



## تخصیص بهینه منابع آب در سطح حوضه آبریز گرگانرود با استفاده از تلفیق مدل MODSIM و الگوریتم COA

احسان محسنی زاده<sup>۱</sup>، مجتبی شوریان<sup>۲\*</sup>

۱- دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی

۲- دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی

\* تلفن: ۰۲۱-۷۳۹۳۲۴۳۷، پست الکترونیکی: m\_shourian@sbu.ac.ir

### خلاصه

افزایش روزافزون نیازهای آبی به دلیل توسعه جمعیت انسانی و پیشرفت صنعت و کشاورزی در دنیای امروز امری اجتناب ناپذیر است. برنامه ریزی و مدیریت بهینه منابع آب در سطح حوضه آبریز دارای پیچیدگیهایی می باشد در این راستا استفاده از مدل های ریاضی می تواند کارگشا باشد. در این مقاله، مسأله بهره برداری بهینه از مخازن سیستم به همراه تخصیص بهینه آب در سطح یک حوضه آبریز با تلفیق مدل MODSIM بعنوان مدل شبیه ساز و الگوریتم بهینه سازی فاخته (Cuckoo Optimization Algorithm) بعنوان الگوریتم بهینه ساز مورد تحلیل و بررسی قرار می گیرد. مدل تهیه شده قادر به تعیین سیاست بهره برداری بهینه از سدهای بوستان، گلستان و وشمگیر همراه با تخصیص بهینه منابع آب بین نیازهای درون حوضه با هدف حداکثرسازی سود حاصل از تخصیص آب به محله ای مصرف می باشد.

کلمات کلیدی: برنامه ریزی منابع آب، تخصیص بهینه، حوضه آبریز، MODSIM، الگوریتم Cuckoo Optimization Algorithm

### ۱. مقدمه

معضل کمبود آب در اقلیم های خشک مانند خاورمیانه که کشور ما ایران نیز جزئی از این ناحیه محسوب می شود نسبت به سایر مناطق دیگر کاملاً چشمگیر می باشد. به طوری که ایران در میان کشورهای آسیایی، بالاترین رقم نسبت میزان استحصال آب به میزان آب قابل استحصال را دارد. لذا برنامه ریزی تخصیص عادلانه و بر اساس توسعه پایدار، بسیار پراهمیت واقع می شود. توجه به توسعه پایدار در برنامه ریزی تخصیص منابع آب خود مستلزم لحاظ کردن شاخصه های بسیار و گوناگونی بوده که می بایست در کنار هم و به صورت همزمان مورد بررسی قرار گیرند. هدف کلی مطالعه توسعه یک مدل ریاضی شبیه سازی - بهینه سازی به منظور ابزار کمکی در مسأله برنامه ریزی بهینه تخصیص منابع آب در سطح حوضه آبریز است. شوریان و موسوی (۱۳۸۵) به منظور تعیین سیمای بهینه منابع آب بالا دست حوضه سیروان از تلفیق MODSIM (به عنوان یک شبیه ساز) و الگوریتم بهینه سازی مبتنی بر هوش مصنوعی دسته ذرات بهره گرفتند. عباس نیا و موسوی (۱۳۸۸) از تلفیق MODSIM با مدل شبیه ساز کیفیت منابع آب QUAL2K و به دست آمدن مدل MODSIM-QUAL2K در حل مسأله تخصیص آب، با شبیه ساز متغیر کیفی TDS در بخشی از سیستم حوضه های دز و کارون، استفاده کرده اند. کریمی (۱۳۸۹) مقایسه مدل های MODSIM و WEAP، به عنوان دو مدل پشتیبان تصمیم گیری مدیریت حوضه آبریز، در نحوه تخصیص آب به نیازها را انجام داد. در این راستا روش شناسی حل مسأله تخصیص بهینه منابع آب در سطح حوضه آبریز، مورد نظر در این تحقیق، شامل مراحل اصلی زیر است:

<sup>1</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، رشته مهندسی عمران، گرایش مدیریت منابع آب

<sup>2</sup> استادیار



۱- استفاده از یک مدل شبیه ساز با قابلیت بهینه سازی تخصیص تک دوره ای در هر گام زمانی و کلیراسیون آن  
۲- توسعه یک مدل بهینه ساز فراکاشی و درون گذاری مدل شبیه ساز به عنوان ابزار ارزیابی تابع برازندگی آن و نتیجتاً توسعه مدل شبیه سازی- بهینه سازی

در این مقاله، با استفاده از مدل MODSIM (Labadie, 1995) بعنوان یک مدل جامع مدیریت منابع آب در سطح حوضه آبریز عملکرد بخشی از سیستم حوضه گرگان رود با تخصیص ظرفیت بهینه ذخیره منابع آبی در احجام مخازن سدهای بوستان و گلستان و وشمگیر شبیه سازی شده است. سپس مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم مسأله با استفاده از الگوریتم بهینه سازی فاخته (Cuckoo optimization algorithm) یا COA با هدف مینیمم سازی هزینه خالص کل تعیین شده است.

