۷	۰٫۰۲	۱۰
	دوم	۳۰٫۸۲۹	۳۲٫۹۰۰	۳۱٫۷۹۲	۰٫۰۲۱	۱۰



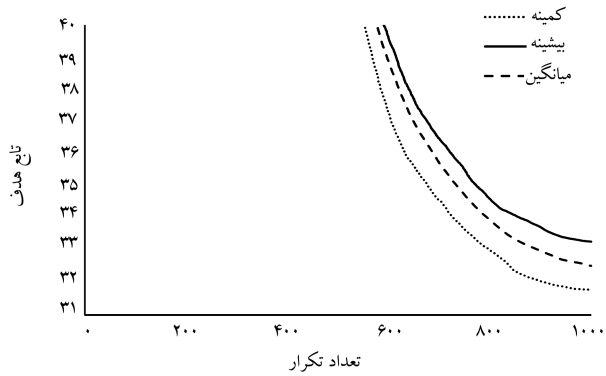
شکل ۱۴. مقادیر میانگین تابع هدف برای مسئله‌ی بهره‌برداری ساده‌ی ۲۴۰ ماهه در دو حالت و ۱۰ بار اجرا.

ترتیب نحوه‌ی تغییرات مقادیر تابع هدف مسئله‌ی بهره‌برداری ساده در حالت‌های اول و دوم و دوره‌ی زمانی ۲۴۰ ماهه را نشان می‌دهد. علاوه بر این، شکل ۱۴ تغییرات مقادیر میانگین تابع هدف مسئله‌ی بهره‌برداری ساده ۲۴۰ ماهه را در دو حالت نشان می‌دهد. نتایج شکل ۱۴ نشان‌دهنده‌ی آن است که با افزایش تعداد تکرار، جواب‌های حالت اول از حالت دوم بهتر و سرعت همگرایی آن بیشتر بوده است. مسئله‌ی بهره‌برداری برقابی نیز با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی گرانشی برای دوره‌های زمانی ۶۰ و۲۴۰ ماهه و برای هر دو حالت متغیر تصمیم حل شده است. مسئله‌ی مذکور با استفاده از بهترین مقادیر پارامترها حل شده و مقادیر تابع هدف در جدول ۲ ارائه شده است. شایان ذکر است که مقادیر مطلوب پارامترها برای مسئله‌ی مذکور همانند مسئله‌ی بهره‌برداری ساده است. مقایسه‌ی نتایج، نشان‌دهنده‌ی آن است که مقادیر کمینه، بیشینه، میانگین تابع هدف و انحراف معیار نرمال‌سازی شده در حالت اول از حالت دوم مناسب‌تر است. در حالت اول و در دوره‌های زمانی ۶۰ و ۲۴۰ ماهه بهترین جواب به ترتیب برابر با ۷٫۵۰۲ و ۲۴٫۶۳۸ بوده است، ولیکن در حالت دوم، بهترین جواب دوره‌های زمانی ۶۰ و ۲۴۰ ماهه به ترتیب برابر با ۸٫۸۳ و ۳۰٫۸۲۹ بوده است. شکل‌های ۱۵ و ۱۶، به ترتیب نحوه‌ی تغییرات مقادیر تابع هدف مسئله‌ی بهره‌برداری برقابی در حالت‌های اول و دوم و دوره‌ی زمانی ۲۴۰ ماهه را نشان می‌دهد. علاوه بر این، شکل ۱۷ تغییرات مقادیر میانگین تابع هدف مسئله‌ی بهره‌برداری برقابی ۲۰ ساله را در دو حالت نشان می‌دهد. نتایج شکل ۱۷، نشان‌دهنده‌ی آن است که همواره جواب‌های حالت اول از حالت دوم بهتر و سرعت همگرایی آن بیشتر بوده است، که به دلیل آن پیش از این اشاره شده است. شکل‌های ۱۸ و ۱۹ به ترتیب مقادیر خروجی بهینه از مخزن و توان تولیدی نیروگاه سد دز در دو حالت پیشنهادی را نشان می‌دهد.

