

## ارزیابی فنی اقتصادی و زیست‌محیطی روش های تصفیه فاضلاب صنایع آبکاری به روش AHP

محمد رضا دباغیان<sup>۱\*</sup>

r\_dabaghyan@yahoo.com

سید حسین هاشمی<sup>۲</sup>

تقی عبادی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۸۶/۱۰/۲۰

تاریخ پذیرش: ۸۶/۱۱/۲۳

### چکیده

در این تحقیق یک روش سیستماتیک برای انتخاب بهترین گزینه در تصفیه فاضلاب صنایع آبکاری که حاوی فلزات سنگین می‌باشد، معرفی شده است. بدین صورت که در این روش پس از استفاده از نظرات کارشناسان، مشاوران و آبکاران به کمک روش تحلیل سلسله مراتبی<sup>۴</sup> (AHP) بهترین گزینه انتخاب شده است.

این تحقیق در محدوده شهر تهران انجام گرفته است که در آن چهار گزینه برای تصفیه فاضلاب حاوی فلزات سنگین (رسوب-دهی شیمیایی<sup>۵</sup>، تعویض یونی<sup>۶</sup>، RO<sup>۷</sup> و نانوفیلتراسیون<sup>۸</sup>) معرفی شده است که توسط سه پارامتر اصلی: ۱- اقتصادی ۲- فنی و کاربردی ۳- زیست محیطی واجتماعی، که هر کدام شامل زیر پارامترهایی از قبیل ابعاد زمین مورد نیاز، هزینه ساخت و نصب، تعمیر و نگه داری، دستیابی به استانداردها، سادگی فن آوری، بومی بودن و ... می‌باشند، با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در این تحقیق ابتدا هر یک از پارامترها و شاخص‌های مربوط به هر یک از آن‌ها، توسط گروه خبرگان و به وسیله پرسشنامه وزن‌دهی می‌شوند. در مرحله بعد پس از محاسبه وزن هر کدام از پارامترها، فن آوری‌های تصفیه فاضلاب به صورت دو به دو نسبت به هر پارامتر مقایسه شده و سپس بهترین گزینه انتخاب می‌شود. نتیجه این مقایسه نشان داد که تصفیه فاضلاب به روش RO مناسب‌ترین گزینه برای تصفیه فاضلاب صنایع آبکاری است.

واژه های کلیدی: انتخاب تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، فلزات سنگین، آبکاری، تصفیه فاضلاب.

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران - محیط زیست، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر<sup>۹</sup> (مسئول مکاتبات)

۲- استادیار، پژوهشکده علوم محیطی دانشگاه شهید بهشتی

۳- استادیار، گروه مهندسی محیط زیست دانشکده عمران و محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر

- 4- Analytical Hierarchy Process
- 5- Chemical Precipitation
- 6- Ion Exchange
- 7- Reverse Osmosis
- 8- Nano Filtration

## مقدمه

محدودی از آن‌ها پارامترهایی به غیر از هزینه اولیه ساخت را مد نظر قرار داده‌اند (۳، ۵، ۷و۶). از میان تحقیقات صورت گرفته می‌توان به گزارشات EPA در مورد فاضلاب‌های شهری و صنعتی و همچنین گروه مهندسان مشاور Nolte and Associates اشاره کرد (۸ تا ۱۳). در حالی که بهترین گزینه برای احداث یک سیستم تصفیه‌خانه جدید می‌تواند گزینه‌ای باشد که دارای کمترین هزینه، کمترین آلودگی و همچنین بیشترین اثرات مثبت محیط‌زیستی باشد (۲).

