تحليل جريان ورودي به مخزن سدها در مدل برنامه‌ريزي آرماني با قيدهاي تصادفي*
(مطالعه موردي سد مخزني مهاباد)

جميل قادري — استاديار گروه آبياری، دانشگاه آزاد اسلامي واحد مهاباد
عثمان محمدپور — مربی گروه آبیاری، دانشگاه آزاد اسلامي واحد مهاباد

چكيده

در اين مطالعه مدلي احتمالي بررسي مي‌شود كه مي‌تواند رفتار تصادفي پديده‌اي مانند دبي رودخانه را توصيف كند تا از آن بتوان براي پيش‌بيني اوضاع آينده با فرض تكرار اتفاق گذشته در آينده استفاده نمود، يا براساس آن اقدامات بهينه در جهت كنترل اوضاع آتي به عمل آورد. با استفاده از اين روش مدل غير خطي برنامه‌ريزي آرماني با قيدهاي تصادفي (CCGP) به مدل قطعي معادل خود تبديل مي‌شود. براي تبديل مدل تصادفي به مدل قطعـي معادل، نـرم‌افزار كامپيوتري OSM به زبان فرترن ۷۷ تهيه شده است . اين نرم‌افزار نخست تابع توزيع تجمعي خام و شرطي جريانهاي ورودي بـه مخزن سد را محاسبه ميكند، سپس از روش درون‌يابي تفاضلات نيوتن و براي قابليت اعتمادهاي مختلف كنترل سيل و خشكسالي، معكوس تابع توزيع تجمعي خام و شرطي را محاسبه مي‌كند. براي آزمون روش و نرم‌افزار، داده‌هاي مربوط به سد مخزني چند منظوره مهابـاد، با اهداف متعددي مانند تأمين آب شرب، تأمين تقاضاي آب كشاورزي، توليد انرژي الكتريكي و كنترل سيلاب، مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از مدل، مدير مخزن را قادر مي‌سازد كه بتواند براي شرايط مختلف همانند ترساليها و خشكساليها برنامه‌ريزي بهينه‌اي داشته باشد.

كلمات كليدی: **بهينه‌سازي، تحليل تصادفي جريان، ترسالي، خشكسالي، بهره‌برداري از سدهاي چند منظوره.**

Analysis of Inflows to Multiobjective Reservoir in Chance Constrained Goal Programming Model
(A Case Study of Mahabad Reservoir)

J. Ghaderi and O. Mohammad pour — Department of Irrigation, Islamic Azad university of Mahabad

Abstract

In order to investigate behavior of stochastic inflows to multiobjective reservoir a probabilistic model has been used .This model can describe river flow for the purpose of forecasting future situations. To convert chance constrained goal programming (CCGP) model to its deterministic equivalents model, OSM computer software has been developed which is written in FORTRAN 77. OSM software can extract conditional and nonconditional cumulative distribution function (CDF) of inflows to reservoir and calculates inverse CDF of inflows for flood and drought control reliability by using Newton’s differential interpolation method. The model is applied to the Mahabad multiobjective reservoir which is a portion of the Urmia lake watershed . This reservoir is constructed to control water for several purposes such as municipal water supply, irrigation demands, flood control and hydroelectric power generation. Use of this model allows the reservoir manager to rank various goals according to their relative importance.

Key words: Optimization, Stochastic inflows, Multiobjective, Reservoir oeration, Wet and dry periods.

---
* Chance Constrained Goal Programming (CCGP)

۱- مقدمه

بدون شك توليد غذاي كافي و مطلوب از اهداف توسعه ملي و امنيتي هر كشوري محسوب مي‌گردد و از آنجاكه توليد غذا به طور فزاينده‌اي به عرضه‌ي آب بستگي دارد، امنيت غذايي رابطة تنگاتنگي با امنيت آبي دارد. محدوديت منابع آب كشور و تشديد اين محدوديت‌كه ناشي از تداوم ميزان تقاضا در بخشهاي مختلف كشاورزي، صنعت، شرب و زيست محيطي است موجب شده است تا حداكثر استفاده از منابع آب موجود و افزايش بهره‌وري و بالطبع افزايش توليد در واحد سطح مطرح شود. بديهي است كه آبهاي استحصال شده فعلي و آب قابل استحصال پاسخگوي روند توسعه كشاورزي و تأمين مواد غذايي جمعيت رو به رشد جامعه نخواهد بود، لذا آنچه در اين زمينه اهميت مي‌يابد مديريت مصرف و بهره‌برداري بهينه همراه با مديريت تقاضا در بخشهاي مختلف شرب، كشاورزي و محيطزيست مي‌باشد تا توسعه پايدار در كلية بخشهاي اقتصادي را امكان‌پذير سازد [۵].

بسياري از پديده‌هاي هيدرولوژيكي چون رواناب،(۱) ميزان و شدت سيلاب، دبي رودخانه و غيره پديده‌هايي هستند كه از عوامل بيشماري تأثير مي‌پذيرند و مستعد پيروي از مدلهاي قطعي نيستند. در اين پديده‌ها استفاده از روشهاي آماري و به كارگيري مدلهاي احتمالي، سودمندي خود را به اثبات رسانده‌اند [۷]. در صورتيكه اطلاعات آماري كافي در اختيار باشد مي‌توان مدلي به دست آورد كه از آن بتوان براي محاسبة احتمال واقع شدن مقدار آينده‌اي از پديده در درون حدود مشخصي استفاده كرد. در تعيين سياستهاي بهينه عملكرد مخازن پشت سدها كه تخليه مطلوب را به صورت تابعي از ذخيره مخزن و جريان آب ورودي به مخزن در نظر مي‌گيرند، مدلهاي برنامهريزي با روشهاي مختلفي مورد استفاده قرار گرفتهاند. بيشتر اين مدلها طبيعت تصادفي جريان ورودي به مخزن را در نظر ميگيرند. ايده اصلي در حل برنامه‌ريزي تصادفي تبديل به مدل قطعي معادل با آنها است. آنگاه مدل قطعي حاصل با استفاده از روشهاي آشنايي مانند برنامهريزي خطي، ديناميكي، آرماني، هندسي و غيرخطي حل مي‌شود. برنامه‌ريزي با قيدهاي تصادفي(۲) (CCP) يكي از مدلهايي است كه براي استفاده حائز اهميت است. قيدهاي تصادفي همراه مدلهاي‌خطي، غيرخطي، ديناميكي و آرماني مي‌توانند به كار روند. لاكس(۳) دو مدل قيدهاي تصادفي گسسته را براي برنامه‌ريزي حوضه رودخانه دلاوار(۴) در آمريكا و حوضه رودخانه موريس(۵) در روماني گسترش داد. او نشان داد كه مي‌توان تعدادي از آرمانها و اهداف برنامه‌ريزي سيستم حوضه رودخانه را با قيدهاي تصادفي كه محدوده و قابليت اعتماد جريان را مشخص مي‌كند به بهترين نحو ارائه نمود [۱۳]. سيمونويچ و مارينو(۶) تكنيك برنامهريزي براساس قابليت اعتماد(۷) را جهت برنامه‌ريزي بهره‌برداري از سيستم مخازن (سه مخزن) رودخانه سرخ در اوكلاهاما به كار گرفتند. اين روش مي‌تواند براي برنامه‌ريزي مخازن چند منظوره با جريانهاي ورودي تصادفي و همچنين تقاضاهاي تصادفي مورد استفاده قرار گيرند [۱۵]. چانچيت و ترل(۸) يك مدل رياضي با سه مشخصه مهم چند منظوره بودن، تصادفي بودن ورودیهاي مخزن و طبيعت سيستم مخازن با مقياس بزرگ را گسترش دادند [۹]. سرينيواسان و سيمونويچ(۹)، تكنيك برنامه‌ريزي قابليت اعتماد را براي بهينه‌سازي عملكرد سيستم آبي مونيتابا(۱۰) با اهداف توليد نيروي برق آبي و كنترل سيلاب را گسترش دادند و مورد استفاده قرار دادند. اين مدل فوايد ناشي از توليد نيروي برق آبي را حداكثر مي‌نمايد و افتهاي اقتصادي حاصل از عدم تأمين قابليت اعتماد موردنياز براي دو هدف اصلي مخزن را به حداقل مي‌رساند [۶]. در مدلهاي برنامه‌ريزي بر مبناي قابليت اعتماد، نگرش كلي بر قابليت اعتمادهايي است كه به عنوان متغير تصميم در نظر گرفته مي‌شود. داندي و همكاران(۱۱) چهار روش مختلف را براي برآورد بازدهي سيستم مخازن كانبرا(۱۲) در استراليا به كار گرفتند. اين چهار روش عبارت بودند از: شبيه‌سازي، مدل تركيبي از بهينهسازي و شبيه‌سازي (WATHNET). مدل بهينه‌سازي كامل(۱۳) و مدل بهينه‌سازي ساده شده(۱۴) كه مدل بازدهي

