



## Development of a Master Plan for River Water Pollution Control: A Case Study of Karoon-Dez River System

Mohammad Karamouz<sup>1</sup>, Reza Kerachian<sup>2</sup>,  
Banafsheh Zahraie<sup>3</sup>, Nemat Jaafarzadeh<sup>4</sup>

### Abstract

Excessive water withdrawal from the rivers due to growing population, agricultural and industrial development, along with increase in the wastewater discharge to this systems, have intensified the need for integrated planning for water pollution control in river systems. In this paper, a framework of a master plan for water pollution control in the river systems and the results of a case study for developing a master plan for Karoon River water pollution control in Khuzestan Province in Iran are presented. The main pollution sources in the domestic, industrial, agricultural and agro-industrial sectors are identified and the effects of these pollution sources on the river water quality are investigated using the a water quality simulation model. A Multiple-Criterion-Decision-Making (MCDM) technique, namely Analytical Hierarchy Process (AHP) is used in order to determine the share of different sectors in polluting the water resources. Data deficiency and the relative weights of different water quality variables are determined using engineering judgments and the information gathered from brain storming sessions with experts, the agencies' officials, and the stakeholders of the system. Based on this study, specific major categories of water pollution reduction projects were defined and in each category, several projects were identified. The effectiveness of the proposed water pollution control projects is also assessed using the MCDM method and water quality simulation model. The total cost of implementation of the projects was also estimated and the projects were prioritized based on their potential impact on water pollution control. The results of this study show that the proposed methodology is of a significant in developing the master plans for river systems.

**Keywords:** Master Plan, Water Pollution Control, Analytical Hierarchy Process, Multiple-Criteria-Decision-Making, River Water Quality.

## برنامه‌ریزی برای تدوین طرح‌های جامع کاهش آلودگی آب سیستم‌های رودخانه‌ای مطالعه موردی: سیستم رودخانه‌های کارون - دز

محمد کارآموز<sup>۱</sup>، رضا کراچیان<sup>۲</sup>، بنفشه زهرایی<sup>۳</sup> و  
نعمت ... جعفرزاده<sup>۴</sup>

### چکیده

در این مقاله، ساختار یک رویکرد تلفیقی برای طراحی و بهره برداری از مخازن برق آبی تشریح شده است. برای این منظور از یک مدل بهینه‌سازی پویا برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم دو مخزنی سری برق آبی بهره‌گرفته شده است. به منظور کاهش مشکلات ابعادی برخی از پارامترهای طراحی با استفاده از تحلیل حساسیت بر نتایج درازمدت مدل بهینه‌سازی تعیین شده‌اند. این پارامترها شامل ظرفیت نصب نیروگاه، ضریب کارکرد و تراز نرمال و حداقل بهره برداری می باشند. به منظور ارزیابی نتایج شبیه سازی بر اساس تغییرات این پارامترها، تغییرات انرژی مطمئن تولید کل سالانه و اطمینان پذیری تامین نیازهای آبی مورد ارزیابی قرار گرفته است. هدف مدل تدوین شده، ارزیابی تاثیر تدوین سیاست‌های بهینه بهره برداری در مرحله انتخاب پارامترهای اصلی طراحی مخازن برق آبی می‌باشد. شبیه‌سازی عملکرد سیستم دومخزنی با علم - کرخه براساس سیاست‌های بهینه تدوین شده نشان دهنده اهمیت در نظر گرفتن تاثیر این سیاستها بر عملکرد درازمدت سیستم و تعیین پارامترهای طراحی بوده است.

**کلمات کلیدی:** مخازن برق آبی، پارامترهای طراحی، شبیه سازی، برنامه‌ریزی پویا، سیاست های بهره برداری

<sup>1</sup>Prof., School of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran., Karamouz@aut.ac.ir

<sup>2</sup>Assist. Prof., Department of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran., kerachian@ut.ac.ir

<sup>3</sup>Assist. Prof., Department of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran., bzahraie@ut.ac.ir

<sup>4</sup>Assist. Prof., Ahvaz University of Medical Science, Ahvaz, Iran., N\_jaafarzade@yahoo.com

استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
آستادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه تهران،  
آستادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه تهران،  
آستادیار دانشکده بهداشت، دانشکده علوم پزشکی اهواز،

در این مقاله، با یک رویکرد جدید و بسط مطالعات انجام شده توسط Karamouz et al. (2003)، ساختار لازم برای طرح‌های جامع کاهش آلودگی سیستم‌های رودخانه‌ای ارائه می‌شود. شناخت وضع موجود، تعیین منابع آلاینده اصلی، تعیین ساختار سلسله مراتبی متغیرهای کیفی، تعیین سهم آلودگی بخش‌های آلوده‌کننده اصلی با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی چند معیاره، شبیه‌سازی کیفی سیستم، وزن‌دهی متغیرهای کیفی برای تعیین بازه‌های بحرانی رودخانه، تعریف پروژه‌های کاهش آلودگی، بررسی اثربخشی پروژه‌های تعریف شده، تعیین ساختار اجرایی و سیستم نظارت و ارزشیابی طرح و برآورد توزیع زمانی بوجه مورد نیاز برای اجرای طرح جامع، از بخش‌های اصلی ساختار یک طرح جامع کاهش آلودگی هستند.

از نوآوری‌های مهم این مقاله می‌توان به ارائه راهکاری برای تعیین سهم منابع آلاینده در بازه‌های مختلف رودخانه اشاره کرد که از اطلاعات مهم مورد نیاز برای مدل‌های تخصیص بار آلودگی در مدیریت کیفی رودخانه‌هاست. در صورت وجود سهم بار آلودگی بخش‌های اصلی آلاینده سیستم، در مدل‌های تخصیص بار آلودگی می‌توان درصد‌های تصفیه بارهای آلودگی ورودی را به نحوی تعیین کرد که هزینه‌های تصفیه هر بخش آلوده‌کننده، متناسب با سهم آن در آلودگی کلی سیستم باشد. در این مقاله همچنین با استفاده از روش مقایسه زوجی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، وزن نسبی متغیرهای کیفی آب رودخانه برای تعیین بازه‌های بحرانی سیستم تعیین و مورد استفاده قرار گرفته است که در مطالعات قبلی کمتر مورد توجه قرار داشته است. از نوآوری‌های دیگر این تحقیق، بررسی اثربخشی دقیق سیاست‌ها و راهکارهای پیشنهادی کاهش آلودگی با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی کیفی رودخانه است. در مطالعات قبلی تنها کاهش درصدی از بار آلودگی کل به عنوان هدف مورد توجه قرار گرفته و در عمل آثار طرح‌های کاهش آلودگی بر کیفیت منابع آب ارزیابی نشده است.

از آنجا که برنامه‌ریزی، طراحی و مدیریت سیستم‌های منابع آب و محیط‌زیست برای دستیابی به اهداف در جهت توسعه پایدار، نیازمند مشارکت مستقیم مردم و سازمان‌های مرتبط با موضوع طرح است. در تدوین طرح‌های جامع کاهش آلودگی نیز مشارکت بخش‌های مختلف به ویژه در تدوین پروژه‌های کاهش آلودگی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و جامع‌نگری طرح را افزایش خواهد داد. بنابراین لازم است در تدوین طرح‌های جامع کاهش آلودگی بین همه آلوده‌کنندگان و مصرف‌کنندگان آب که تضادهای سازمانی دارند، در ارتباط با سهم هر بخش در بار آلودگی کل ورودی به سیستم تفاهم ایجاد شود. ایجاد این تفاهم نیازمند وجود یک نگرش جامع با پشتوانه‌های علمی برای تعیین راهکارهای کاهش آلودگی و مدیریت کیفی رودخانه است.

