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 آبياری، 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 ملـي و امنيتي هر كشوري محسوب مي‌گردد و از آنجاكه توليد غـذا به طور فرآينده‌اي به عرضه‌ي آب بستگي دارد، امنيت غذايي رابطـة 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 زيـست محيطـي اسـت موجـب شـده است تا حداكثر استفاده از منابع آب موجود و افزايش بهره‌وري و بالطبع افزايش توليد در واحد سطح مطرح شود. بديهي است كـه آبهاي استحصال شده فعلي و آب قابل استحصال پاسخگوي روند توسعه كشاورزي و تأمين مواد غذايي جمعيت رو به رشد جامعـه نخواهد بود، لذا آنچه در ايـن زمينـه اهميـت مـي‌يابـد مـديريت مصرف و بهره‌برداري بهينه همراه با مديريت تقاضـا در بخـشهاي مختلف شرب، كشاورزي و محيط‌زيست مي‌باشد تا توسعة پايـدار در كلية بخشهاي اقتصادي را امكان‌پذير سازد [۵].

بسياري از پديده‌هاي هيدرولوژيكي چون رواناب،[1] ميـزان و شدت سيلاب، دبي رودخانه و غيـره پديـده‌هـايي هـستند كـه از عوامل بيشماري تأثير مـي‌پذيرنـد و مـستعد پيـروي از مـدلهاي قطعـي نيستنـد. در اين پـديـده‌ها استفاده از روشـهاي آمـاري و بـه كـارگيري مـدلهاي احتمـالي، سـودمندي خـود را بـه اثبـات رسانده‌اند [۷]. در صورتيكه اطلاعات آماري كافي در اختيار باشد مي‌توان مـدلي بـه دسـت آورد كـه از آن بتـوان بـراي محاسـبة احتمـال واقـع شـدن مقـدار آينـده‌اي از پديـده در درون حـدود مشخصي استفاده كـرد. در تعيـين سياسـتهاي بهينـه عمـلكـرد مخازن پشت سدها كه تخليه مطلوب را به صورت تابعي از ذخيره مخزن و جريان آب ورودي به مخزن در نظر مي‌گيرنـد، مـدلهاي برنامهريزي با روشهاي مختلفي مـورد اسـتفاده قـرار گـرفتهانـد. بيشتـر اين مـدلها طبيـعت تصادفـي جريان ورودي به مخـزن را در نظر مـيگيرند. ايده اصلي در حل برنامه‌ريزي تـصادفي تبـديل بـه مدل قطعي معادل با آنها است. آنگاه مدل قطعـي حاصـل بـا استفاده از روشهاي آشنايي مانند برنامهريزي خطـي، دينـاميكي، آرماني، هندسي و غيرخطي حل مي‌شود. برنامه‌ريزي با قيـدهاي تصادفي[2] (CCP) يكي از مدلهايي است كه براي اسـتفاده حـائز اهميت است. قيدهاي تصادفي همراه مـدلهاي‌خطـي، غيرخطـي، ديناميكي و آرماني مي‌تواننـد بـه كـار رونـد. لاكـس[3] دو مـدل قيدهاي تصادفي گسسته را بـراي برنامـه‌ريـزي حوضـه رودخانـه دلاوار[4] در آمريكـا و حوضـه رودخانـه مـوريس[5] در رومـاني گسترش داد. او نشان داد كه مي‌توان تعدادي از آرمانها و اهـداف برنامه‌ريـزي سيـستم حوضه رودخانـه را با قيدهاي تصادفي كه محدوده و قابليت اعتماد جريان را مشخص مي‌كنـد بـه بهتـرين نحو ارائه نمود [۱۳]. سيمونويچ و مارينو[6] تكنيـك برنـامهريـزي براساس قابليت اعتمـاد[7] را جهـت برنامـه‌ريـزي بهـره‌بـرداري از سيستم مخازن (سه مخزن) رودخانه سرخ در اوكلاهامـا بـه كـار گرفتند. اين روش مي‌تواند براي برنامه‌ريزي مخازن چند منظـوره با جريانهاي ورودي تصادفي و همچنين تقاضاهاي تصادفي مـورد استفاده قرار گيرند [۱۵]. چانچيت و ترل[8] يك مدل رياضـي بـا سه مشخصه مهم چند منظوره بودن، تـصادفي بـودن ورودیهـاي مخزن و طبيعت سيستم مخـازن بـا مقيـاس بـزرگ را گـسترش دادنـد [۹]. سرينيواسـان و سـيمونويچ[9]، تكنيـك برنامـه‌ريـزي قابليــت اعتمـاد را بـراي بهينـه‌سـازي عمـلكـرد سيـستم آبــي مونيتابا[10] با اهداف توليد نيروي بـرق آبـي و كنتـرل سـيلاب را گسترش دادند و مورد استفاده قرار دادند. اين مدل فوايد ناشي از توليد نيروي برق آبي را حـداكثر مـی‌نمايـد و افتهـاي اقتـصادي حاصل از عدم تأمين قابليت اعتماد موردنياز براي دو هدف اصلي مخزن را به حداقل مـي‌رسـاند [۶]. در مـدلهاي برنامـه‌ريـزي بـر مبناي قابليت اعتماد، نگرش كلي بر قابليت اعتمادهايي است كـه بـه عنـوان متغيـر تـصميم در نظـر گرفتـه مـي‌شـود. دانـدي و همكاران[11] چــهار روش مختــلف را بــراي بــرآورد بـازدهــي سيـستـم مخـازن كانبرا[12] در استـراليـا بـه كـار گرفتنـد. ايـن چهـار روش عبـارت بودنـد از: شـبيه‌سـازي، مـدل تركيبـي از بهينهسازي و شبيـه‌ســازي (WATHNET)، مـدل بهينـه‌سـازي كامل[13] و مدل بهينه‌سـازي سـاده شـده[14] كـه مـدل بـازدهي

