پژوهشی

مدیریت محیط زیست رودخانه سیاهرود و بررسی اقتصادی تصفیه پسابهای ورودی به این رودخانه

* دکتر عبدالرضا کرباسی

** مجید صابری

***زیبا کاظمی

کلمات کلیدی:

رودخانه سیاهرود، مدیریت محیط زیست، خصوصیات فیزیکی – شیمیایی، خودپالایی رودخانه، محدودیت راندمان تصفیه

چکیده:

با توجه به اهمیت پهنه های آبی در کشور و کمبود آب آشامیدنی در برخی از مناطق و اهمیت روزافزون حفاظت از محیط زیست و مدیریت صحیح آن، در این تحقیق بحث مدیریت محیط زیست در رودخانه سیاهرود مورد بررسی قرار گرفته است. رودخانه سیاهرود یکی از رودهای کم آب است که در استان مازندران به دریای خزر می ریزد و در حال حاضر به عنوان محلی برای تخلیه فاضلاب کارخانجات مجاور آن مورد استفاده قرار می گیرد. در این تحقیق ۱۰ ایستگاه نمونه برداری در طول رودخانه مذکور انتخاب شدند که بیشتر این نقاط در نزدیکی محلهای تخلیه فاضلاب کارخانجات قرار دارند. خصوصیات فیزیکی – شیمیایی آب رودخانه سیاهرود در نقاط مذکور، کیفیت و کمیت فاضلابهای صنعتی ورودی به این رودخانه، ضریب اکسیژن گیری (K_r , k_d) آن و خودپالایی رودخانه مذکور تعیین گردید. با استفاده از نتایج به دست آمده و با کمک آنالیز رایانه ای، بهینه سازی درصد تصفیه منابع آلاینده در رودخانه سیاهرود و نیز حل معادلات بقای جرم، تعادل BOD ، تعادل اکسیژن (DO) ، تغییرات اکسیژن، حذف BOD ، راندمان تصفیه خانه، حداقل اکسیژن محلول لازم و محدودیت راندمان تصفیه به کمک روش بهینه سازی خطی به انجام رسید.

* مدیر گروه محیط زیست امور انرژی وزارت نیرو

** کارشناس ارشد وزارت نیرو

*** عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اهر

سر آغاز

مراحل مختلف گردش آب در طبیعت به طور کلی خود روشی طبیعی برای تصفیه آب می باشد. تبخیر که عامل اصلی ایجاد باران می باشد یک طریق مؤثر برای تصفیه مایعات است. در طبیعت راههای دیگری نیز برای تصفیه آب آلوده شده توسط موجودات زنده و خصوصاً انسان وجود دارد. تصفیه طبیعی در پاره ای از موارد کافی نبوده و می توان یکی از علل ان را ازدیاد مقدار مواد آلوده کننده در آب دانست که به عنوان مثال، می توان مواد آلوده کننده صنعتی را نام برد (منزوی، ۱۳۶۶، مشتاق، ۱۳۷۴، شریعت، ۱۳۷۵، Steel & McGhee, 1979; Benefield, 1979; Masters, 1972).

رودخانه سیاهرود در پی بارندگیهای مداوم و یا شدید که باعث حمل ذرات مختلف گیاهی، حیوانی و حتی صنعتی و سمی می شوند، شدیداً آلوده می گردد. هم چنین وارد شدن فاضلاب شهری و صنعتی خصوصاً صنایع نساجی شماره ۱ و ۲، کنسروسازی و گونی‌بافی به جریان آب باعث آلودگی این رودخانه می شوند (خاتمی، ۱۳۶۴، صابری، ۱۳۷۶ و کاظمی ۱۳۷۶). نتایج حاصله در ابتدا نازیبا ساختن رودخانه است، که به صورت آبی بدرنگ در می آید. هم چنین پوسته ای از مواد غیرمحلول روی آب مانند مواد روغنی و نفتی ایجاد می شود. حبابهای انیدریدکربنیک و هیدروژن سولفوره که روی سطح آب ظاهر می شوند، علامتی از فعالیتهای حیاتی و تخمیر داخل آب و یا مواد راسب در کف رودخانه و ایجاد محیطی متعفن در اطراف رودخانه است. در کناره رودخانه به سبب تجمع مواد زاید، محیطی مناسب برای رشد و زندگی موجوداتی مضر چون موش و غیره شده است که باعث آلودگی محیط و اطراف آن نیز می گردد(کاظمی، ۱۳۷۶).