## روش کار

## ۱- نمونه‌گیری

در این تحقیق، ابتدا پارامترهای موثر در انتخاب فن آوری از طریق مصاحبه با تعدادی از متخصصان تعیین می‌شوند. در مرحله بعد این پارامترها در قالب پرسشنامه توسط گروه خبرگان شامل کارشناسان، مشاوران و آبارکاران تکمیل می‌شود. افراد پاسخگو در این مرحله از طریق نمونه‌گیری تصادفی و به روش قرعه‌کشی تعیین می‌شوند. برای دستیابی به یک توزیع نرمال با خطای نمونه‌گیری ۵ درصد تعداد نمونه‌ها از فرمول زیر تعیین می‌شود (۱۹).

$$n = \frac{z_{\alpha}^2 \sigma_x^2}{\epsilon^2}$$

که در آن  $n$  تعداد نمونه مورد نیاز،  $\alpha$  درصد خطا،  $\sigma_x^2$  انحراف معیار و  $Z$  متغیر استاندارد است.

## ۲- نحوه امتیازدهی به پارامترها

در پرسشنامه طراحی شده اهمیت هر یک از پارامترهای آن توسط گروه خبرگان تعیین می‌شود. بدین صورت که اهمیت آن‌ها به صورت خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد می‌باشد که امتیاز آن‌ها به ترتیب معادل ۱، ۳، ۵، ۷ و ۹ می‌باشد. برای مثال اگر پارامتری از نظر فرد پاسخگو اهمیت خیلی کم داشته باشد، این بدان معنی است که وزن آن ۱ است (۱۶). پس از تکمیل پرسشنامه‌ها میانگین

افزایش آگاهی عمومی نسبت به مشکلات آلودگی آب در سال‌های اخیر باعث تصویب قوانین جدید و سختگیرانه محیط زیست در خصوص تخلیه پساب شده است. (۱) این موضوع باعث افزایش سرعت ساخت و نصب تصفیه‌خانه‌ها به ویژه در کشورهای در حال توسعه شده است. (۲ و ۳) یکی از مهم‌ترین مسایل در زمینه طراحی و ساخت تصفیه‌خانه‌ها، انتخاب بهترین و اقتصادی‌ترین گزینه با توجه به شرایط موجود و چشم‌انداز است، به طوری که انتخاب غلط می‌تواند تاثیر شدیدی در افزایش هزینه‌ها و همچنین عدم دستیابی به نتیجه دلخواه داشته باشد (۲ و ۴).

هدف اصلی در این تحقیق دستیابی و انتخاب روش تصفیه‌ای برای تصفیه فاضلاب صنایع آبکاری است به گونه‌ای که کمترین اثرات مخرب زیست‌محیطی را به همراه قابلیت اجرا از لحاظ فنی و اقتصادی را داشته باشد. این تکنولوژی علاوه بر دو فاکتور ذکر شده، باید در ابعاد واقعی مورد استفاده قرار گرفته باشد و همچنین از لحاظ فنی به گونه‌ای باشد که اجرای آن در کشور با توجه به مشکلات موجود امکان‌پذیر باشد.

بنابراین مهم‌ترین چالش در این تحقیق دستیابی و ارزیابی روشی است که در آن تکنولوژی مناسب برای تصفیه فاضلاب صنایع آبکاری معرفی شده باشد، به گونه‌ای که تعادلی میان مسائل اقتصادی و تکنولوژیکی برای ساخت تصفیه‌خانه و همچنین اثرات زیست‌محیطی برقرار کند (گزینه‌ای که علاوه بر بیشینه کردن اثرات مثبت زیست‌محیطی، کمترین نسبت هزینه‌ها را نیز تحمیل کند). به هر حال، اثرات زیست‌محیطی و مسائل اقتصادی با پارامترها و ابعاد متفاوتی سنجیده می‌شوند که این موضوع قابلیت مقایسه این پارامترها را به همان صورت اولیه غیر ممکن می‌نماید. در نتیجه الگوی مناسب برای تصمیم‌گیری، الگویی است که بتواند پارامترهای مختلف را وزن‌دهی کرده و سپس آن‌ها را هم‌بعد نماید تا از این طریق قابلیت مقایسه آن‌ها فراهم شود.