رشد و توسعه فعالیت‌های بشر، متأثر از میزان پایداری در سیستم‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی است. امروزه برنامه‌ریزی برای بهره‌برداری از منابع برای نیل به توسعه پایدار، به عنوان یکی از مهمترین مسائل اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی بشر تبدیل شده است. توسعه و مدیریت مؤثر منابع آب به مراتب فراتر از تأمین، انتقال و تصفیه آب است و نیاز به جامع‌نگری در برآورد نیازها، امکانات موجود و ارزیابی شرایط پایداری دارد. طرح‌های جامع کاهش آلودگی به عنوان یکی از ابزارهای ایجاد پایداری در امر توسعه و بهره‌برداری از منابع آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. با وجود اهمیت موضوع، تحقیقات انجام شده در زمینه ساختار لازم برای تدوین طرح‌های جامع کاهش آلودگی، به ویژه در مورد سیستم‌های رودخانه‌ای، بسیار محدود بوده است. تحقیقات انجام شده در زمینه کاهش آلودگی و مدیریت کیفی رودخانه‌ها اغلب مربوط به تخصیص بهینه بار آلودگی منابع آلاینده نقطه‌ای با توجه به ظرفیت خودپالایی این سیستم‌ها بوده و کلان‌نگری لازم در تعیین سهم بار آلودگی منابع و بخش‌های آلاینده و رفع اختلاف بین تصمیم‌گیرندگان و تأثیرپذیران کمتر مورد توجه قرار داشته است. (Bella et al. (1996 در یک مطالعه موردی، مسئله رفع اختلاف در تخصیص آب در یک حوزه آبریز را با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره تحلیل کردند. در این مطالعه رتبه‌بندی سناریوهای موجود بر پایه معیارهای مختلف اقتصادی و زیست‌محیطی صورت گرفته است. (Raju et al. (2000 برای ایجاد جامع‌نگری لازم در بهره‌برداری از طرح‌های بزرگ آبیاری مجموعه متنوعی از معیارها را تعریف کردند. آنان برای رتبه‌بندی سیاست‌های بهره‌برداری، از چندین روش تصمیم‌گیری چند معیاره با در نظر گرفتن معیارهای مختلف زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی استفاده کردند. (Karamouz et al. (2002 از فرآیند سلسله مراتب تحلیلی ۲ (AHP) برای نظارت و ارزشیابی طرح‌های آبیاری تحت فشار استفاده کردند. در این تحقیق با تعریف معیارها و شاخص‌های کمی و کیفی مناسب که برخی از آنها به صورت اعداد فازی جمع‌آوری و پردازش می‌شوند، رتبه‌بندی میزان پیشرفت طرح‌های آبیاری تحت فشار با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی انجام گرفته است.

Karamouz et al. (2003) ساختار لازم برای کاهش آلودگی منابع آب در حوزه‌های آبریز را تدوین کردند. در این طرح با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، ساختار لازم برای کاهش بار آلودگی این سیستم‌ها در حد ۵۰ درصد تدوین و پیشنهاد شده است. کارایی روش پیشنهادی در حوزه آبریز زاینده‌رود مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مقاله حاضر، مطالعه قبلی انجام شده توسط محمد کارآموز (۱۳۷۹) برای کاهش بار آلودگی سیستم‌های رودخانه‌ای توسعه داده می‌شود. کارایی مدل نیز با استفاده از اطلاعات سیستم رودخانه‌ای کارون و دز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

## ۲- مشخصات کلی طرح‌های جامع کاهش آلودگی

### سیستم‌های رودخانه‌ای

در بسیاری از کشورها به ویژه کشورهای در حال توسعه، سیستم‌های برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری از نظر اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی به صورت مجزا عمل می‌کنند. این موضوع در کارایی و پایداری طرح‌های موجود و توسعه این کشورها به طور مستقیم تأثیرگذار بوده است. بررسی مشکلات موجود به ویژه در زمینه‌های زیست‌محیطی نیاز به بازنگری ساختارها و قوانین موجود در این کشورها در عرصه‌های تصمیم‌گیری و ارائه طرح‌هایی با جامع‌نگری کافی برای حل مشکلات موجود (چون طرح‌های جامع کاهش آلودگی) را ضروری ساخته است.

همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، شناسایی مشکلات کمی و کیفی موجود در سیستم منابع آب مورد مطالعه، اولین گام در تدوین طراحی ساختار طرح‌های جامع کاهش آلودگی است. برای این منظور لازم است مؤلفه‌های سیستم، آثار متقابل و تعامل بین آنها شناسایی شوند. طراحی و بهره‌برداری از سیستم‌های نمونه‌برداری و پایش نیز در دو زمینه بهبود داده‌های کمی و کیفی لازم برای مدل‌سازی سیستم و ارزشیابی پروژه‌های کاهش آلودگی در دستیابی به اهداف طرح جامع اهمیت دارد. به عبارت دیگر این سیستم‌ها اطلاعات لازم را از متغیرهای شاخصی ارائه می‌دهند که تغییرهای وضعیت کمی و کیفی سیستم را نشان می‌دهند.

تعریف اهداف و تعیین ابزار کارها چون مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی دومین گام در تدوین طرح‌های جامع کاهش آلودگی است. برخی از مهمترین راهکارهایی که در تدوین و اجرای موفق طرح‌های جامع کاهش آلودگی مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از:

- ایجاد ساختارهای قانونی برای کنترل محیط‌زیست به ویژه منابع آب
- ابزارهای تشویقی اقتصادی و معنوی برای مشارکت بخش‌های خصوصی در طرح‌های کاهش آلودگی
- ارزیابی زیست‌محیطی و اقتصادی طرح‌ها برای آشنا ساختن تصمیم‌گیرندگان و مردم جهت درک بهتر آثار اجرای طرح‌ها و افزایش میزان مشارکت و مسئولیت‌پذیری آنها

با توجه به مطالب فوق، فرآیند تدوین طرح‌های جامع کاهش آلودگی را می‌توان به سه مرحله اصلی خلاصه کرد که جزئیات آن در شکل شماره (۱) ارائه شده است. شناسایی وضع موجود مهمترین فعالیت مرحله اول است که گام‌های اصلی آن در این شکل ارائه شده‌اند. در مرحله دوم، هدف یا اهداف اصلی تدوین طرح جامع کاهش آلودگی مشخص می‌شود. در مرحله سوم، موارد زیر در تدوین فعالیت‌های اجرایی طرح جامع مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرند:

- میزان آب مصرفی بخش‌های مختلف
- سهم بخش‌های مختلف آلاینده اصلی (کشاورزی، صنعتی، شهری و متفرقه) از بار آلودگی کل ورودی به سیستم
- تعیین شاخص‌هایی برای تعیین اثربخشی پروژه‌های پیشنهادی

از بین موارد فوق، تعیین سهم بخش‌های مختلف در آلودگی منابع آب سیستم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است زیرا بسیاری از سازمان‌ها از پذیرش سهم خود در آلودگی سیستم خودداری می‌کنند و همواره سعی می‌کنند با توجیه مشکل از بخش خود سلب مسئولیت کنند. از آنجا که در اجرای موفق طرح‌های کاهش آلودگی، مشارکت همه بخش‌ها و سازمان‌ها ضروری است، ایجاد تفاهم بین سازمان‌های مسئول در آلودگی سیستم اهمیت دارد. استفاده از اهرم‌های اقتصادی چون حمایت مالی از طرح‌های کاهش آلودگی به صورت متناسب با بار آلودگی بخش‌ها می‌تواند در حل سریعتر اختلاف‌های موجود موثر باشد. تعیین پروژه‌های کاهش آلودگی و تدوین جزئیات طرح جامع چون نحوه ارتباطات بین سازمانی در اجرا، نظارت و ارزشیابی طرح در مرحله سوم انجام می‌شود. اولویت‌بندی پروژه‌های کاهش آلودگی پذیرفته شده برای اجرا و تعیین برنامه زمان‌بندی بودجه مورد نیاز در این مرحله انجام می‌شود.

## ۳- گام‌های اصلی تدوین طرح‌های جامع کاهش آلودگی

### سیستم‌های رودخانه‌ای

هدف کلی از طرح‌های جامع کاهش آلودگی سیستم‌های رودخانه‌ای، تدوین و پیشنهاد مجموعه‌ای هماهنگ از راهکارها و سیاست‌های کاهش یا تخصیص بار آلودگی ورودی به رودخانه است به طوری که سیستم با قابلیت اطمینان قابل قبولی با استانداردهای زیست‌محیطی پیشنهاد شده برای رودخانه منطبق شود. گام‌های اصلی برنامه‌ریزی و مدیریت کیفی سیستم‌های رودخانه‌ای به شرح زیر هستند:

### ۳-۱- شناخت وضعیت کمی و کیفی موجود

شناسایی مشکلات کمی و کیفی موجود یا مورد انتظار، اولین گام در برنامه‌ریزی برای مدیریت کیفی یا کاهش آلودگی رودخانه‌هاست. برای این منظور لازم است مؤلفه‌های سیستم، آثار متقابل و تعامل بین آنها شناسایی شوند. تجزیه و تحلیل اطلاعات حاصل از سیستم‌های پایش کمی و کیفی موجود، انجام بازدیدهای میدانی و نمونه‌برداری‌های مقدماتی برای شناخت اولیه از رودخانه و منابع آلاینده آن یا رفع کمبودهای اطلاعاتی از مهمترین فعالیت‌های این مرحله است در قالب مطالعات این بخش، متغیرهای کیفی شاخص، بازه‌های بحرانی سیستم و میزان تخطی از استانداردهای کیفیت آب برآورد می‌شوند.

