تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال سیزدهم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۶
Volume 13, No. 1, Spring 2017 (IR-WRR)
۵۳-۶۸

بهینه‌سازی و مدل‌سازی تلفیقی هیدرولیک و منابع آب پروژه انتقال آب بین‌حوضه‌ای با استفاده از برنامه‌ریزی پویا اصلاح شده (مورد مطالعاتی: فلات مرکزی ایران)

رامین منصوری [۱]، حسن ترابی پوده [۲*]، امیرحمزه حقی‌آبی [۳] و حجت الله یونسی [۴]

چکیده

از آنجایی که پراکنش منابع آب و نزولات در جهان متناسب نمی‌باشد، در مواردی انتقال بین حوضه‌ای آب در قالب طرح‌های آبی برای جمع‌آوری، انتقال و ایجاد کیفیت مناسب برای توسعه موزون فعالیت‌های انسانی لازم است. از طرف دیگر در بحث مدیریت منابع آب علاوه بر بهره‌برداری مخازن با مباحثی روبرو هستیم که همزمان بحث هیدرولیک و منابع آب در این شرایط مهم بوده است. در این بحث هر دو شرایط هیدرولیکی و هیدرولوژیکی برای مدل‌سازی جریان می‌بایست تواماً مورد بررسی قرار بگیرد. در این تحقیق سه سد (یلان، پشندگان و گوکان) و دو تونل انتقال برای انتقال آب از سد یلان به سد گوکان مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به‌منظور مدل‌سازی و بهینه‌سازی این پروژه همزمان دو الگوریتم در محیط ویژوال بیسیک با یکدیگر و با نرم‌افزار EPANET بصورت دینامیکی ارتباط داشته و مدل منابع آب، هیدرولیک و برنامه‌ریزی پویا اصلاح شده را حل می‌کند. از آنجایی که انتقال آب در تونل‌ها به‌صورت تحت فشار می‌باشد و کل پروژه برای راندمان انتقال آب ۹۵ درصد تعریف شده است. با افزایش ارتفاع هر یک از سدها می‌بایست قطر تونل انتقال کاهش یابد تا بتواند راندمان مذکور را داشته باشد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد ارتفاع‌های ۱۴۸/۳۷ و ۵۹/۳۶ متر بترتیب برای سد یلان و پشندگان و قطر تونل‌های ۲/۸ و ۲/۹۵ متر برای تونل‌های یلان – پشندگان و پشندگان – گوکان از نظر اقتصادی بهترین گزینه می‌باشند. از تحلیل اقتصادی موجود در برنامه‌ریزی پویا اصلاح‌شده هزینه کل پروژه با در نظر گرفتن راندمان انتقال ۹۵ درصد برابر ۵۳۱۳/۶۹ میلیارد ریال برآورد شده است.

کلمات کلیدی: طرح منابع آب، بهینه‌سازی، مدل‌سازی، مخازن، راندمان انتقال آب، برنامه‌ریزی پویا.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۲/۲۱
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۶/۲۰

۱- دانشجو دکتری سازه‌های آبی دانشگاه لرستان و هیئت‌علمی دانشگاه آزاد واحد سیرجان
۲- استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه لرستان
۳- دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه لرستان
۴- استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه لرستان
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۳۹۶ امکانپذیر است.

Integrated Optimization and Simulation of Hydraulic and Water Resources Using Developed Dynamic Programming (Case Study: Central Plateau in Iran)

R. Mansouri [1], H. Torabi Pudeh [2], A.H. Haghiabi [3] and H.A. Yonesi [4]*

Abstract

The distribution of water resources and rainfall in the world is not even and accordingly the inter-basin water transfer is sometimes necessary in the form of water projects for the collection, transmission and creation of appropriate quality for balanced development of human activity. On the other hand and in addition to the issues we face in managing and exploiting the reservoirs, it is important to consider and model hydraulic and hydrologic flow conditions together. In this study, three dams (Yalan, Pashandegan and Gokan) and two water transfer tunnels transferring water from Yalan dam to Gokan dam were considered as case study. For the integrated simulating and optimizing, two algorithms were connected with each other and were as well linked dynamically with Epanet software and solved the water resources model, and took care of the hydraulic modelling and dynamic programming. Since the water flow through the tunnels are under pressure, increasing dams' heights will cause the decrease in tunnel diameter for 95% water conveyance efficiency. The results showed that the most economically optimum combination for water transfer in this project would be met with Yalan and Pashandegan dams at the heights of 148.37 and 59.36 m, respectively, and with Yalan-Pashandegan and Pashandegan-Gokan tunnel diameters of 2.8 and 2.95 m, respectively. This project set would cost 5313.69 million Rials.

Keywords: Water resources planning, Optimization, Simulation, Reservoirs, Water transfer efficiency, Dynamic Programming.

Received: May 10, 2016
Accepted: September 10, 2016

1- Ph.D. Student in Water Engineering Department, Lorestan University and Scientific Board in Azad University, Sirjan Branch, Iran.
2-Assistant Professor, Water Engineering Department, Lorestan University, Iran, Email: Torabi1976@gmail.com
3- Associate Professor, Water Engineering Department, Lorestan University, Iran.
4-Assistant Professor, Water Engineering Department, Lorestan University, Iran
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

آب یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های قرن حاضر است که می‌تواند در آینده بسیار نزدیک منشاء بسیاری از تحولات مثبت و منفی جهان قرار گیرد. در گذشته مشکلات و مسائل آب در مقیاس محلی مطرح بود، اما اکنون این مشکلات در مقیاس‌های ملی، منطقه‌ای و حتی جهانی بروز می‌کند. مدیریت و تخصیص مناسب منابع طبیعی زمین مهم‌ترین موضوع برای نسل‌های حال و آینده می‌باشد. به همین دلیل مدیریت منابع آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

افزایش روز افزون جمعیت و کمبود منابع آب‌های سطحی ضرورت مدیریت صحیح از مخازن سدها را ایجاب می‌کند. مدیریت پایدار منابع آب به عنوان یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های قرن حاضر از مجموعه مباحث جدیدی است که از دهه‌ی آخر قرن بیستم و اوایل هزاره سوم تاکنون ذهن دانشمندان و بسیاری از پژوهش‌گران سازمان‌های ملی و بین‌المللی را به خود مشغول کرده است.

از طرف دیگر در بحث مدیریت منابع آب علاوه بر بهره‌برداری مخازن با مباحثی روبرو هستیم که همزمان بحث هیدرولیک و منابع آب در این شرایط مهم بوده و هر دو شرایط هیدرولیکی و هیدرولوژیکی برای مدل‌سازی جریان می‌بایست تواماً مورد بررسی قرار بگیرد. از این موارد می‌توان به بحث انتقال آب بین حوضه‌ای و میان حوضه‌ای اشاره کرد.

از آنجایی که پراکنش منابع آب و نزولات در سطح کشور متناسب نمی‌باشد، انتقال بین حوضه‌ای آب در قالب طرح‌های آبی برای جمع‌آوری، انتقال و ایجاد کیفیت مناسب برای توسعه موزون فعالیت‌های انسانی لازم است.

انتقال بین حوضه‌ای آب یا به عبارت دیگر انتقال حوضه به حوضه آب عبارت است از: انتقال فیزیکی آب از یک حوضه آبریز به حوضه آبریز دیگر، در این جابه‌جایی یک حوضه آبریز آب از دست می‌دهد و حوضه دیگر آب به دست می‌آورد (Cole and Carver, 2011).

White (1977) نشان داد اوج طراحی و اجرای پروژه‌های عظیم انتقال آب در کشورهای صنعتی و پیشرفته به دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ باز می‌گردد. به گفته وایت دهه‌ی ۱۹۷۰ میلادی نقطه عطفی در مدیریت منابع آب جهان بوده است. انتقال آب از یک حوضه به حوضه دیگر در بعضی کشورها، از جمله ایالات متحده امریکا، شوروی سابق و چین یکی از راه‌های معمول افزایش منابع آب حوضه‌های خشک بوده است.

از دیگر تحقیقات صورت گرفته در زمینه انتقال آب بین حوضه‌ای می‌توان به تحقیقات Simpson (1995)، Wolf (2001)، Pereira(2002) و Mutiga et al. (2010) اشاره کرد.

در کشور ایران نیز که در منطقه نیمه خشک قرار دارد و دارای توزیع ناهمگون زمانی و مکانی بارش و رواناب است، راهکار انتقال آب مورد توجه بوده است. Alimoahammadi (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)، انتقال آب سیمین دشت به گرمسار (Razmjo, 2010) اشاره کرد.

در فرآیند تصمیم‌گیری به انتقال بین حوضه‌ای آب، هر یک از سازمان‌ها و گروه‌های ذینفع و درگیر، به‌دنبال منافع خاص خود می‌باشند که این موارد از منافع و قدرت سیاسی تا حق مالکیت و رفاه معیشتی در تغییر است. مسئول تصمیم‌گیری برای انجام چنین پروژه‌هایی نهایتاً دولت است و ریسک اقتصادی این پروژه‌ها معمولاً بر دوش بودجه عمومی است (Emami, 2004).

طرح‌های انتقال آب بین حوضه‌ای و میان حوضه‌ای با توجه به مخزن بالادست و تونل انتقال آب به پایین‌دست شرایطی ترکیبی از مسائل هیدرولوژی (تراز آب مخزن) و هیدرولیکی (هیدرولیک لوله یا تونل انتقال) را در خود جای داده است. از این‌رو تحلیل و بررسی هیدرولوژی و هیدرولیکی برای به‌دست آوردن شرایط مورد نظر می‌بایست همزمان صورت گیرد.

از جمله تحقیقاتی که به‌صورت مدل‌سازی در این زمینه صورت گرفته است مربوط به مدل‌سازی منابع آب حوضه مبدا و مقصد می‌باشد که می‌توان به تحقیقات Saeidiniya et al. (2008) اشاره کرد که بررسی میزان آب قابل انتقال از سرشاخه‌های کارون به حوضه‌های مجاور با استفاده از مدل WEAP پرداختند.