## ۲. مدل MODSIM

مدل MODSIM یک سیستم پشتیبان در تصمیم گیری برای سیستمهای بهره برداری چند منظوره از مخازن، مدیریت تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی، با قابلیت در نظر گیری مکانیسم حاکم بر مناسبات اداری و قانونی استفاده از منابع آب می باشد. این مدل از روش برنامه ریزی جریان شبکه (Network-Flow Programming) یا NFP برای بهینه سازی تخصیص آب در سیستم در هر گام زمانی استفاده می کند. مدل MODSIM ابتدا توسعه ای بر مدل شبیه سازی SIMYLD تهیه شده توسط Texas Water Development Board در سال ۱۹۷۲ بود. بنابراین نام مخفف MODIFIED SIMYLD (MODSIM) به آن داده شد. مدل MODSIM در تعدادی از سیستمهای پیچیده حوضه رودخانه ای، مانند حوضه رودخانه Riogrande (Graham et al. 1986)، حوضه رودخانه کلرادو (Law and Brown 1989)، حوضه رودخانه Guiem در کره جنوبی (Labadie and Fontane 2002) و تعدادی حوضه دیگر با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است. در این مدل مسأله حداقل کردن هزینه شبکه جریان و به عبارتی تخصیص بهینه آب باین مصارف متعدد بصورت تکراری و در طول زمان در هر گام زمانی حل می شود. فرمولبندی عمومی یک مدل NFP به شکل زیر است:

$$\text{Minimize } \sum_{l \in A} c_l q_l \quad (1)$$

subject to:

$$\sum_{j \in O_i} q_j - \sum_{k \in I_i} q_k = 0; \quad \text{for all } i \in N \quad (2)$$

$$l_l \leq q_l \leq u_l; \quad \text{for all } l \in A \quad (3)$$

که در این روابط A مجموعه تمام بازوها در شبکه، N مجموعه تمام گره ها، O<sub>i</sub> مجموعه تمام کانالهای آغاز شونده از گره i (یعنی کانالهای خروجی)، I<sub>i</sub> مجموعه تمام کانالهای پایان یابنده در گره i (یعنی کانالهای ورودی)، q<sub>l</sub> عدد صحیح نرخ دبی در کانال l، c<sub>l</sub> هزینه ها، ضرایب وزنی و یا اولویتهای واحد دبی در کانال l، I<sub>l</sub> کران پایین جریان در کانال l و u<sub>l</sub> کران بالای جریان در کانال l می باشد. در نبود مطالعات اقتصادی و به منظور تخصیص بهینه آب باین مصارف، ضرایب هزینه در تابع هدف با استفاده از مقادیر اولویتهای نسبی تعیین شده توسط کاربر محاسبه می شود. علی رغم قابلیتهای سریع و شاخص مدل MODSIM، این مدل یک مدل شبیه سازی بهره برداری از سیستم همراه با تخصیص بهینه آب باین مصارف در اشل حوضه آبریز و تحت ابعاد معلوم داده شده از المانهای ذخیره، انتقال، پمپاژ و انحراف آب است. به عبارت دیگر مدل به خودی خود قادر به طراحی و تعیین ابعاد بهینه المانهای مذکور نیست. به همین دلیل اتصال این مدل به یک مدل بهینه ساز با متغیرهای تصمیم معرف بهره برداری از المانهای مذکور در این مطالعه بهنگامی شده است.

## ۳. Cuckoo Optimization Algorithm

این الگوریتم بهینه سازی از زندگی یک خانواده از پرندگان به نام فاخته ها، الهام گرفته است. زندگی خاص این نوع پرنده و ویژگی های آن در تخم گذاری و زاد و ولد، انگیزه اصلی پرورش این الگوریتم تکاملی بهینه سازی جدید بوده است. مانند سایر روش های تکاملی، الگوریتم بهینه سازی فاخته (COA)، با یک جمعیت اولیه آغاز می شود. جمعیت فاخته ها، در جوامع مختلف آن ها، دو نوع است: فاخته های بالغ و تخم ها. تلاش فاخته ها برای زنده ماندن اساس الگوریتم بهینه سازی فاخته را تشکیل می دهد. در طول مسابقه برای زنده ماندن، برخی از فاخته ها یا تخم های آنان از بین می روند.