در طرح‌های مدیریت کیفی سیستم‌های رودخانه‌ای تعیین سهم بخش‌های آلاینده اصلی برای تعریف پروژه‌ها و راهکارهای کاهش آلودگی و تخصیص اعتبارات به این بخش‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بخش‌های آلاینده اصلی بر پایه مشخصات منابع آلاینده منطقه مورد مطالعه تعیین می‌شوند ولی به عنوان یک تقسیم‌بندی کلی می‌توان منابع آلاینده اصلی را به صورت منابع آلاینده شهری و روستایی، صنعتی، کشاورزی و منابع آلاینده متفرقه تقسیم‌بندی کرد. منابع آلاینده متفرقه منابعی را شامل می‌شود که در گروه‌های دیگر در نظر گرفته نشده‌اند. به عنوان مثال، ممکن است آلودگی در نتیجه نشت از مخازن زیرزمینی و خطوط انتقال فرآورده‌های نفتی و همچنین آلودگی ناشی از روان‌آب‌های سطحی شهری در بخش‌های منابع آلاینده صنعتی و شهری باشد. از آنجا که عموماً از این نوع منابع آلاینده، اندازه‌گیری‌های مداوم و دقیقی در دسترس نیست. بار آلودگی برآورد شده آنها را می‌توان تحت عنوان آلاینده‌های متفرقه در نظر گرفت.

### ۳-۲- تعیین سهم بخش‌های مختلف آلاینده اصلی از بار آلودگی ورودی به سیستم

بخش‌ها یا سازمان‌های آلاینده معمولاً از پذیرش سهم خود در آلودگی سیستم خودداری می‌کنند و همواره سعی می‌کنند با توجیه مشکل از بخش خود سلب مسئولیت کنند. تعیین سهم و اولویت‌بندی بخش‌های آلاینده اصلی در بازه‌های زمانی و مکانی مختلف از پیش‌نیازهای اصلی تدوین سیاست‌های تصفیه یا کاهش بارهای آلودگی ورودی است. در تعیین سهم بار آلودگی بخش‌های آلاینده اصلی لازم است وضعیت کمی و کیفی پساب یا زآب‌های ورودی از منظر متغیرهای کیفی مختلف مورد توجه قرار داده شوند. بنابراین روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره می‌توانند به طور مؤثر مورد استفاده قرار گیرند. در این تحقیق از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای تعیین سهم منابع آلاینده اصلی در آلودگی سیستم رودخانه استفاده می‌شود.

این روش توسط (Saaty (1980,1994 ارائه شده و از آن در زمینه‌های مختلف استفاده شده است. از قابلیت‌های مهم روش AHP امکان تعریف ساختار سلسله مراتبی برای معیارها، استفاده از روش مقایسه زوجی برای تعیین وزن نسبی معیارها و امکان تحلیل ناسازگاری است. به طور کلی برای حل هر مسئله به کمک روش تحلیل سلسله مراتبی چهار گام اصلی زیر باید برداشته شود:

- تعریف ساختار سلسله مراتبی
- محاسبه وزن نسبی معیارها
- محاسبه نرخ ناسازگاری
- محاسبه وزن نسبی یا رتبه‌بندی گزینه‌ها

به منظور تدوین ساختار سلسله مراتبی برای معیارها، معیارهای هر سطح به زیرمعیارهایی تقسیم می‌شود. در ردیف آخر ساختار سلسله مراتبی، گزینه‌ها قرار دارند که بر اساس ساختار سلسله مراتبی معیارها ارزشیابی می‌شوند. به منظور محاسبه وزن نسبی معیارها از مقایسه زوجی<sup>۲</sup> بین معیارها استفاده می‌شود. بدین صورت که تصمیم‌گیرنده یا تصمیم‌گیرندگان، معیارها و زیرمعیارها را فقط به صورت دو به دو مقایسه می‌کنند. در صورتی که در مقایسه زوجی معیارها سازگاری وجود نداشته باشد، ناسازگاری و قابلیت اعتماد تصمیم‌ها قابل محاسبه است. به عبارت دیگر تصمیم‌گیرنده باید برای هر معیار، ارزش نسبی زیرمعیارهای مربوط به آن معیار را در قالب ماتریس مقایسه زوجی  $(W = a_{ij})$  که یک ماتریس  $n \times n$  است، تهیه کند.

درایه‌های این ماتریس نسبت وزن معیار  $i$  به معیار  $j$  را نشان می‌دهند. معیار اصلی برای پذیرفتن مقایسه‌های زوجی این است که مقایسه‌ها با هم سازگار باشند. برای این منظور باید نشان بدهیم که:

$$W \cdot w = \begin{pmatrix} 1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & 1 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} = \lambda \cdot w \quad (1)$$

در این رابطه  $\lambda$  یک مقدار ویژه<sup>۳</sup>،  $W$  ماتریس مقایسه زوجی و  $w$  یک بردار متناظر با مقدار ویژه  $\lambda$  است که ماتریس  $n \times 1$  است. از آنجا که اختلاف بزرگترین مقدار ویژه ماتریس مقایسه زوجی  $(\lambda_{max})$  با بعد ماتریس  $(n)$ ، نشان‌دهنده میزان ناسازگاری ماتریس مقایسه زوجی است. اختلاف  $\lambda_{max}$  و  $n$  توسط Saaty برای تعریف ضریب ناسازگاری (CI) استفاده شده است:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

همچنین نسبت ناسازگاری (IR) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$IR = CI / CRI \quad (3)$$

که  $CRI$  ضریب ناسازگاری ماتریس تصادفی برای ماتریس  $n \times n$  است که بصورت تصادفی پر شده است. مقادیر  $CRI$  را می‌توان از جدول (۱) بدست آورد. اگر  $IR < 10\%$  باشد معیار سازگاری حاصل شده است و در غیر این صورت از تصمیم‌گیرنده خواسته می‌شود که مقایسه زوجی را بازنگری کند. این مرحله تا زمانی ادامه دارد که همه مقایسه‌ها معیار سازگاری را پوشش دهد. در اغلب موارد بهتر است ماتریس‌های مقایسه زوجی با استفاده از دیدگاه‌های گروهی از متخصصان و صاحب‌نظران تهیه شود. در این مواقع می‌توان از روش تصمیم‌گیری گروهی که توسط (Aczel and Satty (1983

پیشنهاد شده است استفاده کرد نسبت ناسازگاری کل ساختار سلسله مراتبی نیز لازم است مورد ارزیابی قرار گیرد. به عنوان مثال اگر ساختار سلسله مراتبی دارای یک لایه با  $b$  معیار و  $m$  گزینه باشد، شاخص ناسازگاری کل ( $\overline{CI}$ ) به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\overline{CI} = CI + [w_1 \dots w_b] \times \begin{bmatrix} CI_1 \\ \vdots \\ CI_b \end{bmatrix} \quad (4)$$

در رابطه فوق  $CI$  ضریب ناسازگاری و  $[w_1 \dots w_b]$  بردار ویژه محاسبه شده برای ماتریس مقایسه زوجی معیارها می باشد.  $CI_1, \dots, CI_b$  نیز ضرایب ناسازگاری ماتریس های مقایسه زوجی گزینه ها، به ترتیب مربوط به معیارهای ۱ تا  $b$  هستند. مقدار ضریب ناسازگاری تصادفی ساختار سلسله مراتبی ( $\overline{CRI}$ ) را می توان به صورت زیر برآورد کرد:

$$\overline{CRI} = CRI_b + [w_1 \dots w_b] \times \begin{bmatrix} CRI_1 \\ \vdots \\ CRI_m \end{bmatrix} \quad (5)$$

در رابطه فوق  $CRI_b$  ضریب ناسازگاری تصادفی با بعد  $b$  است  $b$  برابر با تعداد معیارهای اصلی است.  $CRI_m$  نیز ضریب ناسازگاری ماتریس تصادفی با بعد  $m$  است. زمانی که نسبت ناسازگاری ساختار سلسله مراتبی نیز کمتر از ۱۰ درصد باشد معیار سازگاری برقرار است و می توان از این ساختار سلسله مراتبی و وزن های آن برای تعیین سهم بار آلودگی بخش های آلاینده اصلی استفاده کرد.

در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی وزن نسبی هر معیار و یا زیرمعیار از بردار ویژه متناظر با مقدار ویژه حداکثر ماتریس مقایسه مربوطه قابل برآورد است. به عنوان نمونه در ساختار سلسله مراتبی که دارای دو ردیف از معیار است وزن نسبی هر گزینه (سهم بار آلودگی هر بخش) را می توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$w_i^a = \sum_{j=1}^b \left( w_j \times \sum_{n=1}^m [c_{i,n} \times w_{j,n}] \right) \quad (6)$$

$$W_i^a = \frac{w_i^a}{\sum_{j=1}^m w_j^a} \quad (7)$$

$w_i^a$ : وزن گزینه  $i$

$w_j$ : وزن نسبی معیار اصلی  $j$  که برابر با  $j$  زمین درایه بردار ویژه ماتریس مقایسه زوجی معیارهای اصلی است.