از اینرو، مدیریت این رودخانه و پسابهای تخلیه شده در مسیرآن مورد بررسی قرار گرفتند.

روش کار

در طول رودخانه ۱۰ نقطه نمونه برداری انتخاب گردید (جدول ۱ و شکل ۱) و نمونه های آب این نقاط آنالیز شدند.

ابتدا مدلهای مختلف خودپالائی رودخانه مورد بررسی قرار گرفت و مدل مناسب انتخاب گردید. سپس ایستگاههای اندازه گیری با توجه به محل ورود آلاینده ها، تغییر در میزان جریان رودخانه، تغییرات شرائط رودخانه (که بر ضریب اکسیژن رسانی مؤثر است) و محدودیتهای تعریف شده برای BOD و DO تعیین گردید. در نهایت با توجه به آمار و اندازه گیری های انجام شده جهت تعیین جریان رودخانه، دبی رودخانه با دو فرض زیر به کمک نرم افزار آماری رایانه ای تعیین گردید.

۱- میانگین حداقل جریان در خشک ترین ماه سال

۲- میانگین متوسط جریان در خشک ترین ماه سال

همچنین مشخصات هر یک از آلاینده های رودخانه تعیین گردیده، سپس به کمک آمار، اطلاعات و اندازه گیری های انجام شده ضرائب اکسیژن دهی و اکسیژن گیری (K_r و K_d) در بین هر یک از ایستگاهها تعیین گردید.

پس از انجام مراحل فوق روابط موردنیاز جهت استفاده در مدل برنامه ریزی خطی تعریف گردید و به کمک یک نرم افزار رایانه ای روابط مربوط به مدل برنامه ریزی خطی حل گردیده و میزان حداقل راندمان تصفیه هر یک از منابع آلاینده، مقادیر اکسیژن محلول و BOD در کلیه ایستگاههای تعیین شده در رودخانه سیاهرود مشخص و نتیجه گیری لازم صورت پذیرفت. خاطر نشان می سازد که جهت تعیین پارامترهای BOD_5، DO، دبی، سرعت و دما از دستگاههای قابل حمل شرکت Hatch استفاده شد و روش آزمایش نیز بر اساس دستورالعمل ASTM به انجام رسید.

روشهای اندازه گیری منحنی تغییرات اکسیژن محلول در رودخانه سیاهرود

روش استریترفیلپس

فرمولهای مورد استفاده برای محاسبه ثابت مصرف اکسیژن(K_1) و نسبت هوادهی (K_2) و کمبود اکسیژن محلول (D_t) در پایین دست رودخانه عبارتند از:

$$1) K_1 \frac{1}{\Delta t} \log \frac{L_A}{L_B}$$

$$2) K_2 = K_1 \frac{L.\Delta D}{D.203\Delta t.D}$$

$$3) Dt = \frac{K_1 L_A}{K_2 - K_1}\left[10^{-K_1 t} - 10^{-K_2 t}\right] + D_A.10^{-K_2 t}$$

$$4) t_c = \frac{1}{K_2 - K_1} \log\left(\frac{K_2}{K_1}\left[1 - \frac{D_A(K_2 - K_1)}{L_A K_1}\right]\right)$$

$$5) D_c = \frac{K_1}{K_2} L_A .10^{-K_1 t_c}$$

که در فرمول (۴) t_c زمان بحرانی کمبود اکسیژن و در فرمول (۵) D_c کمبود بحرانی اکسیژن می باشند.

روش توماس

ساده شده روش استریتر – فیلپس روش توماس می باشد. در این روش ثابتهای واکنشی K_1، K_2 مانند فرمولهای (۱) و (۲) محاسبه می گردند و با استفاده از شکل ۳ میزان بار آلودگی منابع را در زمانهای مختلف t می توان به دست آورد. مقدار متغیر D/L_A به ازای $K_2 t$ و K_2/K_1 از روی این نمودار به دست می آید. منحنی تغییرات اکسیژن محلول به روش توماس در رودخانه سیاهرود محاسبه و ترسیم شده است. در فاصله ۱/۶ کیلومتری از ایستگاه قائم شهر – جویبار میزان اکسیژن به بحرانی ترین مقدار که برابر ۴ میلی گرم در لیتر است، کاهش می یابد. در این محل از لحاظ اکسیژن محلول در رودخانه مسئله ای برای آبزیان در مهرماه ایجاد نمی نماید اما در فصل تابستان به علت دبی کم و آلودگی بیشتر، میزان اکسیژن محلول بحرانی به زیر ۲ میلی گرم در لیتر نیز خواهد رسید که برای آبزیان و ماهیان مسئله ساز می باشد.