1-Run off
2- Chance Constrained

3- Loucks
4-Delaware
5-Mures
6-Simonovic & Marino
7-Reliability Programming
8-Changchit & Terrel
9- Srinivasan & Simonovic
10- Manitoba
11- Dandy et all
12- Canberra
13- Full Optimization
14- Simplified Optimization

ناميده مي‌شود. ايشان نتايج حاصل از چهار روش را با هم مقايسه نمودند. نتايج حاصل نشانگر اين واقعيت است كه مدل WATHNET نتايج معقولي را در برآورد بازدهي سيستم نشان مي‌دهد [۱۱].

در مطالعه حاضر بهمنظور بهينه‌سازي بهره‌برداري از مخازن سدهاي چند منظوره، از مدل غير خطي برنامه‌ريزي آرماني با قيدهاي تصادفي استفاده شده است. جهت كارآيي بيشتر روش، نرم‌افزار و منحنيهايي ارائه شده است. از نرم‌افزار مزبور و نرم‌افزارهاي برنامه‌ريزي همانند DOT، همزمان مي‌توان استفاده نمود. مدل براي سيستم رودخانه ـ مخزن سد مهاباد مورد استفاده قرار گرفت و تحت شرايط مختلف ورودي جريان به مخزن سد، منحنيهايي ارائه شده‌اند. نمودارهاي ارائه شده مديريت سد را قادر ميسازد تا براي شرايط مختلف ورودي جريان به مخزن سد برنامه‌ريزي بهتري داشته باشد.

۲- روش تبديل قيدهاي تصادفي به قيد قطعي معادل

در مخازن سدهاي چند منظوره حجم مشخصي از مخزن سد جهت كنترل سيل خالي نگه داشته مي‌شود، تا براي دريافت آب حاصل از پيك سيلاب آماده باشد. ظرفيتي از مخزن كه به مهار طغيانها تخصيص مي‌يابد فقط آن دسته از سيلابهايي را ذخيره مي‌كند كه در صورت تخليه به پايين دست خسارات عمده‌اي پديد مي‌آورد [۴]. شكل (۱) نواحي مختلف ذخيره مخزن را نشان مي‌دهد. در اين شكل ذخيره مخزن به چهار ناحيه ذخيره‌ي مرده(۱)، ذخيره موقت(۲)، ذخيره متناظر با اهداف حفظ آب(۳) و ذخيره كنترل سيل(۴) تقسيم شده است. در مدلهاي برنامه‌ريزي بر مبناي قابليت اعتماد و قيدهاي تصادفي به منظور كنترل سيل و خشكسالي از قيدهاي احتمالاتي (تصادفي) استفاده مي‌شود. قيدهاي تصادفي داراي احتمال مشخصي (كوچك) براي نقض شدن هستند. قيد تصادفي كنترل سيل را به صورت رابطه‌ي زير مي‌توان نوشت:

$$P(S_t \le S_{max_t}) \ge \alpha_t \qquad (۱)$$

1- Dead storage
2- Buffer storage
3- Conservation storage
4- Flood control storage

در رابطه فوق: P = نشان دهنده احتمال، α_t، قابليت اعتماد در ماه t و S_t، ذخيره مخزن در انتهاي ماه t، (S_{max_t})، حداكثر ذخيره مجاز مخزن در ماه t مي‌باشد.

رابطه بين حداكثر ظرفيت مجاز مخزن (S_{max_t}) و حجم فضاي خالي مورد نياز جهت كنترل سيلاب (FC) به صورت زير مي‌باشد:

$$S_{max_t} = S\max - FC_t \qquad (۲)$$

بهطوريكه S_{max} ظرفيت مخزن بر حسب ميليون متر مكعب مي‌باشد.

S_t و S_{t-1} حجم ذخيره مخزن به ترتيب در ابتدا و انتهاي دوره t با استفاده از معادله پيوستگي داراي رابطه زير خواهند بود:

$$S_t = S_{t-1} + I_t - W_t - R_t - G_t - EV_t \qquad (۳)$$

بهطوريكه: عامل I، حجم جريان آب ورودي به مخزن (ميليون متر مكعب)، W، نياز آب شرب شهري (ميليون متر مكعب)، R، تخليه از نيروگاه (ميليون متر مكعب)، G، سرزير از مخزن (ميليون متر مكعب)، EV، حجم تبخير از سطح مخزن (ميليون متر مكعب) مي‌باشد.

حجم تبخير از درياچه به صورت تابعي از سطح مخزن، ارتفاع تبخير و بارندگي به صورت زير نشان داده است [۱۱].

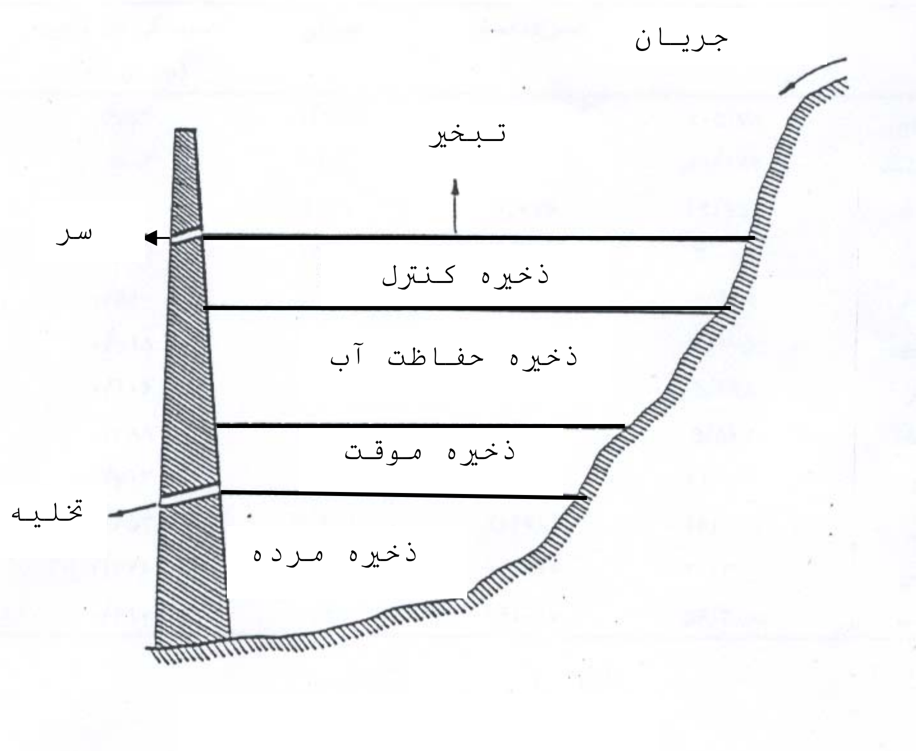
$$EV_t = A_t\left[\frac{e_t - P_t}{1000}\right] \qquad (۴)$$

به طوري كه: e_t، ارتفاع تبخير از درياچه سد در ماه t (ميلي متر)، P_t، ارتفاع بارندگي روي درياچه در ماه t (ميلي متر)، A_t، سطح آب مخزن در ماه t (كيلومتر مربع) مي‌باشد.