$c_{i,n}$ : مقدار زیرمعیار  $n$  برای گزینه  $i$  تقسیم بر حداکثر مقدار این زیرمعیار برای تمام گزینه ها

$w_{j,n}$ : وزن نسبی زیرمعیار  $n$  از معیار اصلی  $j$

$w_i^a$ : وزن نسبی گزینه  $i$

$b$ : تعداد معیارها

$m$ : تعداد گزینه ها

جدول ۱: ضرایب ناسازگاری ماتریس های تصادفی (قدسی پور ۱۳۷۹)

بعد (n)	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
CRI	۰	۰	۰/۵۸	۰/۹	۱/۱۲	۱/۲۴	۱/۳۲	۱/۴۱	۱/۴۵	۱/۴۵

همان طور که اشاره شد وزن نسبی گزینه ها در واقع همان سهم نسبی بخش های آلاینده اصلی از کل بار آلودگی تخلیه شده به سیستم است. برای تعیین دقیق تر سهم بخش های مختلف از بار آلودگی کل ورودی به سیستم و استفاده از آن در تخصیص فصلی بار آلودگی، بهتر است این سهم ها برای بازه های مختلف و فصل های مختلف تعیین شوند. به عنوان مثال بار آلودگی عمده بخش کشاورزی مربوط به فصل های آبیاری و آبشویی است و در برخی از ماه های سال این بخش کمترین تأثیر را در آلودگی سیستم داراست. تعیین تغییرهای مکانی و زمانی سهم بخش های آلاینده در آلودگی سیستم امکان تعریف دقیق تر راهکارهای مدیریت کیفی و بررسی اثربخشی سیاست های تدوین شده را فراهم می سازد.

از آنجا که در این روش لازم است زیرمعیارها نسبت به معیار مرتبط با خود در تراز بالاتر و همچنین گزینه ها نسبت به هر معیار به صورت زوجی مقایسه شوند، معمولاً تعداد زیرمعیارهای هر معیار اصلی یا تعداد گزینه ها به عدد ۹ محدود می شود. دلیل اصلی این امر مشکل بودن مقایسه زوجی تعداد زیادی از معیارها یا گزینه ها (حتی به صورت مقایسه زوجی) برای تصمیم گیرنده است. برای رفع این مشکل می توان برای دسته بندی یا رتبه بندی تعداد زیادی از گزینه ها از روش اندازه گیری مطلق استفاده کرد. کارایی این روش توسط Karamouz et al (2002) در نظارت و ارزشیابی طرح های آبیاری تحت فشار مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور بازه تغییرهای معیارهای سطح آخر به حداکثر ۹ کلاس مختلف تقسیم بندی می شود. در این حالت وزن نسبی کلاس های مختلف به روش AHP معمولی تعیین می شود. سپس برای هر کلاس و هر معیار در تراز آخر یک ارزش نسبی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$PG = \frac{w_{Ind} * w_i}{w_{I_{Max}}} \quad (8)$$

$PG$ : ارزش نسبی کلاس مورد نظر

$w_i$ : وزن نسبی کلاس مورد نظر

$w_{Ind}$ : وزن نسبی معیار متناظر با کلاس مورد نظر در تراز آخر ساختار سلسله مراتبی معیارها که بر اساس محاسبات AHP به دست می‌آید.  
 $w_{Max}$ : حداکثر وزن نسبی کلاس‌هایی که به همراه کلاس مورد نظر با یک معیار در تراز آخر ساختار سلسله مراتبی مرتبط هستند.

برای رتبه‌بندی یا تعیین ارزش هر گزینه، ابتدا تعیین می‌شود که گزینی که در معیارهای مختلف موجود در تراز آخر ساختار سلسله مراتبی معیارها، در رده کلاس قرار می‌گیرد و سپس ارزش نهایی گزینه از مجموع ارزش نسبی  $(PG)$  رده‌های متناظر با آن گزینه به دست می‌آید و رتبه‌بندی گزینه‌ها (به عنوان مثال تعیین نقش نسبی آنها در آلودگی منابع آب) بر اساس ارزش نهایی گزینه‌ها صورت می‌گیرد.

پس از تعیین اولیه سهم بخش‌های اصلی آلاینده سیستم، لازم است با برگزاری جلسه‌های گروهی در سازمان‌ها و شرکت‌های دولتی و خصوصی مرتبط با این بخش‌ها، سهم‌های آلودگی محاسبه شده به بحث گذاشته شود و معیارهای در نظر گرفته شده، روش محاسبه وزن‌های نسبی مورد تبادل نظر قرار گیرد و در صورت نیاز اصلاح و تعدیل شوند. این جلسه‌ها در ایجاد توافق بین سازمان‌ها و بخش‌های مختلف در قبول سهم‌های محاسبه شده و مشارکت جدی آنها در تعریف پروژه‌های کاهش آلودگی و مدیریت کیفی سیستم‌های رودخانه‌ای و اجرای مؤثر آنها بسیار مفید است.

برای انتخاب طرح‌های نهایی مدیریت کیفی رودخانه لازم است تا اثربخشی راهکارهای پیشنهادی در دستیابی به اهداف مورد نظر برآورد شود. طرح‌های کاهش بار آلودگی مستقیم و غیر مستقیم از روش‌های مختلفی نظیر کاهش حجم فاضلاب و پساب تخلیه شده به منابع آب، بهبود یا تغییر کیفیت آلودگی‌های ورودی و کاهش آب مصرفی و به تبع آن کاهش آلاینده‌های تولیدی در کاهش آلودگی منابع آب مؤثر هستند. از آنجا که طرح‌های مدیریت کیفی از نقطه نظر متغیرهای کیفی مختلف بار آلودگی را کاهش می‌دهند، برای تعیین میزان کاهش بار آلودگی ورودی کل در اثر اجرای مجموعه پروژه‌های پیشنهادی، لازم است مجدداً از متغیرهای کیفی در نظر گرفته شده برای محاسبه سهم‌های بار آلودگی ورودی استفاده شود. بنابراین برای تعیین میزان کاهش بار آلودگی کل برای اجرای یک پروژه کاهش آلودگی در یک بازه زمانی، میزان کاهش بار ورودی برای هر متغیر کیفی (مثلاً با واحد تن در سال) برآورد می‌شود و کاهش بار کل به صورت متوسط وزنی کاهش بار آلودگی متغیرهای کیفی مختلف محاسبه می‌شود و تناسب آن با بار آلودگی ورودی از سوی بخش‌های مختلف آلاینده بررسی می‌شود زیرا هزینه‌های مربوط به بخش‌های مختلف آلوده‌کننده برای مدیریت کیفی و کاهش بار آلودگی رودخانه لازم است متناسب با سهم آنها از بار آلودگی ورودی به رودخانه باشند. پس از تدوین راهکارهای نهایی برای مدیریت کیفی رودخانه باید با شبیه‌سازی کیفی رودخانه، دستیابی به

اهداف مورد نظر در زمینه کیفیت آب مورد انتظار با قابلیت اطمینان مناسب بررسی شود.

### ۳-۳- تعیین اثربخشی سیاست‌ها و راهکارهای کاهش آلودگی و مدیریت کیفی

پس از تعیین سیاست‌های تخصیص بار آلودگی، لازم است مجموعه‌ای از راهکارهای کاهش آلودگی چون احداث تصفیه‌خانه‌ها، احداث حوضچه‌های تبخیر، افزایش راندمان آبیاری، کاهش کود و سموم مصرفی در اراضی کشاورزی و غیره مورد استفاده قرار گیرند. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد تخصیص پروژه‌های کاهش آلودگی بهتر است متناسب با سهم بار آلودگی بخش‌های مختلف آلاینده سیستم باشد. از آنجا که هر یک از طرح‌های کاهش آلودگی از نظر متغیرهای کیفی مختلفی بار آلودگی ورودی به سیستم را کاهش می‌دهند برای برآورد بار آلودگی کل کاهش داده شده می‌توان از تحلیل‌های چند معیاره استفاده کرد. لازم است اثربخشی سیاست‌های کاهش بار آلودگی در کیفیت آب رودخانه با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی مناسب مورد ارزیابی قرار گیرد.