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 که 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 کارآيي 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 کنترل سيل خالي نگه داشته مي‌شود، تا براي دريافت آب حاصل از پيك سيلاب آماده باشد. ظرفيتي از مخزن که به مهار طغيانها تخصيص مي‌يابد فقط آن دسته از سيلابهايي را ذخيره مي‌کند که در صورت تخليه به پايين دست خسارات عمده‌اي پديد مي‌آورد [۴]. شکل (۱) نواحي مختلف ذخيره مخزن را نشان مي‌دهد. در اين شکل ذخيره مخزن به چهار ناحيه ذخيره‌ي مرده[1]، ذخيره موقت[2]، ذخيره متناظر با اهداف حفظ آب[3] و ذخيره کنترل سيل[4] تقسيم شده است. در مدلهاي برنامه‌ريزي بر مبناي قابليت اعتماد و قيدهاي تصادفي به منظور کنترل سيل و خشکسالي از قيدهاي احتمالاتي (تصادفي) استفاده مي‌شود. قيدهاي تصادفي داراي احتمال مشخصي (کوچك) براي نقض شدن هستند. قيد تصادفي کنترل 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})، حداکثر ذخيره مجاز مخزن در ماه t مي‌باشد.

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

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

بهطوريکه S_{max} ظرفيت مخزن بر حسب ميليون متر مکعب مي‌باشد.