براساس تحقیقات صورت گرفته، هیچگونه مدل تلفیقی هیدرولیک با منابع آب به‌منظور بهینه‌سازی و مدل‌سازی وضعیت جریان در انتقال بین حوضه‌ای که هم خصوصیات هیدرولوژی و هم خصوصیات هیدرولیک در آن دخیل می‌باشد ارائه نشده است. اما می‌توان گفت مدل‌های پیچیده هیدرولوژی و هیدرولیک وجود دارند. تقریباً تمامی این مدل‌های تلفیقی هیدرولوژی و هیدرولیک مربوط به مدل‌هایی می‌باشند که می‌توانند پخش سیلاب را مدل کرده و داده‌های هیدرولوژی مروبط به بارش و رواناب را با هیدرولیک آنالیز کنند. از این تحقیقات می‌توان به تحقیقات Azeri et al. (2006) اشاره کرد که به‌منظور بررسی رفتار سیلاب و نحوه گسترش آن در بازه‌ای از رودخانه جاغرق در استان خراسان رضوی از تلفیق مدل‌های هیدرولوژیکی HEC-HMS و مدل هیدرولیکی HEC-RAS در GIS استفاده کردند. همچنین در کار تحقیقاتی صورت گرفته توسط Bani Hashemi (2001) مدل کلی شبیه‌سازی هیدرولوژی و هیدرولیک پخش سیلاب ارائه شد.

از سوی دیگر طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب با توجه به تونل‌های بزرگی که با طول زیاد در آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند، دارای هزینه اجرای زیادی می‌باشد، به‌منظور کم کردن هزینه‌ها نیز باید مسئله بهینه‌سازی در این سیستم هیدرولوژیکی و هیدرولیکی نیز صورت گیرد. همان‌طور که در بالا نشان داده شد تمامی طرح‌های انتقال آب بین حوضه‌ای دارای هزینه‌های بسیار بالایی بوده از اینرو بحث بهینه‌سازی مصرف و هزینه در اینگونه مسائل اهمیت پیدا می‌کند.

در بحث بهینه‌سازی پروژه‌های انتقال آب در تحقیقات گذشته فقـط بحث هیدرولوژیکی مسائل مورد نظر بوده است. از اینور Zhu et al. (2013) در تحقیق خود بر روی بهینه‌سازی انتقال آب بر مبنای منحنی فرمان مخزن از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند منحنی فرمان مخزن تابع فاکتورهای هیدرولوژیکی (مقدار جریان ورودی به مخزن) و تراز آب در مخزن می‌باشد. آن‌ها انتقال آب از مخزن سد بیلیو در چین را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد مدل آن‌ها در بهره‌برداری و انتقال آب بسیار کارآمد است.

در تحقیق دیگر Rafiei et al. (2015) مدل تلفیقی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) و لینک آن با نرم‌افزار WEAP به‌منظور طراحی و بهربرداری بهینه سیستم انتقال آب بین حوضه کارون و حوضه زهره را ارائه کرده‌اند. در این مدل با استفاده از الگوریتم PSO مقادیر طراحی بهینه یافت شده سپس با استفاده از نرم‌افزار WEAP با این مقادیر شرایط شبیه‌سازی می‌گردد. همچنین Sadegh (2010) سیستم انتقال آب از حوضه کارون در جنوب غرب ایران به دشت رفسنجان را در مرکز ایران براساس حجم انتقال بهینه‌سازی کرد. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد حجم بهینه انتقال آب ۲۴۰ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد.

در زمینه بهینه‌سازی انتقال آب بین حوضه‌ای یا میان حوضه‌ای تحقیقات زیادی صورت گرفته که می‌توان به تحقیقات Tisdell and Harrison (1992)، Luss (1999)، Wang et al. (2009, 2011) و Condona and Maxwell (2013) اشاره کرد.

در تمامی تحقیقات گذشته سیستم انتقال آب از دیدگاه تخصیص آب یا همان حجم انتقال مورد بررسی و بهینه‌سازی قرار گرفتند. اما در بحث انتقال آب بین حوضه‌ای یا میان حوضه‌ای علاوه بر بحث حجم انتقال که خود تابع مسائل هیدرولوژیکی و هیدرولیکی می‌باشد، بحث هزینه ساخت سد و تونل انتقال که دارای هزینه بالایی می‌باشد بسیار اهمیت دارد. از اینرو در این تحقیق بهینه‌سازی و مدل‌سازی تلفیقی هیدرولیک و منابع آب همزمان مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

Torabi et al. (2016) پیشگام بهینه‌سازی و مدل‌سازی تلفیقی هیدرولیک و منابع آب می‌باشند. در تحقیق صورت گرفته توسط آن‌ها، هزینه انتقال آب بین دو سد با استفاده از یک تونل انتقال شبیه‌سازی و بهینه‌سازی گردیده است. آن‌ها 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. به منظور بهینه‌سازی این سیستم می‌بایست معادله بیلان آب و مدل هیدرولیکی تونل همزمان اجرا می‌گردید. در این تحقیق، در ابتدا معادله بیلان فقط برای سد شماره یک حل گردید و سپس با مشخص شدن جریان ورودی و تراز آب در سد شماره یک دبی تونل با استفاده از نرم‌افزار EPANET محاسبه گردید.

در این تحقیق سیستم انتقال آب شامل سه سد و دو تونل انتقال می‌باشد که به‌صورت سری قرار دارند. افزایش تعداد سدها نسبت به کار Torabi et al. (2016) باعث می‌شود که نتوان با استفاده از روش آن‌ها این سیستم را بهینه کرد. از اینرو در این تحقیق روش برنامه‌ریزی پویا (پیشرو) اصلاح گردید تا بتوان سیستم انتقال آب با تعداد زیاد سد و تونل انتقال حل گردد.

در این تحقیق با استفاده همزمان از معادله بیلان و معادلات هیدرولیکی لوله، با کمک برنامه‌ریزی پویا پیشرو با در نظر گرفتن اصلاحاتی در این روش یک سیستم انتقال آب بین حوضه‌ای در ایران که شامل سه سد و دو تونل انتقال است بهینه گردیده است. در این‌گونه مسائل بهینه‌سازی باید به‌گونه‌ای باشد که آب مورد نیاز حوضه مقصد تامین شود و همچنین کل سیستم انتقال آب بین حوضه‌ای دچار مشکلات هیدرولیکی نگردد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق منطقه مورد مطالعه در طول جغرافیایی "۴۲ °۴۹ تا "۱۳ °۵۰ و عرض جغرافیایی "۳۲ °۲۵ تا "۰۰ °۳۳ قرار گرفته است. این منطقه شامل حوضه فریدونشهر می‌باشد. در طرح کلی انتقال آب، سه سد بر روی رودخانه‌های یلان، پشندگان و گوکان احداث گردیده و سپس آب ابتدا از سد یلان توسط تونلی به طول ۲۳ کیلومتر به سد پشندگان و از سد پشندگان با تونلی به طول ۱۸/۸ کیلومتر به سد گوکان منتقل می‌گردد. پلان کلی انتقال در شکل ۱ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود تونل یلان-پشندگان وظیفه‌ی انتقال آب از سد یلان به سد پشندگان را دارد و تونل پشندگان-گوکان منتقل کننده آب از سد پشندگان به گوکان است. علاوه بر دو تونل ذکر شده دو تونل جانبی ترزه و مصیر که هرکدام از مخازن سدهای ترزه و مصیر می‌باشند نیز در بین راه به تونل پشندگان-گوکان متصل می‌شود و در نهایت آب این تونل‌ها به مخزن سد گوکان ریخته می‌شود.

در این پروژه طراحی به‌صورتی می‌باشد که دهانه ورودی تونل‌ها همیشه برابر عمق مرده سد بالادست خود است. بنابرین همیشه یک تراز آب بروی دهانه ورودی تونل‌ها وجود دارد که این خود باعث می‌شود تونل به‌صورت تحت فشار عمل کند. از طرف دیگر نیز شیب این تونل‌ها و تراز نرمال سطح آب در سد پایین‌دست به‌گونه‌ای انتخاب شده است که جریان در تونل‌ها به‌صورت ثقلی حرکت کند.

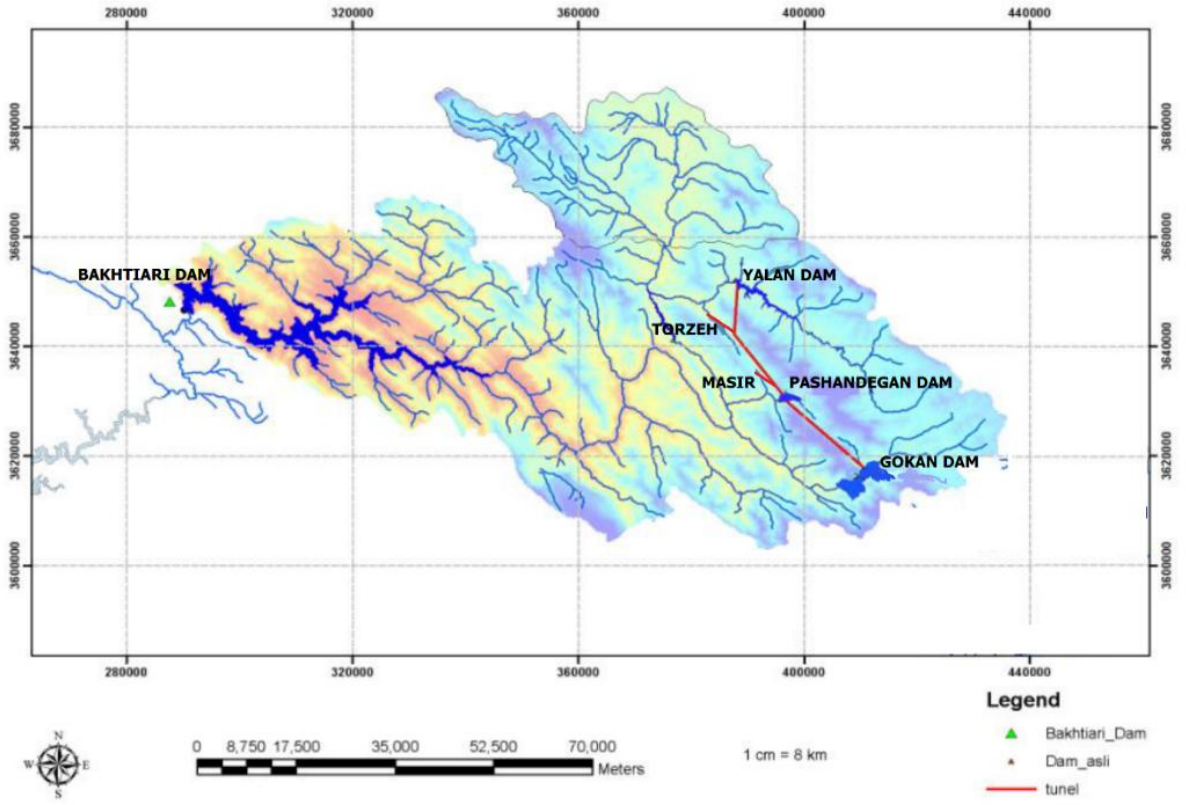

Fig. 1. Plan view of Yalan to Gokan dam water transfer system

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

در طراحی‌ها 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 پروژه تراز نرمال در سد گوکان برابر با ۲۰۹۲/۸ متر است که ثابت می‌باشد. از طرف دیگر تونل‌ها با دو شیب طراحی گردیده‌اند. تمامی اطلاعات هواشناسی و هیدرولوژی 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.

