تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال دوم، شماره ۲، پاییز ۱۳۸۵
Volume 2, No. 2, Fall 2006 (IR-WRR)
۱-۱۴

# کاربرد مفهوم اجزای محدود در مدیریت منابع آب: مدل و نرم‌افزار FEWREM

اکبر کریمی[۱]، رضا اردکانیان[۲]

**چکیده**

در این تحقیق با ترکیب نگرش اجزای محدود و نگرش سیستم‌ها، چارچوبی مناسب برای مدل‌سازی پویای مسایل واقعی و بزرگ و حل آنها توسط الگوریتم‌های تجزیه- هماهنگی و یا تجمیع- تکسیر ارائه گردیده است. این چارچوب امکان استفاده از قابلیتهای هرکدام از دو نگرش یاد شده را در یک قالب یکپارچه برای شبیه‌سازی و بهینه‌یابی در اختیار تحلیلگر قرار می‌دهد. برای نشان دادن کاربرد این چارچوب، مدل و نرم‌افزاری به نام FEWREM[۱] توسعه داده شده است. نهایتا یک مثال با این نرم‌افزار مدل شده و با نمونه حل شده همین مثال با نرم‌افزار MODSIM نیز مقایسه شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مقدار کمبودها در تامین نیازها، برای MODSIM بیشتر از FEWREM است. بعبارت دیگر بهره‌وری مدل FEWREM برای استفاده از منابع آب موجود بیشتر از مدل MODSIM است.

***کلمات کلیدی:*** اجزای محدود، برخورد سیستمی، مدیریت منابع آب، مدل‌سازی، تکسیر – تجمیع

# Application of Finite Elements Concept in Water Resources Management: FEWREM Model and Software

*Akbar Karimi[1] , Reza Ardakanian[2]*

**Abstract**

In this research finite elements approach and systems approach, are combined and a new framework for dynamic modeling of large problems and their solution by Decomposition-Coordination or Aggregation-Disaggregation algorithm is introduced. This framework enables the modeler to benefit from these two approaches in an integrated base and to simulate and optimize large water resources systems. To show applicability of this framework, a software named FEWREM is developed in this research. This model is compared to MODSIM via a case study the results show that MODSIM results in more shortages compared to FEWREM. In other words, the effectiveness of FEWREM in operating the water system is more than MODSIM.

***Keywords:*** Finite Elements, System Approach, Water Resources Management, Modeling, Disaggregation-Aggregation

۱- دانشجوی دکتری آب، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

1 . PhD Student Sharif University of Technology, Tehran, Iran
2 . Assistant Professor Civil Engineering Faculty, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

## ۱- مقدمه

برای برنامه‌ریزی و مدیریت سیستم‌های منابع آب مدل‌های گوناگونی توسط افراد، موسسات و سازمانهای مختلف در سراسر دنیا تهیه شده است. این مدل‌ها برخی فقط برای یک مساله خاص تهیه شده و برخی دیگر بدین علت که ساختار آنها از پویایی لازم برای مدل‌سازی هر مساله‌ای, بدون توجه به رشته خاص از علم, برخوردار بوده است، کاربرد و گسترش بیشتری پیدا کرده‌اند. اکثر مدل‌های توسعه یافته بیشتر شبیه‌سازی سیستم‌ها را انجام می‌دهند. بهینه‌یابی، به آن صورتی که در مراجع مطرح شده است، بویژه در مدل‌هایی که سیستم‌های بزرگ را مدل می‌کنند، به‌علت بزرگ بودن و تعداد زیاد متغیرها اعمال نمی‌گردد. عمده‌ترین علت آن عدم وجود ساختاری مناسب برای مدل‌سازی و حل مساله به گونه‌ای است، که در عین حال که فرایندهای مختلف را با دقت قابل قبول مدل و بهینه کند، هزینه زمانی مدل‌سازی و حل نیز، آن ساختار را توجیه‌پذیر کند. در اکثر مدل‌ها که در ادامه نیز تعدادی از مهمترین آنها ذکر خواهد شد، شبیه‌سازی یک سیستم بزرگ و در نظر گرفتن اندرکنش اجزا مختلف آن مساله مهم و زمانبری بوده است. اعمال یک الگوریتم بهینه‌یابی کامل، به این ساختار در یک حالت معمولی توجیه اقتصادی و زمانی ندارد. بدین ترتیب برای مدیریت بهینه بهره‌برداری از سیستم‌های آبی بزرگ، چنانچه از مدل‌هایی که شبیه‌سازی می‌کنند استفاده شود، صرفا قواعد خاصی ارزیابی می‌گردد و مشخص نمی‌شود که بهترین قوانین برای بهره‌برداری با حداقل هزینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی چه هستند. موضوع بهینه‌یابی بهره‌برداری در سیستم‌های بزرگ، بویژه وقتی هزینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی قابل توجه باشند، اهمیت خود را بهتر نشان می‌دهد.

مدلWEAP21 (Stockholm Environment Institute, 2005) برای ارزیابی و برنامه‌ریزی پروژه‌های آبی تهیه شده است. WEAP21 از بهینه‌یابی تک‌دوره‌ای برای شبیه‌سازی سیستم آبی استفاده می‌کند. بهینه‌یابی تک دوره‌ای فقط برای بهبود عملکرد مدل در همان دوره بدون توجه به تاثیرهای بلند مدت تصمیمهای آن دوره، عمل می‌کند. مدل WEAP21 سیستم‌های آبی را با در نظر گرفتن هیدرولوژی، کشاورزی، آب سطحی و زیرزمینی, مخازن و انرژی آبی مدل می‌کند. این مدل از الگوریتم خطی برای بهینه‌یابی تک دوره‌ای استفاده می‌کند (Close et. al., 2003 McKinney et al., 1999). تابع هدف در این مدل صرفا حداقل کردن فاصله از اهداف کمی و یا کیفی از پیش تعریف شده است. نرم‌افزار MIKE BASIN (DHI, 2003) نیز توسط موسسه هیدرولیک دانمارک تهیه شده است. این نرم‌افزار قابلیتهای فراوانی داشته، مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های آبی شامل مخازن، رودخانه‌ها، آب زیرزمینی، نیروگاه‌های تولید برق‌آبی را می‌تواند انجام دهد. MIKE BASIN به طور عمده برای شبیه‌سازی سیستم‌های آبی به کار می‌رود. البته امکان استفاده از ابزار بهینه‌یابی نیز در کنار این نرم‌افزار وجود دارد. این نرم‌افزار از قالب شبکه‌ای برای مدل‌سازی سیستم آبی استفاده می‌کند. این نرم‌افزار از روش بهینه‌یابی غیرخطی مبتنی بر برنامه‌ریزی مربعاتی[۲] سیاستهای بهینه هر دوره را تعیین کرده (تک‌دوره‌ای) و شبیه‌سازی را بر اساس آن انجام می‌دهد. تابع هدف در این مدل حداقل‌سازی فاصله تا اهداف کمی وکیفی تعریف شده است.

نرم‌افزار RIBASIM توسط موسسه هیدرولیک دلفت (Delft Hydraulics, 2002) در کشور هلند تهیه شده است. این نرم‌افزار از قالب گره-کانال برای مدل‌سازی سیستم آبی استفاده می‌کند. RIBASIM مولفه‌های مختلفی را در یک سیستم آبی شامل مخازن، رودخانه‌ها، تامین انرژی برق‌آبی، آب زیرزمینی و کیفیت آب در نظر می‌گیرد. این نرم‌افزار نیز از بهینه‌یابی تک‌دوره‌ای برای شبیه‌سازی سیستم آبی و بهره‌برداری از آن، استفاده می‌کند. چنین نگرشی الزاما به سیاستهایی بهینه برای بهره‌برداری منجر نمی‌شود، چون مدل صرفا با توجه به شرایط دوره‌ای که در آن قرار دارد تصمیم‌گیری نموده و آینده را در نظر نمی‌گیرد. بنابراین در اثر تغییرات آینده پارامترها، در شرایط ناخواسته‌تری بایستی تصمیم‌گیری کند (Close et. al., 2003). آنچه در فرایند بهینه‌یابی این مدل حداقل می‌گردد، فاصله از اهداف کمی و کیفی از پیش تعریف شده برای مدل است.

مدلARSP توسط مهندسین مشاور ACRES در کشور کانادا تهیه شده است (ACRES, 2004). این نرم‌افزار نیز از نمایش گره-کانال برای مدل‌سازی سیستم آبی استفاده می‌کند. این مدل همه اجزای یک سیستم آبی را شامل مخازن، رودخانه، محلهای مصرف کشاورزی، شرب و صنعت در نظر می‌گیرد. تولید انرژی برق نیز توسط مخازن آبی در این مدل در نظر گرفته می‌شود. این نرم‌افزار نیز از بهینه‌یابی تک‌دوره‌ای برای شبیه‌سازی بهره‌برداری از سیستم آبی در هر دوره استفاده می‌کند. مبنای بهینه‌یابی استفاده از الگوریتم شبکه جریان بر اساس حداقل هزینه استوار است. با در نظر گرفتن هزینه به هر کانال، که هزینه جریان آب در آن کانال است، تابع هدف تشکیل شده و حداقل می‌گردد.

