

## استفاده الگوریتم تکامل تفاضلی در بهینه‌سازی و مدل‌سازی تلفیقی

### هیدرولیک و منابع آب

#### (مورد مطالعاتی: انتقال آب در فلات مرکزی ایران)

رامین منصوری<sup>۱</sup>، حسین تراپی‌پوده<sup>۲\*</sup>، حجت‌اله یونسی<sup>۳</sup> و امیرحمزه حقی‌آبی<sup>۴</sup>

۱- دانش‌آموخته دکتری سازه‌های آبی گروه مهندسی آب دانشگاه لرستان و استادیار گروه مهندسی عمران، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، ایران  
۲، ۳ و ۴ به ترتیب: دانشیار، استادیار؛ و دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران  
تاریخ دریافت: ۹۵/۴/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۵/۷

#### چکیده

پراکنش منابع آب و بارندگی‌ها در سطح کشور متناسب نیستند، از این‌رو انتقال بین‌حوضه‌ای آب در قالب طرح‌های آبی برای جمع‌آوری، انتقال و ایجاد کیفیت مناسب برای توسعه موزون فعالیت‌های انسانی لازم است. این نوع طرح‌ها با توجه به مخزن بالادست و تونل انتقال آب به پایین‌دست شرایطی ترکیبی از مسائل هیدرولوژیکی (تراز آب مخزن) و هیدرولیکی (هیدرولیک لوله یا تونل انتقال) را در خود جای داده است. به همین دلیل، تحلیل و بررسی این مسایل برای به‌دست آوردن شرایط مورد نظر باید همزمان صورت گیرد. در این تحقیق، چهار سد (یلان، پشندگان، گوکان و زاینده‌رود) و سه تونل برای انتقال آب از سد یلان به سد زاینده‌رود در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی این مطالعه، همزمان دو الگوریتم با یکدیگر و با نرم‌افزار EPANET به صورت دینامیکی ارتباط دارند و مدل منابع آب، هیدرولیک و الگوریتم تکامل تفاضلی را حل می‌کند. از آنجا که انتقال آب در تونل‌ها به صورت تحت فشار است و کل مطالعه برای راندمان انتقال آب ۹۵ درصد تعریف شده، با افزایش ارتفاع هریک از سدها لازم است قطر تونل انتقال کاهش یابد تا بتواند راندمان مذکور را داشته باشد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که الگوریتم تکامل تفاضلی در حالتی که ضریب مقیاس و ضریب احتمال ترکیب ( $F$  و  $Cr$ ) برابر ۰/۵ و ۰/۵ و جمعیت اولیه ۱۰۰۰ عضو و نسل ۱۵۰۰ تایی است بهترین جواب را از نظر هزینه ارائه می‌دهد. هزینه بهینه ارائه شده با الگوریتم تکامل تفاضلی برای راندمان انتقال ۹۵ درصد برابر ۱۴۰۱۴/۵ میلیارد ریال است.

#### واژه‌های کلیدی

الگوریتم تکامل تفاضلی، انتقال آب، بهینه‌سازی، مدل‌سازی، منابع آب، هیدرولیک

#### مقدمه

دریافت می‌کند، معادل همان میزان آب است که هزاران سال پیش دریافت می‌داشته است و از این‌رو سرانه آب به شدت در حال کاهش است. به همین دلیل، بهینه‌سازی در زمینه آب در چند دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

مدیریت و تخصیص مناسب منابع طبیعی زمین مهم‌ترین موضوع برای نسل‌های حال و آینده است. آب،

کمبود آب یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های قرن حاضر است که می‌تواند در آینده بسیار نزدیک منشأ بسیاری از تحولات مثبت و منفی جهان قرار گیرد. در گذشته، مشکلات آب در مقیاس محلی مطرح بود، اما اکنون در مقیاس‌های ملی، منطقه‌ای و حتی جهانی بروز می‌کند. مقدار آب تجدید شونده‌ای که کره زمین هم اکنون

به حوضه دیگر در بعضی کشورها، از جمله در ایالات متحده آمریکا، شوروی سابق و چین، یکی از راه‌های معمول افزایش منابع آب حوضه‌های خشک بوده است. از دیگر تحقیقات در زمینه انتقال آب بین حوضه‌ای می‌توان به تحقیقات سیمپسون (Simpson, 1995)، والف (Wolf, 2001)، پری‌را و همکاران (Pereira et al., 2002)، موتیگا و همکاران (Mutiga et al., 2010) اشاره کرد.

در ایران - که در منطقه نیمه خشک قرار دارد و دارای توزیع ناهمگون زمانی و مکانی - بارش و رواناب است - نیز راهکار انتقال آب مورد توجه بوده است. علی‌محمدی (Alimoahmadi, 2012) در مقاله خود به بررسی طرح‌های انتقال آب بین حوضه‌ای در ایران پرداخته است. از میان پروژه‌های مهم انتقال بین حوضه‌ای آب در ایران می‌توان به طرح انتقال آب از سرشاخه‌های کوه‌رنگ به حوضه زاینده‌رود شامل سه تونل، طرح انتقال آب از کارون به حوضه زاینده‌رود (Zarabi et al., 2010)، طرح انتقال آب از سرشاخه‌های کارون به رفسنجان و انار (Karamoz et al., 2004)، انتقال آب گوشان در جنوب استان کردستان (Mokhtarporiyani, 2010)، و انتقال آب سیمین‌دشت به گرمسار (Razmjo, 2010) اشاره کرد.

امامی (Emami, 2004) در فرآیند تصمیم‌گیری به انتقال بین حوضه‌ای آب اشاره می‌کند که هر سازمان و گروه ذینفع و درگیر، به دنبال منافع خاص خود است که از منافع و قدرت سیاسی تا حق مالکیت و رفاه معیشتی در تغییر است. مسئول تصمیم‌گیری برای اجرای چنین پروژه‌هایی نهایتاً دولت است و ریسک اقتصادی این پروژه‌ها معمولاً بر دوش بودجه عمومی است.

از جمله تحقیقات مرتبط با مدل‌سازی منابع آب حوضه مبدأ و مقصد می‌توان به تحقیقات سعیدی‌نیا و همکاران (Saedinia et al., 2008) اشاره کرد که میزان آب قابل انتقال از سرشاخه‌های کارون به حوضه‌های مجاور را با استفاده از مدل WEAP بررسی کرده‌اند.

یکی از عوامل اصلی حیات بشر، چه از لحاظ شرب و چه از لحاظ سایر مصارف مرتبط با انسان و طبیعت اهمیت ویژه‌ای دارد به طوری که در حال حاضر در اکثر کشورهای جهان به بحرانی جدی تبدیل شده است. به همین دلیل مدیریت منابع آب نیز اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. مدیریت منابع آب در گذشته پیچیدگی خاصی نداشت اما با ازدیاد روز افزون جمعیت و افزایش تقاضا برای آب به منظورهای کشاورزی، شرب، صنعت و تولید انرژی، لزوم سرمایه‌گذاری و توسعه در بخش آب گریزناپذیر خواهد بود. پراکنش منابع آب و بارندگی‌ها در سطح کشور متناسب نیست، از این رو انتقال بین حوضه‌ای آب در قالب طرح‌های آبی برای جمع‌آوری، انتقال و ایجاد کیفیت مناسب برای توسعه موزون فعالیت‌های انسانی لازم است. کول و کارور (Cole & Carver, 2011) در تعریف انتقال آب بین حوضه‌ای می‌گویند مراد از انتقال بین حوضه‌ای یا میان حوضه‌ای آب عبارت است از انتقال حقابه‌های اشخاص و منابع آبی و یا انحراف آب‌های سطحی یا زیرزمینی از حوضه‌ای به حوضه دیگر برای اجرای طرح یا پروژه تامین آب در قالب طرح‌های عمومی یا ملی.

قدرت‌نما (Godratnama, 2004) می‌گوید در پایداری سیستم‌های منابع آب نیز سه مفهوم طبیعت، نسل حاضر و نسل آینده باید مد نظر قرار گیرد. طرح‌های انتقال آب بین حوضه‌ای با رعایت حقوق ذی‌نفعان و برای تأمین نیازهای مختلف مصرف، مشروط به توجهات فنی، اقتصادی - اجتماعی، زیست محیطی و منابع ملی می‌توانند در راستای مفهوم پایدار در مدیریت منابع آب ایفای نقش نمایند.

وایت (White, 1977) نشان داده است که اوج طراحی و اجرای پروژه‌های عظیم انتقال آب در کشورهای صنعتی و پیشرفته به دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ باز می‌گردد. به گفته این محقق، دهه ۱۹۷۰ میلادی نقطه عطفی در مدیریت منابع آب جهان بوده است. انتقال آب از حوضه‌ای

خروجی سیل را بررسی کرده است. دی‌هو و همکاران (De Hoo *et al.*, 2001) نیز با بهره‌گیری از مدل LISFLOOD به بررسی نقش تغییرات کاربری اراضی بر دبی اوج سیلاب در دو حوضه آبر و می‌یوس<sup>۱</sup> پرداخته‌اند. منصورى (Mansouri, 2016) نشان داده است که طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب با توجه به تونل‌های بزرگی که با طول زیاد در آنها ساخته می‌شوند، هزینه‌های اجرایی زیادی دارند و برای کم کردن هزینه‌ها نیز باید سیستم هیدرولوژیکی و هیدرولیکی بهینه‌سازی شود که با توجه به هزینه‌های بسیار بالا در انتقال آب بین حوضه‌ای اهمیت پیدا می‌کند.