### ۳-۴- تهیه ساختار ارتباطات بین بخشی در مدیریت کیفی سیستم رودخانه‌ای

اجرای صحیح سیاست‌های مدیریت کیفی سیستم‌های رودخانه‌ای نیازمند چارچوب و الگویی کاملاً مدون و متناسب با خصوصیات فرهنگی، اجتماعی و اقتصادی منطقه مورد مطالعه است. همچنین انسجام‌دهی به کنترل کیفیت پس از اجرای طرح‌های مدیریت کیفی و کاهش آلودگی، نظارت و ارزشیابی پروژه‌های در دست اجرا و یا بهره‌برداری و بازنگری مجدد طرح‌هایی که منطبق با برنامه زمانبندی پیش‌بینی شده پیشرفت نداشته‌اند و یا از کارایی مورد نظر در کاهش آلودگی برخوردار نبوده‌اند، از اهمیت خاصی برخوردار است. از آنجا که مجری اصلی طرح‌های مدیریت کیفی رودخانه‌ها، سازمان‌ها و واحدهای مختلف هستند، در ساختار تشکیلات کنترل و نظارت بین‌بخشی لازم است مشارکت مستقیم بخش‌ها و سازمان‌های مختلف دولتی و غیردولتی مورد توجه قرار گیرد. مدیریت کیفی سیستم‌های رودخانه‌ای می‌تواند به شورایی تحت عنوان شورای حفاظت و مدیریت کیفی واگذار شود. این شورا متشکل از نمایندگان سازمان حفاظت محیط‌زیست، استانداری، سازمان آب، شرکت آب و فاضلاب و همچنین دیگر سازمان‌ها، شرکت‌ها و بخش‌های مرتبط با آلودگی منابع آب خواهد بود. شوراهای حفاظت و مدیریت کیفی رودخانه‌ها از طریق ایجاد کمیته‌های تخصصی و با استفاده از مشاوران عالی می‌توانند در بررسی و تصویب طرح‌های مدیریت کیفی و کاهش آلودگی، تصویب و تخصیص بودجه‌ها و اعتبارات موجود برای مدیریت کیفی یا کاهش آلودگی سیستم و بررسی و تصویب طرح‌های توسعه تأثیرگذار در وضعیت کیفی رودخانه به طور مستقیم مشارکت داشته باشند.

### ۴- مطالعه موردی سیستم رودخانه‌های کارون - دز

رودخانه کارون با طول بیش از ۴۵۰ کیلومتر یکی از پرآب‌ترین رودخانه‌های ایران محسوب می‌شود، که در مسیر خود آب مورد نیاز شرب و صنعت حدود ۱۶ شهر و ده‌ها روستا، هزاران هکتار اراضی کشاورزی، تولید انرژی برق‌آبی، چندین طرح پرورش ماهی و طرح‌ها و کارخانه‌های صنعتی را به عهده دارد. کاهش آبدی رودخانه در مسیر خود بر اثر برداشت‌های روزافزون آب از یک سو و در عین حال تخلیه پساب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی به رودخانه از سوی دیگر وضعیت کیفی رودخانه را به مخاطره افکنده است. پتانسیل فراوان رودخانه کارون در تأمین آب مورد نیاز و استعداد فراوان اراضی کشاورزی دشت خوزستان و ویژگی‌های ممتاز این استان از حیث قابلیت‌های صنعتی و کشاورزی موجب مطرح شدن طرح‌های باتوجه به نقش مهم رودخانه کارون در حیات شهرهای مهمی چون اهواز، آبادان، خرمشهر و شوشتر و اهمیت این رودخانه در آبیاری اراضی کشاورزی لزوم بررسی تغییر کیفیت آب کارون در آینده و چاره‌اندیشی برای کاهش آلودگی آن آشکار می‌شود. مؤلفه‌های سیستم شامل سیستم تصفیه آب‌های سطحی و پساب‌ها، زهکش‌ها، واحدهای صنعتی منفرد، شهرک‌های صنعتی، شبکه‌های کشاورزی و آلاینده‌های متفرقه هستند که هر یک به نوعی در تولید، توزیع و انتقال آلودگی‌های آب نقش دارند.

محدوده مورد مطالعه در این مقاله، رودخانه کارون واقع در استان خوزستان، بعد از سد گتوند تا بالادست شهر اهواز (ایستگاه زرگان) است. این محدوده به طول ۱۹۰ کیلومتر از شهرهایی چون گتوند، شوشتر، ملاتانی و ویس عبور کرده و ضمن تأمین آب شرب این شهرها، نیاز کشاورزی اراضی حاشیه و پایین دست رودخانه را تأمین می‌کند. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، منابع آلاینده رودخانه کارون در محدوده مطالعه، شامل منابع آلاینده صنعتی، شهری، کشاورزی و کشت و صنعت است. با توجه به نحوه توزیع مکانی آلاینده‌ها و بنابر نظر تصمیم‌گیرندگان و متخصصان سیستم، رودخانه به پنج بازه تقسیم شده است. این ۵ بازه به علت آلوده نبودن کارون در بالادست سد گتوند (بازه ۱)، تلاقی رودخانه‌های کارون و دز در بند قیر (بازه‌های ۲ و ۳) و متاثر بودن کارون از برگشت آب خلیج فارس تا محدوده فارسیات (بازه‌های ۴ و ۵) به شرح زیر انتخاب شده‌اند:

- بازه ۱: رودخانه کارون از محل ورود به استان تا سد گتوند
- بازه ۲: رودخانه کارون از سد گتوند تا بند قیر
- بازه ۳: رودخانه دز از محل ورود به استان خوزستان تا بند قیر
- بازه ۴: رودخانه کارون از بند قیر تا فارسیات
- بازه ۵: رودخانه کارون از فارسیات تا محل ورود به خلیج فارس

شکل (۲) و جدول (۲) موقعیت منابع بالقوه آلاینده اصلی محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهند. بیشترین تعداد واحدهای صنعتی در بازه چهارم قرار دارند که شامل ۱۴ واحد صنعتی بزرگ فعال است. در بازه‌های پنجم،

سوم و دوم به ترتیب ۸، ۶ و ۴ واحد صنعتی بزرگ فعال وجود دارد. از نظر دبی فاضلاب صنعتی تخلیه شده به کارون بازه پنجم با دبی ۴/۲ مترمکعب در ثانیه در رده اول قرار می‌گیرد. بازه سوم با دبی ۳/۵۶ مترمکعب در ثانیه و بازه‌های دوم و چهارم به ترتیب با دبی‌های ۲/۳ و ۱/۶ در رده‌های بعدی قرار دارند. بیشترین بار TDS ناشی از بخش صنعت در بازه پنجم وارد رودخانه می‌شود. بازه‌های چهارم، سوم و دوم در اولویت‌های بعدی از نظر بار TDS ورودی از بخش صنعت قرار دارند.

برای بررسی وضعیت موجود کیفیت آب در سیستم رودخانه - مخزن کارون - دز از اطلاعات مربوط به اندازه‌گیری‌های کیفی سازمان حفاظت محیط‌زیست، سازمان آب و برق خوزستان از کیفیت آب رودخانه و منابع آلاینده در بازه زمانی سالهای ۱۳۷۳ تا ۱۳۸۱ استفاده شده است. نتایج مربوط به پهنه‌بندی و وضعیت کیفی رودخانه از نظر متغیرهای مختلف کاراموز (۱۳۸۱) ارائه شده است. سیستم با استفاده از مدل شبیه‌سازی QUAL2E برای سال ۱۳۷۸ شبیه‌سازی شده است. در این سال به علت اندازه‌گیری‌های انجام شده در قالب طرح ساماندهی آبراهه کارون و همچنین اندازه‌گیری‌های سازمان حفاظت محیط‌زیست، بیشترین اطلاعات کمی و کیفی از منابع آلاینده و کیفیت آب رودخانه موجود است. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده به خوبی تغییرهای زمانی و مکانی آلاینده‌های اصلی در طول سیستم را نشان می‌دهند.