هرچند مطالعات مختلفی بر روی استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی انتخاب در دنیا صورت گرفته است، اما تعداد

جدول ۱ - نحوه مقایسه گزینه‌ها و امتیازدهی به آن‌ها

نوع قضاوت لفظی	عدد ارجحیت
غیر قابل ترجیح	۱
به سختی قابل ترجیح	۲
تقریباً قابل ترجیح	۳
نسبتاً قابل ترجیح	۴
قابل ترجیح	۵
به خوبی قابل ترجیح	۶
بسیار قابل ترجیح	۷
به کلی قابل ترجیح	۸
به شدت قابل ترجیح	۹

سپس ماتریس حاصل از مقایسه تمام گزینه‌ها را تشکیل داده و به صورت زیر مولفه‌های آن نرمال می‌شود (۱۴ تا ۱۶):

$$n_{ij} = [a_{ij} / j = 1 \text{ to } n \sum n_{ij}] \quad (j = 1, 2, \dots, n)$$

پس از محاسبه ماتریس نرمال، ماتریس وزن هر کدام از گزینه‌ها محاسبه می‌شود:

$$WI = \left[ j = 1 \text{ to } n \sum \frac{n_{ij}}{nx} \right]$$

با استفاده از ماتریس وزن‌ها، ماتریس داده‌ها را ادغام می‌کنیم،  $W$  حاصل بیانگر ضریب اهمیت هر یک از گزینه‌ها خواهد بود.

برای بررسی دقت نتایج و مقایسه‌های صورت گرفته ارزیابی ثبات یا نرخ سازگاری<sup>۱</sup> محاسبه می‌شود که به صورت زیر محاسبه می‌شود.

نظرات افراد به عنوان وزن هر پارامتر شناخته می‌شود و در سلسله مراتب ساخته شده در مرحله بعدی از این نتایج استفاده می‌شود.

### ۳- تحلیل و مقایسه نتایج به روش تحلیل سلسله مراتبی:

پس از نمونه‌گیری و جمع‌آوری اطلاعات از طریق پرسشنامه نوبت به مقایسه و تحلیل فن‌آوری‌های مختلف از طریق تحلیل سلسله مراتبی می‌رسد، بر اساس مطالعات موجود در ایران حجم پساب صنایع آبکاری بین ۰.۵ تا ۵ متر مکعب در روز در نوسان می‌باشد (۲۰)، که در این قسمت مقایسه‌ها و تصمیم‌گیری برای فاضلاب واحدهای آبکاری با حجم پساب ۵ متر مکعب در روز، به روش AHP صورت می‌گیرد.

در این روش ابتدا سلسله مراتب مقایسه‌ها ساخته می‌شود که در بالاترین بخش هدف که در این جا انتخاب گزینه مناسب است و بعد از آن پارامترهای موثر در تصمیم‌گیری و شاخص‌های مرتبط با هر کدام از آن‌ها قرار می‌گیرند. در پایین‌ترین بخش نیز گزینه‌های مختلف در زمینه تصفیه فاضلاب قرار می‌گیرند (۱۶).

سپس گزینه‌ها در این مرحله به روش دو به دو با یکدیگر مقایسه شده و بر اساس جدول زیر امتیازدهی می‌شوند (۱۴ تا ۱۶). در این مرحله گزینه‌های مختلف بر اساس مدارک و اطلاعات موجود در رابطه با قابلیت هر یک از آن‌ها، با یکدیگر مقایسه می‌شوند این مقایسه‌ها با نظرات تعدادی از متخصصان که در این زمینه فعالیت دارند مقایسه شده و نتیجه حاصل در نرم‌افزار تحلیلی قرار داده می‌شود (۱۶).



زمین مورد نیاز و هزینه راهبری به ترتیب با اوزان ۰/۲۰۹ و ۰/۲۰۲ و ۰/۲۰۱ بیشترین اهمیت را داشتند که این موضوع با توجه به وضعیت کنونی کشور از لحاظ واردات و همچنین ارزش بالای زمین در تهران قابل پیش‌بینی بود.