در بهینه‌سازی پروژه‌های انتقال آب، در تحقیقات گذشته فقط بحث هیدرولوژیکی مسائل مورد نظر بوده است. در این راستا ژو و همکاران (Zhu *et al.*, 2013) در تحقیقاتشان روی بهینه‌سازی انتقال آب بر مبنای منحنی فرمان مخزن از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند و نشان دادند که منحنی فرمان مخزن تابع فاکتورهای هیدرولوژیکی (مقدار جریان ورودی به مخزن) و تراز آب در مخزن است. این محققان انتقال آب از مخزن سد بیلینو در چین را بررسی و نتیجه‌گیری کردند که مدل آنها در بهره‌برداری و انتقال آب بسیار کارآمد است. در تحقیقی دیگر، صادق و همکاران (Sadegh *et al.*, 2010) سیستم انتقال آب از حوضه کارون در جنوب غرب ایران به دشت رفسنجان در مرکز ایران را بر اساس حجم انتقال بهینه‌سازی کردند. نتایج تحقیقات آنها نشان می‌دهد که حجم بهینه انتقال آب ۲۴۰ میلیون مترمکعب در سال خواهد بود.

در بهینه‌سازی انتقال آب بین حوضه‌ای یا میان حوضه‌ای، تحقیقات زیادی شده که می‌توان به تحقیقات وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2007, 2008) و کاندان و مکسول (Condon, & Maxwell, 2013) اشاره کرد.

منصوری (Mansouri, 2016) در رساله دکتری خود می‌گوید این نوع طرح‌ها (طرح‌های انتقال آب بین حوضه‌ای) با توجه به مخزن بالادست و تونل انتقال آب به پایین‌دست شرایطی ترکیبی از مسائل هیدرولوژیکی (تراز آب مخزن) و هیدرولیکی (هیدرولیک لوله یا تونل انتقال) را در خود جای داده است. از این‌رو تحلیل و بررسی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی برای به‌دست آوردن شرایط مورد نظر باید همزمان باشد. همچنین، در کنار این بررسی به‌منظور کم کردن هزینه‌ها نیز باید بهینه‌سازی سیستم‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی نیز مورد توجه قرار گیرد.

در مدل‌های شبیه‌سازی تلفیقی، مدل‌های تلفیقی پیچیده هیدرولوژیکی و هیدرولیکی وجود دارند که می‌توانند معادلات هیدرولیکی و معادلات هیدرولوژیکی مسائل آبی را همزمان شبیه‌سازی کنند. تقریباً همه این مدل‌های تلفیقی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی مربوط به مدل‌هایی هستند که می‌توانند پخش سیلاب را مدل کرده داده‌های هیدرولوژیکی بارش و رواناب را با هیدرولیک آنالیز کنند. تحقیقات آذری و همکاران (Azeri *et al.*, 2006) از این نوع‌اند که در آن به‌منظور بررسی رفتار سیلاب و نحوه گسترش آن در بازه‌ای از رودخانه جعفرق در استان خراسان رضوی از تلفیق مدل‌های هیدرولوژیکی HEC-HMS و مدل هیدرولیکی HEC-RAS در GIS استفاده شده است. همچنین در تحقیقات بنی‌هاشمی و همکاران (Bani-Hashemi *et al.*, 2001)، مدل کلی شبیه‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولیک پخش سیلاب ارائه شده است.

در مطالعات شبیه‌سازی سیلاب و کاربرد مدل‌های هیدرولوژیکی، بیشتر به بررسی دبی رواناب در محل خروجی حوضه پرداخته شده است. رادوان (Radwan, 1999) با استفاده از مدل آنالیز سیلاب برای منطقه‌ای در اردن نقش اقدامات مختلف کنترل سیلاب بر دبی

ترابی‌پوده و همکاران (Torabi-Poudeh *et al.*, 2016) پیشگامان بهینه‌سازی و مدل‌سازی تلفیقی هیدرولیک و منابع آب هستند. این محققان هزینه انتقال آب بین دو سد را با استفاده از یک تونل انتقال شبیه‌سازی و بهینه‌سازی کردند و با استفاده از برنامه‌ریزی پویا، هزینه اجرای سیستم انتقال آب از سد شماره یک به سد شماره دو به کمک یک تونل انتقال را بهینه کردند. برای بهینه‌سازی این سیستم باید معادله بیلان آب و مدل هیدرولیکی تونل همزمان اجرا می‌گردید. در این تحقیق، در ابتدا معادله بیلان فقط برای سد شماره یک حل شد و پس از آن با مشخص شدن جریان ورودی و تراز آب در سد شماره یک دبی تونل با استفاده از نرم‌افزار EPANET محاسبه گردید.

در تحقیق دیگر، منصوری و همکاران (Mansouri *et al.*, 2016) سیستم انتقال آب شامل سه سد و دو تونل انتقال را که به صورت سری قرار دارند با روش برنامه‌ریزی پویا (پیشرو) اصلاح شده را شبیه‌سازی و بهینه‌سازی کردند؛ برای شبیه‌سازی هیدرولیکی از نرم‌افزار EPANET و برای شبیه‌سازی منابع آب از معادله بیلان آب استفاده شده است که به صورت همزمان با مدل بهینه‌ساز (برنامه‌ریزی پویا) اجرا می‌گردد.

در این تحقیق، بهینه‌سازی و مدل‌سازی تلفیقی هیدرولیک و منابع آب همزمان بررسی می‌شود. الگوریتم مورد استفاده در این تحقیق الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) است که اولین بار استورن و پرایس (Storn & Price, 1995) آن را معرفی کردند. الگوریتم تکامل تفاضلی کلاسی از الگوریتم‌های تکاملی است که ساختار آن از نظر مفهوم و پیاده‌سازی بسیار ساده است. این الگوریتم یک روش بهینه‌سازی کارآمد در محیط‌های پیوسته است و در طیفی وسیع از مسائل مهندسی به کار می‌رود. این الگوریتم در نخستین مسابقه بهینه‌سازی IEEE مقام اول را کسب کرد. استورن و پرایس

این الگوریتم در تحقیق بعدی خود با استفاده از توابع محک بسیار متنوعی عملکرد الگوریتم خود را با تعدادی از مشهورترین روش‌های بهینه‌سازی مقایسه کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده برتری الگوریتم تکامل تفاضلی بود. از آن زمان تاکنون، این الگوریتم موضوع بسیاری از مقالات علمی در ادبیات الگوریتم‌های تکاملی بوده است.

این الگوریتم در مسائل مهندسی آب و به‌ویژه در مسائل بهینه‌سازی شبکه‌های لوله، واسنجی مدل‌های بارش-رواناب، آب‌های زیرزمینی، سیستم‌های با چند مخزن و سیستم‌های آبیاری تحت فشار به کار گرفته شده است (Babu & Angira, 2003; Vasan & Raju, 2007; Suribabu, 2010; Mansouri *et al.*, 2014, 2015).

در تمامی تحقیقات گذشته، سیستم انتقال آب از دیدگاه تخصیص آب یا همان حجم انتقال بررسی و بهینه‌سازی شده است. اما در انتقال آب بین حوضه‌ای یا میان حوضه‌ای، علاوه بر حجم انتقال که خود تابع مسائل هیدرولوژیکی و هیدرولیکی است، هزینه ساخت سد و تونل انتقال به دلیل هزینه بالایی که دارند بسیار بااهمیت است.

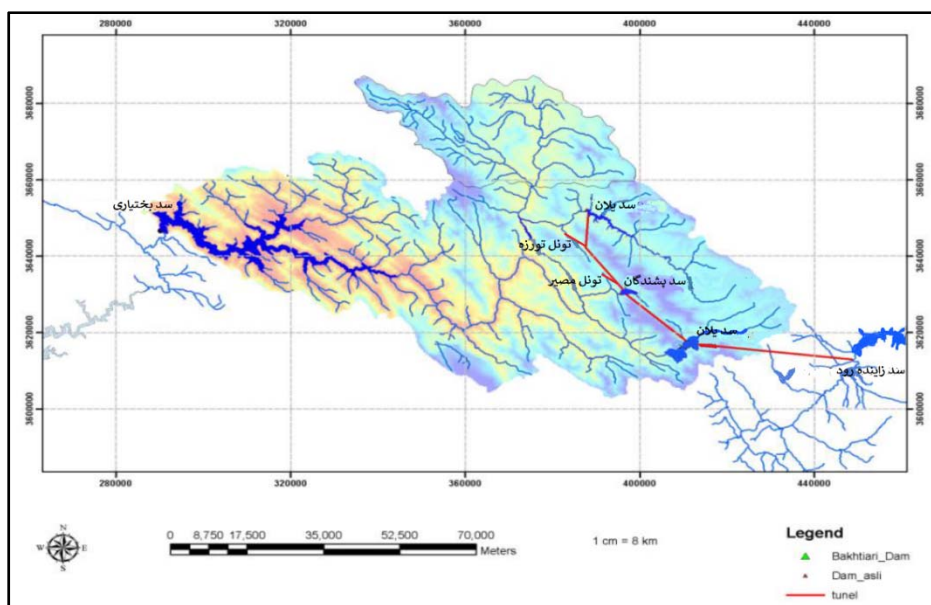
در این تحقیق با استفاده همزمان از معادله بیلان و مدل شبیه‌ساز هیدرولیکی لوله، با کمک الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) با در نظر گرفتن اصلاحاتی در این روش، یک سیستم انتقال آب بین حوضه‌ای در ایران بهینه گردیده است که شامل چهار سد (یلان، پشندگان، گوکان و زاینده‌رود) و سه تونل انتقال (یلان-پشندگان، پشندگان-گوکان و گوکان-زاینده‌رود) است. در این گونه مسائل، بهینه‌سازی باید چنان باشد که آب مورد نیاز حوضه مقصد تامین شود ضمن اینکه کل سیستم انتقال آب بین حوضه‌ای دچار مشکلات هیدرولیکی نگردد.