۲-۲- معادلات حاکم

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

متغیرهای موجود در این مسئله با استفاده از معادله بیلان (متغیرهای هیدرولوژیکی) و معادله هیدرولیک لوله‌ها (متغیرهای هیدرولیکی) بدست می‌آیند و کل مسئله با استفاده از روش برنامه‌ریزی پویا بهینه می‌گردد.

۲-۲-۱- معادله بیلان (متغیرهای هیدرولوژیکی)

برای مدل‌سازی شرایط هیدرولوژیکی در هر مخزن سد از رابطه بیلان منابع آب به‌صورت زیر استفاده می‌شود.

(۱)

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

در این رابطه، 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 توسط 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 می‌بایست از سد برای پایین‌دست رها گردد، در دوره مدل‌سازی t؛ LE_t حجم تبخیر و نفوذ از مخزن در دوره مدل‌سازی t؛ Sp_t مقدار جریان سرریز شده از سد در دوره مدل‌سازی t و P_t مقدار بارندگی بر روی مخزن در دوره مدل‌سازی t می‌باشد. از آنجایی که رابطه بین بارندگی و نفوذ در منطقه نسبتاً یکسان است می‌توان از این دو پارامتر در محاسبات چشم‌پوشی کرد.

در رابطه (۱) مقدار جریان ورودی به هر یک از سدها با توجه به داده‌های هیدرولوژیکی منطقه قابل محاسبه است. با تغییر ارتفاع آب حجم مخزن سد و سطح آب مخزن تغییر می‌کند. این تغییرات از جمله اطلاعات و داده‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی و مدل کردن سیستم انتقال آب حوضه به حوضه می‌باشد. برای تهیه منحنی‌های سطح، حجم و ارتفاع سدهای یلان و پشندگان از نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ استفاده گردید. این منحنی‌ها در شکل ۲ نشان داده شده‌اند.

از طرف دیگر مقدار تبخیر از مخازن مستقیم به سطح تبخیر بستگی دارد. بنابراین در محاسبه میزان تبخیر در دوره مدل‌سازی سطح تبخیر در ابتدا دوره و انتهای دوره بسیار اهمیت دارد از این‌رو می‌توان رابطه (۲) را ارائه نمود.

$$LE_t = f(S_t, S_{t+1}) \qquad (۲)$$

در فرضیات اجرایی طرح، تونل باید در هر زمان ماکزیمم دبی ممکن را انتقال دهد. با افزایش اختلاف ارتفاع آب در سراب و پایاب تونل، دبی انتقالی توسط تونل افزایش می‌یابد. تغییرات جریان ورودی به مخزن هر سد در طول ماه‌های شبیه‌سازی باعث ایجاد تغییرات در تراز سطح آب و به تبع آن دبی خروجی از تونل می‌شود. حال با توجه به مطالب مذکور نتیجه می‌گیریم که تغییرات دبی در تونل‌ها تابعی از تغییرات سطح آب و مشخصات فیزیکی و هیدرولیکی تونل‌ها می‌باشد.

به‌منظور محاسبه دبی تونل از سد یلان به پشندگان و از پشندگان به گوکان می‌بایست رابطه (۱) حل گردد. در این رابطه S_t، Q_{in}، Q_{Agri_t} و Q_{Envi_t} پارامترهای مشخص می‌باشند و پارامترهای LE_t، Q_{Tunnel}، Sp_t و S_{t+1} پارامترهای مجهول مسئله هستند.

از آنجایی که مجهولات این رابطه زیاد می‌باشند می‌بایست یکسری فرضیات را در نظر گرفت. در حل رابطه (۱) فرض بر این است مقدار سرریز شدن آب برابر صفر باشد (Sp_t=0). مقدار تبخیر از سطح مخازن ثابت فرض می‌گردد و مقدار آن برابر تبخیر در ابتدای دوره مدل‌سازی است.

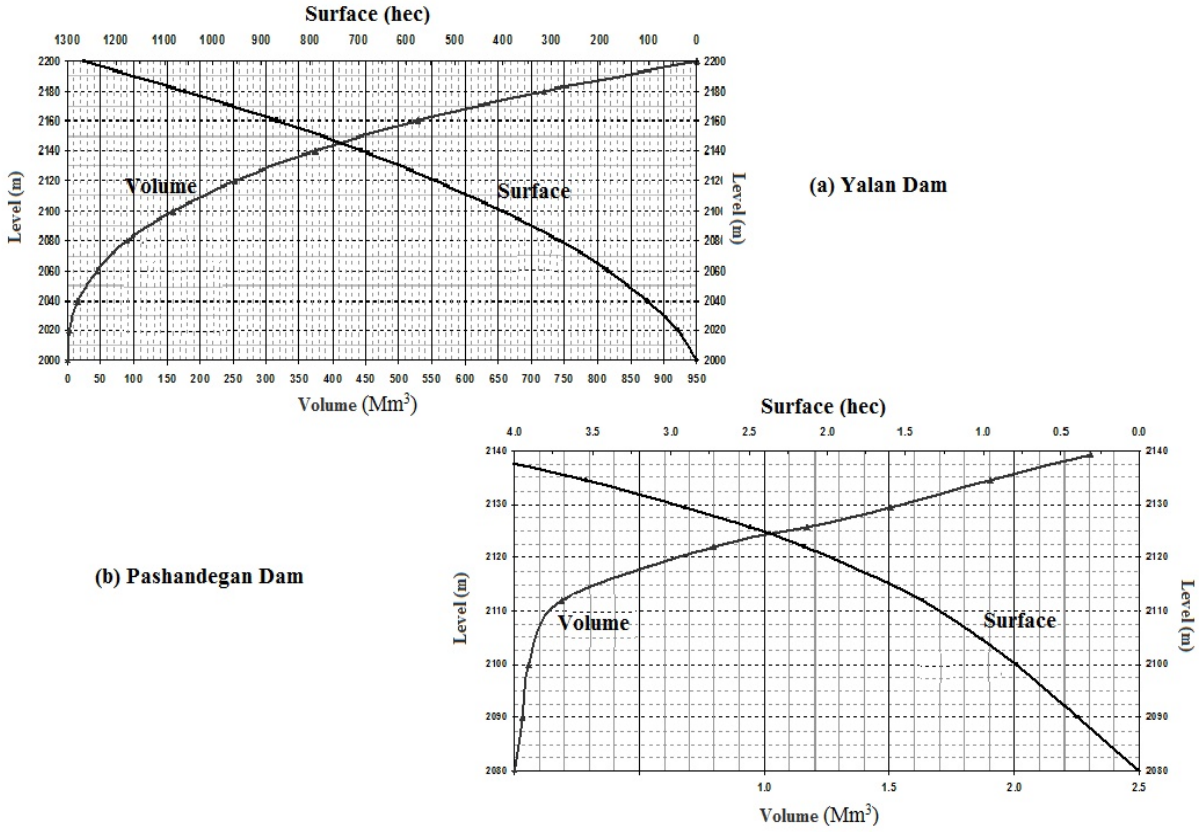

Fig. 2. Volume – surface –level curve in (a) Yalan and (b) Pashandegan dam.

شکل ۲- منحنی حجم- سطح- ارتفاع (a) سد یلان و (b) سد پشندگان

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}) می‌باشد. بعد از محاسبه S_{t+1} سه حال 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 نمود.

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 نمی‌باشد. از اینرو مقدار تبخیر و دبی تونل در ابتدای دوره و در زمانی که تراز نرمال ($S_{t+1} = S_{Normal}$) برقرار است، محاسبه می‌شود. در نهایت مقدار جریان سرریز شده محاسبه می‌گردد.

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. سپس میانگین تبخیر و دبی تونل در رابطه (۱) قرار داده شده و رابطه مجدداً حل می‌گردد. این پروسه تا زمانی که حجم انتهای دوره محاسبه شده (S'_{t+1}) برابر با حجم انتهای دوره مورد نظر (S_{t+1}) باشد، ادامه می‌یابد.

وضعیت سوم: $S_{Minimum} > S_{t+1}$، در این حالت دبی تونل بابر صفر می‌باشد ($Q_{Tunnel} = 0$)، بنابراین مقدار تبخیر و دبی تونل در ابتدای دوره (S_t) و زمانیکه $S_{t+1} = S_{Minimum}$ می‌باشد محاسبه می‌گردد.

تمامی این پروسه برای سه وضعیت در طول دوره آماری که ۴۸۰ ماه (۴۰ سال) می‌باشد، اجرا می‌گردد.