زیست‌محیطی و اجتماعی در جایگاه بعدی قرار گرفت. دلیل نزدیکی نتایج به دست آمده، توجه روزافزون به مسایل محیط-زیست و همچنین مشکلات موجود در زمینه واردات فن آوری و تربیت افراد است که باعث افزایش وزن دو پارامتر فنی-تکنولوژیکی و زیست‌محیطی و اجتماعی در مقابل مسایل و توجهات اقتصادی می‌باشد.

بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق از میان شاخص های پارامتر اقتصادی، سه شاخص هزینه ساخت و نصب، وسعت

جدول ۲- اوزان نرمال پارامترها و شاخص های مختلف

وزن	شاخص‌ها	وزن	پارامترهای اصلی
۰/۲۰۲	اهمیت وسعت زمین مورد نیاز I1	۰/۳۶۱	اقتصادی
۰/۲۰۹	اهمیت هزینه ساخت و نصب تجهیزات I2		
۰/۲۰۱	هزینه راهبری سیستم I3		
۰/۱۹۹	هزینه تعمیر و نگه داری I4		
۰/۱۸۹	هزینه دفع نهایی پسماند I5		
۰/۲۱۸	بومی بودن تجهیزات I6	۰/۳۱۳	فنی و کاربردی
۰/۲۱۷	سادگی راهبری I7		
۰/۱۸۶	عدم نیاز به فن آوری پیشرفته جهت کنترل I8		
۰/۱۵۸	انعطاف‌پذیری سیستم I9		
۰/۲۲۰	دستیابی به استانداردها I10		
۰/۳۰۲	اثرات ناشی از کاهش پساب I11	۰/۳۲۶	زیست‌محیطی و اجتماعی
۰/۲۴۰	اثرات اجتماعی و فرهنگی I12		
۰/۲۰۹	اشتغال‌زایی I13		
۰/۲۴۷	ایمنی شغلی I14		

### ۳- مقایسه سیستم‌های تصفیه فاضلاب به روش AHP

یکدیگر مقایسه شدند. پس از مقایسه و امتیازدهی به گزینه‌های مختلف وزن نرمال هر یک محاسبه می‌شود.

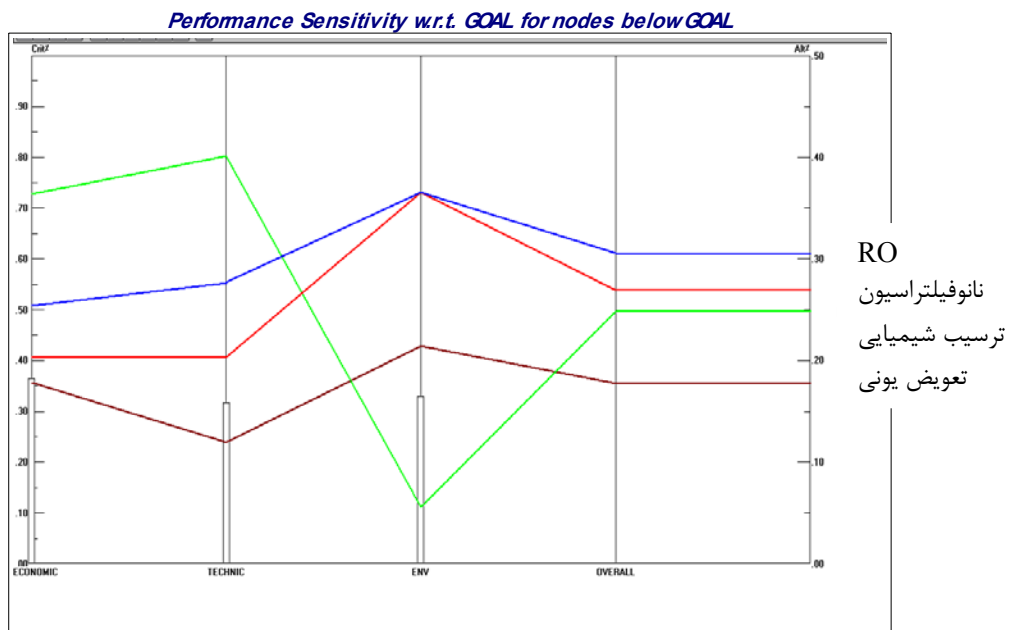
در این مرحله سیستم‌های تصفیه فاضلاب نسبت به هر یک از زیر شاخص های تعریف شده به صورت دو به دو با