از دیگر مدل‌های معروف در مدیریت منابع آب می‌توان به مدل MODSIM اشاره کرد که توسط Labadie در دانشگاه ایالتی کلورادو در اواسط دهه ۱۹۷۰ تهیه شد (Labadie, 2000). در این

نرم‌افزار، سیستم آبی با استفاده از نمایش گره–کانال مدل می‌شود. MODSIM از شبکه جریان با حداقل هزینه برای فرمول‌بندی و حل سیستم آبی استفاده می‌کند. در این نرم‌افزار نیازهای مختلف شرب، صنعت و کشاورزی، مخازن، رودخانه‌ها و تولید انرژی آبی همگی بوسیله نمایش گره–کانال مدل می‌شوند. این مدل از الگوریتم OKA[3] برای بهینه‌یابی جریان در شبکه استفاده می‌کند. بهینه‌یابی این مدل به صورت تک دوره‌ای است. نتایج این بهینه‌یابی تک دوره‌ای برای بهره‌برداری در آن دوره به کار گرفته می‌شود (Close et al., 2003; McKinney et al., 1999). تابع هدف در مدل MODSIM نیز شبیه بقیه مدل‌های شبکه‌ای، از حاصل‌جمع هزینه جریان آب در کانال‌ها تشکیل شده است و حداقل می‌گردد.

مدل SOCRATES (Jacob et al., 1995) در سال ۱۹۹۵ برای کمپانی PG&E[4] در کشور آمریکا تهیه شده است. این نرم‌افزار نیز از مدل‌سازی توسط گره–کانال و از الگوریتم حل شبکه جریان با حداقل هزینه استفاده می‌کند. این نرم‌افزار برای مدل‌سازی سیستم حوضه آبریز بعلاوه سیستم تولید انرژی حرارتی به کار می‌رود. SOCRATES توانایی در نظر گرفتن عدم‌قطعیت در فرایند مدل‌سازی و حل را داشته و برای این کار از الگوریتم تجزیه بندرز[5] استفاده می‌کند. در این الگوریتم مساله قابل تجزیه شدن به اجزایی مستقل از یکدیگر است. البته تعدادی متغیر وجود دارند که در تمام اجزا مشترکند. به اجزا مستقل از هم زیرمساله و به متغیرهای مشترک، متغیرهای اندرکنش می‌گویند. با فرض مقدار اولیه برای متغیرهای اندرکنش، زیرمساله‌ها کاملا از هم مستقل شده هرکدام حل می‌شوند. سپس مساله جدیدی متشکل از متغیرهای اندرکنش و مقدار متوسط تابع هدف زیرمساله‌ها، که مساله اصلی نام دارد حل شده مقدار جدید متغیرهای اندرکنش بدست می‌آید. این مقادیر جدید جایگزین مقادیر قبلی در زیرمساله‌ها شده و آنها دوباره حل می‌گردند. جایگذاری و حل زیرمساله‌ها و مساله اصلی تا زمان ارضا شدن شرط همگرایی ادامه می‌یابد. بدین شکل یک مساله بزرگ که در حالت عادی بسختی حل می‌شود یا عملا حل نمی‌شود، قابل حل می‌گردد. تابع هدف در این مدل سود خالص حاصل از تولید انرژی توسط نیروگاههای آبی و حرارتی می‌باشد. ساختار الگوریتم بکار رفته در مدل SOCRATES از نظر زمانی مساله را تجزیه کرده و حل می‌کند. بنابراین اگر مساله از نظر تعداد گره–کانال‌ها بزرگ شود، به‌عبارت دیگر زیرمساله‌ها خود بزرگ شوند، آنگاه باز حل مساله با مشکل مواجه خواهد شد، چون ساختاری برای تجزیه و حل زیرمساله‌ها وجود ندارد.

دیگر مدلی که به آن پرداخته می‌شود CRIM (Close et al., 2003) نام دارد و در سال ۱۹۹۵ برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی تخصیص آب حوضه آبریز رودخانه کلورادو از نظر کیفی و کمی در ایالات متحده تهیه شده است. این مدل برای شبیه‌سازی و بهینه‌یابی سیاستهای مختلف در این حوضه آبریز با در نظر گرفتن مسایل اقتصادی تهیه شده است. در این مدل مسایل مربوط به معاهدات دولت آمریکا و مکزیک در مورد تخصیص آب این رودخانه در نظر گرفته شده است. این نرم‌افزار برای حل مدل از نرم‌افزار GAMS استفاده می‌کند. تابع هدف این مدل حداقل‌سازی خسارتهای ناشی از کمبود آب است.

نرم‌افزارها و مدل‌های یاد شده در بالا جزو مهمترین و معروف‌ترین نرم‌افزارهای کاربردی در مهندسی و مدیریت منابع آب هستند. تعدادی از آنها صرفا شبیه‌سازی را انجام می‌دهند. تعدادی دیگر که از بهینه‌یابی برای شبیه‌سازی استفاده می‌کنند نیز بعلت مشکلات محاسباتی و ساختاری به صورت جزئی از بهینه‌یابی برای بهره‌برداری بهینه سیستم‌های آبی استفاده می‌کنند (بهینه‌یابی تک دوره‌ای یا شبیه‌سازی بهینه‌یابی شده). نکته مهم قابل توجه در مورد بهینه‌یابی در مدل‌های ذکر شده در بالا تک دوره‌ای بودن آنهاست. بعبارت دیگر این مدل‌ها از بهینه‌یابی به معنای مدل تجویزی[6] استفاده نمی‌کنند. بلکه اصل کار آنها شبیه‌سازی (مدل توصیفی) است و از بهینه‌یابی بعنوان الگوریتمی که سریعتر از الگوریتم‌های دیگر به پاسخ می‌رسد، استفاده می‌کنند. مقدار کمبودها در تامین نیازها برای یک مدل وقتی ساختار هندسی(توپولوژی) آن تغییر نکند، درحالت تک دوره‌ای انحراف معیار بیشتری نسبت به حل چند دوره‌ای خواهد داشت. بعبارت دیگر این مدل‌ها تجویزی برای مدیریت بهتر نمی‌کنند بلکه اثرات قواعد بکارگرفته شده برای مدیریت را نشان می‌دهند. برخی دیگر از مدل‌های بهینه‌یابی نیز که CRIM یک نمونه آن هستند، برای سیستمی خاص تهیه شده و کاربردشان در سیستم‌های دیگر مستلزم تغییر اساسی در ساختار مدل است. در این تحقیق سعی شده است که با ارائه چارچوبی مناسب بر پایه مفهوم اجزای محدود و رویکرد سیستمی، امکان مدل‌سازی و بهینه‌یابی سیستم‌های بزرگ آبی در یک قالب کلی و پویا فراهم گردد. چنین چارچوبی به ویژه برای مدل‌سازی و مدیریت یکپارچه سیستم‌های بزرگ می‌تواند بکار گرفته شود. این چارچوب امکان تهیه مدل‌هایی پویا و قابل تطبیق با اکثر سیستم‌های آبی را نیز فراهم می‌کند. هم‌چنین این چارچوب به خوبی بعنوان بخش عمده‌ای از یک سیستم پشتیبانی تصمیم می‌تواند استفاده شود.

## ۲- چارچوب پیشنهادی برای مدل‌سازی

چارچوب مدل‌سازی در اکثر مدل‌های معتبر و کاربردی، به گونه‌ای است که اکثراً بر شبیه‌سازی تکیه دارند. البته در مقوله شبیه‌سازی این مدل‌ها بخوبی عمل کرده و از توانایی بالایی برخوردار هستند. در این مدل‌ها قواعد خاصی برای بهره‌برداری از آن سیستم شبیه‌سازی می‌شود، اما معین نمی‌گردد که این قوانین تا چه حد مناسب هستند و نسبت به قواعد ممکن دیگر چه اختلافاتی را از نظر تاثیرات اقتصادی و زیست‌محیطی دارند. البته پی بردن به قواعد بهتر از رهگذر آزمون و خطا، توسط همین مدل‌ها قابل انجام است. اما این روش در قالب بهینه‌یابی سراسری سریعتر به پاسخ می‌رسد. بررسی تعدادی از مدل‌های معروف در مدل‌سازی و مدیریت سیستم‌های منابع آب، نشان می‌دهد که بهینه‌یابی در مدل‌هایی که برای مدل‌سازی سیستم‌های بزرگ استفاده می‌شود به صورت موثری برای تجویز سیاستهای بهینه بکار گرفته نمی‌شود، مگر آنکه مساله ساده‌سازی شود. علت این امر پیچیده‌تر شدن فرایند حل مساله بعلت زیاد بودن متغیرهای تصمیم، تعدد تکرار شبیه‌سازی‌ها و نهایتاً نداشتن توجیه زمانی برای حل است. بعبارت دیگر ساختار و چارچوب مناسبی که دقت و سرعت حل را در یک مدل بزرگ بتواند رعایت کند و در عین حال پاسخهای بهینه را در محدوده تصمیم در اختیار تصمیم‌گیر قرار دهد، به خوبی در ساختار مدل‌سازی بکار گرفته نشده است. البته مدل‌هایی خاص برای موارد مشخص تهیه شده است که یک سیستم بزرگ را مدل‌سازی و حل کرده است. اما این مدل‌ها برای کاربرد در مسایل دیگر مستلزم بازنویسی مدل یا تصحیح ساختار آن، برای آن مساله هستند. بعبارت دیگر از پویایی لازم برای انطباق با مسایل دیگر برخوردار نیستند.