## مواد و روش‌ها

دو تونل جانبی دیگر که از سدهای تورزه و مصیر هستند در بین راه به تونل اصلی یلان-پشندگان متصل می‌شوند و برای شبیه‌سازی هیدرولیکی باید حجم آب این دو تونل نیز مد نظر قرار گیرد. از طرف دیگر، تونل پشندگان-گوکان منتقل‌کننده آب از سد پشندگان به گوکان است همچنین رودخانه‌هایی مانند کاهنگان، پاتاگاه، الکن، آب سفید و آب شیرستان نیز به مخزن سد گوکان متصل اند و آورد این رودخانه‌ها به مخزن سد گوکان ریخته می‌شود از این رو لازم است در شبیه‌سازی منابع آب سد گوکان، آورد این رودخانه‌ها محاسبه و اعمال گردد. سرانجام، آب از طریق تونل گوکان-زاینده‌رود به مخزن سد زاینده‌رود انتقال داده می‌شود.

منطقه مورد مطالعه در طول جغرافیایی  $42^{\circ} 49'$  تا  $13^{\circ} 50'$  و عرض جغرافیایی  $32^{\circ} 25'$  تا  $33^{\circ} 00'$  قرار گرفته و شامل حوضه فریدونشهر است. در طرح کلی انتقال آب، چهار سد روی رودخانه‌های یلان، پشندگان، گوکان و زاینده‌رود احداث و پس از آن آب ابتدا از سد یلان با تونلی به طول ۲۳ کیلومتر به سد پشندگان و از سد پشندگان با تونلی به طول ۱۸/۸ کیلومتر به سد گوکان و از سد گوکان با تونلی به طول ۳۸ کیلومتر به سد زاینده‌رود منتقل می‌شود. پلان کلی انتقال در شکل ۱ نشان داده شده است.

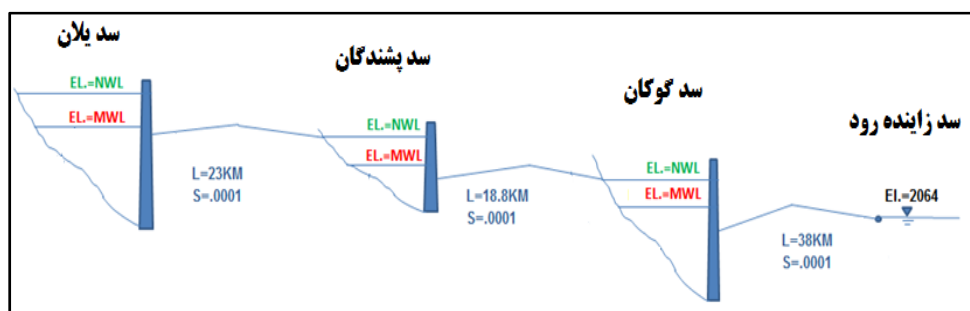
در شکل ۱ مشاهده می‌شود که تونل یلان-پشندگان وظیفه انتقال آب از سد یلان به سد پشندگان را دارد؛



شکل ۱- نمایی کلی از طرح انتقال آب از سد یلان به سد زاینده‌رود

شده‌اند (شکل ۲). تمامی اطلاعات هواشناسی و هیدرولوژیکی منطقه مورد نظر از جمله جریان ورودی، منحنی حجم-سطح-ارتفاع و بارندگی و تبخیر در مخزن هر سد برای تمامی سدها در یک دوره ۴۰ ساله از ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۰ موجود است.

در این طرح، تمامی تونل‌ها تحت فشار عمل می‌کنند و تراز ابتدای تونل برابر با تراز مرده سد بالادست و تراز انتهای تونل برابر با تراز نرمال سد پایین‌دست است. در این تحقیق، تراز نرمال در سد زاینده‌رود ثابت و برابر با ۲۰۶۴ متر است. تونل‌ها با دو شیب طراحی



شکل ۲- نمایی شماتیک از قرارگیری سدها و تونل انتقال در تحقیق انتقال آب از یلان به زاینده‌رود

از سد در دوره مدل‌سازی  $t$ ؛ و  $P_t =$  مقدار بارندگی روی مخزن در دوره مدل‌سازی  $t$  است.

رابطه بین بارندگی و نفوذ در منطقه نسبتاً یکسان است و از این رو می‌توان از این دو پارامتر در محاسبات چشم‌پوشی کرد. همچنین، با توجه به محل ساخت و نوع کاربری سدها نیازهای پایین دست سد فقط شامل نیازهای کشاورزی و زیست‌محیطی خواهد بود.

در رابطه ۱، مقدار جریان ورودی به هر یک از سدها با توجه به داده‌های هیدرولوژیکی منطقه قابل محاسبه است. همچنین، چگونگی تغییرات سطح و حجم مخزن سدهای پیشنهادی به‌ازای رقوم مختلف سطح آب از جمله اطلاعات و داده‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی و مدل کردن سیستم انتقال آب حوضه به حوضه است. به دلیل در دسترس نبودن نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس مناسب از محل محور و مخازن سدهای پیشنهادی، برای تهیه منحنی‌های سطح، حجم و ارتفاع از گزینه‌های مختلف سدهای مطالعاتی روی رودخانه یلان، پشندگان و گوکان از نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ استفاده گردید.

از طرف دیگر، مقدار تبخیر آب از مخازن سدها مستقیم به سطح آب موجود در مخزن (سطح تبخیر) بستگی دارد و بنابراین در محاسبه میزان تبخیر در دوره مدل‌سازی سطح تبخیر در ابتدای دوره و انتهای دوره بسیار اهمیت دارد از این رو می‌توان رابطه ۲ را ارائه داد.

در مطالعه انتقال آب از سد یلان به زاینده‌رود دو وضعیت جریان موجود است. وضعیت اول شرایط هیدرولوژیکی و منابع آبی منطقه است که در این تحقیق رابطه مستقیم با ارتفاع سدها دارد. وضعیت دوم شرایط هیدرولوژیکی و جریان تحت فشار آب در تونل‌های انتقال است که می‌توان گفت با قطر تونل رابطه مستقیم دارد.

متغیرهای موجود با استفاده از معادله بیلان (متغیرهای هیدرولوژیکی) و معادله هیدرولیک لوله‌ها (متغیرهای هیدرولیکی) به دست می‌آیند و کل موضوع با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) بهینه می‌شود. برای مدل‌سازی شرایط هیدرولوژیکی در هر مخزن سد از رابطه بیلان منابع آب (رابطه ۱) استفاده می‌شود:

$$S_{t+1} = S_t + Q_{in} - Q_{Tunnel} - Q_{Agri_t} - Q_{Envi_t} - LE_t + P_t - Sp_t \quad (1)$$

که در آن،

$S_{t+1}$  = حجم مخزن در انتهای دوره مدل‌سازی  $t$ ؛  $S_t$  = حجم مخزن در ابتدای دوره مدل‌سازی  $t$ ؛  $Q_{in}$  = دبی جریان ورودی به مخزن دوره مدل‌سازی  $t$ ؛  $Q_{Tunnel}$  = دبی انتقال آب با تونل در دوره مدل‌سازی  $t$ ؛  $Q_{Agri_t}$  = دبی مورد نیاز کشاورزی در دوره مدل‌سازی  $t$ ؛  $Q_{Envi_t}$  = دبی مورد نیاز محیط زیست (که باید از سد برای پایین دست رها شود) در دوره مدل‌سازی  $t$ ؛  $LE_t$  = حجم تبخیر و نفوذ از مخزن در دوره مدل‌سازی  $t$ ؛  $Sp_t$  = مقدار جریان سرریز شده

$$LE_t = f(S_t, S_{t+1}) \quad (2)$$

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، سه وضعیت جریان وجود دارد؛

- وضعیت اول:  $S_{t+1} > S_{Normal}$ ، در این حالت مقدار جریان سرریز ( $Sp_t$ ) برابر صفر نیست و از این‌رو مقدار تبخیر و دبی تونل در ابتدای دوره و در زمانی که تراز نرمال ( $S_{t+1} = S_{Normal}$ ) برقرار است، محاسبه و در نهایت مقدار جریان سرریز شده محاسبه می‌شود.