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

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

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

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

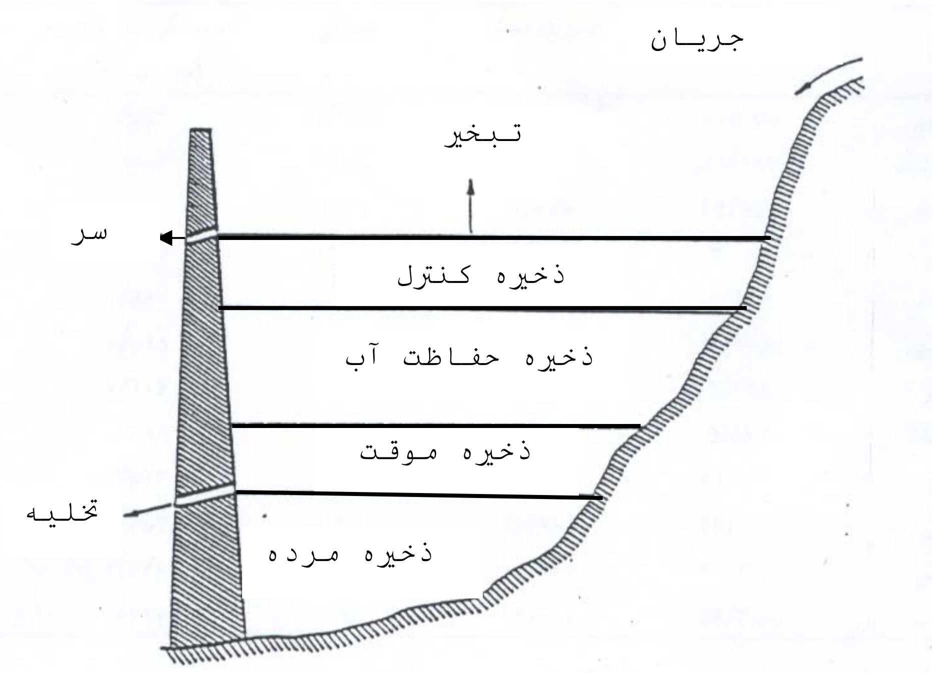
$$EV_t = A_t\left[\frac{e_t - P_t}{1000}\right] \qquad (۴)$$

به طوري که: 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 (کيلومتر 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 ذخیرة مخزن

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

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

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

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

بهطوريکه $F_{I_t}^{-1}(\alpha_t)$ 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:

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

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:

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

بهطوريکه 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 فرايندهاي ماركفي احتمال وقوع وضعيت I (جريان 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 حاضر متغير وضعيت (I) پيوسته در نظر گرفته مي‌شود (مدل ماركف پيوسته). جريانهاي ماهانه ورودي به مخزن چولگي مشخصي را به طرف راست نشان مي‌دهند در اين حالت فركانسها از توزيع نرمال تبعيت نخواهند كرد ولي متغيرهاي اصلي غالباً از نظر شكل تابعي داراي فرم نرمال مي‌باشند و لگاريتمهاي آنها از توزيع نرمال تبعيت مي‌نمايند [۷].

براي استخراج CDF (تابع توزيع تجمعي) نخست آزمون نكويي برازش[2] توزيع احتمال جريانهاي ماهانه ورودي به سد با استفاده از آزمون نكويي برازش كلموگرف - اسميرنوف[3] كه براي داده‌هاي پيوسته مورد استفاده قرار مي‌گيرد، انجام مي‌شود و سپس تابع توزيع تجمعي شرطي و خام استخراج مي‌گردد. با فرض توزيع لوگ نرمال براي داده‌هاي ورودي به مخزن، ميانگين شرطي و واريانس شرطي ماهانه از روابط زير قابل محاسبه هستند. براي به دست آوردن پارامترهاي توزيع از روش گشتاورها استفاده شده است.

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

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

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

متغير نرمال استاندارد شرطي را به صورت زير مي‌توان تعريف كرد.

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

و تابع توزيع تجمعي شرطي را با استفاده از رابطه زير مي‌توان محاسبه نمود:

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

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

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

براي محاسبه CDF خام مراحل فوق انجام مي‌گردد. با اين تفاوت كه به جاي واريانس شرطي و ميانگين شرطي، واريانس و ميانگين خام قرار داده مي‌شود. نرم‌افزاري تحت عنوان OSM به زبان فرترن ۷۷ توسط مؤلفين تهيه شده است كه قادر است كليه محاسبات فوق را انجام دهد. اين نرم‌افزارتابع توزيع تجمعي خام و شرطي را محاسبه مي‌كند و به ازاي قابليت اعتماد معين كنترل سيل و خشكسالي $(\beta\ ,\alpha)$ معكوس تابع توزيع تجمعي خام و شرطي را از روش درون‌يابي تفاضلات نيوتن استخراج مي‌كند. علاقه‌مندان، نرم‌افزار OSM را مي‌توانند از مؤلفين دريافت نمايند.