دو نگرش در نیم قرن اخیر برای مدل‌سازی و تحلیل مسایل بکار گرفته شده است؛ اجزای محدود و رویکرد سیستمی. البته این دو رویکرد تا به امروز با پیشرفت ابزار محاسباتی بهبود قابل توجهی یافته‌اند. بر اساس این دو رویکرد مدل‌ها و نرم‌افزارهای مختلفی نیز تهیه شده است. روش اجزای محدود برای حل مسایل بزرگ با شرایط پیچیده بکار گرفته شده است. در این نگرش با فرض اینکه می‌توان مساله را به اجزا کوچکتر متصل بهم تجزیه کرد و با فرض حل ساده برای هر جزء از تجمیع اجزا و اعمال شرایط مساله به پاسخ مطلوب برای مساله اصلی رسید، اقدام به حل مساله می‌نمایند. از سوی دیگر نگرش سیستمی با تفکیک مساله به فرایندهای موازی و سری(دیدگاه فرایند مدار)، اول به تحلیلگر کمک می‌کند که بهتر بتواند مساله و کنش–واکنشها را ببیند و دوم اینکه مدل مفهومی در قالب گره‌های پردازشگر و کانال‌ها (مدل شبکه‌ای حالت خاصی از همین نگرش سیستمی است) به راحتی به مدل ریاضی تبدیل می‌گردد.

بعلاوه، برای حل مسایل بزرگ الگوریتم‌های مختلفی ارائه شده است که حل مستقیم[۷]، رویکرد تجزیه–هماهنگی[۸] و رویکرد تجمیع–تکسیر[۹] از مهمترین آنها می‌باشند. حل مسایل واقعی تقریباً در تمامی موارد در یک حالت گسسته از نظر مکانی و زمانی صورت می‌پذیرد. بعبارت دیگر نهایتاً حل تمام مسایل به حل ماتریسی می‌انجامد. در حل مستقیم، این ماتریس که شامل پارامترهای مساله است، به یکباره برای مساله مورد نظر تشکیل شده و حل می‌گردد. این رویکرد عموماً برای مسایل کوچک کاربرد دارد ولی برای مسایل بزرگ، اگر ابزار محاسباتی قوی وجود نداشته باشد با توجه به تعداد عملیاتی که بایست صورت پذیرد تا نهایتاً به بردار پاسخها رسید, توجیه‌پذیر نیست.

رویکرد تجزیه–هماهنگی با شکستن یک مساله به اجزا کوچکتر که در اندرکنش با دیگر اجزا هستند, اقدام به حل مساله می‌نماید. بدین صورت که با فرض مقدار اولیه برای برخی از اندرکنشها مساله صورت تجزیه شده به خود می‌گیرد که هر جزء را به سادگی و به سرعت می‌توان حل کرد. سپس مقادیر جدید اندرکنشها بین هر دو جز در مدل هماهنگ کننده مقایسه می‌گردند، با توجه به اختلافها مقدار جدید اندرکنشها وارد فرایند حل می‌شود. در یک فرایند تکراری اگر این اختلاف از یک حد کوچکتر بود مساله حل شده فرض می‌گردد و الا با فرض مقادیر جدید, حل مساله ادامه می‌یابد. البته در مقوله تجزیه–هماهنگی الگوریتم‌های مختلفی ابداع شده که با توجه به نوع توابع و ساختار مساله اقدام به حل مساله می‌کنند.

از سوی دیگر در روش تجمیع–تکسیر با فرض اینکه می‌توان به صورت مفهومی مساله بزرگ با اجزا توزیع شده را به صورت یکجا در نظر گرفت (تجمیع) و بجای یک مساله بزرگ، یک تک مساله را حل نموده سپس با در نظر گرفتن قواعدی برای بازپخش پاسخ بین اجزا مساله, پاسخ مربوط به هر جزء را بدست آورد(تکسیر). البته در این رویکرد در مورد نحوه بازپخش پاسخ بین اجزا, اتفاق نظر وجود ندارد.

نگرشهای دوم و سوم، برای حل مسایل بزرگ به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با توجه به خصوصیت روشهای تجزیه–هماهنگی و تجمیع–تکسیر، اگر مساله را به گونه خاصی ساختار دهیم آنگاه چه روش دوم و چه روش سوم به خوبی بدون اشکالات بنیادین قابل کاربرد می‌باشند. این ساختار را از طریق نگرش اجزای

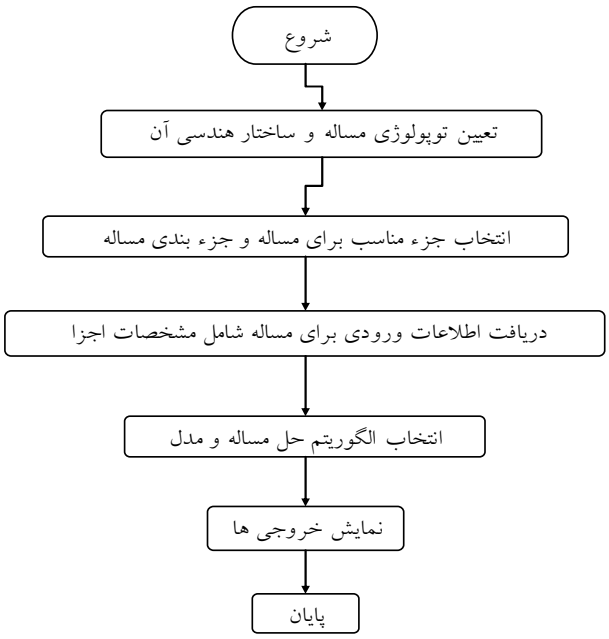
محدود می‌توان به مساله اعمال کرد. در حقیقت با در نظر گرفتن یک جزء پایه برای مساله، که مساله می‌تواند حول این جزء تقسیم‌بندی شده ونمایش داده شود، این امکان را می‌دهد که بتوان از یک ساختار پایه و سرهم‌بندی[10] آنها مساله را شکل داد. با استفاده از این ساختار پایه (جزء پایه) می‌توان از دو رویکرد دوم و سوم بسادگی برای حل مساله استفاده کرد. البته چنانچه مساله بزرگ نباشد می‌توان از رویکرد مستقیم نیز برای حل مساله استفاده کرد. بعبارت دیگر هم می‌توان بر اساس این ساختار پایه مساله را تجزیه کرده و با در نظر گرفتن اندرکنش بین اجزا، مساله را حل کرد و هم می‌توان با تجمیع مفهومی اجزا و در عین‌حال تجمیع ریاضی معادلات هر جزء، به حالت تجمیع‌یافته مساله رسید و آنرا حل کرد. سپس با توجه به قیود تجمیع ریاضی پاسخها را بازپخش نمود. مزیت دیگر این نگرش دقت و اندازه دلخواه تحلیلگر برای تجمیع اجزای مساله است. البته این نگرش در مورد شبیه‌سازی سیستم‌ها نیز قابل کاربرد است.

از سوی دیگر با استفاده از نگرش سیستمی می‌توان بخوبی بسیاری از مسایل مدیریتی، از قبیل سیستم‌های آبی را مدل کرد. سپس با اعمال نگرش اجزای محدود به این مدل‌سازی از مزایای نگرش توضیح داده شده در بالا استفاده کرد. با استفاده از چارچوب مطرح شده در این تحقیق می‌توان بهینه‌یابی را به صورت موثرتری وارد فرایندهای مدل‌سازی، تحلیل و تصمیم‌گیری کرد. البته این چارچوب علاوه بر بهینه‌یابی برای شبیه‌سازی نیز می‌تواند در یک مدل بکار رود. بعبارت دیگر می‌توان بهینه‌یابی شبیه‌سازی شده را بهتر در قالب یک مدل فراهم کرد. شکلهای ۱ و ۲ نمودارهای گردشی الگوریتم کلی این چارچوب و الگوریتم تجزیه – هماهنگی را نشان می‌دهند.