A_t با معادله زير بيان مي‌شود:

$$A_t = \theta + \Psi\left[\frac{S_t + S_{t-1}}{2}\right] \qquad (۵)$$

در رابطه فوق: θ و Ψ ضرايب رگرسيوني هستند.



شکل ۱- نواحی مختلف ذخیرهٔ مخزن

اگر در رابطه (۱) به جاي S_t معادلش از رابطه پيوستگي معادله (۳) قرار داده شود رابطه زير حاصل مي‌شود:

$$p(I_t \le S_{max_t} - S_{t-1} + W_t + R_t + G_t + EV_t) \ge \alpha_t \quad (۶)$$

رابطه (۶) را از نظر آماري مي‌توان به صورت زير نوشت:

$$S_{max_t} - S_{t-1} + W_t + R_t + G_t + EV_t \ge F_{I_t}^{-1}(\alpha_t) \quad (۷)$$

بطوريکه $F_{I_t}^{-1}(\alpha_t)$ معکوس تابعي توزيع تجمعي جريانهاي ورودي به مخزن به ازاي قابليت اعتماد α در دوره t مي‌باشد. با استخراج تابع توزيع تجمعي (خام يا شرطي) و به دست آوردن معکوس آن به ازاي قابليت اعتماد معين و قرار دادن آن در رابطه (۷)، قيد تصادفي رابطه (۱) به صورت قيد قطعي در خواهد آمد. قيد رابطه (۷) به صورت زير به قيد آرماني تبديل مي‌شود:

$$F_{I_t}^{-1}(\alpha_t) + S_{t-1} - R_t - W_t - G_t - EV_t - P_{i,t} + n_{i,t} = S_{max_t} \quad (۸)$$

در رابطه فوق $P_{i,t}$ و $n_{i,t}$ به ترتيب انحرافات مطلوب و نامطلوب از آرمان با اولويت i ام در ماه t مي‌باشند. قيد تصادفي مربوط به کنترل خشکسالي را نيز به صورت زير مي‌توان نوشت:

$$P(S_t \ge S_{\min_t}) \ge \beta_t \quad (۹)$$

بطوريکه $S_{\min_t}$ حداقل ذخيره مجاز مخزن در ماه t و β_t قابليت اعتماد کنترل خشکسالي در ماه t مي‌باشد. قيد تصادفي کنترل خشکسالي نيز همانند قيد کنترل سيل به قيد قطعي معادل تبديل مي‌شود.

۲-۱- استخراج تابع توزيع تجمعي[1] خام و شرطي

در بعضي از مطالعات انجام شده متغيرهاي تصادفي جريان ورودي به مخزن مستقل فرض شده‌اند [۱۵ و ۱۶]. هنگامي‌که بين جريان در دوره‌هاي متوالي همبستگي وجود داشته باشد، مستقل فرض نمودن جريان‌هاي ورودي به مخزن منجر به حل دور از واقعيت مدل مي‌شود. راه حل واقع‌گرايانه‌تر استفاده از تابع

1- Cumulative Distribution Function (CDF)

توزيع تجمعي خام بوده كه از فرايند ماركفي[1] بهره مي‌گيرد. در فراينـدهاي ماركفي احتـمال وقوع وضعيـت I (جريـان ورودي به مخزن) در دوره t فقط به وضعيت آن در دوره t-1 بستگي دارد و به وضعيتهاي قبل از t-1 ربطي پيدا نمي‌كند. در مطالعه حاضـر متغير وضعيت (I) پيوسته در نظر گرفته مي‌شـود (مـدل مـاركف پيوسته). جريانهاي ماهانه ورودي به مخزن چـولگي مشخـصي را به طرف راست نشان مي‌دهند در اين حالـت فركانـسها از توزيـع نرمال تبعيت نخواهند كرد ولـي متغيرهـاي اصـلي غالبـاً از نظـر شكل تابعي داراي فـرم نرمـال مـي‌باشـند و لگاريتمهـاي آنهـا از توزيع نرمال تبعيت مي‌نمايند [۷].

براي استخراج CDF (تـابع توزيـع تجمعـي) نخـست آزمـون نكويي برازش[2] توزيع احتمال جريانهاي ماهانه ورودي به سد بـا استفاده از آزمون نكويي بـرازش كلمـوگرف - اسـميرنوف[3] كـه براي داده‌هاي پيوسته مورد استفاده قرار مي‌گيرد، انجام مي‌شـود و سپس تابع توزيع تجمعي شرطي و خام استخراج مي‌گـردد. بـا فرض توزيع لوگ نرمال براي داده‌هاي ورودي به مخزن، ميانگين شرطي و واريانس شـرطي ماهانـه از روابـط زيـر قابـل محاسـبه هـستند. بـراي بــه دسـت آوردن پارامترهــاي توزيــع از روش گشتاورها استفاده شده است.

$$\mu(y\,|\,x) = \mu_y + \rho\frac{\sigma_y}{\sigma_x}(x-\mu) \quad (۱۰)$$

$$\mathrm{Var}\,(y\,|\,x) = \sigma_c^2 = \sigma_y^2(1-\rho^2) \quad (۱۱)$$

بهطوريكـه در رابطـه‌ي فـوق: $x = Ln\ I_t$ و $y = Ln\ I_{t-1}$، ρ ، همبستگي بين لگاريتم جريانهاي ورودي به مخزن در ماه t و t-1، $\mu(y\,|\,x)$ ، ميـــانگين شــــرطي و $Var\ (y\,|\,x)$، واريانس شرطي مي‌باشد.

متغير نرمال استاندارد شـرطي را بـه صـورت زيـر مـي‌تـوان تعريف كرد.

$$Z_c = \frac{y-\mu\,(y\,|\,x)}{\sigma_c} \quad (۱۲)$$

و تابع توزيع تجمعي شرطي را با استفاده از رابطه زيـر مـي‌تـوان محاسبه نمود:

$$F(y\,|\,x) = \begin{cases} B & Z_c < 0 \\ 1-B & Z_c \geq 0 \end{cases} \quad (۱۳)$$

چاو و همكاران[4] متغير B را با تقريب بسيار خوبي از رابطـه زير محاسبه كرده‌اند [۱۰].

$$B = 0.5\begin{bmatrix} 1 + 0.196854\,(|Z_c|) + 0.115194\,(|Z_c|^2) \\ + 0.000344\,(|Z_c|^3) + 0.019527\,(|Z_c|^4) \end{bmatrix}^{-4} \quad (۱۴)$$

بـراي محاسبـه CDF خام مراحل فوق انجام مـي‌گـردد. بـا اين تفاوت كـه بـه جـاي واريـانس شـرطي و ميـانگين شـرطي، واريانس و ميانگين خام قرار داده مي‌شود. نرم‌افزاري تحت عنوان OSM به زبان فرترن ۷۷ توسط مؤلفين تهيه شده است كه قـادر است كليه محاسبات فوق را انجام دهد. اين نـرم‌افزارتـابع توزيـع تجمعي خام و شرطي را محاسبه مي‌كند و به ازاي قابليت اعتماد معين كنترل سيل و خشكسالي (β ,α) معكوس تـابع توزيـع تجمعـي خـام و شـرطي را از روش درون‌يـابي تفاضـلات نيـوتن استخراج مي‌كند. علاقه‌منـدان، نـرم‌افـزار OSM را مـي‌تواننـد از مؤلفين دريافت نمايند.