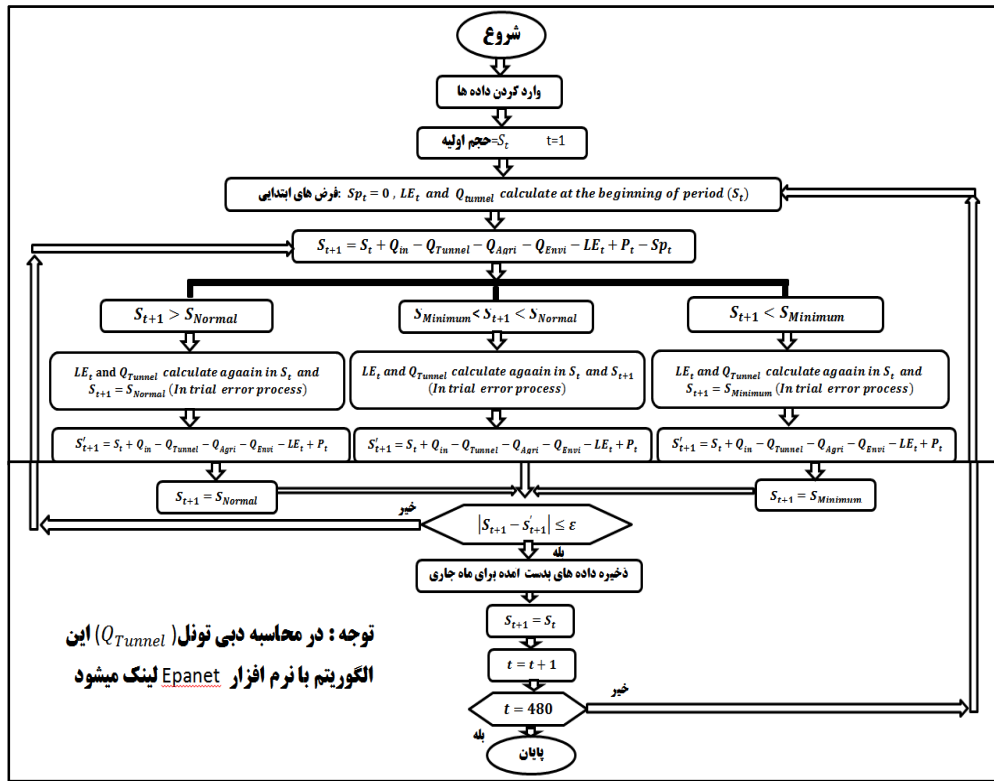
- وضعیت دوم:  $S_{Minimum} < S_{t+1} < S_{Normal}$ ، در این حالت مانند وضعیت اول مقدار تبخیر و دبی تونل در ابتدا ( $S_t$ ) و انتهای دوره ( $S_{t+1}$ ) محاسبه می‌شود. میانگین تبخیر و دبی تونل در رابطه ۱ قرار داده خواهد شد و رابطه مجدداً حل می‌گردد. این فرایند تا زمانی ادامه می‌یابد که حجم انتهای دوره محاسبه شده ( $S'_{t+1}$ ) برابر با حجم انتهای دوره مورد نظر ( $S_{t+1}$ ) باشد.

- وضعیت سوم:  $S_{Minimum} > S_{t+1}$ ، در این حالت دبی تونل برابر صفر است ( $Q_{Tunnel} = 0$ ) و بنابراین مقدار تبخیر و دبی تونل در ابتدای دوره ( $S_t$ ) و زمانی که  $S_{t+1} = S_{Minimum}$  محاسبه می‌شود.

برای محاسبه دبی جریان در تونل‌های انتقال، معادلات هیدرولیکی لوله باید حل شود و از آنجا که با تغییر تراز سطح آب در مخزن، دبی تونل‌ها تغییر خواهد کرد برای محاسبه دبی تونل در رابطه ۱ از نرم‌افزار EPANET استفاده شد. یادآوری می‌شود که در این تحقیق برای حل جریان تحت فشار از مدل عددی EPANET استفاده شده و از این‌رو برای رعایت اختصار از آوردن معادلات هیدرولیکی صرف‌نظر شده است. در الگوریتم شکل ۳ دیده می‌شود که در هر بار اجرای الگوریتم هر جا به محاسبه دبی تونل نیاز باشد الگوریتم به صورت دینامیکی با نرم‌افزار EPANET ارتباط برقرار و مدل‌سازی هیدرولیکی را با کمک این نرم‌افزار اجرا می‌کند و با به‌دست آوردن نتایج، آنها را در الگوریتم قرار می‌دهد.

پارامترهای این رابطه پیش‌تر معرفی گردیده است. در فرضیات اجرایی طرح، تونل باید در هر زمان حداکثر دبی ممکن را انتقال دهد. با افزایش اختلاف ارتفاع آب در سراب و پایاب تونل، دبی انتقالی نیز افزایش می‌یابد. تغییرات جریان ورودی به مخزن هر سد در طول ماه‌های شبیه‌سازی باعث ایجاد تغییرات در تراز سطح آب می‌شود و به‌تبع آن دبی خروجی از تونل نیز تغییر می‌کند. در اینجا نتیجه می‌گیریم که تغییرات دبی در تونل‌ها تابعی است از تغییرات سطح آب و مشخصات فیزیکی و هیدرولیکی تونل‌ها. برای محاسبه دبی تونل یلان- پشندگان، پشندگان- گوکان و گوکان- زاینده‌رود، باید رابطه ۱ حل شود. در این رابطه  $S_t$ ،  $Q_{in}$ ،  $Q_{Agri}$  و  $Q_{Env}$  پارامترهای مشخص و  $LE_t$ ،  $Q_{Tunnel}$ ،  $Sp_t$  و  $S_{t+1}$  پارامترهای مجهول مسأله هستند.

از آنجا که مجهولات این رابطه زیادند، نیاز خواهد بود یک‌سری فرضیات در نظر گرفته شوند. برای حل کردن رابطه ۱، فرض می‌شود مقدار سرریز شدن آب برابر صفر باشد ( $Sp_t=0$ )، مقدار تبخیر از سطح مخازن ثابت و برابر مقدار تبخیر در ابتدای دوره مدل‌سازی است و دبی تونل ( $Q_{Tunnel}$ ) در ابتدای دوره محاسبه خواهد شد. با توجه به این فرضیات، تنها پارامتر مجهول حجم مخزن در انتهای دوره مدل‌سازی ( $S_{t+1}$ ) است. بعد از محاسبه  $S_{t+1}$ ، سه حالت ممکن است رخ دهد که با توجه به الگوریتم ارائه شده در شکل ۳ می‌توان معادله بیلان را با استفاده از لینک با نرم‌افزار EPANET حل کرد. از این‌رو، کد حل معادله بیلان توسط نویسنده در محیط ویژوال بیسیک نوشته شد و صحت کارای آن نتایج مدل‌سازی این کد با نرم‌افزار WEAP چک گردید. سپس با توجه به فلوچارت شکل ۳، این کد به صورت پویا به نرم‌افزار EPANET لینک گردید.



شکل ۳- الگوریتم حل معادله بیلان برای تراز نرمال و قطر ثابت تونل

تمامی این فرایند برای سه وضعیت در طول دوره آماری اجرا می شود که ۴۸۰ ماه (۴۰ سال) است.

هزینه را داشته باشد. می توان تابع هدف را به صورت رابطه ۳ تعریف کرد:

$$\text{Min} \left( \sum (L \times \text{ULC}(d_k) + \text{Cost}_{\text{Dam}}(d_k)) \right) \quad (3)$$

با توجه به تابع هدف، دو نوع هزینه برای این تحقیق تعریف شده است، یکی هزینه تونل هاست که با توجه به طول آنها مطرح و در رابطه ۳ با پارامتر  $L \times \text{ULC}(d_k)$  نمایش داده شده است، و دیگری هزینه ساخت سدهاست که با پارامتر  $\text{Cost}_{\text{Dam}}(d_k)$  نمایش داده شده است. حال با توجه به تابع هدف باید هزینه سد برای ارتفاعهای مختلف و هزینه تونل برای قطرهای مختلف در دسترس باشد. از این رو، در جدول ۱ هزینه ساخت سد یلان، پشندگان و گوکان برای ارتفاعهای مختلف و در شکل ۴ هزینه ساخت تونل انتقال یلان- پشندگان و تونل انتقال

تا این مرحله می توان مدل سازی تلفیقی منابع آب و هیدرولیک جریان را در این تحقیق مشاهده کرد. حال به منظور بهینه سازی طرح از الگوریتم تکامل تفاضلی استفاده می شود که لازم است در هر مرحله از این روند بهینه سازی، الگوریتم شکل ۳ اجرا شود. در هر بهینه سازی دو پارامتر اهمیت دارد که تعیین کننده شرایط مسأله هستند یکی تابع هدف (مربوط به روند کلی اجرای الگوریتم) و دیگری محدودیتها (کنترل و محدود کردن شرایط اجرای الگوریتم). در اینجا این دو پارامتر و کاربرد الگوریتم تکامل تفاضلی در این تحقیق بررسی شده است. هدف این تحقیق بهینه سازی قطر تونل های یلان- پشندگان، پشندگان- گوکان و گوکان- زاینده رود و بهینه سازی ارتفاع سدهای یلان، پشندگان و گوکان برای راندمان انتقال ۹۵ درصد به گونه ای است که کمترین



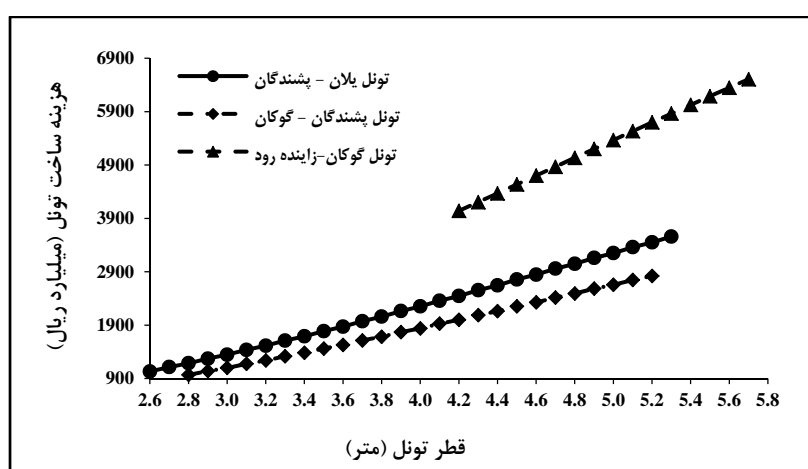
پشندگان- گوکان برای قطرهای مختلف نشان داده شده است. سد زاینده‌رود پیشتر احداث شده و ارتفاع آن مشخص است و بنابراین در محاسبات هزینه آورده نشده است.