روش چرچیل

در این روش ارتباط مناسبی بین BOD ، DO، دما و جریان رودخانه وجود دارد و به وسیله روش کاهش مربعات (Least Squares) و رگرسیون خطی می تواند کامل شود. به طوری که پیش بینی می شود افت اکسیژن محلول نیاز به بار BOD دارد. روش المانها اغلب قابل بحث و یک روش پرزحمت برای محاسبه زمانهایی از جریان مابین ایستگاهها و نسبتهای واکنش رودخانه (K_2, K_1) می باشد.

در روش چرچیل تنها ۶ نمونه در یک مطالعه برای ایجاد حالت واقعی موردنیاز است و نمونه های اضافی برای کنترل و ظرافت محاسبات به کار می روند.

معادلات چرچیل به شرح زیر می باشند:

$$6) b_1 \sum X_1^2 + b_2 \sum X_1 X_2 + b_3 \sum X_1 X_3 = \sum X_1 Y$$

$$7) b_1 \sum X_1 X_2 + b_2 \sum X_2^2 + b_3 \sum X_2 X_3 = \sum X_2 Y$$

$$8) b_1 \sum X_1 X_3 + b_2 \sum X_2 X_3 + b_3 \sum X_3^2 = \sum X_3 Y$$

بر اساس روشهای فوق ضرایب اکسیژن گیری(K_d) و اکسیژن دهی(K_r) در رودخانه سیاهرود محاسبه گردیدند.

نتایج

نتایج برخی از خصوصیات فیزیکی – شیمیایی آب رودخانه سیاهرود در جدول ۲ و شکل ۲ ارائه گردیده است. همانطورکه مشاهده می شود در ایستگاههای ۴، ۵ و ۶ بیشترین میزان BOD_5 و کمترین میزان DO وجود دارد که این مناطق، محل تخلیه پسابهای صنعتی هستند.

الف. منابع آلاینده رودخانه سیاهرود

آلاینده های مختلف صنعتی، شهری و کشاورزی در رودخانه سیاهرود تخلیه می گردند که عمده آنها مربوط به آلاینده های شهری و صنعتی هستند (خاتمی، ۱۳۶۴ و کاظمی، ۱۳۷۶). میزان آلودگی ناشی از سموم دفع آفات نباتی در حد مجاز استاندارد است (The Ministry of Energy, 1996). عمده آلودگی ورودی به رودخانه سیاهرود مربوط به صنایع موجود در محدوده شهری قائم شهر و فاضلاب شهر است که مشخصات آنها به شرح زیر است:

کارخانه نساجی مازندران (شماره۱)

این کارخانه در شهر قائم شهر و در غرب رودخانه سیاهرود قرار دارد. این کارخانه روزانه حدود ۳۰ هزار متر پارچه، ۵۰ تن پنبه، مقدار کمی ویسکوز و ۸۰۰ کیلوگرم پنبه هیدروفیل تولید می نماید. میزان پساب به ازای تولید روزانه۱۲۴ مترمکعب است که در فرآیندهای شستشو و سفیدگری به وجود می آید. در این کارخانه روزانه ۱۲۳۲مترمکعب فاضلاب تولید می گردد که حدود ۵۱ مترمکعب در ساعت آن از فرآیندهای نساجی است. این مقدار با در نظر گرفتن فاضلابهای بهداشتی و سطحی به حدود ۶۰ تا ۱۰۰ مترمکعب در ساعت نیز ممکن است افزایش یابد. در حال حاضر فاضلاب بهداشتی کارخانه، داخل چاه تخلیه می گردد و بقیه

فاضلابها بدون هیچگونه تصفیه مستقیماً بعد از طی کانال رو بسته، به طول ۳ کیلومتر در جنوب خط آهن، از سمت غرب به سیاهرود می ریزد. در این محل کف زیادی سطح آب را پوشانده و آب به صورت دو رنگ کاملاً متمایز قهوه ای تا قرمز و بیرنگ دیده می شود. گاهی نیز با توجه به رنگ به کار گرفته شده در فرآیند رنگرزی، وضعیت ظاهری آب نیز تغییر می کند.