۳- مدل برنامه‌ريزي آرماني با قيدهاي تصادفي

براي بهينه‌سازي عملكرد يك سد با اهداف تأمين آب شرب، كشاورزي، توليد انرژي الكتريكي و كنترل سيلاب، تابع هدف مدل را به صورت زير مي‌توان نوشت:

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

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

اولويتهاي سيستم را مي‌توان به ترتيب تأمين آب شرب، 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

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

قيد آرماني مربوط به تأمين آب مورد نياز كشاورزي

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

قيد آرماني مربوط به توليد انرژي الكتريكي

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

قيد آرماني مربوط به كنترل سيل

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

قيد آرماني مربوط به خشكسالي

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

و قيدهاي فيزيكي مدل به صورت روابط زير ارائه مي‌شود:

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

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

$$R_t + G_t = D_t \qquad (۲۳)$$

$$IR_t \le D_t \qquad (۲۴)$$

$$W_t \le W_{\max} \qquad (۲۵)$$

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

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:

$$\xi_t = a + bS_{t-1} \qquad (۲۷)$$

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

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 مى‌شود 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 ٥٤ 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:

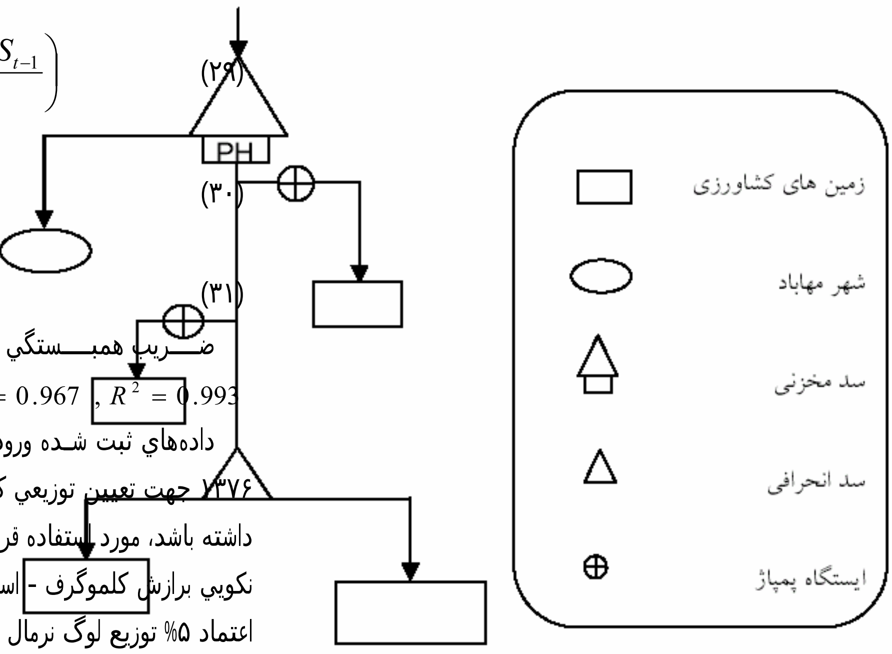
$$A_t = 3.303 + 0.038\left(\frac{S_t + S_{t-1}}{2}\right) \qquad (۲۹)$$