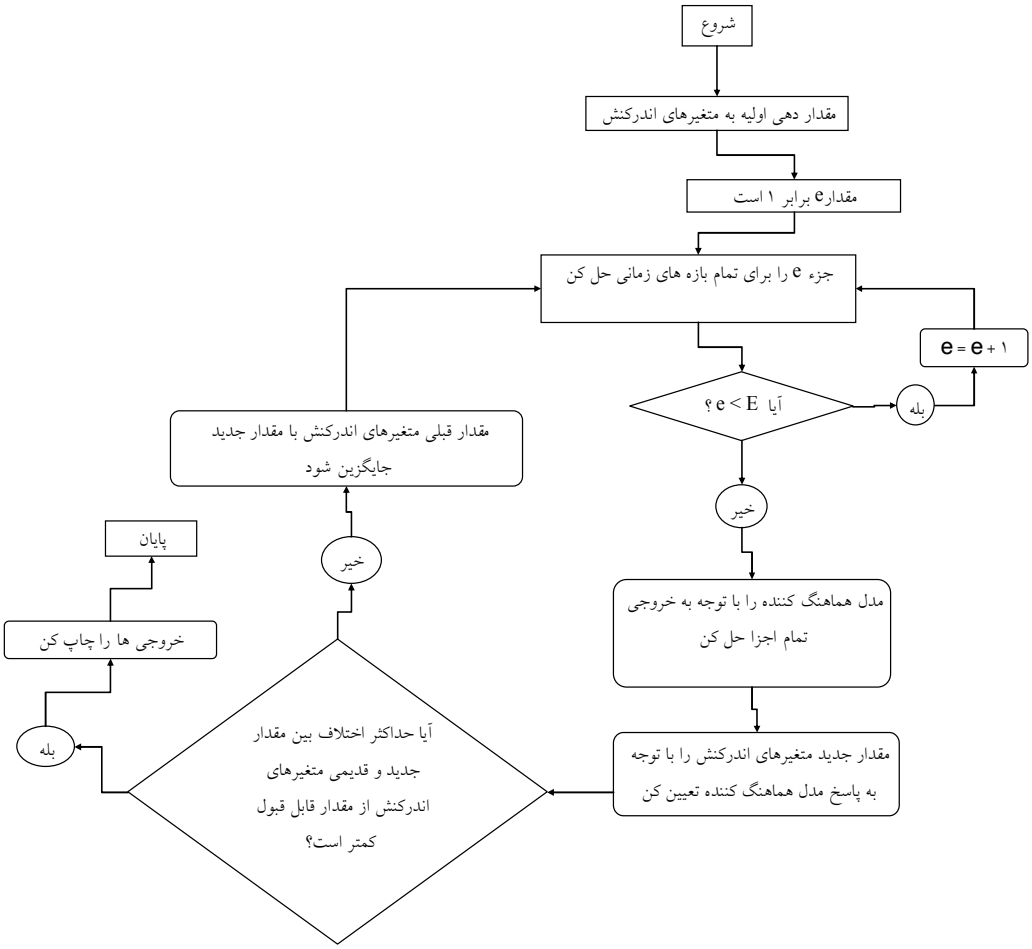
## ۳- معرفی مدل FEWREM

بعنوان نمونه‌ای از کاربرد چارچوبی که برای مدل‌سازی معرفی گردید، مدل FEWREM در ادامه توسعه داده شده و در قالب نرم‌افزاری به همین نام نیز تهیه شده است. این نرم‌افزار توسط مولفین در سال ۱۳۸۴ تهیه شده است. نرم‌افزار FEWREM با استفاده از قابلیتهای ذکر شده در بالا امکان مدل‌سازی و حل یک سیستم آبی بزرگ را از نظر تعداد مخزن، مصارف و زمان برنامه‌ریزی را فراهم میکند. در صورت فعلی این نرم‌افزار بعنوان یک برنامه‌ریز عمل می‌کند.

به طور کلی کاربرد نرم افزارهای شبیه‌سازی و بهینه‌یابی در کنار هم تصمیم‌گیرنده را به سیاستهای بهینه خواهد رساند و استفاده از هرکدام به تنهایی پاسخ بهینه را بدست نمی‌دهد. در واقع نرم‌افزارهای بهینه‌یابی سیاستهای بهینه را بدست می‌دهند و نرم‌افزارهای شبیه‌سازی برای شبیه‌سازی این سیاستها می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. نرم‌افزارهای بهینه‌یابی که برای برنامه‌ریزی بلند مدت سیستم‌ها به کار می‌رود به لحاظ ساختاری با برنامه‌ریزی بهره‌برداری زمان واقعی متفاوت عمل می کنند.




**شکل ۱- الگوریتم پیشنهادی برای مدل‌سازی**




**شکل ۲- الگوریتم روش تجزیه-هماهنگی برای مدل‌سازی و حل مسایل بزرگ**

مدل بررسی شده در این تحقیق برای برنامه ریزی بلند مدت سیستم‌های آبی به کار می‌رود. این مدل از نگرش سیستمی به مدیریت منابع آب در قالب مفهومی اجزای محدود برای مدل‌سازی سیستم‌های منابع آب استفاده می‌کند. مدل FEWREM مساله را به اجزای کوچکتر که هرکدام بخشی از مساله مورد نظر را به تصویر می‌کشد، می‌شکند. البته اندرکنشهای بین اجزا یکپارچگی سیستم را حفظ کرده و نمایش می‌دهد. مدل با توجه به الگوریتم نشان داده شده در شکل ۳ کار می‌کند. جزء پایه در این مدل اجزایی چون مخازن آب، کانال‌ها، رودخانه‌ها، آب زیرزمینی، مناطق مصرف آب، شامل شرب, صنعت, کشاورزی و زیست‌محیطی را در خود جای داده است. نمونه جزء پایه در شکل ۴ نشان داده شده است. اجزای مختلف تفاوتشان در مشخصاتشان یا وجود و عدم وجود مخازن آب، کانال‌ها، رودخانه‌ها، آب زیرزمینی و مناطق مصرف آب شامل شرب, صنعت, کشاورزی و زیست‌محیطی در آنها است. معادلات یک جزء را می‌توان به صورت زیر نشان داد؛

$$[A]_e \cdot \underset{\sim}{X}_e = \underset{\sim}{B}_e \qquad (۱)$$

که در آن $[A]_e$ ماتریس ضرایب، $\underset{\sim}{X}_e$ بردار متغیرها و $\underset{\sim}{B}_e$ بردار سمت راست است. تابع هدف برای این جزء به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Z_e = F\left(\underset{\sim}{X}_e\right) \qquad (۲)$$

که در آن تابع F(.) می‌تواند خطی یا غیر خطی باشد. در مدل FEWREM از روش مستقیم برای حل استفاده می‌شود. بنابراین سیستم کلی به صورت زیر درمی‌آید:

$$Min(Max) \qquad Z = \sum_e Z_e$$

$$s.t. \qquad (۳)$$

$$\begin{bmatrix} A_{Interaction} & 0 \\ 0 & A_{Elements} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underset{\sim}{X}_{Interaction} \\ \underset{\sim}{X}_{Elements} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underset{\sim}{B}_{Interaction} \\ \underset{\sim}{B}_{Elements} \end{bmatrix}$$

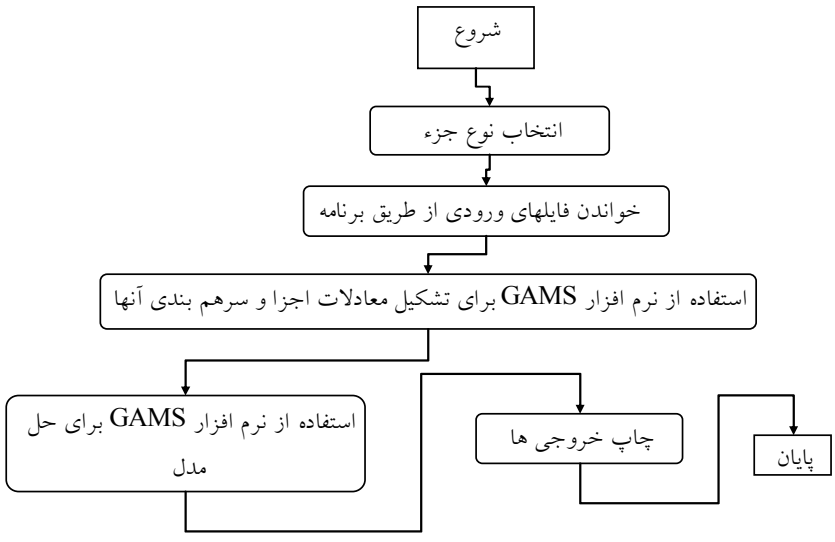
که در آن *Interaction* بیانگر بخشی از ماتریس ضرایب کلی، متغیرها و سمت راست سیستم است که مربوط به متغیرهای اندرکنش بین اجزا می‌شود. زیرنویس *Elements* نیز اشاره به بخشی از ماتریس ضرایب کلی، متغیرها و سمت راست سیستم است که در اندرکنش با اجزای دیگر نیستند.

نرم‌افزار FEWREM بر اساس الگوریتم نشان داده شده در شکل ۳، مساله را به صورت بالا در آورده و حل می‌کند. جزء پایه معرفی شده از یک ساختار شبکه‌ای (شبکه جریان) برای مدل‌سازی فرایندهای درون جزء استفاده می‌کند. هر بخش از حوضه آبریز با یک جزء بر اساس نیاز تحلیلگر و دقت مطلوب او مدل می‌گردد. سپس این اجزا با یکدیگر سرهم‌بندی می‌شوند. نهایتاً مدل ریاضی که در قالب ماتریس بیان شده است، حل می‌شود. نرم‌افزار برای جزءبندی سیستم و حل آن، از نرم‌افزار GAMS بعنوان حل‌کننده استفاده می‌کند. بخش ورودی اطلاعات توسط برنامه صفحات گسترده (Excel)، اطلاعات اجزا را دریافت کرده و فایل‌های ورودی برای مدل را آماده می‌کند. در این مدل تصمیم‌گیری برای مقدار تخصیص از منابع مختلف به مصارف با توجه به ارجحیت تامین نیاز و منبع تامین آن با هدف حداقل‌سازی نیازهای تامین نشده صورت می‌پذیرد. تخصیص از منابع سطحی به مصارف شرب، صنعت، کشاورزی و نیازهای زیست محیطی و تخصیص از منابع آب زیرزمینی به مصارف مختلف متغیرهای تصمیم این مدل را تشکیل می‌دهند. البته این متغیرها، متغیرهای اصلی تصمیم می‌باشند. تابع هدف این مدل، حاصل‌جمع هزینه نیازهای مرتفع نشده بعلاوه هزینه تامین نیاز از منابع مختلف می‌باشد. هر کدام از مولفه‌های تابع هدف با یک ضریب مقیاس در قالب کمیتهای بی‌بعد در آمده با هم جمع می‌شوند. بدین شکل یک تابع هدف کلی برای تمام سیستم، که متشکل از پاسخهای تمام اجزای این سیستم است، بوجود می‌آید. در این قسمت معادله تابع هدف یک جزء به صورت زیر نشان داده می‌شود:

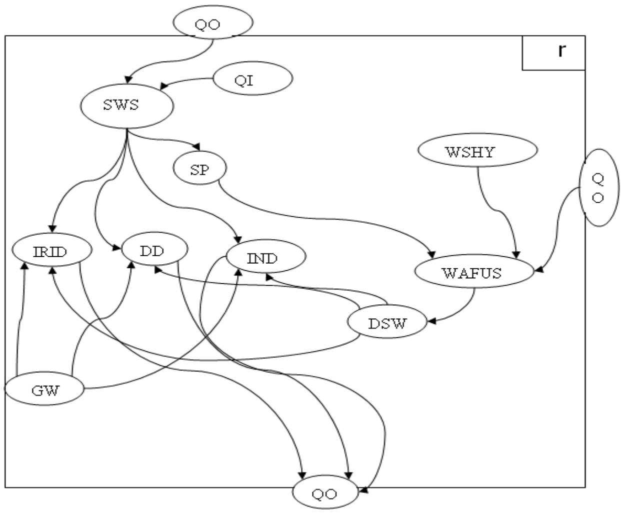
(۴)

$$Z_e = \sum_t \left( WSlack_t \frac{Slack_t}{SlackSCL_t} \right) + \left( WSupply_t \frac{Supply_t}{SupplySCL_t} \right)$$

که در آن $Z_e$ مقدار تابع هدف برای جزء شماره e است؛ $WSupply_t$ هزینه تامین آب از منبع مورد نظر است, این منبع می‌تواند آب سطحی، آب ذخیره شده در مخزن و یا آب زیرزمینی باشد؛ $Supply_t$ مقدار آب تامین شده از منبع مورد نظر در دوره t است؛ $SupplySCL_t$ یک ضریب برای بی‌بعد کردن مولفه تامین آب در تابع هدف است, این ضریب در این مساله مقدار نیاز در دوره مورد نظر می‌باشد؛ $WSlack_t$ هزینه کمبود در تامین نیاز مورد نظر است؛ $Slack_t$ مقدار کمبود در تامین نیاز را در دوره t نشان می‌دهد؛ $SlackSCL_t$ نیز شبیه $SupplySCL_t$ یک ضریب برای بی‌بعد کردن مولفه کمبود در تابع هدف است. البته کمبودها مربوط به نیازهای شرب، صنعت، کشاورزی و زیست‌محیطی می‌شود. تابع هدف شامل دو قسمت اصلی، هزینه کمبودها و هزینه تامین آب است. البته این قسمتها بتعداد متغیرهای تصمیم تکرار می‌شوند. ضریب مقیاس که در مخرج کسرها آورده شده است، برای بی‌بعد کردن مقدار متغیرهای درون تابع هدف است. البته در نهایت نیز از جمع تابع هدف اجزا، تابع هدف سیستم کلی بدست می‌آید.




**شکل ۳- الگوریتم مدل‌سازی و حل در نرم‌افزار FEWREM**

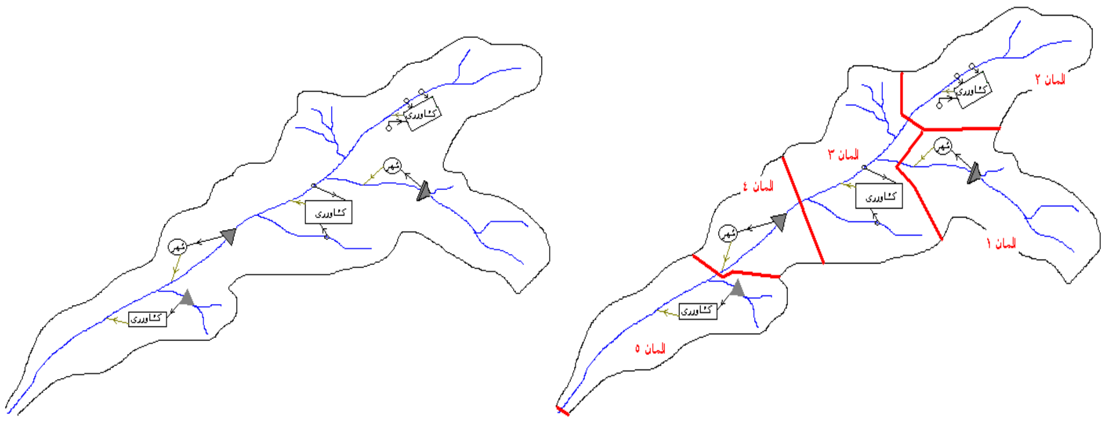



**شکل ۴- یک جزء پایه برای مدل‌سازی سیستم‌های منابع آب به همراه فرایندهای درون آن**

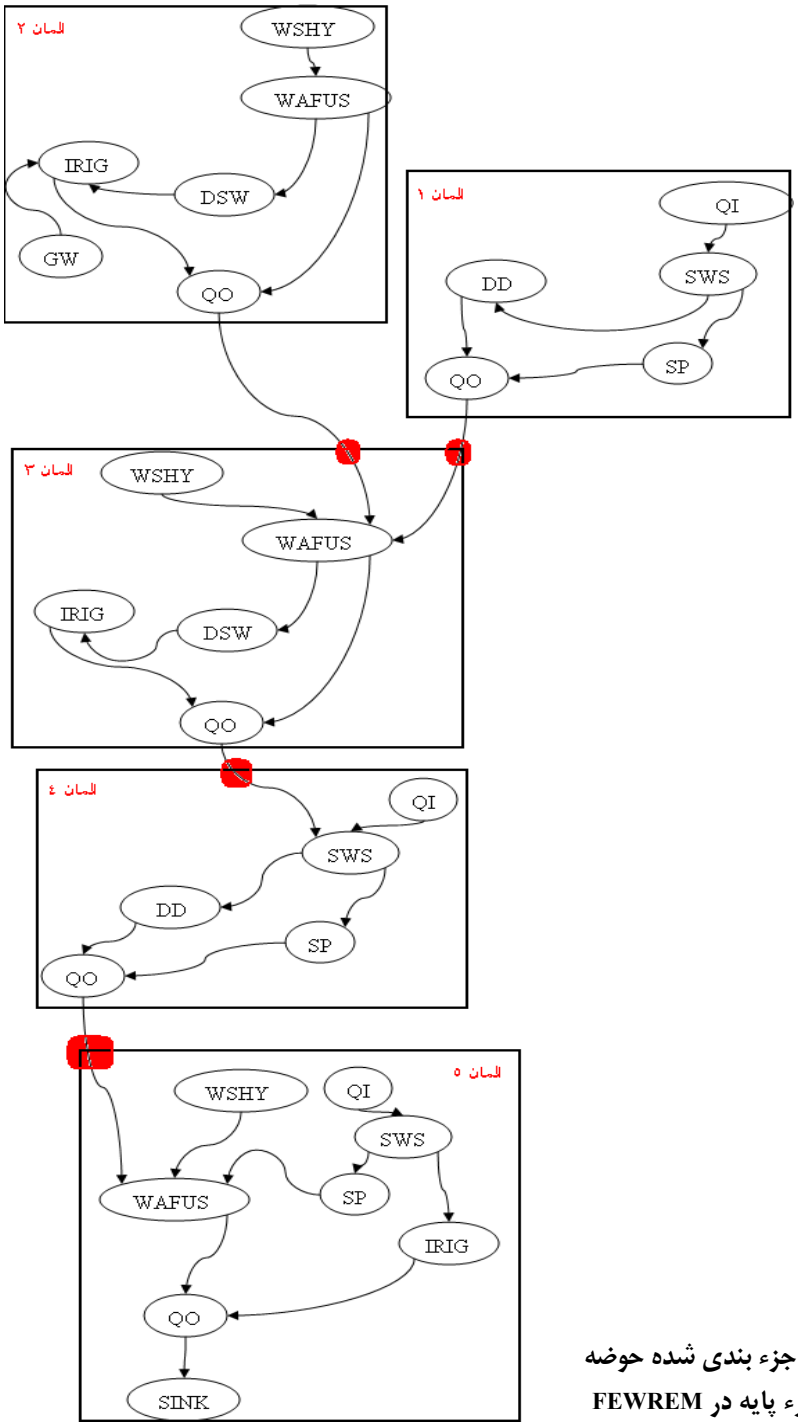
بدین ترتیب مدل FEWREM و اصول حاکم بر آن تشریح شد. برای نشان دادن قابلیتهای این نگرش و مدلی که مبتنی بر آن ساخته شد، یک مساله فرضی توسط این نرم‌افزار و نیز نرم‌افزار MODSIM برای مقایسه نتایج حل شده است. در قسمت بعدی نتایج این بررسی‌ها ارایه می‌گردد.

## ۴- مطالعه موردی

برای نشان دادن قابلیت نرم‌افزار FEWREM یک مساله فرضی شامل حوضه آبریزی با سه مخزن، سه پروژه کشاورزی و دو شهر مدل شده و عملکرد بهینه این سیستم تعیین گردید. برای مقایسه، همین مساله با نرم‌افزار MODSIM نیز حل شده و نهایتاً نتایج هردو مدل مقایسه شده‌اند. شکلهای مربوط به این سیستم که مراحل مدل‌سازی و توضیح در مورد شکلها را به صورت تصویری نشان می‌دهد در شکلهای ۵ و ۶ می‌توان دید. در شکل ۴ که نشان دهنده جزء پایه است، توانایی مدل‌سازی سیستمی شامل مخزن و رابطه با نواحی دیگر، آب سطحی ذخیره نشده و نیز امکان ارتباط با نواحی دیگر، آب زیرزمینی و نیازهای شرب، صنعت, کشاورزی و زیست‌محیطی که قابل تامین از هر یک از منابع هستند، را دارد. از سوی دیگر در شکل ۵ حوضه آبریزی نشان داده می‌شود که شامل یک سیستم کشاورزی در بالا دست است که از آب سطحی و زیرزمینی نیازهای آن تامین می‌شود. در پایین دست، یک سد وجود دارد که آب شرب پایین دست خود را تامین می‌کند. البته سد روی سرشاخه قرار دارد. قسمت بعدی حوضه باز هم یک سیستم کشاورزی است. این سیستم از آب سطحی تامین نیاز می‌کند و البته تحت تاثیر رهاسازی بالادست خود نیز قرار دارد. در پایین دست این سیستم یک شهر قرار دارد که آب مورد نیاز آن از سد نزدیک شهر تامین می‌شود.