جامعه فاختگان نجات یافته به یک محیط بهتر مهاجرت می کنند، و دوباره شروع به تکثیر و تخم گذاری می کنند. امید است تلاش فاخته ها برای زنده ماندن، به حالتی برسد که تنها یک جامعه از فاخته ها و همه با یک ارزش سود مشابه وجود داشته باشند.

برای حل یک مسئله بهینه سازی، لازم است مقادیر متغیرهای مسئله به شکل یک ماتریس درآیند. این ماتریس محل زندگی نامیده می شود. ماتریس محل زندگی  $Npop \times Nvar$  ایجاد می شود. سپس یک تعداد تصادفی از تخم ها برای هر کدام از این محل زندگی اولیه، پیشنهاد می شود. این اعداد به عنوان حدود بالا و پایین تخصیص تخم به هر فاخته در تکرارهای مختلف است. عادت دیگر فاخته های حقیقی این است که آن ها در یک دامنه مشخص تخم گذاری می کنند. این فاصله بیشینه شعاع تخم گذاری (ELR) نامیده می شود.  $\alpha$  عدد صحیحی است که برای به دست آوردن مقدار ماکزیمم ELR به کار می رود.

$$\text{habitat} = [x_1, x_2, \dots, x_{Nvar}] \quad (4)$$

$$\text{سود} = fp(\text{habitat}) = fp(x_1, x_2, \dots, x_{Nvar}) \quad (5)$$

$$ELR = \alpha \times \frac{\text{Number of current cuckoo's eggs}}{\text{Total number of eggs}} \times (\text{var}_{hi} - \text{var}_{low}) \quad (6)$$

بعضی از آن ها که کمتر شبیه تخم های خود پرند میزبان هستند، توسط آن ها شناسایی و بیرون انداخته می شوند. بنابراین بعد از فرآیند تخم گذاری،  $p\%$  از تخم ها (معمولاً ۱۰٪) که مقدار سود آن ها کمتر است، نابود می شوند. تنها یک تخم در هر لانه فرصت رشد می یابد. این به خاطر آن است که وقتی تخم فاخته می شکند و جوجه فاخته سر از تخم بیرون می آورد، تخم های پرند میزبان را از لانه بیرون می اندازد. وقتی فاخته ها به زمان تخم گذاری نزدیک می شوند، به محل زندگی جدید و بهتر مهاجرت می کنند. گروه بندی فاخته ها به روش خوشه بندی k-means انجام می شود. هر فاخته فقط  $\lambda\%$  کل فاصله تا مقصدش را پرواز می کند و همچنین انحرافی به اندازه  $\emptyset$  رادیان دارد. این دو پارامتر،  $\lambda$  و  $\emptyset$  به فاخته ها کمک می کند موقعیت های بسیار بیشتری را در محیط جست و جو کنند. برای هر فاخته،  $\lambda$  و  $\emptyset$  به شکل زیر هستند:

$$\lambda \sim U(0,1)$$

$$\emptyset \sim U(-\omega, \omega)$$

$$X_{NextHabitat} = X_{CurrentHabitat} + F(X_{GoalPoint} - X_{CurrentHabitat}) \quad (7)$$

وقتی همه فاخته ها به نقطه هدف مهاجرت کردند، به هر فاخته بالغ چند تخم داده می شود با توجه به آن، یک ELR برای هر فاخته محاسبه می شود و بعد فرآیند جدید تخم گذاری از نو آغاز می شود. همگرایی بیش از ۹۵٪ از فاخته ها به یک محل زندگی، پایان الگوریتم بهینه سازی فاخته خواهد بود. در هر تکرار از الگوریتم فاخته با استفاده از مقادیر بدست آمده، مقادیر ج دید متغیرها با استفاده از معادله (۷) بدست آورده می شوند. این روند تا رسیدن به یک بهینه متغیرها با توجه به مقدار تابع هدف بدست آمده، مقادیر ج دید متغیرها با استفاده از معادله (۷) بدست آورده می شوند. این روند تا رسیدن به یک تعداد تکرار ماکزیمم که در این مسئله برابر ۳۰۰ در نظر گرفته شده و یا تکرار شدن جواب بهینه عمومی در ۱۰ تکرار متوالی ادامه می یابد. در مطالعه حاضر، تعداد متغیر بهینه سازی (npar) برابر با ۳۶۰ و پس از سعی و خطا مقادیر،  $\text{minNumberOfEggs} = 2$ ،  $\text{numCuckoos} = 4$ ،  $\text{minNumberOfCuckoos} = 8$  و  $\text{maxNumberOfEggs} = 4$  در نظر گرفته شده است.