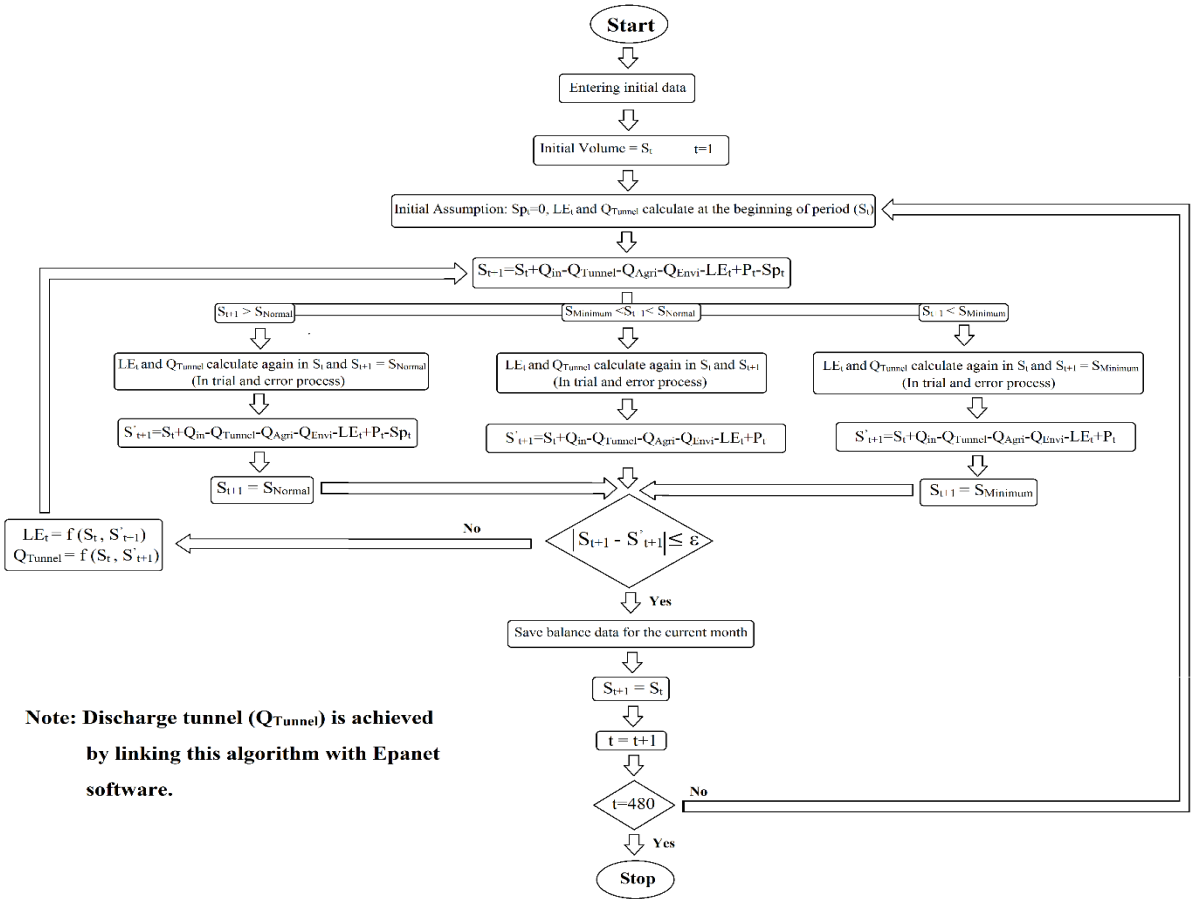

Fig. 3. Reservoir simulation algorithm for a normal level and a diameter tunnel

شکل ۳- الگوریتم حل معادله بیلان برای تراز نرمان و قطر تونل مشخص

۲-۲-۲- معادله هیدرولیک لوله (متغیرهای هیدرولیکی)

به‌منظور محاسبه دبی جریان در تونل‌های انتقال می‌بایست، ابتدا معادله هیدرولیکی لوله حل گردد و از آنجایی که با تغییر تراز سطح آب در مخزن دبی تونل‌ها تغییر خواهد کرد از اینرو نرم‌افزار EPANET به منظور محاسبه دبی تونل در رابطه (۱) مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق همانطور که در الگوریتم شکل ۳ مشاهده می‌شود در هر بار اجرای الگوریتم هرجا نیاز به محاسبه دبی تونل می‌باشد، الگوریتم به صورت دینامیکی با نرم‌افزار EPANET ارتباط برقرار می‌کند و مدل‌سازی هیدرولیکی را با کمک این نرم‌افزار انجام می‌دهد. در نهایت نتایج بدست آمده از نرم‌افزار EPANET در الگوریتم قرار می‌گیرد.

تا این مرحله می‌توان مدل‌سازی تلفیقی منابع آب و هیدرولیک جریان را در این پروژه مشاهده نمود. حال به منظور بهینه‌سازی این طرح انتقال آب از برنامه‌ریزی پویا اصلاح شده که همراه با یک روند سعی و خطا می‌باشد، استفاده می‌شود. که در هر مرحله از این روند بهینه‌سازی الگوریتم شکل ۳ می‌بایست اجرا گردد.

۲-۳- مدل بهینه‌سازی

هر سیاست بهینه دارای خاصیت است که حالت و تصمیم فعلی هر چه که باشد، باقیمانده تصمیمات باید بهینه باشند. در مسئله‌های برنامه‌ریزی پویا، هر مسئله را می‌توان به صورت یک شبکه در ذهن مجسم کرد، که در آن اگر تابع هدف به صورت حداکثر باشد، به دنبال طولانی‌ترین مسیر می‌گردیم و اگر تابع هدف به صورت حداقل باشد، کوتاه‌ترین مسیر بین دو یا چند گره را می‌جوییم.

برنامه‌ریزی پویا یک شیوه بهینه‌سازی است که مسئله‌های پیچیده را به دنباله‌ای از مسئله‌های ساده تبدیل می‌کند. مشخصه اصلی آن در

ماهیت چند مرحله‌ای این روش بهینه‌سازی است. برنامه‌ریزی پویا یک چارچوب کلی برای تجزیه و تحلیل خیلی از مسئله‌ها ارائه می‌دهد. در این چارچوب روش‌های گوناگونی از بهینه‌سازی برای حل صورت مختلف مسئله‌ها قابل به‌کارگیری می‌باشد.

در هر مسئله بهینه‌سازی دو پارامتر تعیین کننده شرایط مسئله می‌باشند، از اینرو از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشند. این پارامترها تابع هدف و محدودیت‌ها می‌باشد. در ادامه به بررسی این دو پارامتر پرداخته و در نهایت کاربرد برنامه‌ریزی پویا در پروژه انتقال آب را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۲-۳-۱- تابع هدف و محدودیت‌ها

هدف این تحقیق بهینه‌سازی قطر تونل‌های یلان به پشندگان و پشندگان به گوکان و بهینه‌سازی ارتفاع سدهای یلان و پشندگان برای ضریب انتقال ۹۵ درصد به گونه‌ای که کم‌ترین هزینه را داشته باشد، می‌باشد. از این‌رو می‌توان تابع هدف را به‌صورت زیر تعریف نمود.

$$Min(\sum(L \times ULC(d_k) + Cost_{dam}(d_k))) \quad (۳)$$

با توجه به تابع هدف دو نوع هزینه برای این پروژه تعریف شده است. هزینه اول هزینه تونل‌ها است که با توجه به طول آن‌ها مطرح شده‌اند و در رابطه (۳) با پارامتر $(L \times ULC(d_k))$ نمایش داده شده است. هزینه‌های دوم مربوط به ساخت سدها است که با پارامتر $(Cost_{Dam}(d_k))$ نمایش داده شده است.

حـــال با توجه به تابع هدف می‌بایست هزینه سد برای ارتفاع‌هـــای مختلف و هزینه تونل برای قطرهای مختلف در دسترس باشد. از این‌رو در جدول ۱ هزینه‌های ساخت سد یلان و پشندگان برای ارتفاع‌های مختلف نشان داده شده است. در شکل ۴ نیز هزینه تونل انتقال یلان–پشندگان و تونل انتقال پشندگان–گوکان برای قطرهای مختلف ارائه شده است.

محدودیت‌های این طرح را می‌توان در قالب دو بخش در نظر گرفت. بخش اول مربوط راندمان انتقال و بخش دوم مربوط به قطر و سرعت جریان در تونل می‌باشد.

از آنجایی که تمامی انتقال‌های آب در این پروژه با راندمان ثابتی صورت می‌گیرد و همچنین با افزایش قطر تونل ارتفاع مورد نیاز سد برای یک راندمان انتقال ثابت کاهش می‌یابد و با کاهش قطر، ارتفاع سد افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان قیود یا محدودیت‌های این طرح را به‌صورت زیر تعریف نمود.

$$\left(\frac{\left(\sum_{j=1}^{j=40}\sum_{i=1}^{i=12} Q_{i,j} - \sum_{j=1}^{j=40}\sum_{i=1}^{i=12} Sp_{i,j}\right)}{\left(\sum_{j=1}^{j=40}\sum_{i=1}^{i=12} Q_{i,j}\right)}\right) \times 100 = 95 \quad (۳)$$

$$\left(\frac{\sum_{j=1}^{j=40}\sum_{i=1}^{i=12} R_{Agri_{i,j}}}{\sum_{j=1}^{j=40}\sum_{i=1}^{i=12} D_{Agri_{i,j}}}\right) \times 100 = 95 \quad (۴)$$

$$\left(\frac{\sum_{j=1}^{j=40}\sum_{i=1}^{i=12} R_{Envi_{i,j}}}{\sum_{j=1}^{j=40}\sum_{i=1}^{i=12} D_{Envi_{i,j}}}\right) \times 100 = 95 \quad (۵)$$

در این طرح راندمان انتقال برای تمامی انتقال‌ها ۹۵ درصد در نظر گرفته شده است. در محدودیت‌های مربوط به تونل‌های انتقال می‌بایست ذکر کرد که حداقل قطر مورد استفاده در این پروژه ۲/۵ متر و حداکثر سرعت جریان در تونل‌ها ۳ متر بر ثانیه است.

$$d_k > 2.5 \quad (۶)$$

$$0 < V_i(d_k) < 3 \quad (۷)$$

Table 1. Dam construction costs versus different heights of Yalan and Pashandegan dam

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

Relation between dam's height and its cost

Yalan		Pashandegan	
Height dam (m)	Dam cost (Rial $\times 10^9$)	Height dam (m)	Dam cost (Rial $\times 10^9$)
0	0	0	0
80	734	20	149
100	1180	40	298
120	1760	50	384
140	2456	60	470
160	3332	80	985
180	4400	90	1242.2
190	5050	100	1500