**شکلهای ۵ - یک حوضه آبریز در شکل واقعی آن و شکل جزء بندی شده آن (هنوز در قالب جزء پایه در نیامده است)**

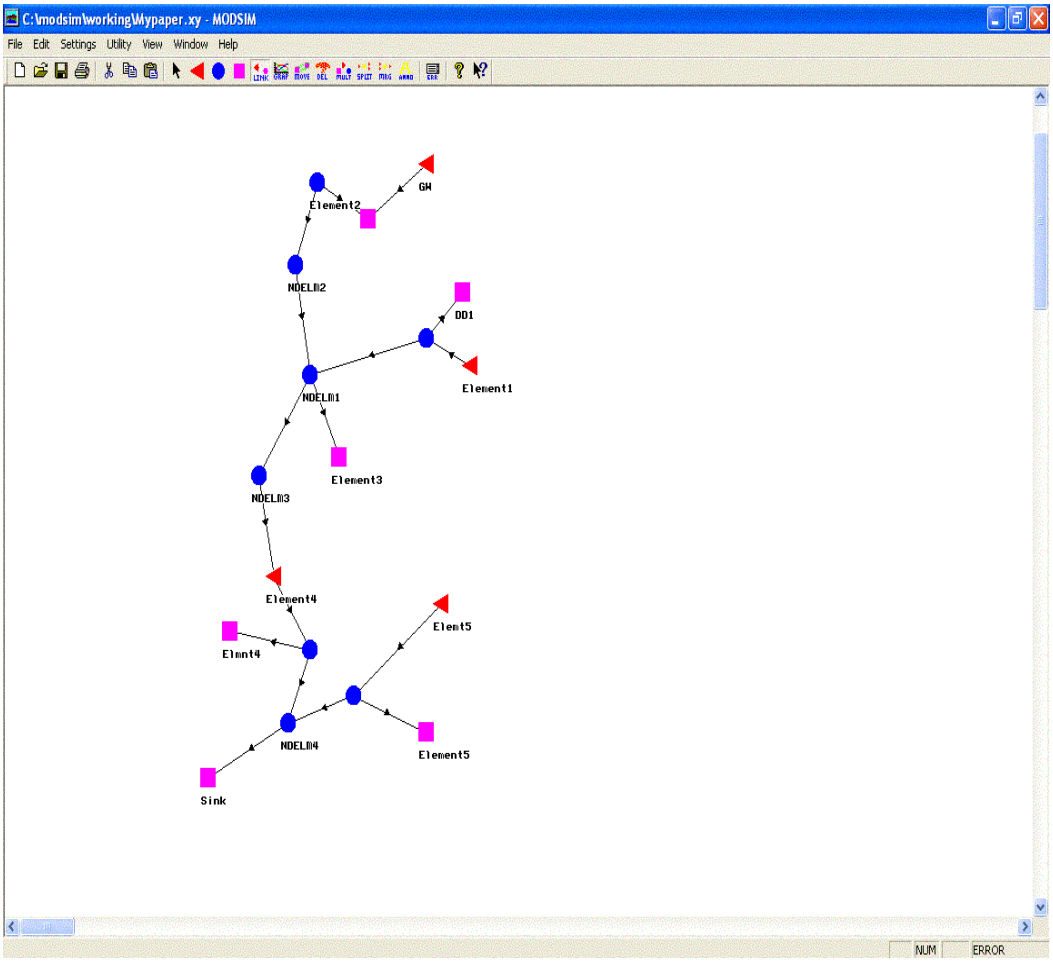



**شکل ۶ - شکل جزء بندی شده حوضه آبریز در قالب جزء پایه در FEWREM**

در پایین دست و تقریبا انتهای حوضه نیز یک سیستم کشاورزی قرار دارد که آب آن از سدی که روی سرشاخه سمت راست آن وجود دارد تامین می شود. اندرکنش آبی بین مخزن سد این سیستم و بالادست وجود ندارد. اگر توجه کنید سیستم تشریح شده شامل ۵ قسمت عمده آبی می‌باشد که هر جزء پایه قابلیت انطباق با هریک از بخشهای آن سیستم آبی را دارد. این امکان بسادگی توسط مدل FEWREM توسط ضرایبی اعمال می‌شود که جزو داده‌های ورودی مدل است.

مدل سیستم آبی بکار رفته در نرم‌افزار MODSIM نیز در شکل ۷ نشان داده شده است. اطلاعات مربوط به این مساله در جداول ۱ تا ۶ آورده شده است. مدل FEWREM این سیستم را برای ۳۰ سال به صورت ماهانه حل و بهینه کرده است (بهینه‌یابی چند دوره‌ای). میانگین عملکرد مدل برای ۱۲ ماه سال در شکلهای ۸ الی ۱۴، آورده شده است. با توجه به شکلهای ۸ تا ۱۰ مشخص است که عملکرد مدل FEWREM کمبود در تامین نیازهای کشاورزی در حوضه را

نشان می‌دهد. البته نیاز شهری کاملا تامین شده است. توزیع کمبودها در مناطق (اجزای) مختلف در شکلهای ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. عملکرد مدل FEWREM در مناطق ۱، ۴ و ۵ بهتر از عملکرد مدل MODSIM است. در منطقه ۲ عملکرد نسبی مدل MODSIM نسبت به مدل FEWREM بهتر بوده است. در منطقه ۳ هردو مدل تقریبا یکسان کار کرده‌اند. آنچه در این قسمت اهمیت دارد مقایسه عملکرد مدل FEWREM با مدل MODSIM در این حوضه است. با توجه به شکل ۱۳، MODSIM در عملکرد خود کمبود بیشتری در تامین نیازها نسبت به مدل FEWREM، داشته است (۴۷۰ میلیون متر مکعب کمبود بیشتر). علاوه بر این، عملکرد MODSIM منجر به حفظ آب در مخازن شده در حالی که ۱۵۷۴ میلیون متر مکعب کمبود در تامین نیازها داشته است. مقدار کمبود در تامین نیازها برای مدل FEWREM، ۱۱۰۴ میلیون متر مکعب بوده است. البته FEWREM آب را در مخازن نگه نداشته و به همین علت خروجی از حوضه برای عملکرد مدل FEWREM، خیلی بیشتر از خروجی برای عملکرد مدل MODSIM است. علت این اختلاف، تفاوت دو مدل در تک دوره‌ای و چند دوره‌ای بودن آنهاست. مدل MODSIM چون تک دوره‌ای است، بیش از یک ماه را در برنامه‌ریزی نمی‌بیند و با توجه به این یک ماه، بدون توجه به تاثیر بلند مدت تصمیمها و مقادیر منابع و نیازها در آینده برنامه‌ریزی می‌کند. بنابراین محافظه‌کارانه‌تر کار کرده و آب را در مخازن نگه می‌دارد، تا در آینده به مشکلهای احتمالی برنخورد. اما مدل FEWREM تمام ۳۰ سال را در برنامه‌ریزی در نظر گرفته، بنابراین با اطلاع از آینده و منابع آب، مخازن را مورد استفاده قرار داده و نیازها را تامین می‌کند. بنابراین در عملکرد این مدل مخازن بجز در فصول خشک پر نگه داشته نمی‌شوند. اما در عملکرد مدل MODSIM مخازن تقریبا در تمام ماهها پر یا نزدیک پر هستند. بررسی عرضه و تقاضا با توجه به منابع آب موجود نشان می‌دهد که موثر بودن عملکرد مدل FEWREM بیشتر از عملکرد مدل MODSIM است. البته ساختار موجود در این حوضه آبریز، با توجه به نتایج حاصل از دو مدل، بگونه‌ای نیست که بخوبی از منابع برای تامین نیازها استفاده کند.




**شکل ۷ – مدل گره-کانال سیستم حوضه در نرم‌افزار MODSIM**

**جدول ۱ - مشخصات مخزن در هر جزء برای مدل‌های FEWREM و MODSIM**

| حجم مخزن به میلیون متر مکعب | حجم حداقل بهره برداری به میلیون متر مکعب | شماره جزئی که مخزن در آن قرار دارد |
|---|---|---|
| ۲۵ | ۳ | ۱ |
| ۲۵ | ۳ | ۴ |
| ۸۵۰ | ۱۵۰ | ۵ |

**جدول ۲ - نیاز سالانه شرب و کشاورزی در اجزا برای مدل‌های FEWREM و MODSIM**

| نیاز سالانه کشاورزی به میلیون متر مکعب | نیاز سالانه شرب یه میلیون متر مکعب | شماره جزء |
|---|---|---|
| ۰ | ۲۲/۹۹۸ | ۱ |
| ۱۶۱۱/۳۷ | ۰ | ۲ |
| ۴۰۴ | ۰ | ۳ |
| ۰ | ۲۲/۹۹۸ | ۴ |
| ۱۶۴۲/۶۶ | ۰ | ۵ |