#### ۴. مشخصات سیستم تحت مطالعه

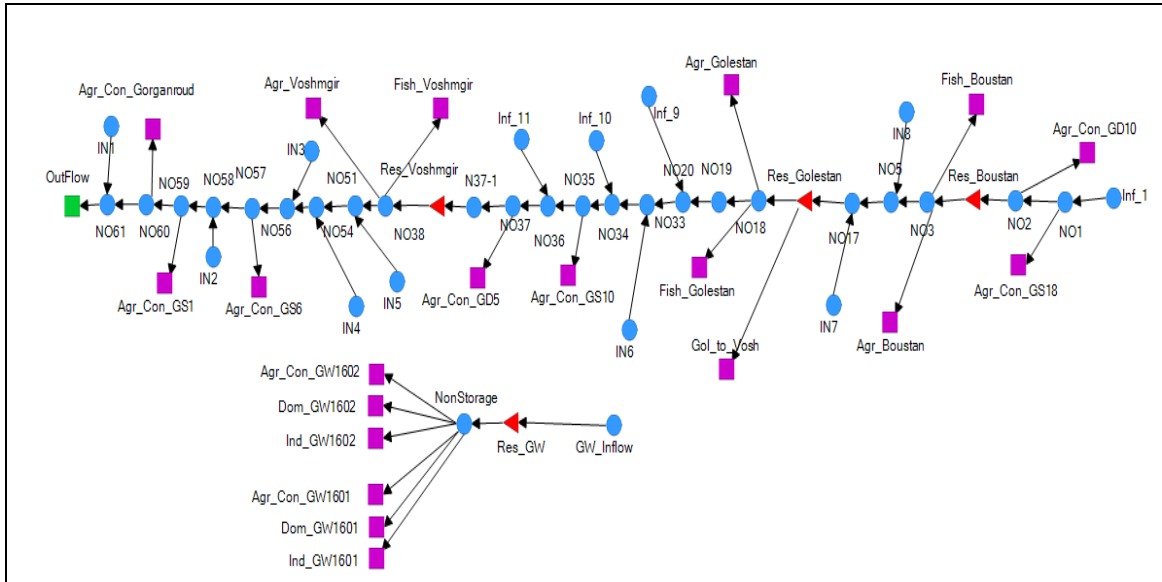
سیستم تحت مطالعه یکی از زیر سیستمهای محدوده حوضه آبریز رودخانه گرگان رود واقع در شمال شرق کشور می باشد. در جدول (۱) سیمای کلی منابع و مصارف سالانه مفروض در سیستم که نشان دهنده میزان کل ورودی به سیستم و مقدار کل نیازهای درون حوضه نشان داده شده است و در جدول (۲) مشخصات سازه های موجود در سیستم تحت مطالعه گزارش شده است. در شکل (۱) نیز توپولوژی سیستم تحت مطالعه، نشان داده شده است. دوره زمانی در نظر گرفته شده جهت شبیه سازی رفتار سیستم برابر با افق زمانی ده ساله ۱۹۸۶-۱۹۷۶ لحاظ شده است.

جدول (۱): سیمای کلی منابع و مصارف سیستم

آبیم	مقدار (MCM)
جریان ورودی به حوضه	۴۹۵/۴۷
نیاز کشاورزی	507/20
نیاز پرورش ماهی	۵۸/۱۰
مجموع کل نیازها	۵۶۵