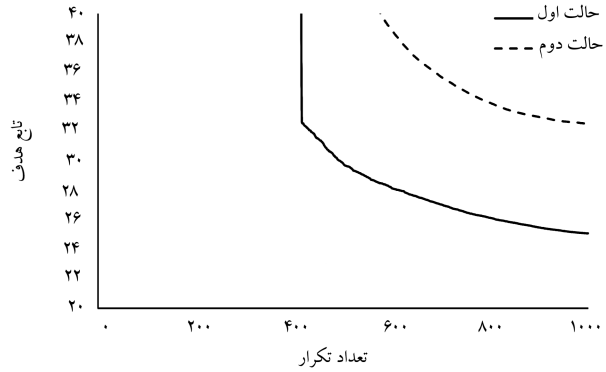
در نهایت به منظور نشان دادن عملکرد و قابلیت‌های الگوریتم پیشنهادی، نتایج حاصل با سایر نتایج موجود مقایسه شده است. شایان ذکر است که مسئله‌ی بهره‌برداری ساده و برقابی با استفاده از نرم‌افزار لینگو[15] مدل شده و جواب بهینه‌ی مطلق به‌دست آمده برای دوره‌های زمانی ۶۰ و ۲۴۰ ماهه‌ی مسئله‌ی بهره‌برداری ساده به ترتیب ۰٫۷۳۱۶ و ۴٫۷۶۸ بوده است.[۱۴] مقایسه‌ی نتایج به‌دست آمده با نتایج نرم‌افزار لینگو، نشان‌دهنده‌ی آن است که جواب‌های به‌دست آمده با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی در حالت اول برای دوره‌های ۶۰ و ۲۴۰ ماهه به ترتیب ۹۹٫۴٪ و ۵۷٫۸٪ جواب‌های به‌دست آمده از نرم‌افزار لینگو است. همچنین جواب‌های به‌دست آمده برای این مسئله در حالت دوم برای دوره‌های ۶۰ و ۲۴۰ ماهه به ترتیب ۷۶٫۹۲٪ و ۵۶٫۷۱٪ جواب‌های به‌دست آمده از نرم‌افزار لینگو است. از طرفی، جواب بهینه‌ی به‌دست آمده با استفاده از نرم‌افزار لینگو برای دوره‌های ۶۰ و ۲۴۰ ماهه‌ی مسئله‌ی بهره‌برداری برقابی به ترتیب ۷٫۳۷۲ و ۲۰٫۶۲۲ بوده است. مقایسه‌ی نتایج به‌دست آمده با نتایج



شکل ۱۵. مقادیر میانگین، کمینه و بیشینه‌ی تابع هدف برای مسئله‌ی بهره‌برداری برقابی ۲۴۰ ماهه در دو حالت و ۱۰ بار اجرا (حالت اول).



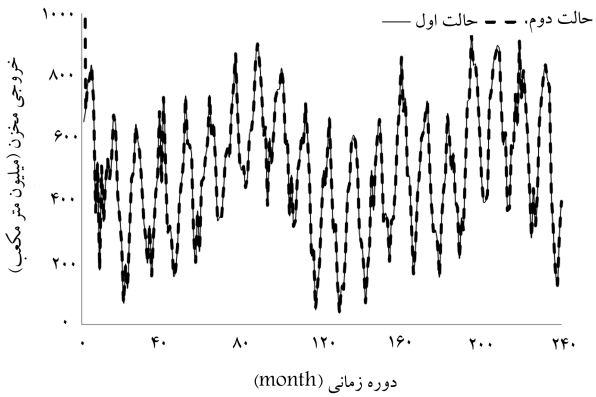
شکل ۱۶. مقادیر میانگین، کمینه و بیشینه‌ی تابع هدف برای مسئله‌ی بهره‌برداری برقابی ۲۴۰ ماهه در دو حالت و ۱۰ بار اجرا (حالت دوم).



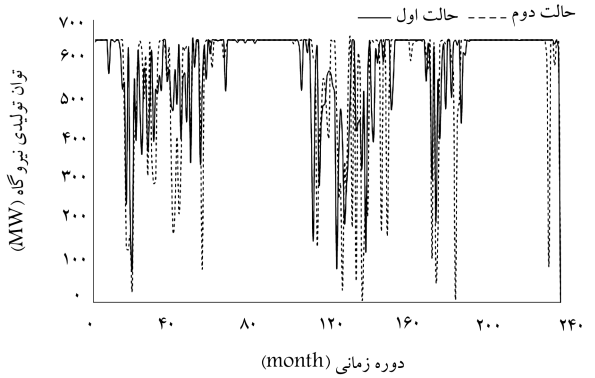
شکل ۱۷. مقادیر میانگین تابع هدف برای مسئله‌ی بهره‌برداری برقابی ۶۰ ماهه در دو حالت و ۱۰ بار اجرا.