جدول ۱- رابطه بین هزینه سد و ارتفاع سد از پی برای سدهای یلان، پشندگان و گوکان

رابطه بین هزینه سد و ارتفاع سد از پی					
یلان		پشندگان		گوکان	
متر	میلیارد ریال	متر	میلیارد ریال	متر	میلیارد ریال
۰	۰	۰	۰	۰	۰
۸۰	۷۳۴	۲۰	۱۴۹	۱۵	۷۷
۱۰۰	۱۱۸۰	۴۰	۲۹۸	۳۰	۱۶۶
۱۲۰	۱۷۶۰	۵۰	۳۸۴	۵۰	۴۸۱
۱۴۰	۲۴۵۶	۶۰	۴۷۰	۶۵	۸۰۴
۱۶۰	۳۳۳۲	۸۰	۹۸۵	۸۰	۱۵۲۵
۱۸۰	۴۴۰۰	۹۰	۱۲۴۲/۲	۱۰۸	۲۹۰۷
۱۹۰	۵۰۵۰	۱۰۰	۱۵۰۰	۱۴۰	۴۵۰۰

این طرح را به صورت زیر تعریف کرد. در این طرح، راندمان انتقال برای تمامی انتقال‌ها ۹۵ درصد در نظر گرفته شده است. در محدودیت‌های مرتبط با تونل‌های انتقال گفتنی است که حداقل قطر مورد استفاده در این تحقیق را ۲/۵ متر و حداکثر سرعت جریان در تونل‌ها را ۳ متر بر ثانیه باید در نظر گرفت تا از ایجاد خسارت جلوگیری کرد (روابط ۴ تا ۸).

محدودیت‌های این طرح را می‌توان در قالب دو بخش در نظر گرفت: بخش اول راندمان انتقال و بخش دوم قطر و سرعت جریان در تونل. تمامی انتقال‌های آب در این تحقیق باید راندمانی ثابت داشته باشند و چون با افزایش قطر تونل ارتفاع مورد نیاز سد برای راندمان انتقال ثابت کاهش و با کاهش قطر، ارتفاع سد افزایش می‌یابد، بنابراین می‌توان قیدها یا محدودیت‌های



شکل ۴- رابطه بین هزینه تونل و قطر تونل

شده در مدل‌سازی بر حسب میلیون مترمکعب؛  
 $R_{Envi}$  = مقدار آب رها شده برای نیازهای زیست‌محیطی بر حسب میلیون مترمکعب؛  $D_{Envi}$  = مقدار آب مورد نیاز برای نیازهای زیست‌محیطی بر حسب میلیون مترمکعب؛  
 $R_{Agri}$  = مقدار آب رها شده برای نیازهای کشاورزی بر حسب میلیون مترمکعب؛  $D_{Agri}$  = مقدار آب مورد نیاز برای نیازهای کشاورزی بر حسب میلیون مترمکعب؛ و  
 $V_i(d_k)$  = سرعت جریان در تونل.

$$\left( \frac{\sum_{j=1}^{40} \sum_{i=1}^{12} Q_{ij} - \sum_{j=1}^{40} \sum_{i=1}^{12} Spillway_{ij}}{\sum_{j=1}^{40} \sum_{i=1}^{12} Q_{ij}} \right) \times 100 = 95 \quad (۴)$$

$$\left( \frac{\sum_{j=1}^{40} \sum_{i=1}^{12} Q_{ij} - \sum_{j=1}^{40} \sum_{i=1}^{12} Spillway_{ij}}{\sum_{j=1}^{40} \sum_{i=1}^{12} Q_{ij}} \right) \times 100 = 95 \quad (۵)$$

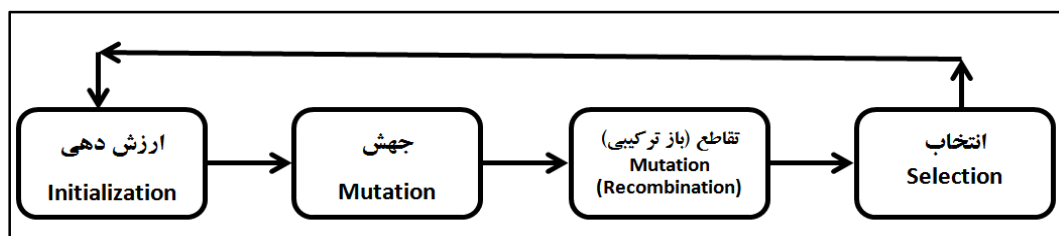
$$\left( \frac{\sum_{j=1}^{40} \sum_{i=1}^{12} R_{Envi_{ij}}}{\sum_{j=1}^{40} \sum_{i=1}^{12} D_{Envi_{ij}}} \right) \times 100 = 95 \quad (۶)$$

$$d_k \geq 2.5 \quad (۷)$$

$$0 < V_i(d_k) < 3 \quad (۸)$$

یکی از الگوریتم‌های تکاملی که اخیراً ارائه شده، الگوریتم تکاملی تفاضلی است. این الگوریتم برای غلبه بر عیب اصلی الگوریتم‌های ژنتیکی، یعنی فقدان جستجوی محلی در این الگوریتم‌ها، ارائه شده است. تفاوت اصلی بین الگوریتم‌های ژنتیکی و الگوریتم DE در ترتیب عملگرهای جهش و تقاطع (باز ترکیبی) و همچنین نحوه کار عملگر انتخاب است (شکل ۵).

که در آنها،  
 $Q$  = مقدار جریان ورودی به مخزن بر حسب میلیون مترمکعب؛  $Spillway$  = مقدار جریان سرریز



شکل ۵- روند کار الگوریتم تکامل تفاضلی و عملگرهای آن

هدف سنجیده می‌شود، مقایسه خواهد شد و بهترین اعضا به‌عنوان نسل بعدی وارد مرحله بعد می‌شوند.  
 سرعت بالا، سادگی و قدرتمند بودن الگوریتم DE، از مهمترین ویژگی‌های آن است. این روش تنها با تنظیم سه پارامتر شروع به کار می‌کند. پارامتر NP اندازه جمعیت، پارامتر F وزن جهش و پارامتر Cr احتمال باز ترکیبی یا تقاطع است که در تفاضل دو بردار ضرب و به بردار سوم اضافه می‌شود. به گفته استورن و پرایس (Storn & Price, 1995) پارامتر F معمولاً بین ۰ تا ۲ تنظیم می‌شود و پارامتر Cr مقداری بین ۰ تا ۱ می‌گیرد. به‌طور کلی این

استورن و پرایس (Storn & Price, 1995) نشان دادند که این الگوریتم از یک اپراتور تفاضلی برای تولید جواب‌های جدید بهره می‌گیرد که این اپراتور اطلاعات بین اعضای جمعیت را مبادله می‌کند. یکی از مزایای این الگوریتم، داشتن حافظه است که اطلاعات جواب‌های مناسب را در جمعیت فعلی حفظ می‌کند. دیگر مزیت این الگوریتم مربوط به عملگر انتخاب آن است. در این الگوریتم همه اعضای جمعیت شانس مساوی برای انتخاب شدن به‌عنوان یکی از والدین را دارند. به این صورت که نسل نوزاد با نسل والد از نظر میزان شایستگی که توسط تابع

طول گام جهش را مشخص می‌کند. هرچه این ضریب کوچکتر باشد محیط مورد نظر برای یافتن عضو جدید، با فواصل کوچکتری جستجو می‌شوند که زمان اجرای الگوریتم افزایش می‌یابد که ممکن است باعث گردد الگوریتم در بهینه‌های موضعی به دام بیفتد (شکل ۶).

#### مرحله سوم: عملگر تقاطع (باز ترکیبی)

در این بخش، بین بردار جهش‌یافته و عضو هدف که در مرحله اول انتخاب شد، یک ترکیب ایجاد و بردار سنجش تولید می‌شود. اساس این ترکیب بر پایه ضریب CR است که همانطور اشاره شد ضریبی است در بازه ۰ تا ۱. به این صورت که هر یک از مؤلفه‌های این بردار جهش‌یافته با احتمال CR به بردار کاندید منتقل می‌شود و گرنه مؤلفه معادل در بردار اصلی جایگزین خواهد شد. رابطه ۱۰ نشان‌دهنده این عملگر است.

$$u_{ji,G+1} = \begin{cases} V_{ji,G+1} & \text{If } \text{rand}(j) \leq Cr \text{ or } j = \text{randb} \\ X_{ji,G} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

که در آن،

$\text{rand}(j)$  = ژامین فراخوانی تابع تصادفی که عددی میان صفر و یک تولید می‌کند.

الگوریتم دارای چهار مرحله اساسی ارزش‌دهی، جهش، تقاطع (یا باز ترکیبی) و انتخاب است که هر مرحله به تفصیل در زیر شرح داده می‌شود.

#### مرحله اول: عملگر ارزش‌دهی:

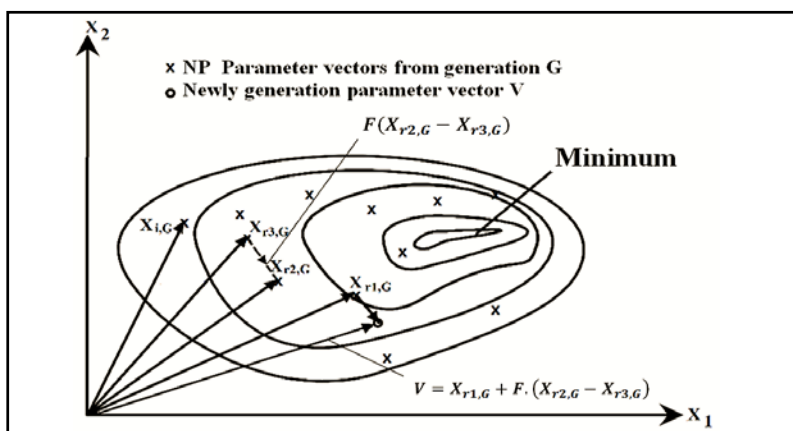
این الگوریتم، ابتدا جمعیتی به اندازه مقادیر تصادفی (NP) در محدوده مقادیر مسأله مربوط ایجاد می‌کند. در این مرحله، مرزهای مقادیر مشخص می‌شود. گام بعدی انتخاب چهار عضو از جمعیت به صورت تصادفی است که از بین این چهار عضو تصادفی یک عضو به صورت تصادفی به عنوان بردار هدف انتخاب می‌شود و سه عضو دیگر به عنوان بردارهای ۱، ۲ و ۳ جدا می‌شوند.