جدول (۲): مشخصات سازه های موجود در سیستم تحت مطالعه

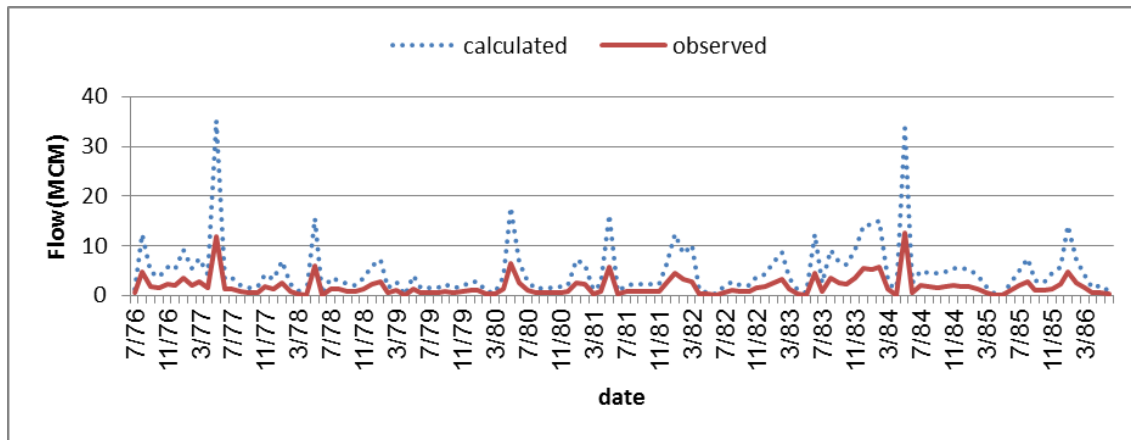
سازه	حجم حداکثر (MCM)
سد بوستان	۴۳/۷
سد گلستان	۵۷/۸
سد وشمگیر	۴۲



شکل (۱): توپولوژی سیستم تحت مطالعه در محیط مدل MODSIM

## ۵. صحت سنجی عملکرد مدل COA-MODSIM

با استفاده از سری دراز مدت آبدهی ماهانه و سالانه رودخانه گرگانرود در ایستگاه تمر که از گزارش منابع آب سطحی (کمی و کیفی) دفتر کل برنامه ریزی کلان آب و آبفا بدست آمده جریان عبوری از گره ایستگاه تمر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از مقایسه سری زمانی آبدهی سالانه حالت مشاهداتی و محاسباتی برای جریان عبوری از این گره طی دوره ۱۰ سال در شکل (۳-۴) آورده شده است.



شکل (۲): مقایسه حالت مشاهداتی و محاسباتی برای جریان عبوری از ایستگاه تمر طی دوره ۱۰ ساله



نتایج بدست آمده نشان می دهد که مدل COA-MODSIM عملکرد قابل قبولی داشته است و همگنی نسبتا خوبی بین مقادیر آبدهی سالانه و مدل شده در ایستگاه تهر وجود دارد.

#### ۶. طراحی و بهره برداری بهینه از سیستم با استفاده از مدل COA-MODSIM

در ابتدا مدل شبیه سازی شده در MODSIM برای حوضه رودخانه گرگانرود، بدون تغییر در قسمت Custom Code و قبل از متصل شدن به الگوریتم بهینه ساز COA به نتایج اجرا شده است و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفته شده است. سپس با برنامه نویسی مدل COA در محیط Costum Coding و درونگذاری مدل MODSIM در آن، مقادیر پارامترها و متغیرهای مسأله برابر با مقادیر تولید شده توسط الگوریتم COA در نظر گرفته می شود و نتایج مقدار تامین شده نیازها در مدل COA-MODSIM بدست آمده است. تابع هزینه حالت اول به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

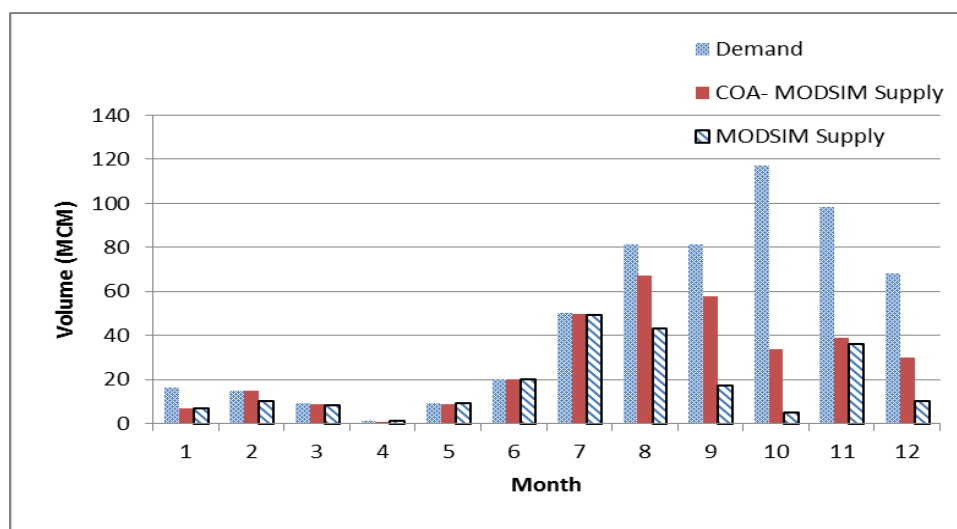
$$COST = 20000 - 10*(Total Supply) + 10*(OutFlow) \quad (8)$$