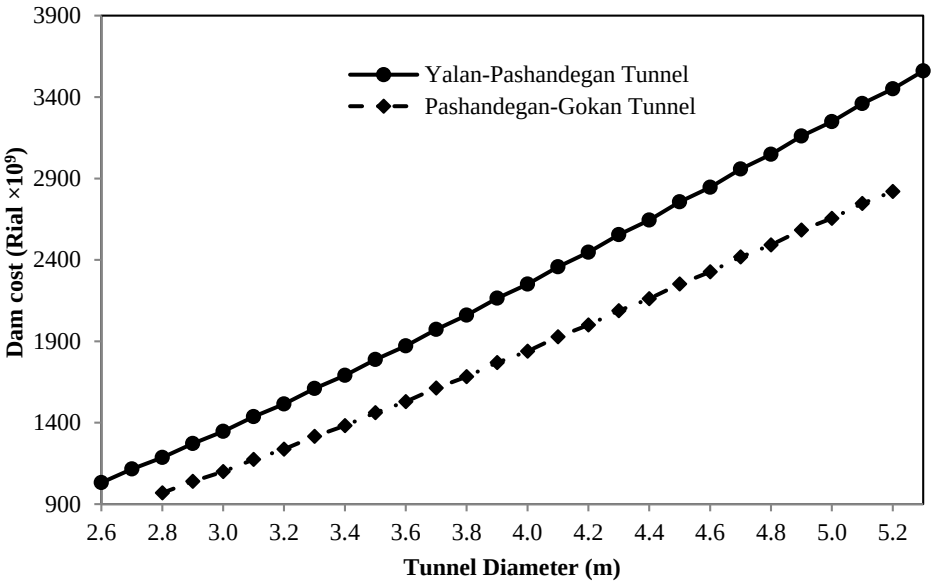

Fig. 4. Tunnel construction costs versus different diameters

شکل ۴- رابطه بین هزینه تونل و قطر تونل

در روابط بالا، Q مقدار جریان ورودی به مخزن بر حسب میلیون مترمکعب؛ Sp مقدار جریان سرریز شده در مدل‌سازی بر حسب میلیون مترمکعب؛ R_{Envi} مقدار آب رها شده برای نیازهای زیست محیطی بر حسب میلیون مترمکعب؛ D_{Envi} مقدار آب مورد نیاز برای نیازهای زیست محیطی 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 است.

۲-۳-۲- برنامه‌ریزی پویا اصلاح‌شده

برای حل مسئله مذکور از طریق برنامه‌ریزی پویا ابتدا باید مسئله را به یک سری زیر مسئله و یا مرحله تقسیم نمود. در این مسئله، تراز سطح آب در مخازن یلان و پشندگان به‌عنوان متغیر حالت و قطر تونل‌ها به‌عنوان متغیر تصمیم مد نظر قرار گرفت. بدیهی است قطر تونلی که برای یک حالت مشخصی از تراز سطح آب (متغیر حالت) قادر به انتقال آب در راندمان مورد نظر باشد، متغیر تصمیم خواهد بود. از آنجاییکه تراز مخزن سد گوکان به‌علت موجود بودن مخزن مشخص می‌باشد، بنابراین نمایش کلی شبکه به‌صورت شکل ۵ خواهد شد.

از آنجایی که سری زمانی جریان ورودی به مخزن سد گوکان در ابتدای کار نامشخص می‌باشد، حل مسئله به روش پسرو امکان پذیر نیست. بنابراین مسئله می‌بایست به روش پیشرو حل گردد. حال اگر بخواهیم مسئله را به روش پیشرو حل نماییم باید از سد یلان شروع کنیم. در این حالت جریان ورودی به مخزن سد یلان مشخص است، اما مشکل دیگری وجود دارد و آن نامشخص بودن تراز خروجی تونل یلان به پشندگان می‌باشد. بنابراین هر چند جریان ورودی مشخص ولی تراز خروجی تونل جهت انجام محاسبات سری زمانی جریان خروجی از تونل مجهول است. از این رو حل مسئله به روش پیشرو نیز بدون اعمال یک سری تغییرات قابل حل نیست.

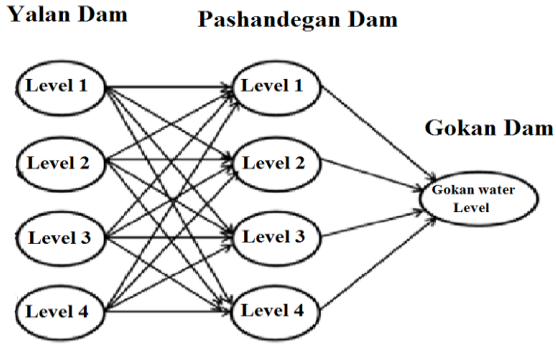

Fig. 5. General display DDP (forward method) model, water level as state variable and the tunnels diameter as decision variable

شکل ۵- نمایش شبکه کلی مسئله، تراز مخزن به‌عنوان متغیر حالت و قطر تونل به‌عنوان متغیر تصمیم

در این تحقیق با اصلاح برنامه‌ریزی پویا (پیشرو) می‌توان این مسئله را حل نمود. اصلاح برنامه‌ریزی پویا (پیشرو) با تلفیق یک فرایند سعی و خطا در برنامه‌ریزی پویا صورت گرفت. الگوریتم مورد استفاده در برنامه‌ریزی پویا اصلاح شده (پیشرو) به‌صورت شکل ۶ می‌باشد.

در این روش ابتدا فرض می‌گردد ترازهای بهینه سد پشندگان معلوم است و لذا برابر یک مقدار مشخص فرض می‌گردد. فرض اولیه تراز سد پشندگان باید مقداری بزرگ‌تر از تراز سطح نرمال آب در سد گوکان باشد. فرض اولیه باید بر اساس قضاوت مهندسی و همچنین انجام یک سری محاسبات هیدرولیکی تقریبی انتخاب گردد. پس از انتخاب تراز سد پشندگان محاسبات به روش پیشرو و از سد یلان آغاز می‌گردد. مراحل انجام محاسبات با توجه به الگوریتم شکل ۶ به شرح زیر است.

مرحله اول – انتخاب تراز نرمال فرضی برای سد پشندگان

انتخاب تراز نرمال فرضی سد پشندگان بطور مستقیم بر تراز نرمال سد یلان برای قطرهای مختلف تونل انتقال یلان به پشندگان در راندمان انتقال ۹۵ درصد اثر می‌گذارد.

مرحله دوم – ورود اطلاعات اولیه

ورود اطلاعات اولیه شامل جریان ورودی، تبخیر از سطح آب، منحنی‌ها حجم سطح ارتفاع، حداقل جریان زیست محیطی، نیاز آبی و بارش بر سطح آب می‌باشد.

مرحله سوم – انتخاب قطر تونل یلان به پشندگان و شبیه‌سازی مخزن برای ترازهای نرمال مختلف و راندمان ۹۵ درصد

قطر اولیه برای تونل انتقال یلان به پشندگان انتخاب می‌گردد. به‌منظور کاهش حجم محاسبات قطر تونل با فواصل ۲۰ سانتی‌متر گسسته می‌گردد. پس از انتخاب قطر تونل می‌بایست، تراز نرمالی را که در آن راندمان انتقال معادل راندمان مورد نظر باشد را بیابیم.

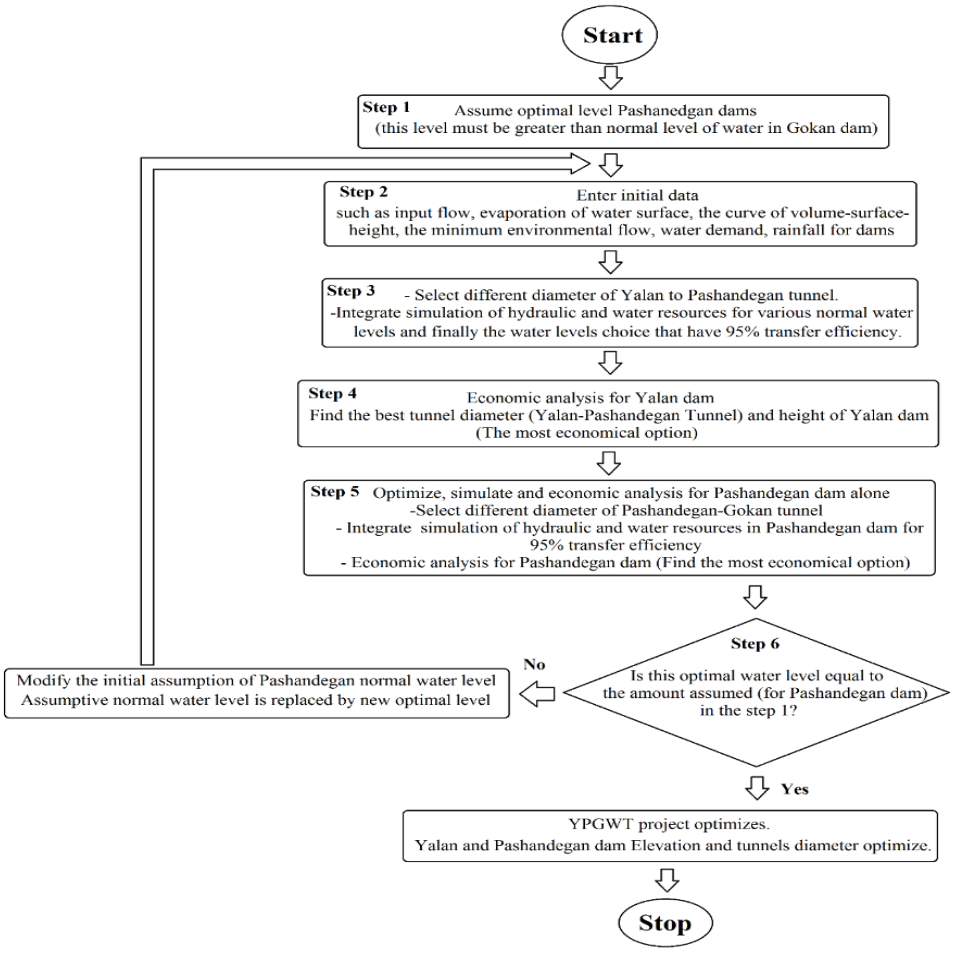

Fig. 6. DP algorithm combined with a process of trial and error (Developed Dynamic Programming)
شکل ۶- الگوریتم برنامه‌ریزی پویا (پیشرو) در تلفیق با یک فرآیند سعی و خطا (برنامه‌ریزی پویا اصلاح شده)

به‌منظور یافتن تراز نرمال مورد نظر باید شبیه‌سازی تلفیقی هیدرولیک و منابع آب برای ترازهای نرمال مختلف انجام و در نهایت از بین ترازهای مذکور، تراز معادل راندمان مورد نظر استخراج گردد. با افزایش حجم زنده مخزن، تراز متوسط سطح آب افزایش می‌یابد، که این افزایش خود منجر به افزایش حجم خروجی از تونل انتقال می‌گردد و راندمان انتقال را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر افزایش حجم زنده مخزن، میزان سرریزی از مخزن را کاهش و به‌عبارتی حجم تنظیمی مخزن را افزایش می‌دهد.