۳- مدل برنامه‌ريزي آرماني با قيدهاي تصادفي

براي بهينه‌سازي عملكرد يك سد با اهداف تأمين آب شـرب، كشاورزي، توليد انرژي الكتريكي و كنتـرل سـيلاب، تـابع هـدف مدل را به صورت زير مي‌توان نوشت:

$$\text{Minimize}\quad Z = P_1\sum_{t=1}^{T} n_{1,t} + P_2\sum_{t=1}^{T} n_{2,t} + P_3\sum_{t=1}^{T} n_{3,t} + P_4\sum_{t=1}^{T} n_{4,t} \quad (۱۵)$$

بـهطوريكه T افق ديـد برنامه‌ريزي، P_i نشان دهنـده ترتيب اولويت و $n_{i,t}$ انحراف نامطلوب از آرمان i در دوره t مي‌باشد.

اولويتهاي سيستم را مي‌تـوان بـه ترتيـب تـأمين آب شـرب، كشاورزي ، توليد انرژي الكتريكي و كنترل سيلاب در نظر گرفت.

1- Markov process
2- Goodness-of Fit Test
3- Kolmogorov-Smirnov
4- Chow et al

قيدهاي اين مدل در دو گروه قيدهاي فيزيكي و آرماني قرار دارند. قيدهاي فيزيكي بايد به طور كامل برآورده شوند، در حاليكه در قيدهاي آرماني خواست برنامه‌ريز دست‌يابي به آرمان مربوطه است، ولي اجباري بر آن نمي‌باشد. همچنين قيدهاي مدل مي‌توانند به صورت قطعي يا احتمالي به شرح زير مطرح گردند:

قيد آرماني مربوط به تأمين آب شرب شهري

$$W_t - P_{1,t} + n_{1,t} = MTAR_t \quad (۱۶)$$

قيد آرماني مربوط به تأمين آب مورد نياز كشاورزي

$$IR_t - P_{2,t} + n_{2,t} = IRTAR_t \quad (۱۷)$$

قيد آرماني مربوط به توليد انرژي الكتريكي

$$R_t.\xi_t - P_{3,t} + n_{3,t} = PTAR_t \quad (۱۸)$$

قيد آرماني مربوط به كنترل سيل

$$F^{-1}(\alpha_t)+S_{t-1}-R_t-W_t-G_t-EV_t-P_{4,t}+n_{4,t}=S_{\max_t} \quad (۱۹)$$

قيد آرماني مربوط به خشكسالي

$$F^{-1}(1-\beta_t)+S_{t-1}-R_t-W_t-G_t-EV_t-P_{5,t}+n_{5,t}=S_{\min_t} \quad (۲۰)$$

و قيدهاي فيزيكي مدل به صورت روابط زير ارائه مي‌شود:

$$S_{\min} \le S_t \le S_{\max} \quad (۲۱)$$

$$R_t.\xi_t \le h_t.P_{\max_t} \quad (۲۲)$$

$$R_t + G_t = D_t \quad (۲۳)$$

$$IR_t \le D_t \quad (۲۴)$$

$$W_t \le W_{\max} \quad (۲۵)$$

$$IR_{\min} \le IR_t \le IR_{\max} \quad (۲۶)$$

به‌طوري‌كه در روابط فوق MTAR تقاضاي آب شرب و صنعت، PTAR تقاضاي آب كشاورزي، PTAR توان الكتريكي مورد انتظار برحسب ميليون‌كيلووات، $W_{\max}$ ظرفيت تصفيه‌خانه آب شهر، $IR_{\min}$ و $IR_{\max}$ به ترتيب حداقل و حداكثر ظرفيت كانالهاي آبياري، $S_{\min}$ و $S_{\max}$ به ترتيب حداقل و حداكثر ظرفيت مجاز مخزن مي‌باشند. كليه عوامل ذكر شده برحسب ميليون‌متر مكعب مي‌باشند. h_t تعداد ساعات بهره‌برداري شده در دوره t، α و β به ترتيب قابليت اعتمادهاي مربوط به كنترل سيلاب و خشكسالي مي‌باشند. عوامل W_t، IR_t، R_t، G_t و D_t به ترتيب آب تخليه شده جهت تأمين آب شرب و صنعت، كشاورزي، توليد انرژي الكتريكي، آب اضافي از سرريز سد و جريان رودخانه در پايين دست سد در دوره‌ي t بر حسب ميليون‌متر مكعب مي‌باشد. همچنين ξ_t شدت توليد انرژي الكتريكي در دوره t برحسب مگاوات ساعت و $P_{\max_t}$ ظرفيت توليد مولدها در دوره t برحسب مگاوات مي‌باشد. براي مخازن با سطح نسبتاً بزرگ، شدت توليد انرژي الكتريكي و ظرفيت توليد مولدها را به صورت تابعي از حجم ذخيره مخزن و به شرح زير مي‌توان نوشت:

$$\xi_t = a + bS_{t-1} \quad (۲۷)$$

$$P_{\max_t} = c + dS_{t-1} \quad (۲۸)$$

در روابط فوق a، b، c و d ضرايب حاصل از رگرسيون معادلات فوق مي‌باشند. در رابطه‌هاي (۱۸) و (۲۲) به جاي ξ_t و $P_{\max_t}$ معادل‌شان از رابطه‌هاي (۲۷) و (۲۸) قرار داده مي‌شود.

براي حل مدل برنامه‌ريزي آرماني با قيدهاي تصادفي، كه تابع هدف آن رابطه (۱۵) و قيدهاي آن روابط (۱۶) الي (۲۶) مي‌باشد، ابتدا قيدهاي تصادفي را به معادل قطعي آنها تبديل می‌شود و سپس با استفاده از الگوريتم برنامه‌ريزي آرماني [۳]، تابع هدف به تعداد اولويتهاي موجود در آن به مدلهاي برنامه‌ريزي غيرخطي تبديل مي‌گردد. هر يك از اين مدلهاي غيرخطي به ترتيب اولويت و با استفاده از روش جهات امكان‌پذير حل مي‌شوند. بهطوريكه پس از حل اولين مدل نتيجه

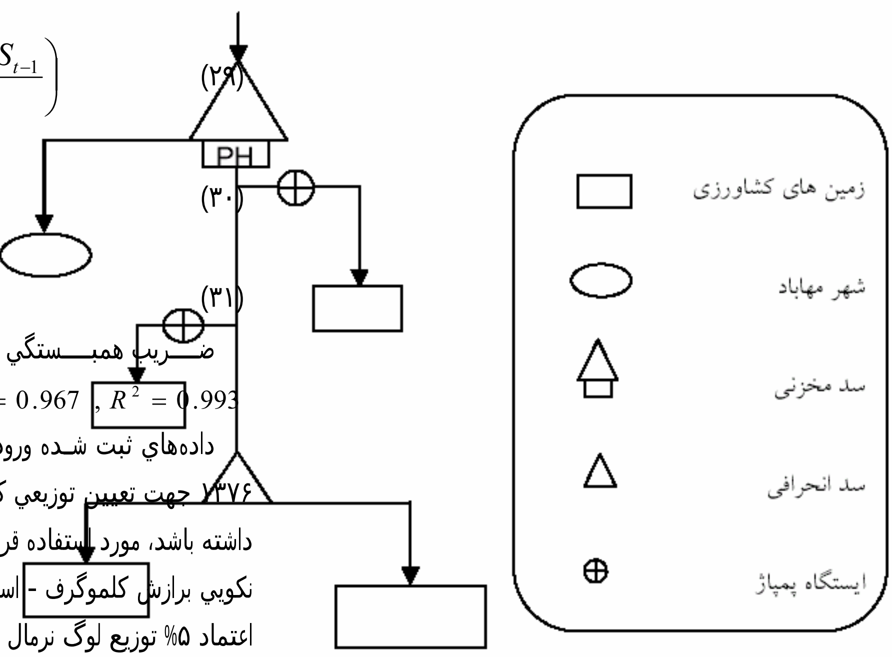
آن به عنوان قيد در مدل بعدي منظور مي‌گردد. از حـل آخـرين مدل برنامه‌ريزي غير خطي نتايج نهايي مدل برنامه‌ريزي آرمـاني با قيدهاي تصادفي حاصل مي‌گردد.