نرم‌افزار لینگو نشان‌دهنده‌ی آن است که جواب‌های به‌دست آمده با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی گرانشی در حالت اول برای دوره‌های ۶۰ و ۲۴۰ ماهه به ترتیب ۹۸٫۲۶٪ و ۸۳٫۶۹٪ جواب‌های به‌دست آمده از نرم‌افزار لینگو بوده است. همچنین جواب‌های به‌دست آمده برای این مسئله در حالت دوم برای دوره‌های ۶۰ و ۲۴۰ ماهه، ۸۳٫۴۸٪ و ۶۶٫۸۹٪ جواب‌های به‌دست آمده از نرم‌افزار لینگو است.

در پژوهش حاضر، مقادیر تابع هدف به‌دست آمده با استفاده از الگوریتم



شکل ۱۸. مقادیر جریان خروجی بهینه‌ی مسئله‌ی بهره‌برداری ساده از مخزن دز.



شکل ۱۹. مقادیر توان تولیدی نیروگاه مسئله‌ی بهره‌برداری برقابی از مخزن سد دز.

جست‌وجوی گرانشی با مقادیر الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه،[۱۴] بهینه‌سازی جفت‌گیری زنبورعسل[۱۲] و الگوریتم هوش جمعی ذرات،[۱۷] مقایسه شده است. جدول‌های ۳ و ۴، مقادیر میانگین تابع هدف را در حالت‌های اول (I) و دوم (II) برای ۴ الگوریتم جست‌وجوی گرانشی (GSA)، بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچگان (ACO)، جفت‌گیری زنبورعسل (HBMO) و هوش جمعی ذرات (PSO) نشان می‌دهد. شایان ذکر است که نتایج الگوریتم بهینه‌سازی جامعه‌ی مورچگان برای ۲۰۰ مورچه و ۲۰۰۰ تکرار و نتایج الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل برای ۱۳۰ زنبور و ۳۰۰۰ تکرار است. ولیکن نتایج الگوریتم‌های جست‌وجوی گرانشی و هوش جمعی ذرات برای ۱۰۰ ذره و ۱۰۰۰ تکرار است. علاوه بر این، این مسائل برای حالت دوم که متغیر تصمیم حجم ذخیره‌ی مخزن است، با استفاده از هوش جمعی ذرات حل نشده است. مقایسه‌ی نتایج نشان‌دهنده‌ی آن است که برای هر دو مسئله و در تمامی حالت‌های مذکور، نتایج الگوریتم جست‌وجوی گرانشی نسبت به سایر نتایج موجود بهتر است.

۶. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، قابلیت‌های الگوریتم جست‌وجوی گرانشی در حل مسئله‌ی بهره‌برداری بهینه از مخزن سد دز بررسی شده است. لذا مسائل بهره‌برداری ساده و برقابی مخزن سد دز با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی گرانشی در دوره‌های زمانی ۶۰ و ۲۴۰ ماهه حل و نتایج تجزیه و تحلیل شده‌اند. برای حل مسائل مذکور، دو حالت در نظر گرفته شده است که در حالت اول، میزان آب رها شده

جدول ۳. مقادیر میانگین تابع هدف مسئله‌ی بهره‌برداری ساده‌ی الگوریتم جست‌وجوی گرانشی با سایر روش‌های موجود.

دوره‌ی زمانی	GSA (I)	GSA (II)	ACO (I)	ACO (II)	HBMO (I)	PSO (I)
۶۰ ماهه	۰/۷۳۹	۱/۰۱۹	۰/۷۹۹	۱/۲۰۹	۰/۸۱۰۴	۲/۸۶
۲۴۰ ماهه	۸/۹۹۹	۱۱/۰۳۸	۱۲/۰۱۳	۱۵/۰۹۵	-	۴۹۵ (نشدنی)

جدول ۴. مقادیر میانگین تابع هدف مسئله‌ی بهره‌برداری برقابی الگوریتم جست‌وجوی گرانشی با سایر روش‌های موجود.