کارخانه نساجی قائم شهر (شماره ۲)

این کارخانه یکی از واحدهای تولیدی بزرگ نساجی ایران است که در شهر قائم شهر، در شرق رودخانه سیاهرود واقع شده است. در این کارخانه هم از الیاف طبیعی و هم از الیاف مصنوعی به منظور تولید پارچه استفاده می گردد. فاضلاب خروجی از فرآیندهای مختلف کارخانه ۲۹۹ مترمکعب در ساعت می باشد که این مقدار فاضلاب تولیدی در روزهای بدون بارندگی است. حداکثر فاضلاب ۴۲۹ مترمکعب در ساعت و حداقل آن ۱۶۹ مترمکعب در ساعت می باشد.

فاضلاب حاصله از قسمتهای مختلف صنعتی که عمدتاً شامل فاضلاب رنگرزی و تهیه آب نرم می باشد به اضافه فاضلاب انسانی حاصل از کارگران و خانه های مسکونی اطراف کارخانه، مجموعاً فاضلاب صنعتی این واحد را تشکیل می دهند که در حال حاضر بدون تصفیه به رودخانه سیاهرود، بالاتر از پل کمربندی قائم شهر می ریزد. لازم به توضیح است که فاضلاب گونی بافی در طول مسیر، بسیار جزئی و چندبار در سال و هم چنین فاضلاب بعضی از منازل به داخل لوله هدایت کننده فاضلاب این کارخانه راه یافته و در انتها به رودخانه سیاهرود می ریزند.

کارخانه کنسروسازی قائم شهر

این کارخانه در شهر قائم شهر در سمت شرقی رودخانه سیاهرود واقع گردیده است، فعالیتهای تولیدی کارخانه به طور کلی شامل تهیه کنسروهای مختلف (کنسروگوشت گوسفند، گوشت مرغ، کنسرو حبوبات، کنسرو سبزیجات)، مربا و رب گوجه فرنگی می باشد و از این طریق، فاضلاب حاوی مواد گوناگون به رودخانه سیاهرود تخلیه می شود.

نتایج کیفی به دست آمده در مورد فاضلابهای صنعتی ورودی به رودخانه سیاهرود در جدول ۳ ارائه شده است.

مدیریت محیط زیست رودخانه سیاهرود

انتخاب ایستگاهها و قطعات (Reaches) جهت بررسی خودپالایی و به طور کلی مدیریت محیط زیست رودخانه ها اهمیت زیادی دارد (کارآموز و دیگران ۱۳۷۵، HEC-S, 1986; Thomann, 1972). ایستگاهها می بایست در محلهای زیر انتخاب گردند:

محل ورود فاضلاب، محل آبگیری از رودخانه، محل تغییر مشخصات هیدرولیکی رودخانه، محلهایی که نیاز به حفظ اکسیژن محلول در حد معینی باشد، محلهایی که اکسیژن محلول نباید از حد معینی افزایش یابد(NIH, 1986).

بر اساس آزمایشات انجام شده بر روی نمونه های ۱۰ ایستگاه، همانطور که مشاهده گردید میزان اکسیژن محلول در ایستگاههای ۴، ۵ و ۶ به شدت کاهش یافته است (جدول ۲، شکل ۲). لذا بررسی موضوع مدیریت محیط زیست رودخانه سیاهرود در محدوده ایستگاههای ۴ الی ۶ قابل بررسی است.

در مبحث خودپالایی و مدیریت رودخانه، مهمترین اصل میزان اکسیژن محلول (DO) می باشد. بدین سبب در این تحقیق منحنی تغییرات اکسیژن محلول به ۳ روش اندازه گیری شدند.