بـــراي تبـــديل مـــدل تـــصادفي بـــه معـــادل قطعـــي آن نرم‌افزاركامپيوتري OSM به زبان فرترن ۷۷ تهيه شده است و بـه عنوان يك زيربرنامه براي نرم‌افزار بهينه‌سازي DOT معرفي شـده است. نرم‌افزار DOT مـدلهاي برنامـه‌ريـزي غيرخطـي را از روش جهات امكان‌پذير حل مي‌كند.

۴- كاربرد مدل جهت برنامه‌ريزي سد مخزني مهاباد

حوضه آبريز رودخانه مهابـاد يكـي از زيـر حوضـه‌هـاي مهـم درياچه‌ي اروميه واقع در آذربايجان غربي مي‌باشد. ايـن سيـستم شامل سد مخزني مهاباد در يك كيلومتري شمال شـهر مهابـاد و سد انحرافي پايين دست آن در محل روستاي يوسف‌كنـد اسـت. اهداف سيستم تهيه آب شـرب شـهر مهابـاد تـأمين آب ۱۸۰۰۰ هكتار اراضي كشاورزي، توليد انـرژي الكتريكـي و كنتـرل سـيل مي‌باشد. مخزن اين سد داراي حجم فعال۱۸۰ و حجـم مـرده۴۰ ميليون متر مكعب است. آب خروجي از سد در مسير رودخانـه از داخل شهر عبور كرده و پـس از آب‌گيـري دو ايـستگاه پمپـاژ از رودخانه، وارد سد انحرافي پايين دست مي‌شـود. بعـد از انحـراف آب بـه كانـالهاي اصلـي شبـكه، مازاد آن سرريـز شـده و نهايتـاً بـه درياچه اروميـــه مـــي‌ريـــزد. سيـــستم آبي رودخانـــه مهابـاد به صورت شماتيك در شكل (۲) نشان داده شده است. اطلاعـات دقيقي در مورد مقدار حجم پرشده مخزن به وسـيله رسـوبات در دست نمي‌باشد، تنها در سال ۱۳۵۵ گروه اعزامي آبهاي سـطحي دفتر بررسيهاي منابع آب وزارت نيرو از پشت سد تا انتهـاي هـر دو شاخه دهبكر و بيطاس را به ۵٤ مقطع تقسيم نمودند و در هر مقطع عمق‌سنجي كرده و مقدار رسوب ورودي در طـول ۶ سـال به مخزن سد را ۷/۴۰۴/۰۰۰ مترمكعب برآورد كردند كه متوسط رسوب گيري سالانه آن ۱/۲۳۴/۰۰۰ مترمكعب مي‌شـود. بـا ايـن برآورد با گذشت ۳۲ سال از زمـان بهـره‌بـرداري از سـد، مقـدار حجم پرشده مخزن ۳۹/۴۹ ميليون‌متـر مكعـب مـي‌باشـد. البتـه بايستي به اين نكته توجه كرد كه پرشدن قسمتي از حجم مـرده باعث كندي سرعت پر شدن خواهد گرديد [۶].

با استفاده از اطلاعات مربوط به سيستم آبي رودخانه مهابـاد و سد مخزني آن تحليل رگرسـيون معـادلات (۵) ، (۲۷) و (۲۸) انـجام گرفته است. با مشخص شدن ضرايب ثابت ايـــن معـادلات به صورت زير كاليبره شده‌اند:



شكل ۲- نمودار شماتيك سيستم آبي رودخانه‌ي مهاباد

$$A_t = 3.303 + 0.038\left(\frac{S_t + S_{t-1}}{2}\right) \quad (۲۹)$$

$$\xi_t = 28.926 + 0.3964\, S_{t-1} \quad (۳۰)$$

$$P_{\max_t} = 2.66 + 0.026\, S_{t-1} \quad (۳۱)$$

ضـــرايب همبـــستگي معـــادلات فـــوق بـــه ترتيـــب $R^2 = 0.993$, $R^2 = 0.967$ و $R^2 = 0.984$ مي باشد.

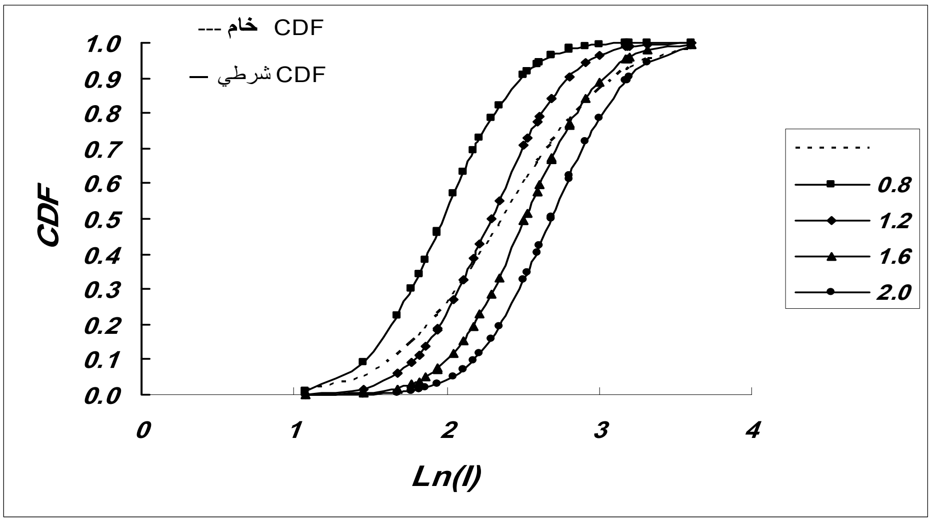
داده‌هاي ثبت شـده ورودي بـه سـد بـين سـالهاي ۱۳۴۳ و ۱۳۷۶ جهت تعيين توزيعي كه بهترين برازش را براي همه ماهها داشته باشد، مورد استفاده قرارگرفتند. كيفيت بـرازش بـا آزمـون نكويي برازش كلموگرف - اسميرنوف تست گرديد كـه در سـطح اعتماد ۵% توزيع لوگ نرمال با داده‌ها برازش خيلـي خـوبي دارد. فضاي خالي موردنياز جهت كنترل سيل را ميتوان بـا اسـتفاده از

تجزيه و تحليل هيدروگرافهاي جريـان ورودي بـه مخـزن سـد و جريان خروجي از مخزن سد محاسبه نمود. براي رسيدن به يـك برآورد مقدماتي فـضاي خـالي موردنيـاز جهـت كنتـرل سـيل را مي‌توان از منحني دوام حجم سيلاب نيز محاسـبه نمـود. فـضاي خالي جهت كنترل سيل بـراي سـد مخزنـي مهابـاد در ماههـاي بهمن، اسفند، فروردين و ارديبهشت به ترتيب ۲۷، ۵۲، ۸۹ و ٢٦ ميليون‌متر مكعب برآورد شـده اسـت. در جـدول (۱) مشخـصات جريان ورودي به مخزن سد در ماههاي مختلف نشان داده شـده است. مشاهده مي‌گردد كه در همه ماهها همبستگي‌تـك تـأخيره (يـك مرحلـه قبـل) جريانهـاي ورودي بـه سـد معنـي‌دارتـر از همبستگي دو تأخيره است. به همين دليل در اين مطالعه از مدل ماركفي كه همبستگي تك‌تأخيره را بـين سكانـسهاي متـوالي در نظر مي‌گيرد استفاده شده است.