مقایسه نتایج مدل با اندازه‌گیری‌های موجود، نشان‌دهنده کارایی مناسب مدل جهت شبیه‌سازی کیفی سیستم در شرایط موجود و برآورد تغییرهای غلظت متغیرهای کیفی مهم در شرایط آبی است. در این مطالعه با واسنجی مدل، ضرایب مربوط به نرخ‌های پخش و زوال متغیرهای کیفی مختلف در بازه‌های مختلف رودخانه بدست آمده است. در این مدل شبیه‌سازی، رودخانه به چهار بخش رودخانه دز، شاخه گرگر، رودخانه کارون از سد گتوند تا زرگان و رودخانه کارون از زرگان تا دارخوین تقسیم شده و هر قسمت به طور مجزا با در نظر گرفتن شرایط مرزی و اولیه شبیه‌سازی شده است. جزئیات بیشتری از نحوه مدل‌سازی، واسنجی و صحت‌سنجی مدل تدوین شده برای شبیه‌سازی کیفی رودخانه در مرجع (۱) ارائه شده است. بر پایه اندازه‌گیری‌های موجود و نتایج شبیه‌سازی سیستم، تغییرهای غلظت متغیرهای کیفی مهم در سیستم برآورد شده است که خلاصه‌ای از نتایج در جدول (۳) ارائه شده است (جهت اطلاع از جزئیات تغییرات مکانی و زمانی متغیرهای کیفی به کاراموز (۱۳۸۱) مراجعه شود). غلظت دیگر متغیرهای کیفی در شرایط موجود در حد استاندارد است. برای تعیین وضعیت کلی سیستم از نظر تخطی از استانداردهای کیفیت آب رودخانه و تعیین بازه‌های بحرانی، از مقادیر اندازه‌گیری شده متغیرهای کیفی در ایستگاه‌های مختلف استفاده شده است. در این تحلیل متغیرهای کیفی ارائه شده در جدول (۴) به همراه وزن نسبی آنها، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

جدول ۲: توزیع مکانی منابع بالقوه آلاینده صنعتی مهم (اداره کل محیط زیست خوزستان، ۱۳۸۱)

بازه	منابع مهم آلاینده صنعتی
بازه اول	منابع آلاینده قابل توجه وجود ندارد
بازه دوم	کارخانه نیشکر کارون، زهکش‌های پرورش ماهی، کشتارگاه گتوند، کشتارگاه شوشتر، تخلیه پساب‌ها از طریق تانکر
بازه سوم	کارخانه قند دزفول، کاغذ سازی پارس، کارخانه نیشکر هفت تپه، کشتارگاه اندیمشک، کشتارگاه دزفول، کشتارگاه شوشتر
بازه چهارم	نیروگاه رامین، نیروگاه زرگان، خرم نوش اهواز، لوله‌سازی خوزستان، نورد و لوله اهواز، گروه ملی فولاد اهواز، فارسیت، شیر پاستوریزه اهواز، زمزم، نیکنوش اهواز، قند و تصفیه شکر اهواز، دامپروری ملاتانی، شرکت مقوا و خمیر اهواز
بازه پنجم	مجتمع شیمیایی پاسارگاد، صابون سازی خرمشهر، خرم نوش خرمشهر، پتروشیمی آبادان، شیر پاستوریزه آبادان، شرکت نیکنوش خرمشهر، نوشابه‌های گازدار آبادان، پالایشگاه آبادان (تخلیه پساب به اروند)

مقایسه زوجی برابر با میانگین هندسی درایه‌های متناظر در ماتریس‌های مقایسه زوجی افراد گروه تصمیم‌گیری هستند. پس از محاسبه این ماتریس‌های مقایسه زوجی و انجام تحلیل‌های سازگاری آنها، وزن نسبی متغیرهای کیفی در هر ردیف ساختار سلسله مراتبی به روش بردارهای ویژه تعیین می‌شود.

در تمامی موارد نسبت ناسازگاری ماتریس‌های مقایسه زوجی کمتر از ۱۰ درصد بوده است. شکل شماره (۲) ساختار سلسله مراتبی شاخص‌ها و وزن نسبی آنها را که به روش بردار ویژه محاسبه شده‌اند را نشان می‌دهد.

در تمامی موارد نسبت ناسازگاری ماتریس‌های مقایسه زوجی کمتر از ۱۰ درصد بوده است. شکل شماره (۲) ساختار سلسله مراتبی شاخص‌ها و وزن نسبی آنها را که به روش بردار ویژه محاسبه شده‌اند را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است در مورد متغیر کیفی pH، برای در نظر گرفتن آثار کلیایی و اسیدی بودن، مقدار عددی pH از عدد ۷ کم شده است و قدر مطلق آن منظور شده است. متغیر کیفی DO نیز به صورت یک متغیر کیفی مثبت در تحلیل‌ها در نظر گرفته شده است.

بر اساس وزن‌های نسبی متغیرها و بار آلودگی ورودی بخش‌های مختلف، برای متغیرهای کیفی شاخص، سهم آلاینده‌های بخش کشاورزی و کشت و صنعت، شهری و صنعتی تعیین شده است. سهم آلودگی منابع آلاینده اصلی که برای کل محدوده مطالعه در فصل‌های بهار، تابستان، پاییز و زمستان محاسبه شده‌اند در جدول (۶) ارائه شده است. برای فصل تابستان و به صورت سالانه، سهم منابع آلاینده مختلف در بازه‌های دوم تا پنجم به صورت جداگانه محاسبه شده است و نتایج آن در جدول (۷) ارائه شده است. نتایج این بررسی‌ها نشان‌دهنده سهم عمده بخش کشاورزی در آلودگی رودخانه کارون است.

با توجه به میزان تخطی نرمال شده، غلظت متغیرها و اهمیت نسبی آنها در آلودگی آب، با استفاده از روش مقایسه زوجی، مقدار ویژه هر یک از وزن‌های نسبی اختصاص داده شده به متغیرهای کیفی محاسبه شد. بررسی وضعیت کلی تخطی از استانداردها نشان می‌دهد که در کل سیستم، تخطی از استاندارد وجود داشته و حد فاصل بند قیر تا دارخوین از شرایط بحرانی‌تری برخوردار است.

#### ۴-۱- تعیین سهم آلودگی اصلی آلاینده

برای ارزیابی آثار زیست‌محیطی فاضلاب‌ها، زه‌آب‌ها و پساب‌های تخلیه شده به رودخانه کارون، برخی از متغیرهای کیفی به عنوان متغیرهای شاخص در نظر گرفته شده‌اند. ملاک انتخاب متغیرهای فوق مشترک بودن اطلاعات مربوط به اندازه‌گیری این متغیرها در منابع آلاینده و همچنین اهمیت این متغیرها در تغییر کیفیت آب رودخانه بوده است. متغیرهای کیفی انتخاب شده در پنج گروه فلزات سنگین، مواد آلی، مواد جامد، مواد مغذی و متفرقه تقسیم‌بندی هستند (جدول ۵). اطلاعات مربوط به غلظت فلزات سنگین در آلاینده‌های سیستم در سال‌های اخیر موجود نبوده است ولی از آنجا که نتایج تحلیل‌های انجام شده نشان دهنده اهمیت قابل توجه بار آلودگی مربوط به فلزات سنگین در تعیین سهم آلاینده‌های بخش‌های مختلف است، از نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده در سال‌های ۱۳۷۴ تا ۱۳۷۶ استفاده شده است.

برای تعیین سهم آلاینده‌های اصلی در سیستم رودخانه کارون و دز، در ساختار سلسله مراتبی متغیرهای کیفی، ۲۰ متغیر کیفی شاخص در سه سطح تعریف شده‌اند. برای تعیین وزن نسبی زیرمعیارها، زیرمعیارهای هر متغیر کیفی یا گروه اصلی به صورت دو به دو با هم مقایسه شده و وزن نسبی آنها بر اساس میزان آلودگی و میزان تأثیر آنها در سیستم و قضاوت مهندسی تعیین می‌شود. (شکل ۳). در برآورد ماتریس‌های مقایسه زوجی از روش تصمیم‌گیری گروهی استفاده شده است. همان‌طور که قبلاً در توضیح روش AHP اشاره شد در این روش درایه‌های ماتریس



جدول ۳: وضعیت کلی برخی از متغیرهای کیفی مهم در رودخانه کارون

متغیرهای کیفی شاخص	حد استاندارد (mg/L)	منابع اصلی آلودگی	توضیحات
DO	۵-۱۰	-	به طور موضعی در رودخانه دز کمتر از حد استاندارد تخطی می‌کند. ولی معمولاً مشکل اکسیژن محلول وجود ندارد.
BOD	۵-۱۰	فاضلاب‌های شهری و برخی صنایع بزرگ	در بازه دز و بازه اهواز تخطی از استاندارد کیفی وجود دارد.
COD	۲۵-۴۰	اراضی پرورش ماهی و صنایع	در بازه دز و بازه گرگر و حوالی اهواز تخطی از استاندارد وجود دارد.
باکتری‌های کلیفرم گوارشی	۱۰۰۰ عدد در ۱۰۰ میلی لیتر	فاضلاب شهری، کشتارگاه‌ها و زه‌آب کشاورزی	بر پایه اندازه‌گیری‌های موجود غلظت آن در اغلب بازه‌ها به مراتب بالاتر از حد استاندارد است.
مواد جامد محلول	۱۲۰۰	زه‌آب‌های کشاورزی و بسزدگی آب شور خلیج فارس	غلظت این متغیر کیفی از بالادست به سمت خلیج فارس به طور مداوم افزایش می‌یابد و به ویژه در پایین دست دارخوین از استاندارد تخطی می‌کند.
فلزات سنگین	-	زه‌آب‌های کشاورزی و پساب صنایع	غلظت فلزاتی چون کادمیم و نیکل و سرب از استاندارد رودخانه تخطی می‌کند.