جدول ۳ - وزن نرمال گزینه‌های مختلف در مقابل هر یک از شاخص‌ها

پارامترهای اصلی	شاخص‌ها	نانو فیلتراسیون	RO	تعویض یونی	ترسیب شیمیایی
اقتصادی	I1	۰/۴۰۸	۰/۴۰۸	۰/۱۳۸	۰/۰۴۶
	I2	۰/۰۴۴	۰/۱۶۷	۰/۱۰۲	۰/۶۸۴
	I3	۰/۰۵۵	۰/۱۰۵	۰/۲۰۶	۰/۶۳۴
	I4	۰/۰۵۳	۰/۰۷۸	۰/۱۷۰	۰/۶۹۹
	I5	۰/۳۰۴	۰/۴۳۱	۰/۲۰۲	۰/۰۶۴
فنی و کاربردی	I6	۰/۰۴۵	۰/۰۶۸	۰/۱۵۵	۰/۷۳۳
	I7	۰/۱۴۱	۰/۰۴۴	۰/۰۸۹	۰/۷۲۶
	I8	۰/۰۵۳	۰/۰۹۵	۰/۱۶۶	۰/۶۸۷
	I9	۰/۴۲۶	۰/۴۲۶	۰/۰۴۶	۰/۱۰۲
	I10	۰/۳۲۰	۰/۴۹۲	۰/۱۴۸	۰/۰۴۰
زیست‌محیطی و اجتماعی	I11	۰/۳۹۰	۰/۳۹۰	۰/۱۶۸	۰/۰۵۳
	I12	۰/۳۹۳	۰/۳۹۳	۰/۱۵۸	۰/۰۵۶
	I13	۰/۲۳۲	۰/۲۳۲	۰/۳۹۵	۰/۱۴۶
	I14	۰/۳۹۹	۰/۳۹۹	۰/۱۵۸	۰/۰۴۳

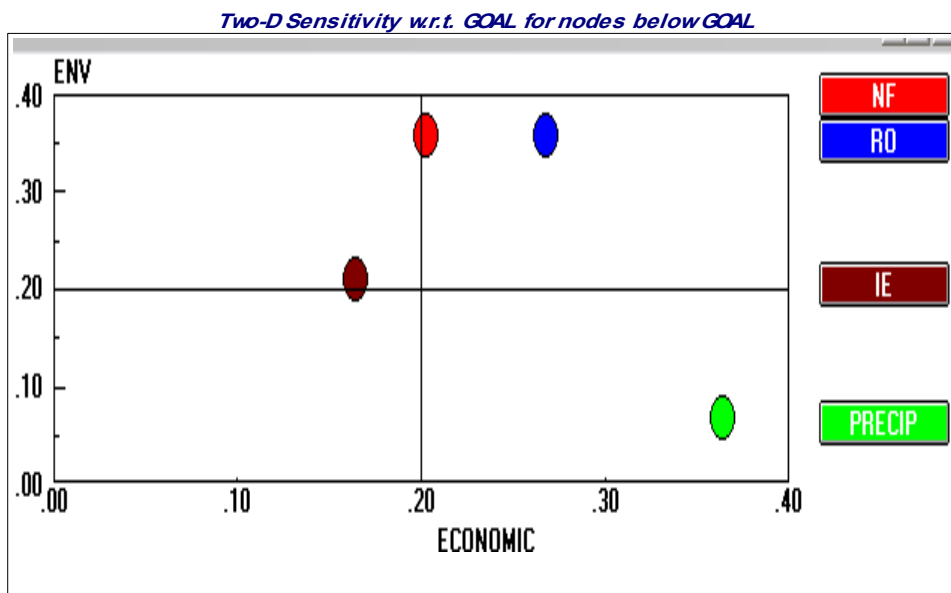
در این بخش پس از مقایسه سیستم‌ها و تحلیل داده‌ها توسط نرم‌افزار Expert Choice تصفیه فاضلاب به روش RO با ۰/۳۰۵ امتیاز به عنوان بهترین فن آوری و پس از آن نانو فیلتراسیون، ترسیب شیمیایی و در نهایت تعویض یونی