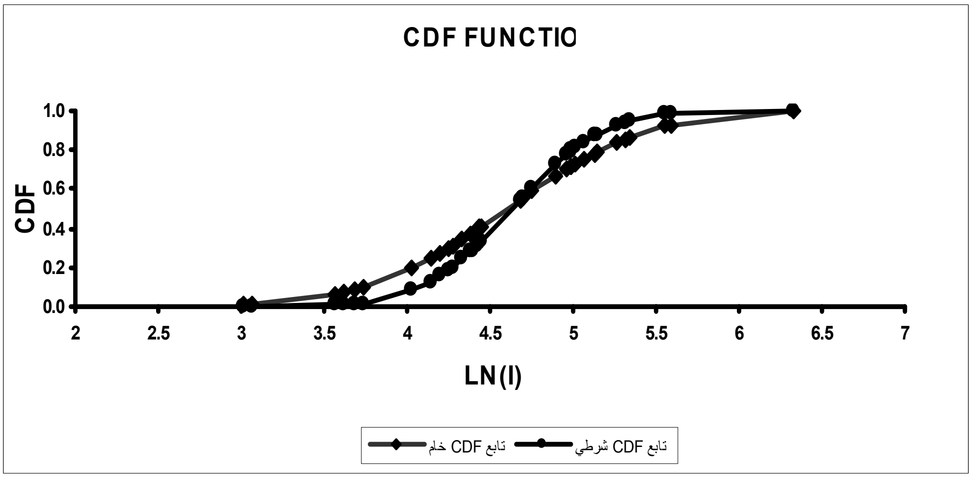
با اسـتفاده از مـدل ارائـه شـده توسـط فايرينـگ و جكـسون [۱۲]براي افـق ديـد برنامـه‌ريـزي يكـساله بـا دوره‌هـاي ماهانـه، شبيه‌سازي جريان انجام گرفته است و مقادير شـبيه‌سـازي شـده جهت محاسبه تابع توزيع تجمعي خام و شـرطي مـورد اسـتفاده قرار گرفته‌اند. در شـكل (۳) تابع توزيع تجمعـي خـام و شـرطي جريانهاي ورودي بـه مخـزن بـراي مـاه شـهريور براسـاس چهـار مقدار معلوم ۰/۸، ۱/۲، ۱/٦ و ۲ ميليون‌متر مكعب در مـاه مـرداد نشان داده شده است. در شكل (۴) CDF شرطي و خام براي مـاه آذر بر مبناي جريان ورودي پيشبيني شـده آبـان مـاه اسـتخراج شده است. اين منحنيها با استفاده از برنامه‌ي OSM تهيـه شـده اند، مقايسه بين منحنيهاي تابع توزيـع تجمعـي شـرطي و خـام نشان مي‌دهد كه اگر جريان ورودي به مخـزن سـد در مـاه قبـل بيش از ميانگين جريان ورودي در آن ماه باشد، اسـتفاده از تـابع توزيع خام منجـر بـه بـرآورد كمتـر از مقـدار واقعـي و بـالعكس مي‌شود.

جدول ۱- مشخصات جريانهاي ورودي به سد مهاباد در ماههاي مختلف سال برحسب ميليون‌متر مكعب

ماه	متوسط	انحراف معيار	چولگي	همبستگي تك تأخيره (ماه t و $t+1$)	همبستگي دوتأخيره (ماه t و $t+2$)
فروردين	۱۰۵/۷۸	۵۶/۲۸۱	۱/۱۱۶	۰/۵۷۶	۰/۴۲۳
ارديبهشت	۶۱/۱۹۲	۳۴/۵۵۱	۱/۸۰	۰/۸۸۳	۰/۷۴۷
خرداد	۱۲/۱۵۳	۹/۶۷۷	۳/۱۸	۰/۸۴۰	۰/۴۴۵
تير	۳/۰۶۹	۱/۳۲۷	۱/۳۳۶	۰/۶۱۷	۰/۲۷۵
مرداد	۱/۴۹۹	۰/۸۳۲	۱/۲۰۱	۰/۶۶۰	-۰/۰۱۱
شهريور	۱/۱۷۵	۰/۶۲۳	۰/۸۴۶	۰/۰۱۸	-۰/۳۸
مهر	۱/۴۹۸	۰/۶۵۰	۰/۷۸۸	۰/۱۰۶	۰/۰۷۲
آبان	۵/۵۶۷	۵/۳۴۲	۲/٤۲۳	۰/۶۸۸	۰/۶۷۱
آذر	۱۱/۰۳۹	۹/۶۴۳	۱/۳۵۳	۰/۷۱۳	۰/۵۶۰
دي	۱۶/۷۲۹	۱۶/۹۸۰	۱/۹۸۱	۰/۶۵۳	۰/۶۳۴
بهمن	۲۰/۳۱۰	۱۵/۸۴۶	۱/۳۵۴	۰/۳۶۶	۰/۱۷۴
اسفند	۵۶/۳۰۸	۴۴/۰۱۷	۲/۴۴	۰/۶۱۰	۰/۱۵۰



شكل ۳- تابع توزيع تجمعي خام و شرطي ماه شهريور براساس چهار مقدار معلوم ورودي ماه مرداد (I برحسب 10^5 مترمكعب و چهار مقدار ذكر شده برحسب ميليون مترمكعب)



شكل ۴- تابع توزيع تجمعي خام و شرطي ماه آذر بر اساس جريان پيش‌بيني شدة ماه آبان

براي تبديل قيد تصادفي روابط (۱) و (۹) به قيد قطعي معادل خود در ماههاي شهريور و آذر مي‌توان از اين منحنيها استفاده نمود. به عنوان مثال براي قابليت اعتماد كنترل سيل (α) ۰/۹ براي ماه شهريور، مقدار معكوس تابع توزيع تجمعي خام ($F_{I_t}^{-1}(\alpha)$) معادل ۲/۲۰۹ ميليون‌مترمكعب و به ازاي همين قابليت اعتماد و با فرض جريان ورودي برابر ۱/۶ميليون‌متر مكعب براي ماه مرداد، معكوس تابع توزيع تجمعي شرطي از شكل (۳) معادل ۲/۰۰۸۵ خواهد بود با قرار دادن مقادير $F_{I_t}^{-1}(\alpha)$ در رابطه‌ي (۸) قيد تصادفي به قيد قطعي معادل خود تبديل مي‌شود. در اين مطالعه CDF ماههاي شهريور و آذر به عنوان مثال نشان داده شده‌اند، براي ديگر ماههاي سال نيز مي‌توان منحنيهاي CDF خام و شرطي را استخراج نمود.

مقادير تقاضا براي آب شرب شهري، آبياري، توان موردانتظار انرژي الكتريكي و فضاي خالي موردنياز جهت كنترل سيل در جدول (۲) نشان داده شده است.