تخمین ضریب اکسیژن گیری در رودخانه (K_d)

مناسبترین روش جهت تعیین ضریب اکسیژن گیری در طول رودخانه استفاده از نتیجه آزمایشات BOD اندازه گیری شده در طول رودخانه است. برای تعیین ضریب K_d می توان از فرمول ۹ استفاده نمود.

$$L_t = L_o e - K_d t \quad (9$$

با اندازه گیری غلظت BOD درابتدا وانتهای هر قطعه (L_o و L_t) و تعیین سرعت آب و در نتیجه زمان حرکت آب از ابتدا تا انتهای هر قطعه (t)، مقدار ضریب اکسیژن گیری (K_d) تعیین می گردد. نکته قابل توجه آن است که مقدار K_d بستگی به سرعت، عمق و تلاطم جریان در طول رودخانه دارد و در نتیجه در یک قطعه مشخص از رودخانه میزان K_d با تغییر در جریان عبوری از رودخانه، تغییر می یابد. لذا بهتر است مقدار K_d در هر قطعه از رودخانه بر حسب جریانهای مختلف عبوری تعیین گردد. مقدار

K_d محاسبه شده بر اساس آزمایشات BOD اندازه گیری شده در رودخانه سیاهرود (جدول ۳) در قطعات بین ایستگاههای ۵ الی ۱۰ (با فرض آن که در مسیر فوق، فاضلابی وارد رودخانه نمی شود) قابل محاسبه است. مقدار K_d بین ایستگاههای ۵ و ۶ به روش زیر محاسبه شده است.

K_d بین ایستگاههای ۵ و ۶ :

$$K_d = \frac{-\ln \frac{L_6}{L_5}}{t}$$

$$t = \frac{X}{V} = \frac{5000}{0.96} = 5208 \qquad s = 0.0603 \text{ day}$$

$$\Rightarrow K_d = \frac{-\ln \frac{16.3}{29.6}}{0.0603} = 9.89 \qquad \text{day}^{-1}$$

$$K_{d(20)} = \frac{K_d}{1.135^{T-20}} = \frac{9.89}{1.135^{-0.5}} = 10.45 \qquad \text{day}^{-1}$$

مقدار K_d در حدود قطعه بین ایستگاههای ۵ و ۶ توسط دفتر تحقیقات زیست محیطی (بخش آب و خاک) سازمان حفاظت محیط زیست نیز در سال ۱۳۶۴ در ۴ فصل اندازه گیری شده است. جدول ۳ نتیجه اندازه گیریهای انجام شده در مورد سرعت، جریان، BOD, DO و دما در طول رودخانه را نشان می دهد. لازم به ذکر است که فاصله بین ایستگاههای ۵ و ۶ در این مطالعه در فاصله بین ایستگاههای ۲ و ۳ در جدول مذکور قرار می گیرد.

مقدار $K_{d(20)}$ در فاصله ایستگاههای ۲ و ۳ در نظر گرفته شده در مطالعات فوق (مطابق با فاصله بین ایستگاههای ۵ و ۶ در این مطالعه) در فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب برابر ۲/۵۹، ۲/۱۴، ۳/۶۳ و ۰/۱۳- محاسبه شده است. لازم به ذکر است که مقادیر مذکور بر اساس لگاریتم بر پایه ۱۰ به دست آمده و در صورتی که مبنای فوق بر اساس لگاریتم طبیعی تغییر داده شود مقادیر $K_{d(20)}$ در فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب برابر مقادیر ۵/۹۷، ۴/۹۵، ۸/۳۵ و ۰/۳- خواهد بود.

در مورد نتایج به دست آمده در تحقیقات فوق چند نکته به شرح ذیل به نظر می رسد:

۱. به دلیل آن که فاصله ایستگاهها از یکدیگر زیاد است، مقادیر جریان به دست آمده در ایستگاههای ۲ و ۳ اختلاف زیادی دارند که در نتایج به دست آمده مسلماً خطای قابل توجهی را وارد می نمایند.

۲. مقدار BOD به دست آمده در آزمایشگاه، تبدیل به BOD در درجه حرارت رودخانه شده است. به نظر می رسد که BOD به دست آمده در آزمایشگاه باید در محاسبات، ملاک عمل قرار گیرد.

۳. مقدار $K_{d(20)}$ به دست آمده در زمستان منفی است که در مطالعات مذکور، دلیل آن را روند افزایشی اکسیژن محلول در رودخانه دانسته اند که صحیح به نظر نمی رسد. دلیل منفی شدن مقدار مذکور، ورود فاضلاب در طول قطعه مزبور است و اساساً از فرمول به کار رفته در این مطالعات و نیز فرمول ۹ هنگامی می توان استفاده کرد که در بین ایستگاههای انتخابی، بار آلودگی جدیدی به رودخانه اضافه نشود.