که در آن Total Supply مقدار جریان آب تامین شده و OutFlow مقدار جریان خروجی از حوضه می باشد، که برای کم کردن جریان خروجی مقدار OutFlow در عدد ۱۰ ضرب شده است. جهت منفی نشدن نتیجه حاصله مقادیر بالا از یک عدد فرضی نسبتا بزرگ (۲۰۰۰۰) کسر شده اند. در نظر گرفتن این موارد، مدل بهینه سازی سیستم اجرا شده است. نتایج ارائه شده در جدول (۳) وضعیت تأمین نیازهای درون حوضه را نشان می دهد.

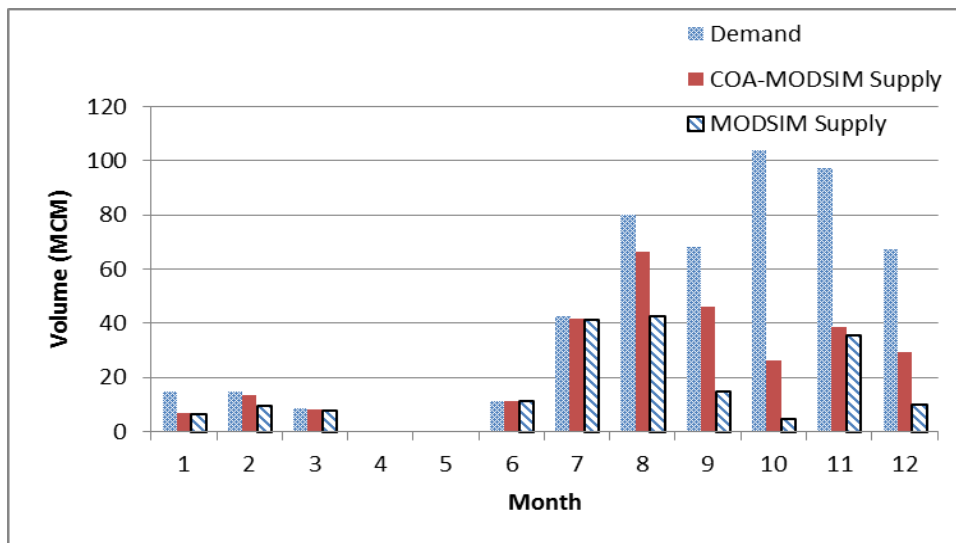
جدول (۳): وضعیت تأمین نیازهای درون حوضه در حالت بهینه

آیتم	مقدار نیاز (MCM)	مقدار تأمین شده COA- Modsim(MCM)	مقدار تأمین شده Modsim (MCM)	درصد بهبود نتایج
کشاورزی	507/20	288/27	181/90	36/89%
پرورش ماهی	58/10	50/1	32/41	35/31%
مجموع	565	339	215	36/57%
جریان خروجی از حوضه	-	208/3	273/98	23/97%

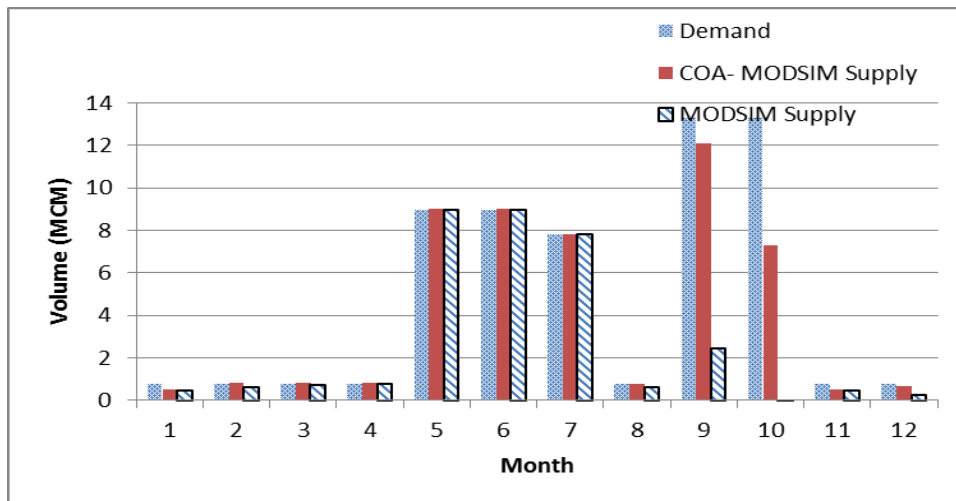
با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۳) مشاهده می شود که از میزان تقریبی ۴۹۵/۴۷ میلیون متر مکعب جریان متوسط سالیانه ورودی به حوضه، ابعاد و ظرفیتهای سازه های ذخیره و انتقال بدست آمده قادر به تخصیص ۳۳۹ میلیون متر مکعب آب از این میزان به محلهای مصرف مختلف در سیستم بوده است جریان باقی مانده به مقدار ۲۰۸/۳ میلیون متر مکعب از طریق رودخانه اصلی از سیستم خارج شده اند. در شکل های (۳) تا (۶) نتایج حاصل از اجرای مدل گزارش شده است.