#### مرحله دوم: عملگر جهش:

در این مرحله، برای تولید بردار جهش یافته در ابتدا اختلاف دو بردار ۲ و ۳ در ضریب F با بردار ۱ جمع می‌شود. بردار جهش یافته به صورت رابطه ۹ در هر عمل جهش درون جمعیت ایجاد می‌شود.

$$V_{i,G+1} = X_{r1,G} + F \times (X_{r2,G} - X_{r3,G}) \quad (9)$$

همان‌طور که اشاره شد ثابت F که ضریب مقیاس نام دارد، مقداری بین ۰ تا ۲ به خود می‌گیرد. این ضریب



شکل ۶- نمایش شماتیک از عملگر جهش در الگوریتم تکامل تفاضلی (Mansouri et al., 2015)

## مرحله چهارم: انتخاب

منصوری و همکاران (Mansouri et al., 2015) می‌گویند در این مرحله، بردار سنجش به‌دست آمده از مرحله قبل و عضو هدف که در مرحله اول انتخاب شده بود با توجه به تابع هدف، ارزش‌دهی می‌شوند و بردار سنجش اگر ارزشی بیش از ارزش عضو هدف داشته باشد، یکی از اعضای نسل بعد قرار می‌گیرد و اگر نداشته باشد عضو هدف خود یکی از جمعیت نسل بعد می‌شود. رابطه ۱۱ بیان‌کننده انتخاب بین بردار سنجش و عضو هدف است.

$$X_{ji,G+1} = \begin{cases} u_{ji,G+1} & \text{If } f(u_{ji,G+1}) \leq f(X_{ji,G}) \\ X_{ji,G} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

این روند ادامه می‌یابد تا نسل جدید به تعداد NP برسد. پس از آن به‌همین صورت این روند تکرار خواهد شد تا شرایط خاتمه وصول گردد. در این تحقیق، هر بردار در الگوریتم تکامل تفاضلی شش عضو دارد که سه عضو اول به ارتفاع سدها و سه عضو دیگر به قطر تونل‌های انتقال مربوط است.

برای یافتن قطر تونل در بین دو مخزن با تراز نرمال مشخص از تکنیک شبیه‌سازی استفاده می‌شود. برای تعیین قطر، یکی از حالات به‌دست آمده از الگوریتم تکامل تفاضلی تشریح می‌گردد. بدین‌منظور تعیین قطر بین سد یلان با تراز نرمال ۲۱۱۵ و سد پشندگان با تراز ۲۰۹۵ را انتخاب می‌کنیم که به‌صورت تصادفی از الگوریتم تکامل تفاضلی استخراج شده‌اند. برای شبیه‌سازی سیستم، ابتدا باید تراز مرده سد یلان تعیین شود. با توجه به دو شبیه بودن تونل انتقال، تراز معادل بالاترین نقطه کف تونل انتقال، تراز مرده سد یلان است. فاصله نقطه تغییر شیب تونل تا سد پشندگان ۱۴۴۶۶ متر است. شیب تونل معادل ۰/۰۰۱ است و بنابراین تراز کف تونل در بالاترین قسمت برابر است با:

تراز مرده سد یلان = تراز بالاترین نقطه کف تونل + تراز بالاترین نقطه کف تونل = تراز نرمال سد پشندگان + (شیب تونل × فاصله نقطه تغییر شیب تونل تا خروجی تونل به سد پشندگان)

با توجه به این موضوع، تراز مرده سد یلان معادل ۲۹۰۶/۴۴ است. جریان ورودی به سد یلان نیز معلوم و مطابق قسمت الف شکل ۷ است. اکنون برای قطر تونل به‌دست آمده از الگوریتم تکامل تفاضلی و با استفاده از تکنیک شبیه‌سازی با در نظر گرفتن سایر قیده‌های مسأله، راندمان انتقال تونل به‌صورت رابطه ۳ برای قطر مورد نظر محاسبه می‌شود. حال اگر راندمان انتقال بین ۹۴/۹ و ۹۵/۱ باشد، مسأله مورد نظر از نظر محدودیت مشکلی ندارد و گزینه دارای محدودیت است.

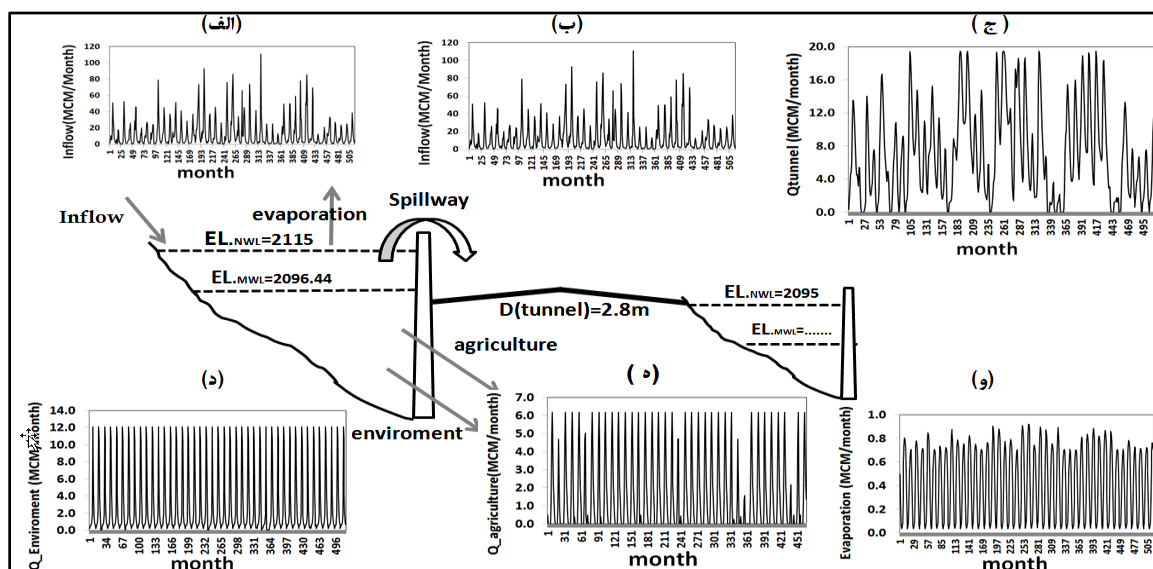
## نتایج و بحث

در بهینه‌سازی مربوط به منابع آب و هیدرولیک، دو مسأله خیلی مهم است، یکی روند اجرای الگوریتم برای یافتن جواب بهینه و دیگری بررسی محدودیت‌ها در اجرای الگوریتم. در این تحقیق برای به‌دست آوردن بهترین شرایط الگوریتم که بتواند دو شرط بالا را مد نظر داشته باشد لازم بود الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) اصلاح شود. در بهینه‌سازی سیستم انتقال آب بین حوضه‌ای، همزمان باید بهینه‌سازی، مدل‌سازی هیدرولیکی و منابع آب صورت گیرد، بنابراین الگوریتم تکامل تفاضلی به‌صورتی کدنویسی شد که در تولید هر بردار، الگوریتم با یک رابط دینامیکی به کد بیلان آب (مدل‌سازی هیدرولوژیکی) و نرم‌افزار EPANET (مدل‌سازی هیدرولیکی) متصل است. بنابراین می‌توان گفت که پوسته بیرونی این برنامه شامل الگوریتم تکامل تفاضلی است اما در داخل این پوسته همزمان و در تولید هر بردار که شامل ارتفاع سدها و قطر تونل‌هاست، این الگوریتم به‌صورت دینامیکی با مدل بیلان

تکامل تفاضلی از جمعیت حذف شوند. روند کار تابع پنالتی به این صورت است که پس از مشخص شدن ارتفاع سدها و قطر تونل‌ها برای بردار هدف و سنجش، مدل بیلان آب جهت محاسبه تراز سطح آب و به تبع آن راندمان انتقال از رابطه ۱۱ و نرم‌افزار EPANET برای محاسبه سرعت جریان در تونل همزمان اجرا و سپس پارامتر راندمان انتقال و سرعت جریان از لحاظ محدودیت بررسی می‌شود. اگر راندمان انتقال و سرعت جریان در بازه مورد نظر نباشد به هزینه به دست آمده مبلغ یک میلیارد ریال اضافه می‌شود.

آب (مربوط به تراز سطح آب) و مدل هیدرولیک تحت فشار (مربوط به قطر تونل‌ها) ارتباط دارد. در شکل ۸ مراحل الگوریتم تکامل تفاضلی مورد استفاده در این تحقیق ارائه شده است.

در بررسی محدودیت‌ها در این سیستم، نویسنده قسمتی از الگوریتم را طراحی کرده که در شکل ۸ با نام تابع پنالتی مشخص شده است. این بخش (تابع پنالتی) باعث می‌شود که بردارهایی که از لحاظ محدودیت‌ها دچار مشکل هستند با یک افزایش هزینه مواجه و در روند اجرای الگوریتم



شکل ۷- شماتیک شبیه‌سازی درازمدت سیستم انتقال آب از یلان به پشندگان.