**جدول ۳ توزیع ماهانه نیاز در هر جزء برای مدل‌های FEWREM و MODSIM بر حسب میلیون متر مکعب**

| شماره جزء | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ |
|---|---|---|---|---|---|
| مهر | ۱/۹۰۹ | ۱۷۳/۵ | ۴۱/۹ | ۱/۹۰۹ | ۱۵۸/۳۲ |
| آبان | ۱/۷۱ | ۱۴۱/۱۲ | ۲۱/۹ | ۱/۷۱ | ۱۱۶/۱۷ |
| آذر | ۱/۴۱۱ | ۷۴ | ۶/۲ | ۱/۴۱۱ | ۲۹/۴۵ |
| دی | ۱/۳۷ | ۷۸/۰۵ | ۵/۸ | ۱/۳۷ | ۵۸/۴۵ |
| بهمن | ۱/۳۷۱ | ۱۱۵/۸۲ | ۱۱ | ۱/۳۷۱ | ۹۶/۶۷ |
| اسفند | ۱/۵۱۲ | ۱۵۵/۹ | ۲۴/۵ | ۱/۵۱۲ | ۱۵۳/۰۲ |
| فروردین | ۱/۶۹۸ | ۱۶۸/۷۶ | ۳۷/۵ | ۱/۶۹۸ | ۲۱۸/۰۷ |
| اردیبهشت | ۱/۹۹۱ | ۱۳۸/۳۹ | ۳۶/۳ | ۱/۹۹۱ | ۲۰۸/۹ |
| خرداد | ۲/۳۳۴ | ۱۱۸/۹۹ | ۴۰/۲ | ۲/۳۳۴ | ۱۶۰/۸۴ |
| تیر | ۲/۵۹۸ | ۱۱۴/۱۷ | ۵۲/۵ | ۲/۵۹۸ | ۱۲۳/۸۶ |
| مرداد | ۲/۷۴۵ | ۱۴۸/۴۲ | ۵۷/۵ | ۲/۷۴۵ | ۱۳۲/۵ |
| شهریور | ۲/۳۴۹ | ۱۸۴/۲۵ | ۶۸/۷ | ۲/۳۴۹ | ۱۸۶/۴۱ |

**جدول ۴- توزیع ماهانه آبدهی سطحی در هر جزء برای مدل‌های FEWREM و MODSIM بر حسب میلیون متر مکعب**

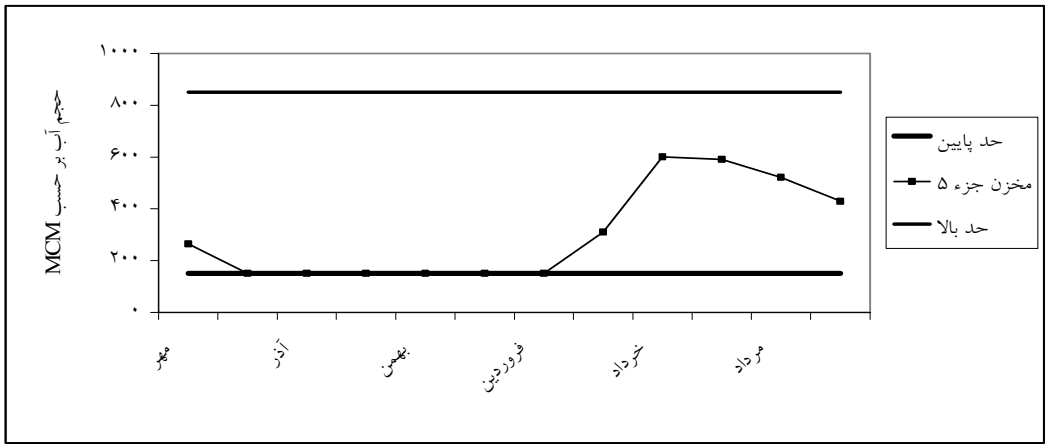
| شماره جزء | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ |
|---|---|---|---|---|---|
| مهر | ۰/۳۱ | ۱۱/۷۳ | ۳/۹۱ | ۰/۳۱ | ۴۳ |
| آبان | ۱/۴۵ | ۵۴/۴۷ | ۱۸/۱۶ | ۱/۴۵ | ۱۹۹/۷۱ |
| آذر | ۲/۵۶ | ۹۵/۸۴ | ۳۱/۹۵ | ۲/۵۶ | ۳۵۱/۴ |
| دی | ۲/۴۱ | ۹۰/۲۶ | ۳۰/۰۹ | ۲/۴۱ | ۳۳۰/۹۴ |
| بهمن | ۲/۷۵ | ۱۰۲/۹۴ | ۳۴/۳۱ | ۲/۷۵ | ۳۷۷/۴۴ |
| اسفند | ۴/۹۹ | ۱۸۷ | ۶۲/۳۳ | ۴/۹۹ | ۶۸۵/۶۸ |
| فروردین | ۵/۴۲ | ۲۰۳/۱ | ۶۷/۷ | ۵/۴۲ | ۷۴۴/۷ |
| اردیبهشت | ۳/۹۹ | ۱۴۹/۷۶ | ۴۹/۹۲ | ۳/۹۹ | ۵۴۹/۱۳ |
| خرداد | ۱/۲ | ۴۵/۱ | ۱۵/۰۳ | ۱/۲ | ۱۶۵/۳۸ |
| تیر | ۰/۴۴ | ۱۶/۴۶ | ۵/۴۹ | ۰/۴۴ | ۶۰/۳۴ |
| مرداد | ۰/۳۳ | ۱۲/۳ | ۴/۱ | ۰/۳۳ | ۴۵/۱۱ |
| شهریور | ۰/۲۸ | ۱۰/۳۴ | ۳/۴۵ | ۰/۲۸ | ۳۷/۹ |

**جدول ۵ - ضرایب آب بازگشتی بکار رفته در حل مساله نمونه برای مدل‌های FEWREM و MODSIM**

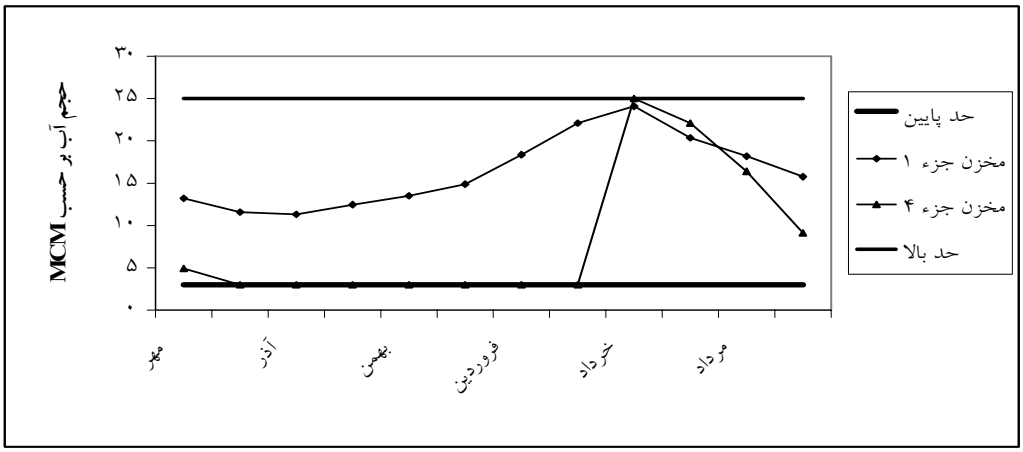
| | |
|---|---|
| ضریب آب بازگشتی از مصرف کشاورزی | ۰/۲۵ |
| ضریب آب بازگشتی از مصرف شرب و صنعت | ۰/۵ |

**جدول ۶- هزینه کمبودها و تامین نیازها (ریال بر متر مکعب) برای مدل‌های FEWREM و MODSIM**

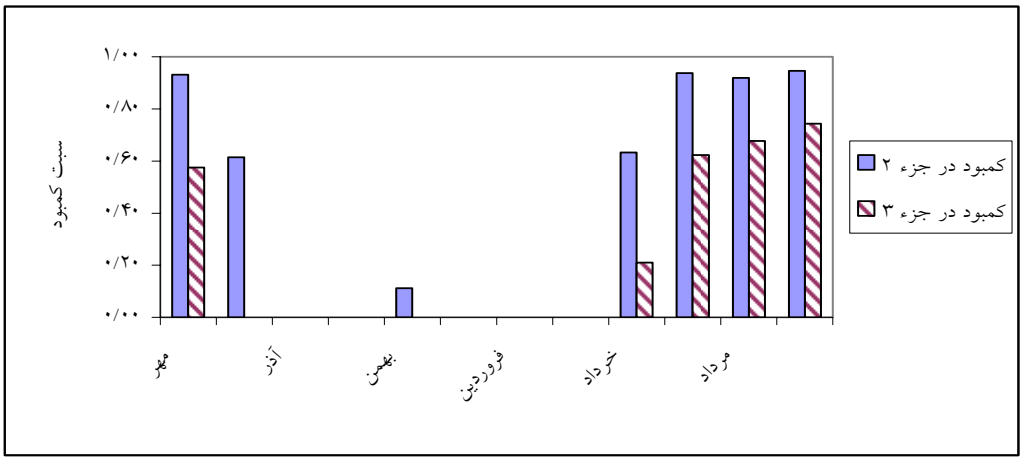
| | |
|---|---|
| هزینه کمبود در تامین نیاز کشاورزی | ۱۴۰ |
| هزینه کمبود در تامین نیاز شهری | ۱۵۰ |
| هزینه کمبود در تامین نیاز زیست محیطی | ۹۰ |
| هزینه تامین نیاز مخزن سد | ۱۰ |
| هزینه تامین نیاز از آب سطحی | ۲ |
| هزینه تامین نیاز از آب زیرزمینی | ۵ |