پس از انجام شبیه‌سازی تلفیقی هیدرولیک و منابع آب (الگوریتم شکل ۳) در طول دوره برای هر تراز نرمال مخزن، راندمان انتقال محاسبه می‌گردد. در نهایت از بین ترازهای نرمال، ترازی که دارای راندمان انتقال مورد نظر است با استفاده از میان‌یابی بدست می‌آید. در این قسمت نیز همانند قطر تونل، به‌منظور کاهش حجم محاسبات، حجم مخزن را گسسته می‌شود. در این بخش برای قطر انتخاب شده در مرحله ۲، تراز معادل راندمان انتقال مد نظر بدست می‌آید.

در ادامه قطر تونل ۲۰ سانتی‌متر افزایش می‌یابد و مجدداً عملیات مرحله سوم اجرا می‌گردد. در نهایت برای قطرهای مختلف تونل، ترازهای نرمال معادل راندمان انتقال ۹۵ درصد بدست می‌آید.

مرحله چهارم – انجام تحلیل اقتصادی برای سد یلان به تنهایی و یافتن بهترین قطر تونل و ارتفاع این سد

با توجه به اطلاعات مرحله سوم که بیانگر قطر تونل یلان به پشندگان و ارتفاع مورد نیاز سد یلان برای راندمان ۹۵ درصد است، می‌بایست اقتصادی‌ترین گزینه انتخاب گردد. بدیهی است برای راندمان انتقال ثابت، با افزایش قطر تونل، ارتفاع مورد نیاز سد کاهش یافته و با کاهش قطر، ارتفاع سد افزایش می‌یابد. اکنون جهت یافتن بهترین گزینه اقتصادی از هزینه سد برای ارتفاع‌های مختلف (جدول ۱) و هزینه تونل برای قطرهای مختلف (شکل ۴) استفاده می‌شود. پس از تعیین هزینه سد یلان برای ارتفاع‌های مختلف و هزینه تونل برای قطرهای مختلف، هزینه ترکیب سد و تونل که منجر به راندمان انتقال ۹۵ درصد می‌گردد، محاسبه می‌شود.

مرحله پنجم – بهینه‌سازی، مدل‌سازی و انجام تحلیل اقتصادی برای سد پشندگان به تنهایی و یافتن بهترین قطر تونل و ارتفاع این سد

پس از تعیین قطر بهینه تونل یلان به پشندگان و ارتفاع سد یلان، نوبت به بهینه‌سازی ارتفاع سد پشندگان و قطر تونل پشندگان به گوکان می‌باشد. بدیهی است یک ترکیب از قطر تونل پشندگان به گوکان و ارتفاع سد پشندگان برای راندمان ۹۵ درصد دارای کمترین هزینه است.

مرحله ششم – مقایسه تراز نرمال بهینه سد پشندگان با تراز فرض شده سد پشندگان

این موضوع دارای یک محدودیت می‌باشد و آن تراز پایاب تونل یلان به پشندگان است. بدیهی است اگر تراز نرمال بهینه سد پشندگان دقیقاً معادل تراز فرض شده پایاب تونل یلان به پشندگان باشد، آنگاه طرح در کل تا مرحله انتقال به سد گوکان بهینه شده است. در عمل امکان رخ دادن چنین حالتی بسیار کم است. بنابراین در صورت عدم تساوی تراز بهینه سد پشندگان با تراز فرض شده اولیه، تراز بهینه بدست آمده برای سد پشندگان جایگزین تراز فرض اولیه می‌شود. از آنجایی که تراز سد پشندگان تغییر کرد، ابتدا سد یلان و سپس سد پشندگان را بهینه‌سازی کرده و این عملیات را آنقدر تکرار می‌کنیم تا تراز فرض شده اولیه برای سد پشندگان با تراز بهینه بدست آمده برای این سد برابر شود، در آن صورت طرح تا محل سد گوکان بهینه می‌گردد.

۳- نتایج و بحث

بر اساس الگوریتم شکل ۶، در ابتدا تراز سد پشندگان برابر با ۲۱۰۲ متر فرض گردیده شد (مرحله ۱). در ادامه تمامی اطلاعات ابتدایی مانند جریان ورودی مخزن یلان، تونل تورزه و مصیر و دیگر اطلاعات هیدرولوژیکی به منظور شبیه‌سازی بیلان آب یه مدل وارد شد (مرحله ۲) با توجه به داده‌های هواشناسی در سد تورزه و مصیر ماکزیم دبی این تونل‌های جانبی برابر ۲/۴۳ مترمکعب بر ثانیه برای تونل تورزه و ۲/۶۲۸ مترمکعب بر ثانیه برای تونل مسیر محاسبه شده است.

در مرحله بعد برای تراز نرمال مخزن پشندگان برابر ۲۱۰۲، مخزن سد یلان مدل‌سازی گردید. در این مرحله قطر تونل یلان–پشندگان و ارتفاع سد یلان با فرض مشخص بودن ارتفاع سد پشندگان گسسته شده و برای تمامی حالت‌ها مدل‌سازی صورت گرفت. گسسته‌سازی قطر تونل بین ۲/۶ متر تا ۵/۳ متر با فاصله‌های ۱۰ سانتی‌متر صورت گرفت. همچنین حجم مخزن سد یلان نیز با فواصل ۵ میلیون مترمکعب از ۲۰۰ تا ۴۸۰ میلیون مترمکعب گسسته

گردید. برای تمامی حالات مدل‌سازی صورت گرفت و مقدار راندمان مختلف برای ترکیب‌های قطر تونل و حجم مخزن یلان (ارتفاع سد یلان) مشخص گردید. نتایج مربوط به این مدل‌سازی در شکل ۷ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۷ بدیهی است با افزایش قطر تونل ارتفاع مورد نیاز سد برای یک راندمان انتقال ثابت کاهش یافته و با کاهش قطر، ارتفاع سد افزایش می‌یابد. از آنجای که در این تحقیق هدف بهینه‌سازی انتقال آب با راندمان انتقال ۹۵ درصد است، از اینرو می‌بایست از بین نتایج برای راندمان‌های مختلف ترکیب تراز سد یلان و تونل انتقالی را انتخاب کرد که راندمان ۹۵ درصد انتقال را داشته باشد. بنابراین از میان داده‌های مدل‌سازی سد یلان برای فرض اولیه تراز پشندگان در شکل ۸ ترکیب ارتفاع سد یلان و قطر تونل یلان–پشندگان که راندمان ۹۵ درصد را دارا می‌باشد، نشان داده شده است.

اکنون جهت یافتن بهترین گزینه اقتصادی می‌بایست هزینه سد برای ارتفاع‌های مختلف و هزینه تونل برای قطرهای مختلف در دسترس باشد. از این‌رو با استفاده از جدول ۱ و شکل ۴ می‌توان برای ترکیبات مختلف قطر تونل و ارتفاع سد که دارای ۹۵ درصد راندمان انتقال می‌باشد هزینه‌ها را محاسبه کرد. نتایج این محاسبات برای قطر تونل و ارتفاع سد به‌ترتیب در جدول ۲ ارائه شده است.

با توجه به نتایج جدول ۲ مشخص است که کمترین هزینه برای سد یلان و تونل انتقال یلان – پشندگان مربوط به ارتفاع ۱۴۳/۵۱ متر و قطر تونل ۲/۸ متر است. بنابراین گزینه بهینه مربوط به ارتفاع سد یلان و قطر تونل انتقال آن برای راندمان ۹۵ درصد در صورتی که تراز سد پشندگان ۲۱۰۲ متر (فرض اولیه) باشد، مشخص گردید.

در گام بعدی ارتفاع سد پشندگان و قطر تونل پشندگان – گوکان می‌شود. از اینرو معادلات بیلان آب و هیدرولیک تونل برای این حالت به منظور مدل‌سازی حل می‌گردد. از آنجا که ارتفاع سد گوکان مشخص است و ارتفاع سد یلان و قطر تونل انتقال آن در مرحله قبل بدست آمده است، جریان ورودی به سد پشندگان محاسبه می‌شود. در نهایت ارتفاع این سد و قطر تونل انتقال آن مشابه با مرحله قبل بدست می‌آید.