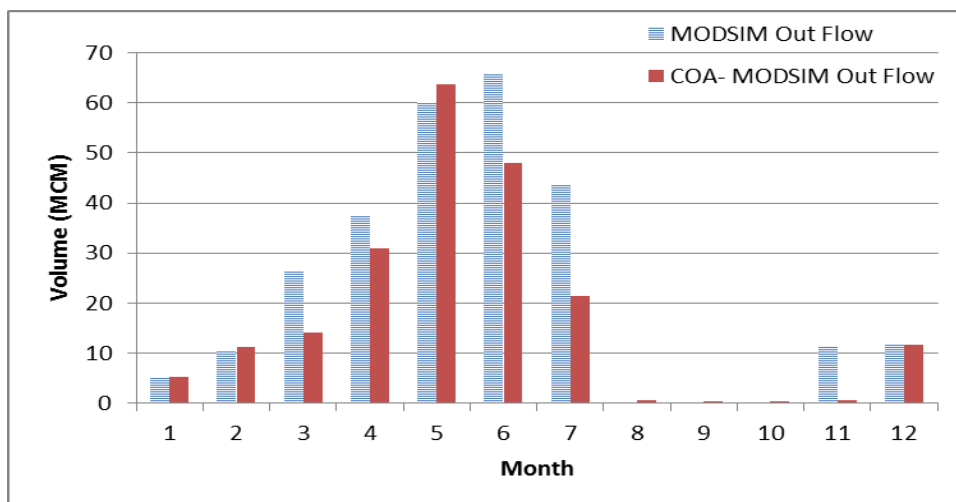
شکل (۳): وضعیت تأمین متوسط کل نیازهای سیستم در بهترین جواب مدل



شکل (۴): وضعیت تأمین متوسط نیازهای کشاورزی در بهترین جواب مدل



شکل (۵): وضعیت تأمین متوسط نیازهای پرورش ماهی در بهترین جواب مدل



شکل (۶): وضعیت جریان خروجی از حوضه در بهترین جواب مدل

## ۷. آنالیز حساسیت با تغییر پارامترهای الگوریتم فاخته

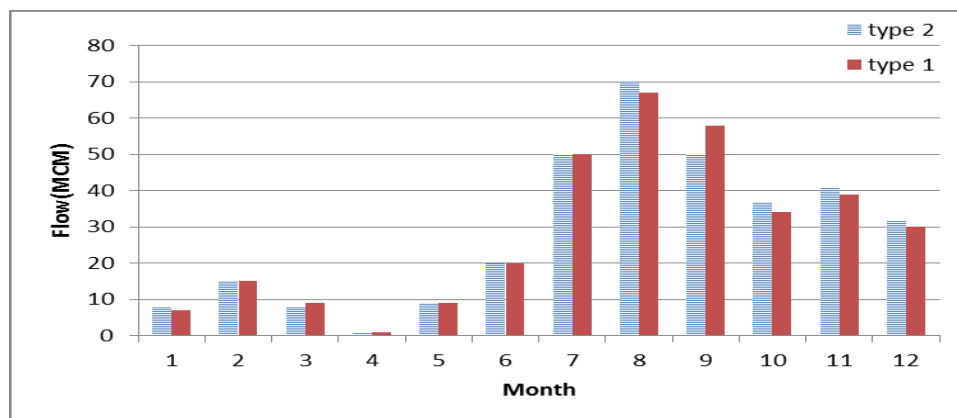
به منظور بررسی تأثیر پارامترهای الگوریتم فاخته بعنوان پارامتر آنالیز حساسیت، مسأله در دو حالت زیر حل می گردد. در جدول (4) مقادیر پارامترها الگوریتم فاخته در دو حالت آمده است. در جدول (5) نتایج حاصل از اجرای مدل در شرایط جدید نمایش داده شده است.