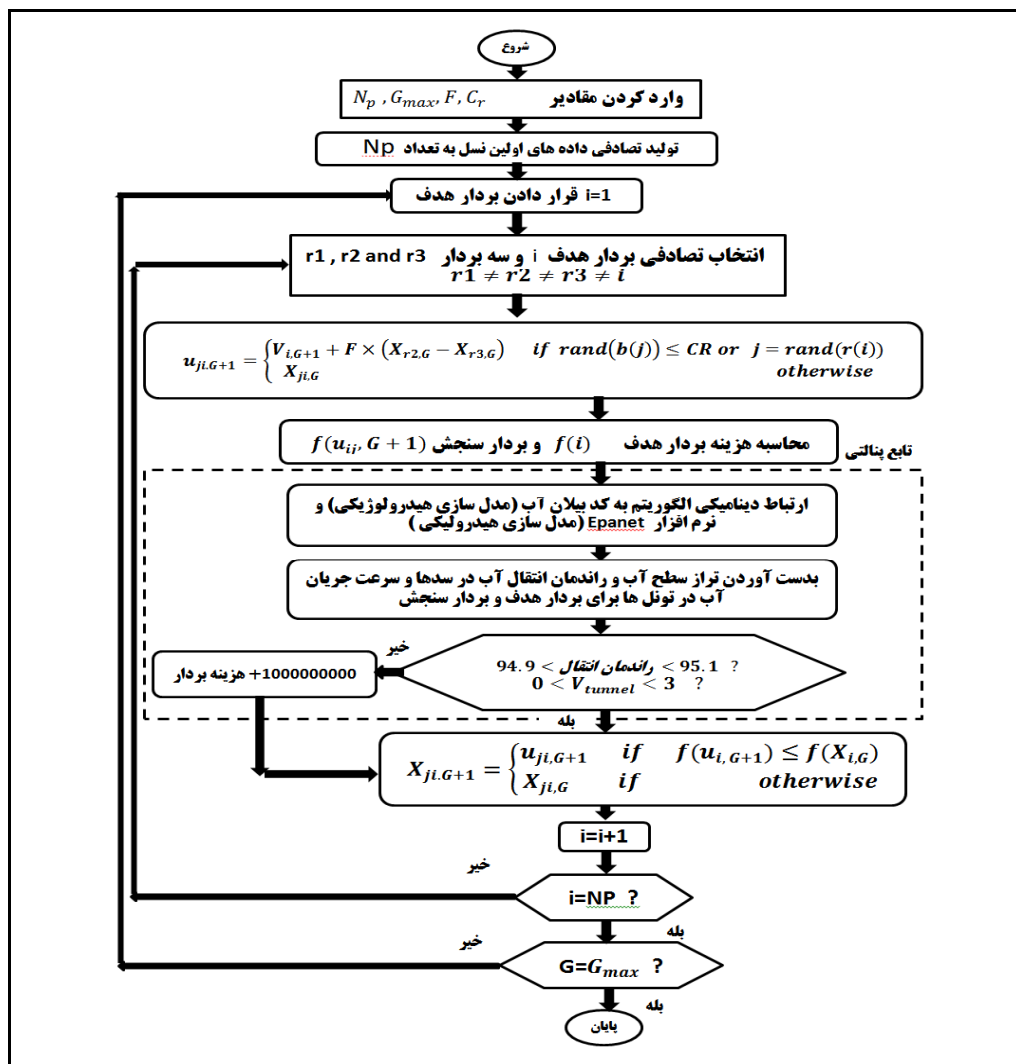
الف) جریان ورودی ماهیانه به سد یلان، ب) جریان سرریز شده از سد، ج) سری زمانی جریان انتقال یافته توسط تونل،

د) نیاز جریان زیست محیطی، ه) نیاز جریان مورد نیاز کشاورزی و و) میزان تبخیر از سد یلان

الگوریتم سه اجرا صورت گرفت و بهترین حالت این سه اجرا برای آن شرایط در نظر گرفته شد. با توجه به تحقیقات گذشته، بهترین مقادیر ضریب‌های  $F$  و  $Cr$  مقادیر میانی است و از این رو در این تحقیق برای ضریب  $F$  مقادیر بین  $0/8-0/4$  با گام  $0/1$  ضرایب انتخاب شده‌اند و همچنین برای ضریب  $Cr$  مقادیر بین  $0/7-0/4$  با گام  $0/1$  نیز انتخاب شدند. در جدول ۲، نتایج این بررسی و حالات مختلف ترکیبات ضریب‌های  $F$  و  $Cr$  نشان داده شده است.

با بررسی منابع در مورد الگوریتم تکامل تفاضلی، تحقیقات منصوری و ترابی (Mansouri & Torabi, 2015) و دیگر الگوریتم‌های تکاملی برای یافتن بهترین شرایط برای بهینه‌سازی در این تحقیق ابتدا با در نظر گرفتن جمعیت اولیه ۱۰۰۰ عضوی ( $NP=1000$ ) و تعداد نسل ۱۵۰۰ تا  $G=1500$  برای پیدا کردن ضریب‌های  $F$  و  $Cr$ ، ده (۱۰) ترکیب مختلف از این دو ضریب بررسی شد. یادآوری می‌شود که در بررسی هر یک از شرایط در این

نتایج حاصل از بررسی ترکیبات دو ضریب F و Cr نتایج می‌دهد که ضریب F برابر ۰/۵ و ضریب Cr برابر ۰/۵ گذشته را تایید می‌کند. با توجه به جدول ۲، نتایج نشان کمترین هزینه را ارائه می‌کند.



شکل ۸- مراحل الگوریتم تکامل تفاضلی در بهینه‌سازی سیستم انتقال آب از یلان به زاینده‌رود

جدول ۲- مقادیر بهینه ترکیبات مختلف ضریب‌های F و Cr برای جمعیت ۱۰۰۰ عضوی و تعداد نسل ۱۵۰۰

تعداد حالات	F	Cr	کمترین هزینه (میلیارد ریال)
۱	۰/۴	۰/۴	۱۴۰۶۰/۸
۲	۰/۴	۰/۷	۱۴۰۳۶
۳	۰/۵	۰/۴	۱۴۰۱۸/۸
۴	۰/۵	۰/۵	۱۴۰۱۴/۵
۵	۰/۵	۰/۷	۱۴۰۲۷/۲
۶	۰/۶	۰/۴	۱۴۰۳۷/۲
۷	۰/۶	۰/۷	۱۴۰۲۶/۸
۸	۰/۷	۰/۴	۱۴۰۴۲
۹	۰/۷	۰/۷	۱۴۰۲۴/۸
۱۰	۰/۸	۰/۴	۱۴۰۴۸

این تحقیق نشان می‌دهد کمترین هزینه مربوط به جمعیت اولیه ۱۰۰۰ و تعداد نسل ۱۵۰۰ و ضریب  $F$  برابر ۰/۵ و ضریب  $Cr$  برابر ۰/۵ است که هزینه‌ای برابر با ۱۴۰۱۴/۵ میلیارد ریال را ارائه کرده است. این هزینه برای ارتفاع سه سد یلان، پشندگان، و گوکان به‌ترتیب برابر ۱۳۵/۷۷، ۴۴/۱۸، و ۱۰۶/۳۳ متر و قطر تونل یلان-پشندگان، پشندگان-گوکان، و گوکان-زاینده‌رود به‌ترتیب برابر ۲/۷۸۷، ۳/۳۰۳ و ۵/۴۱۷ متر است. در جدول ۳ ارتفاع سدها و قطر تونل‌ها برای جواب بهینه ارائه شده است.

یادآوری می‌شود که کامپیوتر مورد استفاده در این تحقیق از نوع هفت هسته‌ای با ۴ گیگ حافظه بوده است که با توجه به برنامه مورد نظر زمانی که نیاز است ۱۰،۰۰۰ بردار برای نسل بعد تولید شود ۳۲ ثانیه طول می‌کشد. در بررسی تاثیر تعداد جمعیت اولیه بر نتایج تحقیق در ادامه چهار جمعیت ۵۰، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۵۰۰ عضوی برای تعداد نسل ۱۵۰۰ و ضریب‌های  $F$  و  $Cr$  برابر ۰/۵ و ۰/۵ بررسی شد؛ نتایج این بررسی نشان داد که کمترین هزینه در بین این چهار حالت بیشتر از ۱۴۰۱۴/۵ میلیارد ریال است. نتایج نهایی حاصل از

جدول ۳- ارتفاع سدها و قطر تونل‌ها در حالت بهینه برای سیستم انتقال آب بین حوضه‌ای یلان به زاینده‌رود

مقادیر (متر)	اجزاء سیستم انتقال آب
۱۳۵/۷۷	ارتفاع سد یلان
۲/۷۸۷	قطر تونل یلان-پشندگان
۴۴/۱۸	ارتفاع سد پشندگان
۳/۳۰۳	قطر تونل پشندگان-گوکان
۱۰۶/۳۳	ارتفاع سد گوکان
۵/۴۱۷	قطر تونل گوکان-زاینده‌رود
۱۴۰۱۴/۵	هزینه کل (میلیارد ریال)

نسل، تحقیقات نشان می‌دهد که جمعیت اولیه ۱۰۰۰ عضوی و نسل ۱۵۰۰ تایی بهترین حالت از نظر زمان و کارایی است. در این شرایط الگوریتم برای تولید هر نسل که ۱۰۰۰ جمعیت دارد زمانی نزدیک به ۴ ثانیه نیاز دارد. هزینه نهایی ارائه شده با الگوریتم تکامل تفاضلی برای راندمان انتقال ۹۵ درصد برابر ۱۴۰۱۴/۵ میلیارد ریال است؛ در این حالت، ارتفاع‌های بهینه ۱۳۵/۷۷، ۴۴/۱۸ و ۱۰۶/۳۳ متر به‌ترتیب برای سد یلان، پشندگان و گوکان و قطر تونل‌های بهینه ۲/۷۸۷، ۳/۳۰۳ و ۵/۴۱۷ متر به‌ترتیب برای تونل‌های یلان-پشندگان، پشندگان-گوکان و گوکان-زاینده‌رود ارائه شده است.