در مکان‌های بعدی قرار گرفتند. همچنین شاخص ناسازگاری (CI) در حدود ۰/۰۲ به دست آمد که کمتر از ۰/۱ است که در نتیجه محاسبات مورد قبول است.



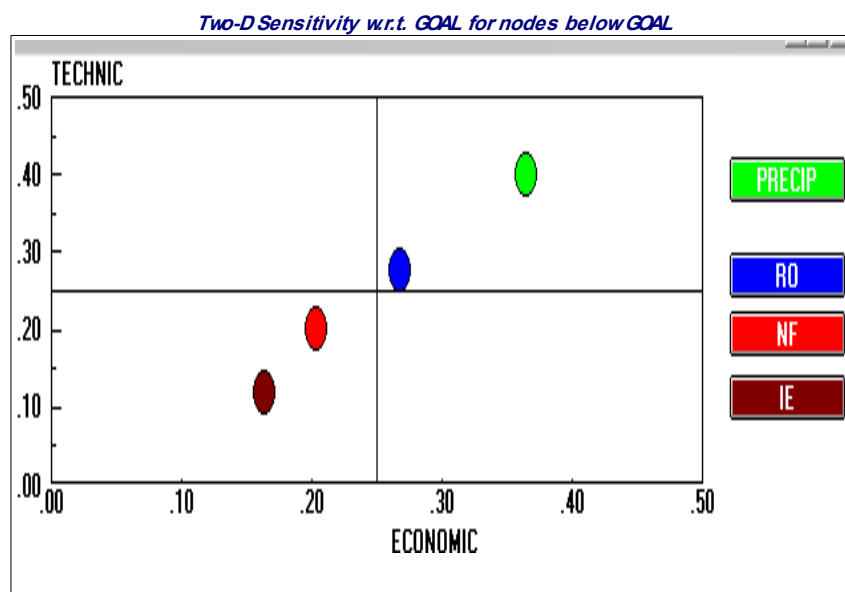
نمودار ۱ - رتبه بندی گزینه‌های مختلف و ارتباط آن‌ها با پارامترهای اصلی

همچنین در صورت تحلیل حساسیت بر روی دو پارامتر اقتصادی و زیست‌محیطی نیز دو گزینه RO و نانوفیلتراسیون مطلوبیت دارند.



نمودار ۲ - تحلیل حساسیت گزینه‌های مختلف در مقابل دو پارامتر اقتصادی و زیست‌محیطی

بنابر نتایج حاصل ترسیب شیمیایی در صورتی که دو پارامتر اقتصادی و فنی و کاربردی به عنوان پارامترهای موثر باشند، به عنوان گزینه مطلوب شناخته می‌شود.



نمودار ۳ - تحلیل حساسیت دو بعدی نسبت به دو پارامتر اقتصادی و فنی و کاربردی

#### نتیجه گیری نهایی

انتخاب فن آوری مناسب برای تصفیه فاضلاب صنایع آبکاری به علت وجود پارامترها و مسایل و مشکلات متنوع مساله ای پیچیده و زمان بر می باشد. در این تحقیق با استفاده از نظرات متخصصان و صنعتگران، با تعیین پارامترهای تاثیرگذار در تصمیم گیری، یک روش مناسب برای انتخاب فن آوری معرفی شده است.