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

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

ضـــريب 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



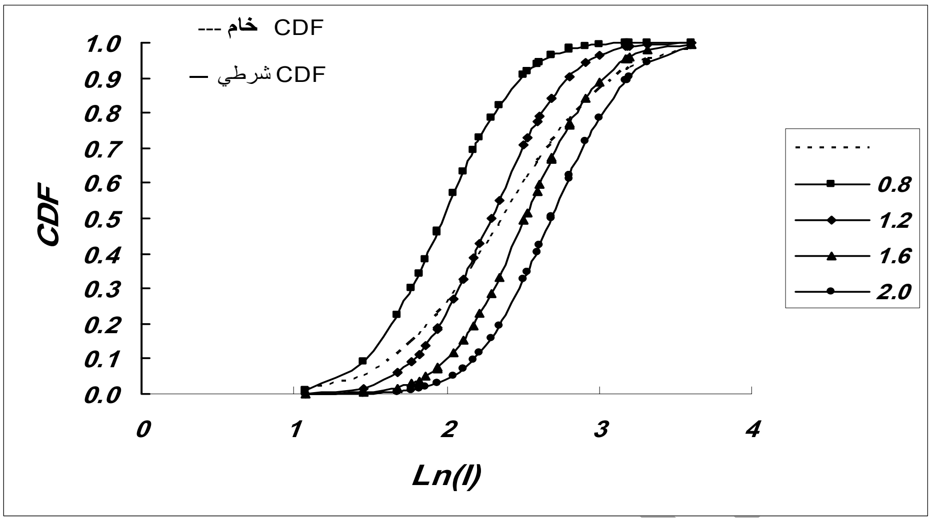
شكل ۲- نمودار شماتيك سيستم آبي رودخانه‌ي مهاباد

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 ٢٧، ٥٢، ٨٩ و ٢٦ ميليون‌متر مكعب برآورد شـده اسـت. در جـدول (١) 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.

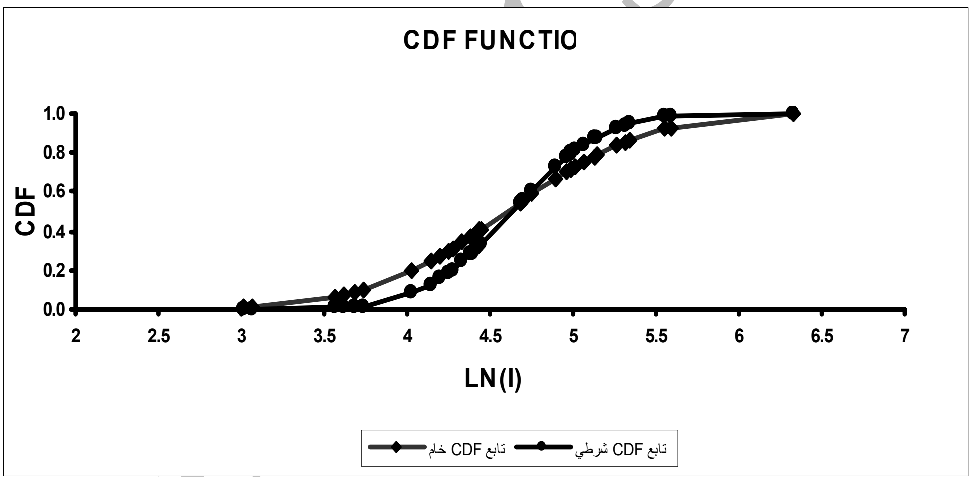
با اسـتفاده از مـدل ارائـه شـده توسـط فايرينـگ و جكـسون [١٢]براي افـق ديـد برنامـه‌ريـزي يكـساله بـا دوره‌هـاي ماهانـه، شبيه‌سازي جريان انجام گرفته است و مقادير شـبيه‌سـازي شـده جهت محاسبه تابع توزيع تجمعي خام و شـرطي مـورد اسـتفاده قرار گرفته‌اند. در شـكل (٣) تابع توزيع تجمعـي خـام و شـرطي جريانهاي 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 ١- 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.