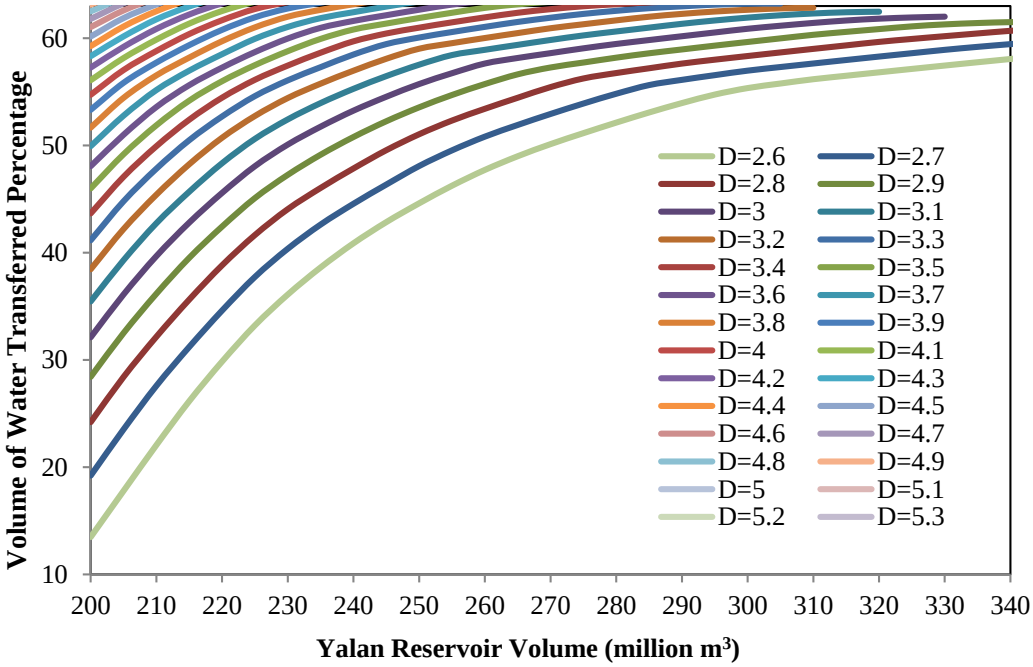

Fig. 7. Yalan reservoir volume against volume of water transferred percentage to Pashandegan for different diameter tunnel (Pashandegan Level =2102 m)

شکل ۷- حجم مخزن در مقابل راندمان‌های مختلف برای قطرهای مختلف تونل انتقال در سد یلان (تراز پیشندگان برابر ۲۱۰۲ متر)

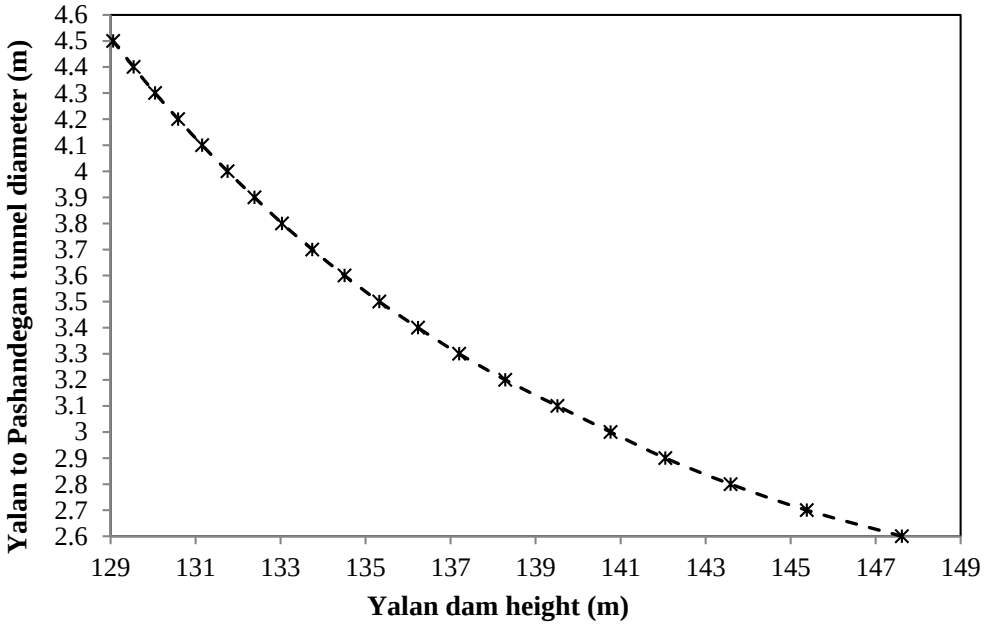

Fig. 8. Yalan dam height at different diameter of Yalan to Pashandegan tunnel for 95% water transfer efficiency (Pashandegan Level =2102 m)

شکل ۸- ترکیب ارتفاع سد یلان همراه با قطر تونل انتقال در راندمان ۹۵ درصد (تراز پیشندگان برابر ۲۱۰۲ متر)

Table 2. Calculation of the best combination of tunnel diameter and Yalan dam height in 95% water transfer efficiency (Pashandegan dam level = 2102 m).

جدول ۲- هزینه ترکیبات قطر تونل و ارتفاع سد یلان برای راندمان انتقال ۹۵ درصد (تراز پیشندگان برابر ۲۱۰۲ متر)

Yalan Normal level (m)	Tunnel Diameter (m)	Yalan Dam Height (m)	Total Cost (Rial × 10^9)
2127.532161	2.6	147.53	3817.91
2125.28978	2.7	145.29	3802.69
2123.513667	2.8	143.51	3795.90
2122.003002	2.9	142.00	3815.73
2120.735484	3.0	140.74	3834.21
2119.473812	3.1	139.47	3874.69
2118.236591	3.2	138.24	3908.63
2117.143713	3.3	137.14	3966.60
2116.18442	3.4	136.18	4013.22
2115.284811	3.5	135.28	4079.91
2114.968582	3.6	134.97	4151.91
2114.098418	3.7	134.10	4223.62
2113.327406	3.8	133.33	4283.44
2112.606559	3.9	132.61	4362.71
2111.913736	4.0	131.91	4425.15
2111.283457	4.1	131.28	4509.66
2110.707304	4.2	130.71	4578.66
2110.20242	4.3	130.20	4670.04
2109.703852	4.4	129.70	4741.54
2109.275751	4.5	129.28	4838.80

با توجه به الگوریتم شکل ۳ و مرحله پنجم مخزن سد پشندگان با داده‌های مشخص شده برای راندمان ۹۵ درصد انتقال مدل‌سازی گردید. در این مرحله نیز مانند مدل‌سازی سد یلان (مرحله ۳) قطر تونل از ۲/۶ متر تا ۵/۳ متر با فواصل ۱۰ سانتی‌متر گسسته گردید و همچنین مخزن سد پشندگان از ۰/۱۴ تا ۰/۹ میلیون مترمکعب با فواصل ۰/۰۲ میلیون مترمکعب نیز به منظور شبیه‌سازی و بهینه‌سازی گسسته شد.

پس از گسسته‌سازی و مدل‌سازی جریان همانند سد یلان ترکیبات مختلف ارتفاع سد و قطر تونل که راندمان‌های مختلف انتقال را پوشش می‌دهند، مشخص گردید. و از مابین آن‌ها ترکیبات قطر تونل و ارتفاع سد پشندگان مربوط به راندمان انتقال ۹۵ درصد استخراج شد. پس از مشخص شدن ترکیبات قطر و ارتفاع سد مربوط به راندمان انتقال ۹۵ درصد با توجه به جدول ۱ و شکل ۴ هزینه نهایی هر یک از ترکیبات مشخص گردید. در شکل ۹ هزینه کل نسبت به ارتفاع سد و در شکل ۱۰ هزینه کل نسبت به قطر تونل ارائه شده است.

پس از تحلیل اقتصادی بر روی سد پشندگان و تونل انتقال آن، بهترین ترکیب که قادر به انتقال ۹۵ درصد آب و دارای کمترین هزینه است برابر با ارتفاع ۵۹/۵۵ متر برای سد پشندگان و قطر تونل پشندگان به گوکان برابر ۳ متر می‌باشد. با توجه به ارتفاع بهینه سد پشندگان که برابر با ۵۹/۵۵ متر (تراز ۲۱۱۰/۵۵ متر) است، در مرحله ششم این تراز با تراز فرض شده اولیه (۲۱۰۲ متر) مقایسه شد. مقایسه بین فرض اولیه و تراز بهینه سد پشندگان مشخص کرد که تراز بهینه بیش‌تر از فرض اولیه است.

از اینرو ثابت می‌شود فرض ابتدایی صحیح نیست. بنابراین در این حالت با توجه به الگوریتم شکل ۶ می‌بایست مراحل ۲ تا ۶ مجدداً تکرار شوند.

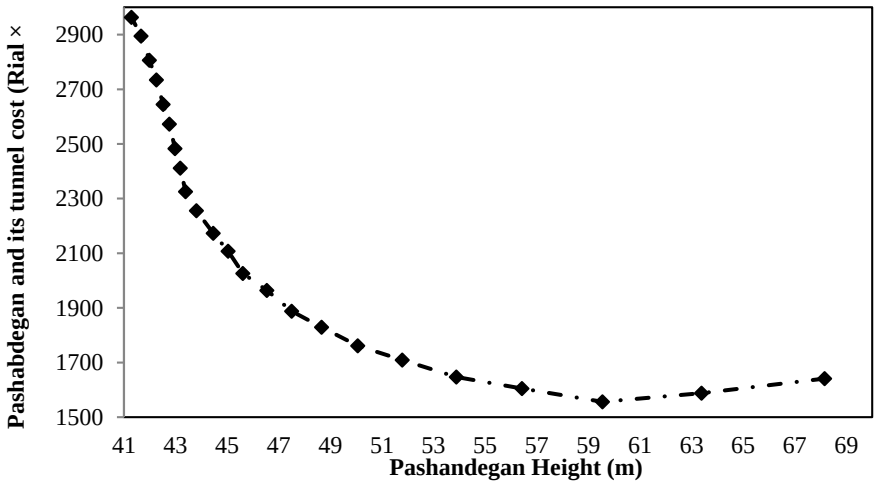

Fig. 9. The cost of Pashandegan dam and transfer tunnel against Pashandegan height in 95% water transfer efficiency (Yalan dam height = 143.51 m)

شکل ۹- هزینه سد پشندگان با تونل انتقال در برابر ارتفاع سد پشندگان برای راندمان انتقال ۹۵ درصد (ارتفاع سد یلان ۱۴۳/۵۱ متر)

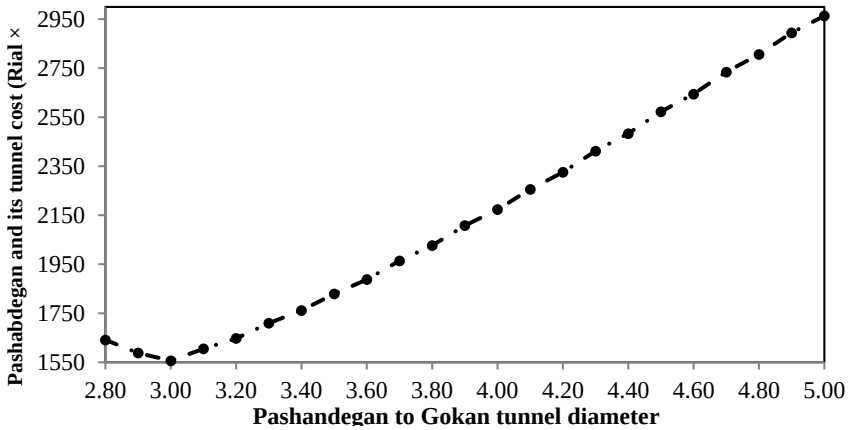

Fig. 10. The cost of Pashandegan dam and transfer tunnel against Pashandegan - Gokan tunnel diameter in 95% water transfer efficiency (Yalan dam height = 143.51 m)

شکل ۱۰- هزینه سد پشندگان با تونل انتقال در برابر قطر تونل پشندگان – گوکان برای راندمان انتقال ۹۵ درصد (ارتفاع سد یلان ۱۴۳/۵۱ متر)

در این دوره تکرار تراز بهینه پشندگان (۲۱۱۰/۵۵ متر) جایگزین فرض اولیه (۲۱۰۲ متر) می‌گردد و تمامی مراحل بالا مجدداً انجام می‌گیرد.