## نتیجه‌گیری

برای بهینه‌سازی سیستم انتقال آب بین حوضه‌ای در ایران که شامل چهار سد (یلان، پشندگان، گوکان و زاینده‌رود) و سه تونل انتقال است، همزمان دو الگوریتم در محیط ویژوال بیسیک کد نویسی شد که می‌توانند با یکدیگر و با نرم‌افزار EPANET به‌صورت دینامیکی ارتباط داشته باشند و مدل منابع آب، هیدرولیک و الگوریتم تکامل تفاضلی را حل کنند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که الگوریتم تکامل تفاضلی در حالتی که ضریب‌های مقیاس و ضریب احتمال ترکیب ( $F$  و  $Cr$ ) برابر ۰/۵ و ۰/۵ است بهترین جواب را از نظر هزینه ارائه می‌دهد. در مورد بهترین جمعیت اولیه و بهترین تعداد

## مراجع

- Alimoahammadi, R. 2012. Inter-basin water transfer and provide solutions. National Conference on Inter-Basin Water Transfer (Challenges and Opportunities). Shahrekord. Iran. (in Persian)
- Azeri, M., Honest, H. R. and Telvari, A. F. 2006. The integration of HEC-HMS and HEC-RAS models to simulate flood in GIS (case study: Jagharq basin). The First National Conference on Engineering of Dry Rivers. Mashhad. Iran. (in Persian)
- Babu, B. V. and Angira, R. 2003. Optimization of water pumping system using differential evolution strategies. Proceedings of the Second International Conference on Computational Intelligence, Robotics and Autonomous Systems (CIRAS). Singapore.
- Bani-Hashemi, D. A., Saghafian, B., Abbas, A. A., Fatehi-Merj, A. and Mafi, Sh. 2001. Developed a general model simulating the hydrological and hydraulic Flood spreading. Research Report. Soil Conservation and Watershed Management Research Center. (in Persian)
- Cole, D. and Carver, W. B. 2011. Inter-basin transfers of water. Georgia Water Resources Conference. April 11-13. University of Georgia.
- Condon, L. E. and Maxwell, R. M. 2013. Implementation of a linear optimization water allocation algorithm into a fully integrated physical hydrology model. *Adv. Water Resour.* 60, 135-147.
- De Hoo, A., Odijk, M., Koster, E. and Lucieer, A. 2001. Assessing the effects of land use changes on floods in the Meuse and Oder catchments. *Phys. Chem. Earth (B)*. 26(7-8): 593-599.
- Emami, A. 2004. The challenge for water basin to basin, inter-basin water transfer proceedings and its role in sustainable development. Power and Water University of Technology. (in Persian)
- Godratnama, Gh. 2004. Transfer area to water, measures and policies, Inter-basin water transfer proceedings and its role in sustainable development. Power and Water University of Technology. (in Persian)
- Karamoz, M., Araghinezhad, Sh. and Ahamadi, A. 2004. Inter-basin water transfer: a national necessity in terms of economic and environmental audits, inter-basin water transfer proceedings and its role in sustainable development. Power and Water University of Technology. (in Persian)
- Mansouri, R. 2016. Optimization of hydraulic-hydrologic complex system of reservoirs and connecting tunnel. Ph. D. Thesis. Lorestan University. Iran. (in Persian)
- Mansouri, R., Torabi, H. and Mirshahi, D. 2014. Differential evolution algorithm (DE) to estimate the coefficients of uniformity of water distribution in sprinkler irrigation. *Sci. J. Pure Appl. Sci.* 5(2): 78-92.
- Mansouri, R. and Torabi, H. 2015. Using differential evolution algorithm (DE) to optimize water distribution system (case study: Esmaeilabad pressurized irrigation network). *Water Soil Sci. J.* 25 (2/4): 81-95. (in Persian)
- Mansouri, R., Torabi, H., Hoseini, M. and Morshedzadeh, H. 2015. Optimization of the water distribution networks with differential evolution (DE) and mixed integer linear programming (MILP). *J. Water Resour. Protect.* 7, 715-729.
- Mansouri, R., Torabi-Pudeh, H., Haghbi, A. H. and Yonesi, H. A. 2016. Optimization and simulation of integrated hydraulic and water resources by using developed dynamic programming (case study: Central Plateau in Iran). *Iran-Water Resources Research.* (in Persian)
- Mokhtarporiyani, S. B. 2010. Achievements in the implementation of water conveyance tunnel Goshan value engineering. Fourth National Conference on Value Engineering. (in Persian)
- Mutiga, J. K., Mavengano, S. T., Zhongbo, S., Woldai, T. and Becht, R. 2010. Water allocation as a planning tool to minimise water use conflicts in the upper Ewaso Ng'iro north basin, Kenya. *Water Resour. Manage.* 24, 3939-3959.
- Pereira, L. S., Cordery, I. and Iacovides, I. 2002. Coping with water scarcity. International hydrological Programme. UNESCO. Paris.
- Radwan, A. 1999. Flood analysis and mitigation for area in Jordan. *J. Water Resour. Manage.* 125(3): 170-177.



- Razmjo, M. Gh. 2010. Study the problems water transfer project Simindasht to Garmsar and advice. The Second National Seminar on Geotechnical Problems of Irrigation and Drainage Networks. Karaj. Iran. (in Persian)
- Sadegh, M., Mahjouri, N. and Kerachian, R. 2010. Optimal inter-basin water allocation using crisp and fuzzy Shapley games. *Water Resour. Manage.* 24(10): 2291-2310.
- Saeidiniya, M., Samadi-Boroujeni, H. and Fatah, R. 2008. Study of inter-basin water transfer projects by using WEAP (case study: tunnel Beheshtabad). *J. Water Res.* 2(3): 33-44. (in Persian)
- Simpson, L. D. 1995. Transbasin diversion, the United States experience. *Water Resources Management Consultant, World Bank.*
- Storn, R. and Price, K. 1995. Differential evolution-a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces. Technical Report, International Computer Science Institute. Berkeley, CA.
- Storn, R. and Price, K. 1997. Differential evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *J. Global Optim.* 11, 341-359.
- Suribabu, C. R. 2010. Differential evolution algorithm for optimal design of water distribution networks. *J. Hydroinformatic.* 12(1): 66-82.
- Torabi-Poudeh, H., Mansouri, R., Haghiabi, A. H. and Yonesi, H. A. 2016. Optimization of hydraulic-hydrologic complex system of reservoirs and connecting tunnel. *Water Resour. Manage.* 30, 5177-5191. doi: 10.1007/s11269-016-1477-5.
- Vasan, A. and Raju, K. 2007. Application of differential evolution for irrigation planning: an Indian case study. *Water Res. Manage.* 21(8): 1393-1407.
- Wang, L., Fang, L. and Hipel, K. W. 2007. Mathematical programming approaches for modeling water rights allocation. *J. Water Resour. Plan. Manage.* 133(1): 50-59.
- Wang, L., Fang, L. and Hipel, K. W. 2008. Basin-wide cooperative water resources allocation. *Eur J. Oper. Res.* 190(3): 798-817.
- White, G. 1977. Comparative Analysis of Complex River Development. In: White, G. (Ed.) *Environmental Effect of Complex River Development.* West View Press. Boulder, Colorado.
- Wolf, A. 2001. Transboundary waters: sharing benefits, lessons learned. Thematic Background Paper. International Conference on Freshwater. Bonn.
- Zarabi, A., Halebian, A. H. and Shabankari, M. 2010. Inter-basin water transfer planning of Karun River to Zayandehroud. *Res. J. Isfahan Uni.* 22(1): 67-84. (in Persian)
- Zhu, X., Zhang, C., Yin, J., Zhou, H. and Jiang, Y. 2013. Optimization of water diversion based on reservoir operating rules: analysis of the Biliu river reservoir, China. *J. Hydrol. Eng.* 19(2): 411-421.

## **Using Differential Evolution Algorithm for Optimizing and Modeling of Integrated Hydraulic and Water Resources (Case Study: The Central Plateau of Iran)**

**R. Mansouri, H. Torabi-Poudeh<sup>\*</sup>, H. Yonesi and A. Haghiabi**

\* Corresponding Author: Associate Professor, Water Engineering Department, University of Lorestan, Khoram-Abad, Iran. Email: torabi1976@gmail.com

Received: 3 July 2016, Accepted: 29 July 2017

Since the distribution of water resources and rainfall in the country is not proportionate. Inter-basin water transfer in the form of water projects for the collection, transmission and creation of appropriate quality for development of human activity is necessary. On the other hand, this type of plan according to the upstream reservoir and downstream water transfer tunnel has combination of problems hydrology (water level of the reservoir) and hydraulic (hydraulic pipe or tunnel). The hydrology and hydraulic analysis to obtain the desired conditions should be simultaneous. In this studied four dams (Yalan, Pashanedegan, Gokan and Zayanehroud) and three tunnels to transfer water from the Yalan dam to Pashandegan dam have been used. In order to simulate and optimize this project, two algorithms associated with each other and connected to EPANET dynamically for solving water resources and hydraulic model and differential evolution algorithm. Since the water in the tunnels is under pressure for the entire study for water transfer efficiency of 95 percent is defined, by increasing the height of each of the dams should reduce the tunnel diameter. The results showed that weighting factor of 0.5 and crossover constant of 0.5 and population and generation of 1000 and 1500 respectively has provided an optimal solution in DE algorithm. Optimal cost by 95% transfer efficiency is equal to 14014.5 Billion riyals.

**Keywords:** Differential Evolution Algorithm, Hydraulic, Optimization, Simulation, Water Resources, Water Transfer