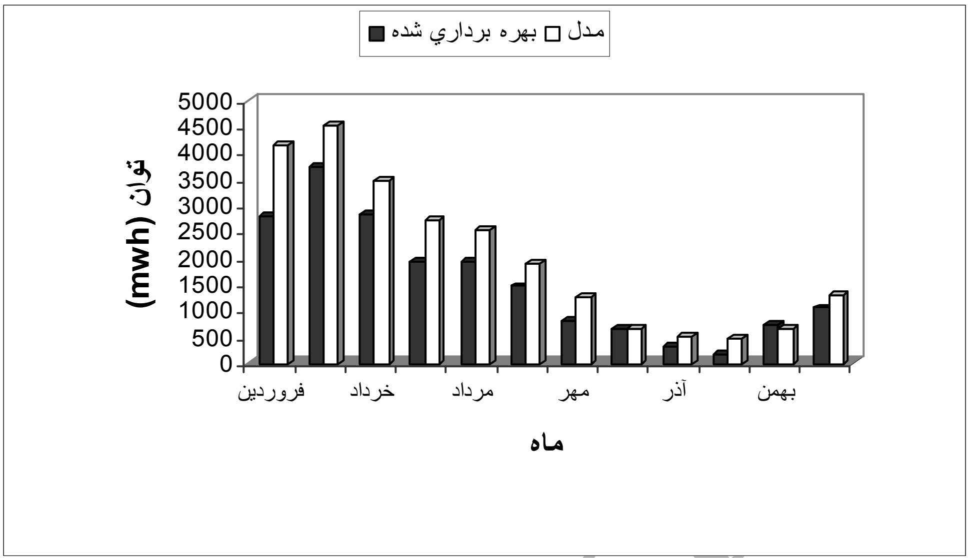
جدول ۲- مقادير تقاضا براي اهداف متعدد سيستم آبي رودخانه مهاباد در ماههاي مختلف سال برحسب ميليون‌متر مكعب

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

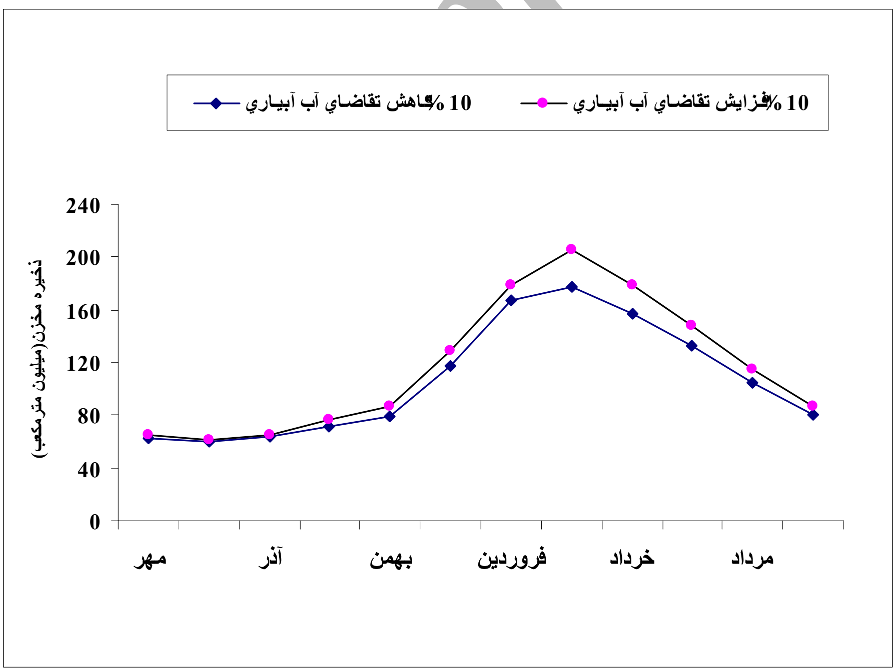
جدول۳- نتايج حاصل از مدل برنامه‌ريزي آرماني با قيدهاي تصادفي براساس سد چند منظوره مهاباد

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 كاهش ۱۰% به آب موردنياز كشاورزي در ماههاي فروردين و ارديبهشت فضاي خالي موردنياز جهت كنترل سيل به دليل رقابت موجود بين اهداف متعدد سيستم باقي نخواهد ماند (قابليت اعتماد كنترل سيل ۹۰% مي‌باشد و به احتمال ۱۰% قيد مي‌تواند نقض شود)، لذا در شرايط كنوني به هيچ وجه نمي‌توان تقاضاي موردنياز آبياري را افزايش داد.