دوره‌ی زمانی	GSA (I)	GSA (II)	ACO (I)	ACO (II)	PSO (I)
۶۰ ماهه	۷/۵۴۶	۸/۹۷۵	۰/۷۹۹	۸/۵۶۸	۱۱/۷
۲۴۰ ماهه	۲۵/۵۴۷	۳۱/۷۹۲	۱۲/۰۱۳	۴۰/۶۲۹	۱۳۹۰ (نشدنی)

از مخزن در هر ماه و در حالت دوم، میزان حجم ذخیره‌ی مخزن در انتهای هر ماه به‌عنوان متغیر تصمیم منظور شده است. مقایسه‌ی نتایج حاصل از حل دو مسئله‌ی ساده و برقابی در هر دو حالت ذکر شده با سایر نتایج موجود (الگوریتم مورچه، هوش جمعی ذرات و جفت‌گیری زنبورعسل)، نشان‌دهنده‌ی آن است که با به کارگیری الگوریتم جست‌وجوی گرانشی، جواب مناسب‌تر و با هزینه‌ی محاسباتی کمتر حاصل شده است. علاوه بر این، مقایسه‌ی نتایج حاصل از دو حالت متغیر تصمیم نشان‌دهنده‌ی آن است که به دلیل کوچک‌تر بودن محدوده‌ی متغیرهای تصمیم در حالت اول، جواب مناسب‌تری در این حالت نسبت به حالت دوم حاصل می‌شود. همچنین مقایسه‌ی نتایج به‌دست آمده برای مسائل بهره‌برداری ساده و برقابی در دو دوره‌ی زمانی مختلف نشان‌دهنده‌ی آن است که عملکرد الگوریتم پیشنهادی برای حل مسائل با دوره‌ی زمانی کوتاه‌تر (۶۰ ماهه) مطلوب‌تر است. با توجه به موارد مذکور، بررسی عملکرد الگوریتم جست‌وجوی گرانشی در حل سایر مسائل مورد بحث در زمینه‌ی مهندسی آب توصیه می‌شود.

پانوشت‌ها

1. linear programming
2. non-linear programming
3. dynamic programming
4. meta heuristic algorithm
5. genetic algorithm (GA)
6. honey bees mating optimization (HBMO)
7. ant colony optimization algorithm (ACO)
8. particle swarm optimization (PSO)
9. artificial bee colony (ABC)
10. enhanced comprehensive learning particle swarm optimization
11. gravitational search algorithm
12. exploration
13. exploitation
14. Matlab
15. Lingo

منابع (References)

1. Windsor, J.s. "Optimization model for the operation of flood control systems", *J. Water Resources Research*, **9**(5), pp. 1219-1226 (1973).
2. Heiw, k., Labadie, J. and Scott, J. "Optimal operational Analysis of the colorado-big thempson project", In Computerized Decision Support System for Water Managers, ASCE, New York, pp. 632-646. (1989).
3. Jacovkis, P.M., Gradowczyk, H., Freisztav, A.M. and Tabak, E.G. "A linear programming approach water-resources optimization", *T Zeitschrift for Operations Research*, **33**(5), pp. 341-362 (1989).
4. Barros, M.T.L., Tsai, F.T.C., Yang, S., Lopes, J.E. G. and Yeh, W.W.G. "Optimization of large-scale hydropower system operations", *J. Water Resources Plan Management*, **129**(3), pp. 178-188 (2003).
5. Catalao, J.P.S., Mariano, S.J.P.S., Mendes, V.M.F. and Ferreira, L.A.F.M. "Nonlinear optimization method for short-term hydro schedualing considering head-dependency", *European Transaction on Electrical Power*, **20**(2), pp. 172-183 (2010).
6. Alaya, A.B., Souissi, A., Tarhouni J. and Ncib, K. "Optimization of Nebhana reservoir water allocation by stochastic dynamic programming", *J. Water Resources Management*, **17**(4), pp. 259-272 (2003).
7. Nandalal, K.D.W. and Bogardi, J.J. "Dynamic programming based operation of reservoirs: Applicability and limits", Cambridge University Press, Cambridge (2007).
8. Loucks, D.P., Van Beek, E., Stedinger, J.R., Dijkman, J.P. and Villars, M.T. "Water resources systems planning and management: An introduction to methods", Models and Applications, UNESCO, Paris (2005).