تخمین ضریب اکسیژن دهی به رودخانه (K_r)

جهت تعیین ضریب اکسیژن دهی به رودخانه(K_r) می توان از آزمایشات انجام شده در طول رودخانه استفاده نمود. همانطور که در محاسبات، مشخص گردید ضریب K_d بین ایستگاههای ۵ و ۶ رودخانه سیاهرود برابر ۹/۸۹ در روز است. با توجه به این مقدار و نتایج آزمایشات رودخانه سیاهرود (جدول ۴) و با استفاده از معادله استریتر – فیلیپس، K_r به صورت زیر برای رودخانه سیاهرود محاسبه می گردد.

$$D = \frac{K_d L_o}{K_r - K_d}\left[e^{-k_d t} - e^{-k_r t}\right] + D_o e^{-k_r t}$$

$$(8.73 - 4.2) = \frac{9.89(29.6)}{K_r - 9.89}\left[e^{-9.89(0.0603)} - e^{-k_r(0.0603)}\right] + (8.73 - 4.8)e^{-K_r(0.0603)}$$

$$\Rightarrow$$

$$4.5 = \frac{292.74}{k_r - 9.89}\left[0.551 - e^{k_r(0.0603)}\right] + 3.93e^{-K_r(0.0603)}$$

$$\Rightarrow \quad K_{r(20)} = \frac{K_r}{1.04^{+0.5}} = 42.20$$

$$\Rightarrow \quad K_r = 43.04$$

K_r در ۴ فصل بهار، تابستان، پاییز و زمستان نیز در سال ۱۳۶۴ توسط سازمان حفاظت محیط زیست تعیین شده است که بر اساس آزمایشات انجام شده در مورد کیفیت آب رودخانه سیاهرود توسط سازمان فوق، مقادیر K_r در ۳ فصل اول به ترتیب برابر ۱۴/۸۹، ۸/۶۵ و ۳۴/۰۶ به دست آمده است. لازم به ذکر است که بر اساس موارد مطرح شده، در این ارقام تقریب زیادی وجود دارد.

خودپالایی رودخانه سیاهرود

بر اساس نمونه برداریها، آنالیز و محاسبات به انجام رسیده در بخشهای پیشین، مشخصات جریان و پارامترهای موردنظر برای بررسی خودپالایی رودخانه سیاهرود، تعیین و در جدول ۵ ارائه شده اند.

تعیین معادلات و آنالیز کامپیوتری برای رودخانه سیاهرود

جریان آب در رودخانه سیاهرود در ۲ حالت در نظر گرفته شده است. حالت اول میانگین متوسط ماهانه جریان آب در رودخانه در خشکترین ماه گرم سال و حالت دوم میانگین حداقل ماهانه جریان آب از رودخانه (طبق نتایج به دست آمده توسط افشین۱۳۶۱، مهندسین مشاور ۱۳۷۵ و ۱۳۷۳ و ۱۳۷۲، و وزارت نیرو۱۳۶۴).

در رودخانه سیاهرود، پس از تعیین میزان جریان آب رودخانه، منابع آلاینده و ضرایب مورد نیاز، معادلات مربوطه برای هر ایستگاه تعیین شده و سپس آنالیز رایانه ای شده اند. با استفاده از نتایج به دست آمده، درصد تصفیه منابع آلاینده در هر یک از ایستگاهها تعیین و منحنی اکسیژن محلول در رودخانه رسم شده است.

لازم به ذکر است که معادلات با توجه به موارد ذیل تهیه شده اند.

۱. حداقل تصفیه موردنیاز ۴۰٪ بوده و از واحد متعادل کننده در کلیه منابع آلاینده استفاده شده است.
۲. محدودیتی جهت حداکثر مقدار BOD در نظر گرفته نشده است.
۳. حداقل اکسیژن محلول در طول رودخانه ۴ میلی گرم در لیتر در نظر گرفته شده است.