۵- نتیجه‌گیري

در این مطالعه روش تبدیل مدل تصادفي بهینه‌یابي عملکرد مخزن یك سد چند منظوره به مدل قطعي معادل مورد بررسي قرار داده شده است. براي آزمون كارايي روش، سیستم رودخانه - مخزن مهاباد مورد مطالعه قرار گرفته است. با استفاده از داده‌هاي مربوط به سد مخزني مهاباد، قید تصادفي مربوط به کنترل سیل مخزن به ازاي قابلیت اعتماد ۰/۹ به قید قطعي معادل تبدیل شده است. جهت كارايي هرچه بیشتر مدل نرم‌افزار کامپیوتري به زبان فرترن ۷۷ تهیه شده است که با استفاده از آن مي‌توان براي همه ماه‌ها، منحنیهایي شبیه به شکل (۳) و (۴) استخراج نمود. براي به دست آوردن نتايج واقع‌گرايانه توصیه مي‌شود همبستگي بین سكانس جريان ورودي به مخزن در دوره‌هاي متوالي مدنظر قرار گیرد.

جداول و منحنیهاي ارائه شده است كه مديريت مخزن را قادر مي‌سازد در شرايط مختلف برنامه‌ريزي واقع‌گرايانه‌اي ارائه دهد. به دلیل محافظه‌کارانه بودن سیاستهاي اعمال شده در سیستم، خصوصاً این که در ماههاي سیلابي تخلیه‌ها اضافي از سرريز و دريچه‌هاي اضطراري انجام مي‌گیرد، در بیشتر ماهها مقادير انرژي الكتريكي به دست آمده از مدل بیش از میزان بهره‌برداري شده مي باشد با افزايش تقاضاي تأمین آب آبیاري فضاي خالي موردنياز براي كنترل سیلاب كاهش يافته و تولید 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.

[۱۰] افشار، ع و ح. مرادخاني، تخصیص مجدد بهینه ظرفیتهاي ذخیره اصلي و كنترل سیلاب در مخازن چند منظوره، مموعه مقالات كنفرانس منطقه‌اي منابع آب، ايران، اصفهان، ۱۳۷۴.

[۱۱] باراني. غ. م. خانجاني و ع. محمدپور، بهینه‌سازي عملکرد مخازن سدهاي چند منظوره با استفاده از مدل برنامه‌ريزي آرماني با قیدهاي تصادفي، مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس بین‌المللي عمران، ايران، مشهد، ۱۳۷۹.

[۱۲] باراني. غ. م.خانجاني و ع. محمدپور، بهینه‌سازي بهره‌برداري از مخازن سدهاي چند منظوره با استفاده از مدل برنامه‌ريزي آرماني(قطعي)، مجله علوم و صنايع كشاورزي، ايران، مشهد، ۱۳۷۹.

[۱۳] راهنماي مطالعات طرحهاي كنترل سیلاب، استاندارد مهندسي آب، نشريه شماره ۱۰، ۱۳۷۱.

[١٤] قادري، جمیل، مديريت براي افزايش راندمان شبکه‌هاي آبیاري و زهکشي و بهینه كردن الگوي مصرف آب، مجموعه مقالات اوّلین كنفرانس علمي تحقیقاتي بهینه‌سازي مصارف آب، سازمان آب مصرفي استان تهران، ۱۳۷۹.

[۱۵] محمدپور، عثمان، بهینه‌سازي سیستم بهره‌برداري سدهاي چند منظوره با استفاده از مدلهاي قطعي و تصادفي برنامه‌ريزي آرماني، پايان‌نامه كارشناسي ارشد دانشکده كشاورزي دانشگاه كرمان، ۱۳۷۸.

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