این روش به علت در نظر گرفتن مسایل مختلف و چند بعدی بودن انتخاب در آن، نسبت به روش های متداول و تک بعدی در زمینه انتخاب فن آوری قابلیت بیشتری دارد. به علاوه آنکه با کمی کردن پارامترهای کیفی توسط افراد متخصص، مقایسه فن آوری های مختلف تصفیه فاضلاب به صورت بهتری انجام می گیرد.

همچنین این روش قابلیت تعمیم به دیگر صنایع، برای انتخاب فن آوری تصفیه فاضلاب را دارا می باشد.

#### منابع

2. Guangming Zeng. 2007, " Optimization of wastewater treatment alternative selection by hierarchy grey relational analysis", Journal of Environmental Management 82 (2007) 250–259
3. Handfield R. 2001, "Applying environmental criteria to supplier assessment: A study in the application of the Analytical Hierarchy Process", European Journal of Operational Research 141 (2002) 70–87
۴. سازمان مدیریت و برنامه ریزی ۱۳۸۲، "لایحه برنامه چهارم توسعه اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی جمهوری اسلامی ایران".
۵. شایگان ج، افشاری ع ۱۳۸۳، "بررسی وضعیت فاضلاب های شهری و صنعتی در ایران"، آب و فاضلاب، ش. ۴۹.
۶. شیرزاد، س ۱۳۷۶، "مقایسه فنی- اقتصادی روش های تصفیه فاضلاب شهری در شرایط اقلیمی ایران"، پایان نامه کارشناسی ارشد، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی.
۱. سازمان حفاظت از محیط زیست (۱۳۷۹)، "مجموعه قوانین و مقررات حفاظت از محیط زیست"، جلد اول



- Paper No.7, Washington D.C., The World Bank
13. Nolte and Associates Engineers, Partners and Surveyors (1999), "Engineering Report: The Cost of Wastewater Reclamation in California", California, USA
۱۴. آریانژاد م، تحقیق در عملیات، انتشارات دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۸۱
۱۵. اصغریور م، تصمیم گیری های چند معیاره، تهران انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۷۷
۱۶. قدسی پور ح، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) دانشگاه امیرکبیر، ۱۳۷۹
17. Saaty, T.L., 1980. The Analytical Hierarchy Process. McGraw-Hill, New York.
18. Saaty, T.L., 1977. A scaling method for priorities in Hierarchical.
۱۹. آذر ع، معرفی م، "آمار و کاربرد آن در مدیریت" جلد دوم، ۱۳۸۱
۲۰. فرازمنده ع، ارومیه ح، تشیعی ح، ۱۳۸۴، بررسی آلودگی ناشی از پساب های واحدها و کارگاه های آبکاری استان اصفهان.
۷. احمدی م، تجریشی م، ۱۳۸۳ بررسی فنی و اقتصادی روش های تصفیه فاضلاب صنایع غذایی در ایران. " پایان نامه کارشناسی ارشد." دانشگاه صنعتی شریف.
8. USEPA 1975, "Cost Effectiveness Wastewater Treatment", EPA-43019-75-002, 1975
9. USEPA 1976.:Area-wide Assessment Procedures Manual: Performance and Cost", Appendix H, Municipal Environmental Research Laboratory. Cincinnati, Ohio, EPA-60019-76-014
10. USEPA 1977, "Construction Cost for Municipal Wastewater Treatment Plants", Office of Water Program Operations, Washington D.C
11. USEPA 2002, "Development Document for the Proposed Effluent Limitation Guidelines and Standards" EPA, Office of Water, EPA-821-B-01-007
12. Arthur P. 1983, "Notes on the Design and Operation of Waste Stabilization Ponds in Warm Climates of Developing Countries", Technical