مدل برنامه‌ريزي آرماني با قيدهاي تصادفي جهت بهينه‌سازي عملكرد سيستم آبي سد مهاباد مورداستفاده قرارگرفت. نتايج حاصل از مدل در جدول (۳) نشان داده شده است.

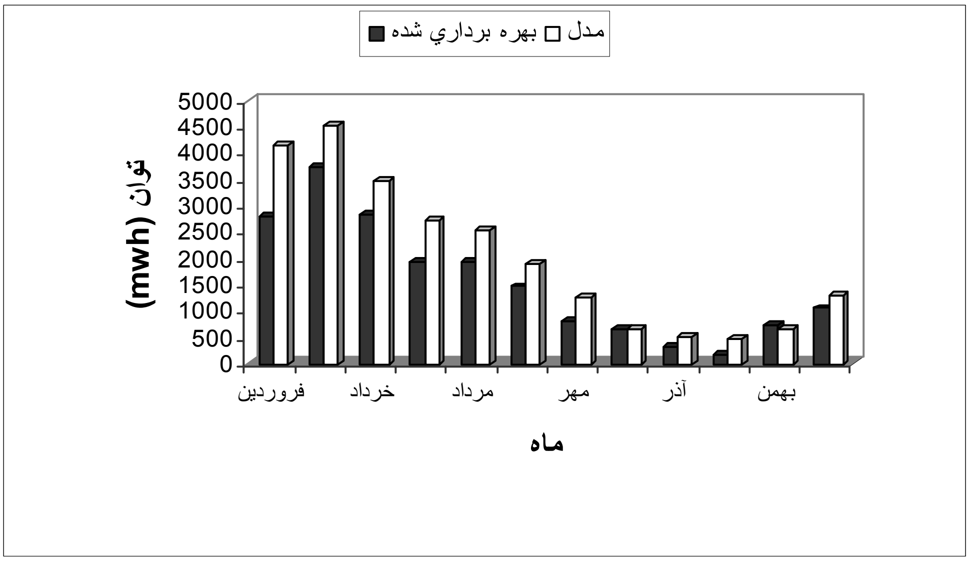
جدول ۲- مقادير تقاضا براي اهداف متعدد سيستم آبي رودخانه مهاباد در ماههاي مختلف سال برحسب ميليون‌متر مكعب

ماه	MTAR آب شرب شهري	IRTAR آب آبياري	PTAR(mwh) توان انرژي‌الكتريكي مورد انتظار	FC فضاي خالي مورد نياز جهت كنترل سيل
فروردين	۱/۲۴۱	۵/۲۶	٤١٣٦	۸۹
ارديبهشت	۱/۲۴۱	۲۵/۳۷۹	۴۵۱۶	۲۶
خرداد	۱/۲۴۱	۳۱/۳۴۱	۳۴۶۸	-
تير	۱/۳۳۹	۲۷/۸۵۹	۲۴۲۳	-
مرداد	۱/۳۳۹	۲۸/۹۶۲	٢٤٢٣	-
شهريور	۱/۳۳۹	۲۵/۰۱۹	١٦٧٧	-
مهر	۱/۱۶۶	۱۹/۱۲۳	۹۰۴	-
آبان	۱/۱۶۶	۷/۵۶	۸۳۵	-
آذر	۱/۱۶۶	-	۶۸۹	-
دي	۱/۰۷۳	-	۶۶۳	-
بهمن	۱/۰۷۳	-	۱۰۴۹	۲۷
اسفند	۱/۰۷۳	-	۱۳۱۰	۵۲

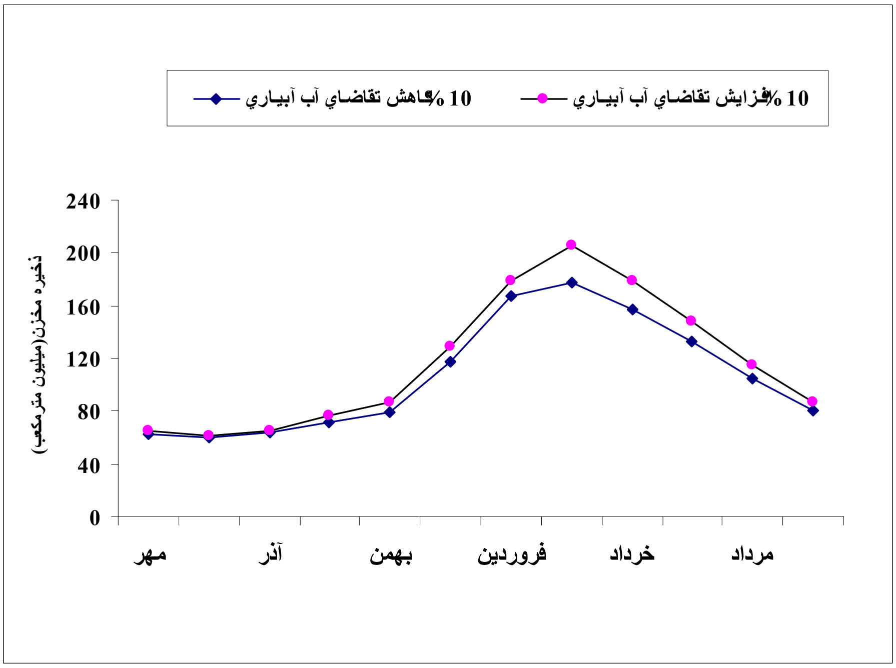
جدول۳- نتايج حاصل از مدل برنامه‌ريزي آرماني با قيدهاي تصادفي براساس سد چند منظوره مهاباد

ماه	W	IR	R	G	S	E (mwh)
فروردين	۱/۳۷۶	۵/۲۶	۵۱/۹۲۷	۸/۸۰۶	۱۸۶/۱۵۶	۴۱۳۶
ارديبهشت	۱/۲۴۱	۲۵/۳۷۹	۴۳/۸۶۸	۰	۱۹۴/۱۷۱	۴۵۱۵/۹۸
خرداد	۱/۲۴۰	۳۱/۳۴۱	۳۲/۶۹۸	۰	۱۷۴/۳۸۵	۳۴۶۸/۰۳
تير	۱/۳۸۸	۲۷/۵۸۹	۲۷/۸۵۹	۰	۱۴۸/۰۹۳	۲۷۴۰/۳۷
مرداد	۱/۳۳۱	۲۸/۹۶۲	۲۸/۹۶۲	۰	۱۱۶/۲۳۶	۲۵۵۲/۶۶
شهريور	۱/۳۲۴	۲۵/۰۱۹	۲۵/۰۱۹	۰	۸۹/۲۰۴	۱۹۰۰/۲۳
مهر	۱/۱۶۵	۱۹/۱۲۲	۱۹/۱۲۲	۰	۶۸/۷۶۹	۱۲۴۷/۳۳
آبان	۱/۱۶۴	۷/۵۶	۱۱/۲۸۴	۰	۶۱/۲۴۶	۶۴۶/۳۶
آذر	۱/۱۶۲	۰	۹/۶۴	۰	۶۲/۹۰۱	۵۲۳/۹۸
دی	۱/۰۶۹	۰	۸/۶۷۱	۰	۷۱/۲۹۵	۴۷۶/۸۹۲
بهمن	۱/۰۷	۰	۱۱/۶۴۳	۰	۸۶/۹۴۳	۶۷۸/۳۶۵
اسفند	۱/۰۷۲	۲/۳۸۹	۲۰/۳۵۷	۰	۱۲۶/۲۷۳	۱۳۱۰
مجموع						۲۴۱۹۶/۱۹

نتايج مندرج در اين جدول بيانگر اين واقعيت است كـه نيـاز آب شرب و كشاورزي در تمام ماههـاي سـال تـأمين گرديـده اسـت. مقدار انرژي الكتريكي طي افق ديد برنامه‌ريزي يك ساله معـادل ٢٤١٩٦/١٩ مگاوات ساعت مـي‌باشـد. مقـادير انـرژي الكتريكـي حاصل از مدل و ميانگين انرژي الكتريكي بهـره‌بـرداري شـده در سالهاي ۱۳۷۳ الي ۱۳۷۶ در شـكل (۵) نـشان داده شـده اسـت. مقايسه آنها نشان مي‌دهد كه مقادير انرژي الكتريكـي بـه دسـت آمده از مدل در بيشتر ماهها بـيش از ميـزان بهـره‌بـرداري شـده مي‌باشد. شكل (۶) مقادير بهينه ذخيره مخزن را به ازاي افـزايش و كاهش ۱۰% به آب موردنياز آبياري (IRTAR) نشان مي‌دهد.