جدول ۴: متغیرهای کیفی در نظر گرفته شده برای کیفیت آب رودخانه جهت تعیین نقاط بحرانی در تیرماه ۱۳۷۸

متغیر کیفی	استاندارد (mg/L)	وزن نسبی	متغیر کیفی	استاندارد (mg/L)	وزن نسبی
DO (متغیر مثبت)	۵	۰/۰۹	فسفر کل	۰/۱	۰/۰۴۳
SO <sub>4</sub>	۲۵۰	۰/۰۴۳	کدورت (NTU)	۵۰	۰/۰۴۳
Cl	۲۰۰	۰/۰۴۳	Coliform (MPN /100mL)	۱۰۰۰	۰/۱۴
غلظت کل جامدات محلول به جز کلر، سولفات و پتاسیم	۱۸۳	۰/۰۹	COD	۲۵۰	۰/۰۴۳
Cd	۰/۰۰۵	۰/۱۴	Hg	۰/۰۰۰۲	۰/۱۴
K <sup>+</sup>	۱۲	۰/۰۴۳	Pb	۰/۰۰۵	۰/۱۴

جدول ۵: متغیرهای کیفی انتخاب شده برای منابع آلاینده و گروه بندی آنها

گروه اصلی آلاینده	متغیرهای کیفی
فلزات	Fe, Hg, Cd, Pb
مواد آلی	CO BOD, D
مواد جامد محلول و نامحلول	کدورت، سختی، TSS, TDS, SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> , Cl <sup>-</sup>
مواد مغذی	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , P
متفرقه	DO, Coliform, pH

صحيح نيست. کاراموز (۱۳۸۱)، دسته‌بندی صنایع با استفاده از روش رتبه‌بندی AHP با اندازه‌گیری مطلق انجام شده است. همان‌طور که در توضیح روش AHP اشاره شد برای اولویت بخشی گزینه‌های مختلف دو روش اندازه‌گیری نسبی و اندازه‌گیری مطلق وجود دارد. در روش اندازه‌گیری نسبی، وزن‌های نسبی اهداف، زیرهدف‌ها و گزینه‌ها، براساس مقایسه با یکدیگر محاسبه می‌شود. در مقابل، در اندازه‌گیری مطلق تمام مقایسه‌ها با یک مقیاس تعیین شده انجام می‌شود که در نتیجه حجم مقایسه‌ها به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد.

#### ۲-۴- رتبه‌بندی منابع آلاینده

در بخش قبل سهم منابع آلاینده اصلی محدوده مورد مطالعه در بازه‌ها و فصل‌های مختلف تعیین شد. برای تخصیص مناسب پروژه‌های کاهش آلودگی لازم است در بخش‌های مختلف سهم و رتبه‌بندی عوامل آلاینده نیز مشخص شود. به عنوان مثال در بخش صنعت بیش از ۳۰ واحد صنعتی بزرگ در محدوده مورد مطالعات وجود دارند که فاضلاب یا پساب صنعتی خود را به رودخانه کارون تخلیه می‌کنند. از آنجا که تعداد صنایع آلاینده زیاد است و عملاً امکان مقایسه زوجی بین این تعداد از گزینه‌ها عملی و

جدول ۶: سهم آلودگی بخش‌های آلاینده اصلی در کل محدوده مورد مطالعه (درصد) (اداره کل محیط‌زیست خوزستان، ۱۳۸۱)

فصل	کشاورزی و کشت و صنعت	شهری	صنعتی
بهار	۶۲	۲۴	۱۴
تابستان	۴۷	۲۷	۲۶
پاییز	۲۸	۳۳	۳۹
زمستان	۳۱	۳۴	۳۵
سالانه	۴۹	۲۷	۲۴

#### ۳-۴- پیشنهاد پروژه‌های کاهش آلودگی

در بخش قبل سهم بار آلودگی و رتبه‌بندی منابع آلاینده مهم در محدوده مورد مطالعه ارائه شد. سهم‌های بار آلودگی محاسبه شده در قالب جلسه‌های کارشناسی متعدد بررسی شده و به تأیید سازمان‌ها یا بخش‌های آلاینده در محدوده طرح رسیده است. این موضوع در رفع یا کاهش اختلاف‌های موجود و جلب مشارکت فعال سازمان‌ها و بخش‌های آلاینده در تدوین، پیشنهاد و اجرای طرح‌های کاهش آلودگی نقش قابل توجهی داشته است. پروژه‌ها یا راهکارهای کاهش آلودگی در سه گروه اصلی پروژه‌های مستقیم، پروژه‌های غیر مستقیم و پروژه‌های پشتیبانی به شرح زیر تعریف شده‌اند:

- پروژه‌های مستقیم پروژه‌هایی را شامل می‌شوند که با اجرای آنها آلودگی به طور مستقیم کاهش می‌یابد و تأثیر آنها بدون واسطه است.
- پروژه‌های غیرمستقیم شامل پروژه‌هایی هستند که اجرای آنها به طور غیرمستقیم بر کاهش آلودگی تأثیر می‌گذارد. این پروژه‌ها عموماً از طریق ایجاد توازن در عرضه و تقاضای آب، پایداری بلند مدت سیستم را از نظر کمی و کیفی را موجب می‌شوند. این پروژه‌ها در بلند مدت می‌توانند نقش مؤثری در بازسازی اکولوژیک سیستم داشته باشند.
- پروژه‌های پشتیبانی، امکان جمع‌آوری، کنترل کیفیت و تحلیل اطلاعات پایه و زمینه‌های تحقیقاتی مورد نیاز را برای اجرای طرح جامع کاهش آلودگی منابع آب را فراهم می‌کنند و همچنین در قالب یک طرح نظارت و ارزشیابی، امکان کنترل و اصلاح روند طرح‌ها را فراهم می‌کنند.

در این بخش با همکاری مستقیم سازمان‌ها و واحدهای مرتبط با آلودگی رودخانه و همفکری با کارشناسان و صاحب‌نظران داخلی و خارجی بیش از ۱۵۴ پروژه کاهش آلودگی تعریف شده که محورهای اصلی آن در جدول (۸) ارائه شده است.

#### ۴-۴- بررسی اثر بخشی پروژه‌های کاهش آلودگی

با توجه به این که افق طرح و زمان اجرای اغلب پروژه‌های پیشنهادی ۱۰ سال است ضرورت دارد با توجه به وضعیت طرح‌های توسعه منابع آب در

منطقه و اثر بخشی هر یک از پروژه‌های کاهش آلودگی، میزان کاهش بار آلودگی سیستم و وضعیت کیفی رودخانه پس از اجرای طرح‌های پیشنهادی بررسی شده و دستیابی به اهداف مورد انتظار بررسی شود. بر پایه اطلاعات موجود از طرح‌های توسعه و انتقال منابع آب در منطقه، نتایج بررسی‌های انجام شده نشان دهنده این مطلب است که با وجود افزایش نیازهای آبی سیستم رودخانه‌های کارون و دز، به علت افزایش قابل ملاحظه قدرت کنترل سیستم، تأمین نیازهای آبی و زیست‌محیطی همواره امکان‌پذیر است. بررسی غلظت TDS در شرایط آبی نشان‌دهنده این مطلب است که با افزایش آبدی رودخانه در فصل‌های کم آبی، به علت افزایش قدرت تنظیم دبی رودخانه، افزایش راندمان آبیاری و با اجرای دیگر طرح‌های کاهش آلودگی، علاوه بر تأمین حداقل نیاز آبی پایین دست و جلوگیری از شوری رودخانه ناشی از پس زدگی آب دریا، غلظت کل مواد جامد محلول در سیستم در حد مجاز برای آب شرب خواهد بود و از این جنبه مشکل چندانی وجود نخواهد داشت. در صورتی که به امر بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها با نگرش ویژه به مسائل زیست‌محیطی و اجرای پروژه‌های کاهش آلودگی از منابع در بخش کشاورزی توجه شود، این امر نیاز به پروژه‌های کلان انتقال زه‌آب‌های کشاورزی را منتفی می‌سازد.

برای تعیین اثربخشی پروژه‌های پیشنهادی، معیارهایی چون تغییر در میزان آب مصرفی و فاضلاب تولید شده، مشخصات طرح‌های کاهش آلودگی چون مشخصات تصفیه‌خانه‌های شهری و صنعتی، استاندارد تخلیه فاضلاب به آب‌های سطحی مورد توجه قرار گرفته است. از آنجا که پروژه‌های کاهش آلودگی از نقطه نظر متغیرهای کیفی مختلف بار آلودگی ورودی را کاهش می‌دهند، با در نظر گرفتن وزن نسبی متغیرهای کیفی، که بر اساس مقایسه‌های زوجی در بخش تعیین سهم آلاینده‌های ورودی برآورد شدند، میزان کاهش بار آلودگی ورودی به سیستم در بخش‌های کشاورزی، شهری، صنعتی و متفرقه محاسبه شده و نتایج در جدول (۹) ارائه شده است.