با توجه به فرض کردن تراز سد پشندگان برابر با ۲۱۱۰/۵۵، سد یلان و تونل انتقال یلان – پشندگان برای راندمان انتقال ۹۵ درصد مجدداً مدل‌سازی و بهینه‌سازی شد. نتایج حاصل از مدل‌سازی و بهینه‌سازی و تحلیل اقتصادی نشان داد که ارتفاع ۱۴۸/۳۷ متر برای سد یلان و قطر تونل ۲/۸ متر گزینه بهینه برای سد یلان می‌باشد، که قادر است ۹۵ درصد از آب موجود را انتقال دهد. هزینه بهینه این ترکیب ارتفاع سد و قطر تونل با توجه به جدول ۱ و شکل ۴ برابر ۳۷۹۵/۹ میلیارد ریال برآورد گردید. پس از مشخص شدن تراز بهینه سد یلان و قطر تونل انتقال یلان – پشندگان با استفاده از الگوریتم‌های شکل ۶ و ۳ جریان ورودی به مخزن سد پشندگان و جریان خروجی برای تمامی حالات مدل‌سازی گردید. در نهایت ترکیبات ارتفاع سد و قطر تونل مربوط به انتقال ۹۵ درصد استخراج شد و تحلیل اقتصادی بر روی آن‌ها صورت گرفت. نتایج حاصل از مدل‌سازی و تحلیل اقتصادی مربوط به سد پشندگان و تونل انتقال پشندگان – گوکان برای انتقال ۹۵ درصد آب زمانیکه تراز سد یلان برابر با ۱۴۸/۳۷ متر است، در جدول ۳ نشان داده شده است.

Table. 3. The cost of Pashandegan dam and transfer tunnel in 95% water transfer efficiency (Yalan dam height = 148.37 m)

جدول ۳- هزینه ترکیبات قطر تونل و ارتفاع سد پشندگان برای راندمان انتقال ۹۵ درصد (ارتفاع سد یلان برابر ۱۴۸/۳۷ متر)

Pashandegan Normal level (m)	Tunnel Diameter (m)	Pashandegan Dam Height (m)	Total Cost (Rial × 10^9)
2116.51	2.8	65.51	1572.14
2114.23	2.85	63.23	1547.93
2112.19	2.9	61.19	1530.85
2110.36	2.95	59.36	1517.79
2108.71	3	57.71	1541.46
2107.22	3.05	56.22	1566.42
2105.88	3.1	54.88	1592.54

همان‌طور که در جدول ۳ مشخص می‌باشد، تراز بهینه سد پشندگان پس از مدل‌سازی جریان ورودی از سد یلان برابر با ۲۱۱۰/۳۶ متر بدست آمده است. این مقدار با مقدار فرض شده (۲۱۱۰/۵۵ متر) تقریباً یکسان است. بنابراین ترکیب بهینه ارتفاع و قطر تونل سد پشندگان همراه با ترکیب بهینه ارتفاع و قطر تونل سد یلان مشخص شده است. در جدول ۴ ترکیب بهینه ارتفاع سد یلان و پشندگان و قطر تونل یلان – پشندگان و پشندگان – گوکان همراه با هزینه احداث پروژه ارائه شده است. هزینه بهینه کل پروژه برابر با ۵۳۱۳/۶۹ میلیارد ریال برآورد شده است.

Table 4. The best optimal combination of dams' height and tunnels' diameter and these cost

جدول ۴- ترکیب بهینه قطر تونل و ارتفاع سد به همراه هزینه ساخت

Dam name	Dam height (m)	Tunnel diameter (m)	Total cost (Rial × 10^9)	Final cost (Rial × 10^9)
Yalan	148.37	2.8	3795.9	5313.69
Pashandegan	59.36	2.95	1517.79	

۴-نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده همزمان از معادله بیلان و معادلات هیدرولیکی لوله، با کمک برنامه‌ریزی پویا پیشرو اصلاح شده (با در نظر گرفتن اصلاحاتی در این روش) یک سیستم انتقال آب بین حوضه‌ای در ایران که شامل سه سد (یلان، پشندگان و گوکان) و دو تونل انتقال است، بهینه گردیده است. در این‌گونه مسائل، بهینه‌سازی باید به‌گونه‌ای باشد که آب مورد نیاز حوضه مقصد تامین شود و همچنین کل سیستم انتقال آب بین حوضه‌ای دچار مشکلات هیدرولیکی نگردد. در این تحقیق بهینه‌سازی قطر تونل‌های یلان به پشندگان و پشندگان به گوکان و بهینه‌سازی ارتفاع سدهای یلان و پشندگان برای ضریب انتقال ۹۵ درصد به گونه‌ای که کم‌ترین هزینه را داشته باشد، مد نظر است. به‌منظور تحقق این هدف همزمان دو الگوریتم در محیط ویژوال بیسیک کد نویسی گردیده که می‌توانند با یکدیگر و با نرم‌افزار EPANET بصورت دینامیکی ارتباط داشته و مدل منابع آب، هیدرولیک و برنامه‌ریزی پویا اصلاح شده را حل نمایند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که برنامه‌ریزی پویا اصلاح شده به روش پیشرو قادر به بهینه‌سازی این پروژه است و ارتفاع‌های بهینه ۱۴۸/۳۷ و ۵۹/۳۶ متر بترتیب برای سد یلان و پشندگان و قطر تونل‌های بهینه ۲/۸ و ۲/۹۵ متر برای تونل‌های یلان – پشندگان و پشندگان – گوکان را ارائه کرده است. از تحلیل اقتصادی موجود در برنامه‌ریزی پویا اصلاح شده هزینه کل پروژه با در نظر گرفتن راندمان انتقال ۹۵ درصد برابر ۵۳۱۳/۶۹ میلیارد ریال برآورد شده است.

۵- مراجع

Alimoahammadi R (2012) Inter-basin water transfer and provide solutions. National Conference on Inter-basin Water Transfer (Challenges and Opportunities), June, Shahrekord (In Persian)

Azeri M, Honest HR, Telvari AF (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, March (In Persian)

Bani Hashemi DA, Saghafian B, Abbas AA, Fatehi merj A, Mafi SH (2001) Developed a general model simulating the hydrological and hydraulic Flood spreading, research projects, Soil Conservation and Watershed Management Research Center (In Persian)

Cole D, Carver WB (2011) Inter-basin transfers of water. Georgia Water Resources Conference, April 11–13, University of Georgia

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)

Karamoz M, Araghinezhad SH, 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)

Luss H (1999) on equitable resource allocation problems: a lexicographic minimax approach. Operation Research Journal, 47(3):361–378

Mokhtarporiyani Sb (2010) Achievements in the implementation of water conveyance tunnel Goshan value engineering, value engineering and dam Fourth National Conference (In Persian)

Mutiga JK, Mavengano ST, Zhongbo S, Woldai T, Becht R (2010) Water allocation as a planning tool to minimize water use conflicts in the upper Ewaso Ng'iro North Basin, Kenya. Water Resource Management, 24:3939–3959

Pereira LS, Cordery I, Iacovides I (2002) Copying with water scarcity. International Hydrological Programme. UNESCO, Paris

Razmjo MGh (2010) Study the problems water transfer project Simindasht to Garmsar and advice, The Second National Seminar on Geotechnical Problems of Irrigation and Drainage Networks (In Persian)

Saeidiniya M, Samadi Boroujeni H, Fatah R (2008) Study of inter-basin water transfer projects by using WEAP (Case Study: Tunnel Beheshtabad), Journal of Water Research, 2(3):33-44 (In Persian)

Sadegh M, Mahjouri N, Kerachian R (2010) Optimal inter-basin water allocation using crisp and fuzzy Shapely games. Water Resource Management, 24:2291–2310, doi. 10.1007/s11269-009-9552-9

Simpson LD (1995) Transbasin diversion, the United States experience. Water Resources Management Consultant, World Bank

Tisdell JG, Harrison SR (1992) Estimating an optimal distribution of water entitlements. Water Resource Research, 28:3111–3117

Torabi Pudeh H, Mansouri R, Haghiabi AH, Yonesi HA (2016) Optimization of hydraulic-hydrologic complex system of reservoirs and connecting tunnel. Water Resource Management. doi: 10.1007/s11269-016-1477-5

Wang XL, Sun YF, Song LG, Mei CS (2009) an eco-environmental water demand based model for optimizing water resources using hybrid genetic simulated annealing algorithms. Part i. Model development. Journal of Environmental Management, 90(8):2628-2635

Wang KW, Chang LC, Chang FJ (2011) Multi-tier interactive genetic algorithms for the optimization of long-term reservoir operation. Advances in Water Resources, 34:1343–1351

White G (1977) Comparative analysis of complex river development. In environmental effect of complex river development. Gilbert White Editor, 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 AH, Shabankari M (2010) Inter-basin water transfer planning of Karun River to Zayandehroud. Research Journal of Isfahan University, 1-18 (In Persian)

Zhu X, Zhang C, Yin J, Zhou H, Jiang Y (2013) Optimization of water diversion based on reservoir operating rules: Analysis of the biliu river reservoir, China. Journal of Hydrologic Engineering, 19(2):411-421