شكل ۵- مقايسه مقادير انرژي الكتريكي محاسبه شده از مدل با مقادير ميانگين بهره‌برداري شده در سالهاي ۱۳۷۶-۱۳۷۳ نيروگاه سد مهاباد



شكل ۶- مقايسه مقادير بهينه ذخيره مخزن به ازاي افزايش و كاهش ۱۰% آب موردنياز آبياري

در اين شكل مشاهده مي‌شود كه به ازاي افزايش و كـاهش ۱۰% بـه آب موردنيـاز كـشاورزي در ماههـاي فـروردين و ارديبهـشت فضاي خالي موردنياز جهت كنترل سيل به دليل رقابـت موجـود بين اهداف متعدد سيستم بـاقي نخواهـد مانـد (قابليـت اعتمـاد كنترل سيل ۹۰% مي‌باشد و به احتمال ۱۰% قيد مي‌توانـد نقـض شود)، لذا در شرايط كنـوني بـه هـيچ وجـه نمـي‌تـوان تقاضـاي موردنياز آبياري را افزايش داد.

۵- نتيجه‌گيري

در اين مطالعه روش تبديل مدل تصادفي بهينه‌يابي عملكـرد مخزن يك سد چند منظوره به مدل قطعي معادل مـورد بررسـي قــرار داده شـده اسـت. بـراي آزمـون كـارايي روش، سيــستـم رودخانه - مخزن مهاباد مورد مطالعه قرار گرفته است. با استفاده از داده‌هاي مربـوط بـه سـد مخزني مهاباد، قيد تـصادفي مربـوط به كنترل سيل مخزن به ازاي قابليت اعتماد ۰/۹ به قيـد قطعـي معادل تبديل شده است. جهت كارايي هرچه بيشتر مدل نرم‌افزار كامپيوتري به زبان فرترن ۷۷ تهيه شده است كه با استفاده از آن مي‌توان براي همه ماه‌ها، منحنيهايي شـبيه بـه شـكل (۳) و (۴) استخراج نمود. براي به دست آوردن نتـايج واقـع‌گرايانـه توصـيه مي‌شود همبستگي بـين سـكانس جريـان ورودي بـه مخـزن در دوره‌هاي متوالي مدنظر قرار گيرد.

جداول و منحنيهاي ارائه شده اسـت كـه مـديريت مخـزن را قادر مي‌سازد در شرايط مختلف برنامه‌ريزي واقع‌گرايانـه‌اي ارائـه دهد. به دليل محافظه‌كارانـه بـودن سياسـتهاي اعمـال شـده در سيستم، خصوصاً اين كه در ماههاي سيلابي تخليـه‌هـا اضـافي از سرريز و دريچه‌هاي اضطراري انجام مـي‌گيـرد، در بيـشتر ماههـا مقادير انرژي الكتريكي به دسـت آمـده از مـدل بـيش از ميـزان بهره‌برداري شده مي باشد با افزايش تقاضـاي تـأمين آب آبيـاري فضاي خالي موردنياز براي كنترل سيلاب كـاهش يافتـه و توليـد انرژي الكتريكي افزايش مي‌يابد.

مراجع

[1] Changchit. C., and M. P. Terrel. 1989. CCGP model for multiobjective reservoir systems., J. W. R Plng and Mgmt, ASCE, 115 (5). 658-670.

[2] Changchit. C., and M. P Terrel. 1993. A multiobjective reservoir operation model with stochastic inflows. Computers Ind. Eng. 24 (2): 303-313.

[3] Chow. V. T., Madiment. D.R and Mays. L.W. 1988. Applied hydrology. McGraw-Hill Book-Company.

[4] Dandy, G. C., M. C. Connarty., and D. P Loucks. 1997. Comparison of methods for yield assessment of multiple reservoir., J. W. R Plng. and Mgmt, ASCE, 123(6) .350-358.

[5] Fiering, M. B., and Jackson, B. B. synthetic stream flows. Water Resources monograph, Number1. American Geophysical union. Washington, D. C. 1971.

[6] Loucks D.P. 1980. Discrete chance constrained model for river basin planning., International symposium on stochastic programming.

[7] Marino. M.A., and B. Mahammadi. 1983. Reservoir management, reliability programming approach. Water Resour. Res. 19 (3). 613-617.

[8] Simonovic, S.P., and M. A. Marino, 1982. Reliability programming in reservoir management, 3, system of multipurpose reservoirs. Water Resour Res, 18 (4). 735-743.

[9] Srinivasan, R., and S.P. Simonovic, 1994 .A Reliability programming model for hydropower optimization… con. J. civ. Eng. 21. 1061-1073.

[١٠] افشار، ع و ح. مرادخاني، تخصيص مجدد بهينـه ظرفيتهـاي ذخيره اصلي و كنتـرل سـيلاب در مخـازن چنـد منظـوره، مموعـه مقـالات كنفـرانس منطقـه‌اي منـابع آب، ايـران، اصفهان، ۱۳۷۴.

[۱۱] باراني، غ. م. خانجاني و ع. محمدپور، بهينـه‌سـازي عملكـرد مخازن سدهاي چند منظوره با استفاده از مدل برنامه‌ريـزي آرمـاني بـا قيـدهاي تـصادفي، مجموعـه مقـالات پنجمـين كنفرانس بين‌المللي عمران، ايران، مشهد، ۱۳۷۹.

[۱۲] باراني، غ. م.خانجاني و ع. محمدپور، بهينه‌سازي بهره‌برداري از مخـازن سـدهاي چنـد منظـوره بـا اسـتفاده از مـدل برنامه‌ريزي آرماني(قطعي)، مجله علوم و صنايع كـشاورزي، ايران، مشهد، ۱۳۷۹.

[۱۳] راهنمـاي مطالعـات طرحهـاي كنتـرل سـيلاب، اسـتاندارد مهندسي آب، نشريه شماره ۱۰، ۱۳۷۱.

[١٤] قادري، جميل، مديريت براي افـزايش رانـدمان شـبكه‌هـاي آبياري و زهكشي و بهينه كردن الگوي مصرف آب، مجموعه مقالات اوّلين كنفرانس علمي تحقيقاتي بهينه‌سازي مصارف آب، سازمان آب مصرفي استان تهران، ۱۳۷۹.

[۱۵] محمدپور، عثمان، بهينه‌سازي سيستم بهره‌برداري سـدهاي چنـد منظـوره بـا اسـتفاده از مـدلهاي قطعـي و تـصادفي برنامه‌ريزي آرماني، پايـان‌نامـه كارشناسـي ارشـد دانـشكده كشاورزي دانشگاه كرمان، ۱۳۷۸.

[١٦] موحد دانش، علي اصغر، مقدمه‌اي بر هيدرولوژي، جلد دوم، انتشارات عميدي، تبريز، ۱۳۶۷.