جدول (4): مقادیر پارامترهای الگوریتم فاخته در حالت اول و دوم

Item	type 1	type 2
NumCuckooS	4	6
MaxNumOfCuckoos	8	12

جدول (5): نتایج بدست آمده در سه سناریو اولویت بندی ذخیره مخزن و تامین نیازها در مدل COA-MODSIM

آیتم	حالت 1	حالت 2
تأمین متوسط سالیانه نیاز کشاورزی (mcm)	288/3	288/8
تأمین متوسط سالیانه آبی پروری (mcm)	50/1	50/7
تأمین کل نیازها (mcm)	339	341
جریان خروجی (mcm)	208/3	208
هزینه سیستم	18693	18670



شکل (7): مقایسه وضعیت تأمین متوسط کل نیازهای سیستم در مدل با توابع هدف حالت ۱ و ۲

## ۸. نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از الگوریتم COA که در آن مدل جامع مدیریت حوضه آبریز MODSIM بعنوان موتور شبیه ساز مورد استفاده قرار گرفته است، مسأله بهره برداری بهینه از یک سیستم منابع آب با امان ذخیره با هدف کمینه کردن هزینه خالص کل تحلیل شده است. مدل پیشنهادی COA-MODSIM در این پایان نامه برای تخصیص آب سدهای بوستان، گلستان و وشمگیر به مصرف کنندگان حوضه گرگانود به کار گرفته شده است. با توجه به نتایج مدل COA-MODSIM نسبت به مدل MODSIM مشاهده شد که در مدل COA-MODSIM نسبت به مدل MODSIM میزان تأمین آب برای کشاورزی ۳۶/۸۹٪ بیشتر بوده است. همچنین میزان تأمین آب برای پرورش ماهی در مدل COA-MODSIM نسبت به مدل MODSIM به میزان ۳۵/۳۱٪ افزایش یافته است. در مجموع مقدار تأمین شده از کل نیازها در مدل COA-MODSIM نسبت به مدل MODSIM ۳۶/۵۷٪ بیشتر بوده است. همچنین جریان خروجی از حوضه به میزان ۲۳/۹۷٪ کاهش یافته است. در مدل COA-MODSIM نسبت به مدل MODSIM برگشت آب از جریان خروجی به سیستم و تأمین بخشی از نیازهای درون حوضه ای به میزان قابل توجه ۸۷/۴۷٪ افزایش داشته است که منجر به افزایش کلی تأمین آب در حوضه آبریز گرگانود گردیده است.





نتایج حاصل از مدل با انتظارات کلی در زمینه تحلیل سیستمهای منابع آب همخوانی داشته و بیانگر تأثیر عوامل مختلف در تصمیم گیری پیچیده در سطح کلان مدیریت منابع آب در رفتار و عملکرد سیستم می باشد. در انتها تأکید می گردد نتایج حاصل در این مقاله مبتنی بر پیش فرضها و صحت دادهها و اطلاعات است. علی رغم آن در صورت تکمیل اطلاعات و داده های مورد نیاز، امکان نیل به نتایج کاربردی پیرامون سوالات مطرح در تعیین سیمای بهینه پروژه های منابع آب در حوضه های آبریز کشور با استفاده از مدل توسعه داده شده کاملاً امکانپذیر می باشد.

## ۹. مراجع

1. Shourian M., Mousavi S. J. and Tahershamsi A. (2008a), "Basin-wide Water Allocation Planning by Integrating PSO Algorithm and MODSIM", J. Water Resources Management, 22, pp. 1347-1366.
2. Labadie, J. (1995), MODSIM: river basin network flow model for conjunctive stream-aquifer management, program user manual and documentation, Colorado State University.
3. Labadie, G. and Baldo, M. (2000). "MODSIM: DSS for River Basin Management Documentations and User Manual", Colorado State University.
4. U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, Pacific Northeast Region, (2000). "River and Reservoir Operations Simulation of the Snake River: Application of MODSIM to the Snake River Basin".
5. Labadie, J. and Fontane, D. (2003). "MODSIM River Basin Management DSS: Application to the GEUM River Basin, Korea", Final Report.
6. Payne, B. Robert, The Cuckoos, Oxford University Press, 2005.
7. C. Ellis, C. Kepler, A. Kepler, K. Teebaki, Occurrence of the Longtailed Cuckoo Eudynamis Taitensis on Caroline Atoll, Kiribati. 90 (1990) 202

۸. گزارش منابع آب سطحی (۱۳۹۲)، بهنگام سازی طرح جامع آب کشور، حوضه آبریز گرگان رود، وزارت نیرو، دفتر کل برنامه ریزی کلان آب و آبفا.