9. Colorni, A., Dorigo, M., Maffoli, F., Maniezzo, V., Righini, G. and Trubian, M. "Heuristics from nature for hard combinatorial optimization problems", *J. International Transactions on Operational Research*, **3**(1), pp. 1-21 (1996).
10. Esat, V. and Hall, M.J. "Water resources system optimization using genetic algorithms hydro informatics", *Proc., 1st Int. Conf. on Hydro Informatics*, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 225-231 (1994).
11. Reddy, M.J. and Kumar, D.N. "Ant colony optimization for multi-purpose reservoir operatio", *J. Water Resource Management*, **20**(6), pp. 879-89 (2006).
12. Afshar, A., Bozorg Haddad, O., Marino, M. and Adams, A.B.J. "Honey-bee mating optimization (HBMO) algorithm for optimal reservoir operation", *Franklin Institute*, **344**(5), pp. 452-462 (2007).
13. Afshar, M.H. and Moeini, R. "Partially and fully constrained ant algorithms for the optimal solution of large scale reservoir operation problems", *J. Water Resources Management*, **22**(12), pp. 1835-1857 (2008).
14. Moeini, R. and Afshar, M.H. "Application of an ant colony optimization algorithm for optimal operation of reservoirs: A comparative study of three proposed formulations", *J. Scientia Iranica*, **16**(4), pp. 273-285 (2009).
15. Montalvo, I., Izquierdo, J., Perez-Garcia, R. and Herrera, M. "Improved performance of PSO with self-adaptive parameters for computing the optimal design of water supply systems", *J. Engineering Application of Artificial Intelligence*, **23**(5), pp. 727-735 (2010).
16. Asfaw, T.D. and Hashim, A.M. "Reservoir operation analysis aimed to optimize the capacity factor of hydroelectirc power generation", *International Conference on Environment and Industrial Innovation, IACSIT Press*, Singapore, pp. 28-32 (2011).
17. Afshar, M.H. "Large scale reservoir operation by constrained particle swarm optimization algorithms", *J. Hydro-environment Research*, **6**(1), pp. 75-87 (2012).
18. Moeini, R. and Afshar, M.H. "Extension of the constrained ant colony optimization algorithms for the optimal operation of multi-reservoir systems", *Hydroinformatics*, **15**(1), pp. 155-173 (2013).
19. Afshar, M.H. "Extension of constrained particle swarm optimization algorithm to optimal operation of multi-reservoir system", *J. Electrical Power and Energy Systems*, **51**, pp. 71-81 (2013).
20. Hossain, M.S. and EI-shafie, A. "Evolutionary techniques versus swarm intelligences: Application in reservoir release optimization", *Neural Comput. and Applic.*, **24**(7-8), pp. 1583-1594. (2014a).
21. Hossain, Md. S. and EI-shafie, A. "Performance analysis of artificial bee colony (ABC) algorithm in optimizing release policy of Aswan High Dam", *Neural Comput. and Applic.*, **24**(5), pp. 1199-1206 (2014b).
22. Mohammad Reza Pour, O. and Zeynali, M.J. "Application of an max-min ant system algorithm for optimal operation of multi -reservoirs (case study: Golestan and voshmgir reservoir dams)", *J. International Agriculture and Crop Sciences*, **8**(1), pp. 27-33 (2015).
23. Zhang, X., Yu, X. and Qin, H. "Optimal oeration of multi-reservoir hydropower systems using enhanced comprehensive learning particle swarm optimization", *j. Hydro-Environment Research*, **10**, pp. 50-63 (2016).
24. Tayebian, A., Mohaamed Ali, T.A., Ghazali, A.H. and Malek, M.A. "Optimization of exclusive release policies for hydropower reservoir operation by using genetic algorithm", *J. Water Resource Management*, **30**(3), pp. 1203-1216 (2016).
25. Khajehzadeh, M., Taha, M.R., El-shafie, A. and Eslami, M. "A modified gravitational search algorithm for slope stability analysis", *J. Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **25**(8), pp. 1589-1597 (2012).
26. Khajehzadeh, M. and Eslami, M. "Gravitational search algorithm for optimization of retaining structures", *J. Indian Science and Technology*, **5**(1), pp. 1821-1827 (2012).
27. Khatibinia, M., Salajegheh, E., Salajegheh, J. and Fadaee, M.J. "Reliability-based design optimization of reinforced concrete structures includingsoil-structure interaction using a discrete gravitational search algorithm and a proposed meta model", *J. American Mathematical Society*, **45**(10), pp. 1147-1165 (2013).
28. Khatibinia, M. and Khosravi, S. "A hybrid approach based on an improved gravitational search algorithm and orthogonal crossover for optimal shape design of concrete gravity dams", *J. Applied Soft Computing*, **16**, pp. 223-233 (2014).
29. Rashedi, E., Nezamabadi-pour, H. and Saryazdi, S. "GSA: A gravitational search algorithm", *J. Information Sciences*, **179**(13), pp. 2232-2248 (2009).
30. Afshar, M.H., Rezaei Sangdehi, A. and Moeini, R. "Optimal Reservoir Operation using Deterministic Adaptive Refinement mechanism for Ant Algorithm", *J. Civil Engineering Ferdowsi University of Mashhad*, **23**(1), pp. 66-83 (2011).