شکل (۴) بخش‌های آلاینده اصلی، سهم هر بخش از آب مصرفی و بار آلودگی سالانه تولیدی و اثر بخشی پروژه‌های پیشنهادی در کاهش بار آلودگی را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول (۹) و شکل شماره (۴) با اجرای طرح‌ها و راهکارهای کاهش آلودگی، بار آلودگی کل ورودی به سیستم به میزان ۵۰ درصد کاهش خواهد یافت. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است بار آلودگی ورودی به سیستم از طرف بخش‌های اصلی آلاینده کاملاً متناسب با میزان آب مصرفی آنها نیست. به عنوان مثال بخش شهری و روستایی که تنها ۴ درصد آب برداشتی از کارون را مصرف می‌کند در حدود ۲۶ درصد بار آلودگی را باعث می‌شود. در این شکل بر اساس میزان عدم قطعیت موجود در برآورد سهم بار آلودگی هر بخش، بازه (طیف) تغییرات سهم‌های بخش‌های مختلف از بار آلودگی کل نیز مشخص شده‌اند. بخش کشاورزی که بیشترین سهم آلودگی را نیز

دارد به علت مشخص نبودن دقیق میزان آب مصرفی، عدم اندازه‌گیری تمامی زه‌آب‌ها و وجود جریان‌های برگشتی دارای بیشترین عدم قطعیت است. عدم قطعیت بخش‌های شهری و صنعت به علت وجود چاه‌های جذبی، عدم اندازه‌گیری دقیق دبی کانال‌های تخلیه فاضلاب و تخلیه‌های غیر مجاز به رودخانه بوده است. عدم قطعیت بار آلودگی بخش متفرقه نیز که به علت عدم اندازه‌گیری روان‌آب‌های سطحی شهری، شیرابه‌های زباله و نشست از مخازن و خطوط لوله بوده است، با توجه به میزان سهم آن، قابل توجه است.

زیرکمیته‌های مختلف مربوط به پروژه‌های شهری، صنعتی، کشاورزی و کشت و صنعت تشکیل شده است و بنا به ضرورت از یک مشاور عالی استفاده می‌کند. شورا و زیرکمیته‌های مرتبط آن تصویب طرح‌ها، تخصیص اعتبارات، نظارت بر اجرا و بهره‌برداری و همچنین ارزشیابی پیشرفت طرح جامع را به عهده دارند. ساختارهای مشابه شکل (۵)، برای بخش‌های آلاینده دیگر سیستم، نظیر بخش‌های صنعت، کشاورزی و کشت و صنعت نیز تدوین شده است.

جدول ۷: سهم آلودگی بخش‌های آلاینده اصلی در بازه‌های مختلف

بازه	فصل تابستان (درصد)			سالانه (درصد)		
	کشاورزی و صنعت	شهری	رشته	کشاورزی و صنعت	شهری	رشته
بازه ۲	۴۱	۲۴	۳۵	۷۳	۱۷	۱۰
بازه ۳	۵۹	۱۹	۲۲	۵۵	۲۰	۲۵
بازه ۴	۵	۷۴	۲۱	۱۵	۶۱	۲۴
بازه ۵	ناچیز	۴۲	۵۸	ناچیز	۴۱	۵۹
کل محدوده مطالعه	۵۲	۲۷	۲۱	۴۹	۲۷	۲۴

همانطور که اشاره شد برای بررسی غلظت متغیرهای کیفی مختلف در طول مسیر رودخانه، سیستم مجدداً در قالب سناریوهای مختلف در شرایط توسعه و با در نظر گرفتن اثر بخشی پروژه‌های پیشنهادی توسط مدل QUAL2E شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان دهنده رعایت استانداردهای پیشنهاد شده برای کیفیت آب در رودخانه‌ها هستند. اجرای بسیاری از راهکارهای مدیریت کیفی سیستم‌های رودخانه‌ای ممکن است زمان‌بر بوده یا به علت محدودیت‌های اجرایی یا مالی امکان اجرای همزمان طرح‌ها یا راهکارهای مدیریت کیفی و کاهش بار آلودگی وجود نداشته باشد. بنابراین لازم است بر اساس معیارهایی چون اثر بخشی راهکارها، زمان اجرا، هزینه و امکانات جانبی مورد نیاز، طرح‌ها اولویت‌بندی شده و برنامه زمانی اجرا بر این اساس تهیه شود. در تدوین برنامه زمان‌بندی اجرا اغلب سعی می‌شود پروژه‌های با اثر بخشی بیشتر در ابتدا اجرا شوند تا امکان کاهش و یا کنترل سریع‌تر آلودگی منابع آب در محدوده مورد مطالعه فراهم شود. در تعیین برنامه زمان‌بندی پروژه‌های کاهش آلودگی لازم است پروژه‌های پشتیبانی به لحاظ اهمیتی که در اثر بخشی پروژه‌های مستقیم و غیر مستقیم دارند از ابتدا مورد توجه قرار گیرند و متناسب با این پروژه‌ها اجرا شوند.

#### ۵- خلاصه و جمع‌بندی

در این مقاله ساختار کلی و مراحل لازم برای تدوین طرح‌های جامع کاهش آلودگی سیستم‌های رودخانه‌ای در قالب یک مطالعه موردی ارائه شد. از آنجا که در تدوین طرح و پیشنهاد پروژه‌های کاهش آلودگی، تعیین سهم بخش‌ها و واحدهای آلاینده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، با پیشنهاد ساختار سلسله مراتبی متغیرهای کیفی و به کارگیری روش تصمیم‌گیری چند معیاره فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) سهم بخش‌ها و واحدهای آلاینده در آلودگی سیستم برآورد شد. وجود پشتوانه علمی در تعیین سهم بخش‌های آلاینده در رفع یا کاهش اختلاف‌های موجود و جلب مشارکت سازمان‌ها و واحدهای مختلف در تدوین و اجرای راهکارهای کاهش آلودگی مؤثر است. طرح‌های کاهش آلودگی متناسب با بار آلودگی بخش‌ها، در سه گروه پروژه‌های مستقیم، پروژه‌های غیر مستقیم و پروژه‌های پشتیبانی تعریف می‌شوند. اثر بخشی راهکارهای پیشنهادی با استفاده مجدد از ساختار سلسله مراتبی معیارها و وزن‌های نسبی متغیرهای کیفی انجام می‌شود.

پس از تعیین برنامه زمان‌بندی اجرای پروژه‌های کاهش آلودگی، اعتبارات مورد نیاز برای سال‌های اجرای طرح نیز با مشارکت سازمان‌ها و بخش‌های پیشنهاد دهنده آنها برآورد شده است. شکل (۴) مجموع اعتبارات ریالی و ارزی مورد نیاز در یک افق ۱۰ ساله را ارائه می‌دهد. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد مجری اصلی طرح‌های مدیریت کیفی و کاهش آلودگی رودخانه‌ها، سازمان‌ها و واحدهای مختلف هستند. بنابراین در ساختار تشکیلات کنترل و نظارت بین‌بخشی طرح جامع کاهش آلودگی رودخانه‌ها لازم است مشارکت مستقیم بخش‌ها و سازمان‌های مختلف دولتی و غیر دولتی مورد توجه قرار گیرد. تصویب، نظارت و ارزشیابی در بخش‌های طراحی، اجرا و بهره‌برداری راهکارها و پروژه‌های کاهش آلودگی بهتر است بر عهده یک شورای حفاظت کیفی، متشکل از نمایندگان بخش‌ها و سازمان‌های مرتبط باشد. شکل (۵) ساختار پیشنهادی برای اجرا و بهره‌برداری راهکارهای کاهش آلودگی برای سیستم رودخانه کارون را به عنوان نمونه برای بخش شهری نشان می‌دهد. شورای حفاظت کیفی از

از مدل‌های شبیه‌سازی کیفی نیز برای بررسی تغییرهای زمانی و مکانی غلظت متغیرهای کیفی مهم در سیستم رودخانه‌ای استفاده می‌شود. ساختار پیشنهادی در تدوین طرح جامع سیستم رودخانه‌های کارون و دز مورد استفاده قرار گرفته است و نتایج، کارایی الگوریتم پیشنهادی را در تدوین مناسب طرح‌های جامع کاهش آلودگی نشان می‌دهد.