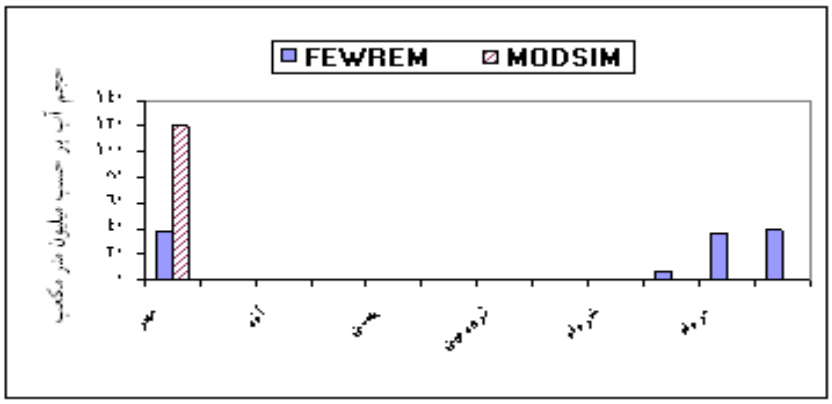

**شکل ۸- عملکرد مخزن در جزء شماره ۵ برای تامین نیاز کشاورزی (متوسط ۳۰ ساله) در مدل FEWREM**



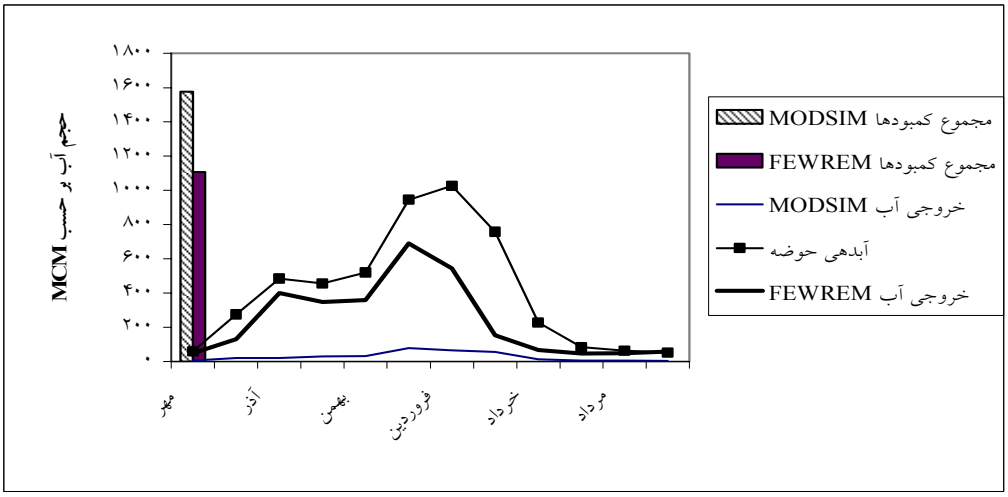

**شکل ۹ - عملکرد مخازن در اجزای ۱ و ۴ برای تامین نیاز شرب (متوسط ۳۰ ساله) در مدل FEWREM**



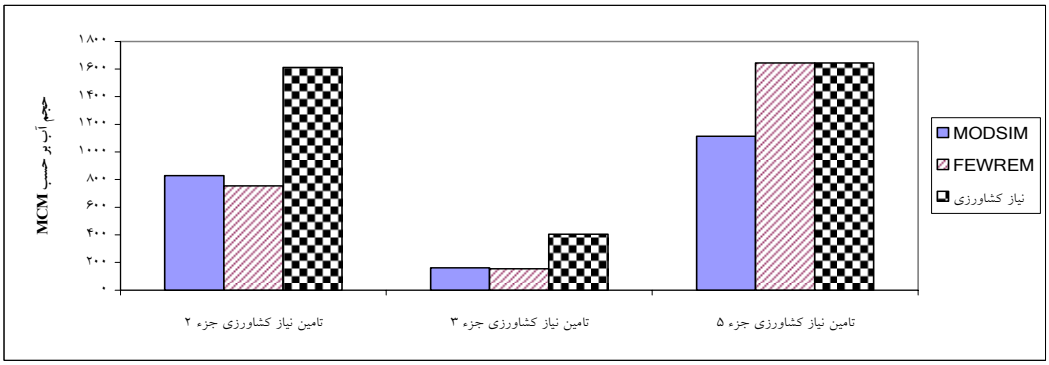

**شکل ۱۰ - کمبود آب مورد نیاز کشاورزی در اجزای ۲ و ۳ (متوسط ۳۰ ساله) در مدل FEWREM**



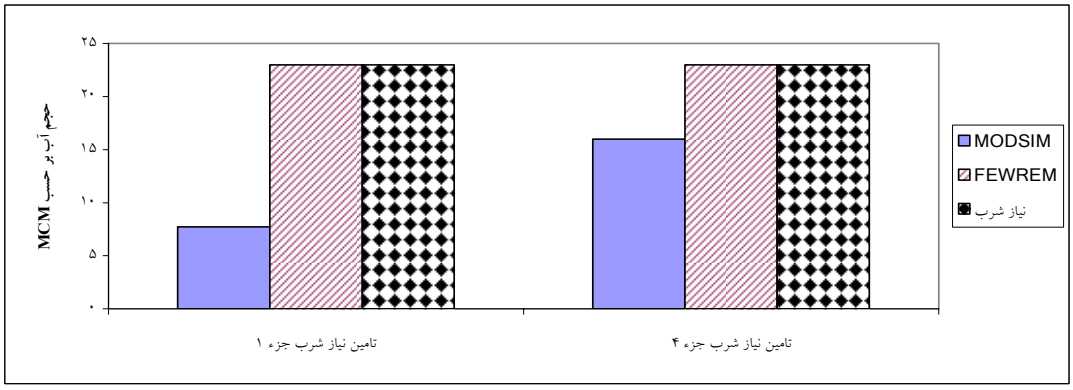

**شکل ۱۱ - مقایسه بهره‌برداری از آب زیرزمینی در جزء ۲ برای کشاورزی (متوسط ۳۰ ساله) در مدل‌های FEWREM و MODSIM**




**شکل ۱۲ - مقایسه تاثیر تنظیمی توسعه در حوضه در قالب آب سطحی موجود برای استفاده و آب خروجی از حوضه (متوسط ۳۰ ساله)**




**شکل ۱۳ - مقایسه تامین نیازهای کشاورزی برای دو مدل FEWREM و MODSIM**




**شکل ۱۴ - مقایسه تامین نیازهای شرب برای دو مدل FEWREM و MODSIM**

## ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با ترکیب نگرش‌های اجزای محدود و نگرش سیستمی، چارچوبی مناسب برای مدل‌سازی سیستم‌های بزرگ بنحوی که بتوان از الگوریتم‌های تجزیه-هماهنگی و یا تجمیع-تکسیر، برای بهینه‌یابی بهره‌برداری از سیستم‌های آبی و شبیه‌سازی آنها استفاده کرد، ارائه گردید. بر مبنای این چارچوب مدلی به نام FEWREM تهیه شد که بهینه‌یابی چند دوره‌ای سیستم آبی را انجام می‌دهد. عملکرد این نرم‌افزار با مدل MODSIM در قالب یک مساله نمونه مقایسه شد. عملکرد مدل FEWREM در مقایسه با مدل MODSIM بعلت تفاوت نگرشهای بکار رفته در این دو مدل از حیث برنامه‌ریزی بهتر بوده است. معیار مقایسه عملکردهای دو مدل، نحوه استفاده از منابع و ابزار موجود برای تامین نیازها بوده است.

## پی‌نوشت‌ها

1- Finite Elements Water Resources Management Model
2-Quadratic Programming
3- Out of Kilter Algorithm
4-Benders Decomposition Algorithm
5-Pacific Gas & Electric Company
6-Prescriptive
7-Direct Solution
8-Decomposition-Coordination Approach
9-Aggregation-Disaggregation Approach
10-Assembling

تاریخ دریافت مقاله: ۲۰ اردیبهشت ۱۳۸۵
تاریخ اصلاح مقاله: ۲۵ تیر ۱۳۸۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۲۵ شهریور ۱۳۸۵

## ۶- مراجع

ACRES, (2004), *ACRES Reservoir Simulation Package User's Manual*, ACRES Co. Ltd., Canada.

Close A., Haneman W.M., Labadie J.W., Loucks D.P., Lund J.R., MacKinney D.C., and Stedinger J.R., (2003), *A Strategic Review of CALSIM II and its Use for Water Planning, Management, and Operations in Central California*, California bay Delta Authority Science Program Association of Bay Governments, Oakland, California.

Delft Hydraulics, (2002), *River Basin Planning and Management*, Rotterdamseweg 185, The Netherlands, http://www.wldelft.nl.

DHI, (2003), *MIKE BASIN 2003*, DHI Water & Environment, DK-2970 Horsholm, Denmark, http://www.dhisoftware.com/mikebasin/.

Jacob, J., Loucks D.P., Stedinger J.R., (1995), SOCRATES, A System for Scheduling hydroelectric generation under uncertainty, *Annals of Operations Research*, Vol. 59.

Labadie J.W. and Baldo M.L. and Larson R., (2000), *MODSIM: Decision Support System for River Basin Management Documentation and User Manual*, Department of Civil Engineering, Colorado State University, U.S Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Pacific Northwest Region.

McKinney D.C., Cai X., Rosegrant M.W., Ringler C. and Scott C.A., (1999), *Modeling Water Resources Management at the Basin Level: Review and Future Directions*, International Water Management Institute.

Stockholm Environment Institute, (2005), *WEAP21: Water Evaluation and Planning System*, 11 Arlington Street, Boston, MA 02116, USA, http://www.weap21.org.