حالت اول: جریان رودخانه برابر میانگین متوسط ماهیانه جریان آب رودخانه در خشکترین ماه سال فرض شود.
(Q = 28 L/s)

۱- معادله بقای جرم

$$Q_j = Q_{j-1} + q_j$$

$$Q_5 = 0.286 + 0.184 = 0.470\frac{m^3}{S}$$

$$Q_{5-1} = 0.470 + 0.0851 = 0.555\frac{m^3}{S}$$

$$Q_6 = 0.555\frac{m^3}{S}$$

در ایستگاههای کمکی Q_{5-2} الی Q_{5-5} مقدار جریان برابر مقدار ۰/۵۵۵ مترمکعب در ثانیه می باشد.

۲- معادله تعادل (BOD)

$$L_j Q_j = Q_{j-1} N_{j-1} + q_j F_j$$

$$0.470L_5 = 0.286(5) + 0.184F_5 \Rightarrow 0.470L_5 - 0.184F_5 = 1.43$$

$$0.555L_{5-1} = 0.470N_5 + 0.085F_{5-1} \Rightarrow 0.555L_{5-1} - 0.470N_5 - 0.085F_{5-1} = 0$$

$$L_{5-2} = N_{5-1}, L_{5-3} = N_{5-2}, L_{5-4} = N_{5-3}$$

$L_{5-5} = N_{5-4}, L_6 = N_{5-5}$

۳- معادله تعادل اکسیژن(DO)

$$C_j Q_j = Q_{j-1} M_{j-1} + q_j G_j$$

این معادله در هر ایستگاه با فرض مقادیر مختلف DO_w فاضلاب ورودی به رودخانه به دست آمده است.

$$DO_w = 0 \Rightarrow 0.470C_5 - 0.286(8.7) - 0.184(0) = 0 \Rightarrow C_5 = 5.29\frac{mg}{l}$$

$$DO_w = 1 \Rightarrow 0.470C_5 - 0.286(8.7) - 0.184(1) = 0 \Rightarrow C_5 = 5.69\frac{mg}{l}$$

$$DO_w = 2 \Rightarrow 0.470C_5 - 0.286(8.7) - 0.184(2) = 0 \Rightarrow C_5 = 6.07\frac{mg}{l}$$

$$DO_w = 3 \Rightarrow 0.470C_5 - 0.286(8.7) - 0.184(3) = 0 \Rightarrow C_5 = 6.47\frac{mg}{l}$$

$$DO_w = 4 \Rightarrow 0.470C_5 - 0.286(8.7) - 0.184(4) = 0 \Rightarrow C_5 = 6.86\frac{mg}{l}$$

$$DO_w = 0 \Rightarrow 0.555C_{5-1} - 0.470M_5 - 0.085(0) = 0 \Rightarrow 0.555C_{5-1} - 0.470M_5 = 0$$

$$DO_w = 1 \Rightarrow 0.555C_{5-1} - 0.470M_5 = 0.085$$

$$DO_w = 2 \Rightarrow 0.555C_{5-1} - 0.470M_5 = 0.170$$

$$DO_w = 3 \Rightarrow 0.555C_{5-1} - 0.470M_5 = 0.255$$

$$DO_w = 4 \Rightarrow 0.555C_{5-1} - 0.470M_5 = 0.340$$

$C_{5-2} = M_{5-1}, C_{5-3} = M_{5-2}, C_{5-4} = M_{5-3}$

$C_{5-5} = M_{5-4}, C_6 = M_{5-5}$

۴- معادله تغییرات اکسیژن

$$M_j = C_s\left[1 - e^{-r_j t_j}\right] + C_j\left[e^{-r_j t_j}\right] - \left[\frac{K_j}{r_j - K_j}\right]\left[e^{-K_j t_j} - e^{-r_j t_j}\right]L_j$$

$$M_5 - 0.941C_5 + 0.031L_5 = 0.510$$

$$M_{5-1} - 0.950C_{5-1} + 0.026L_{5-1} = 0.428$$

$$M_{5-2} - 0.950C_{5-2} + 0.026L_{5-2} = 0.428$$

$$M_{5-3} - 0.950C_{5-3} + 0.026L_{5-3} = 0.428$$

$$M_{5-4} - 0.950C_{5-4} + 0.026L_{5-4} = 0.428$$

$$M_{5-5} - 0.950C_{5-5} + 0.026L_{5-5} = 0.428$$

$$M_6 - 0.927C_6 + 0.038L_6 = 0.633$$

۵- معادله حذف BOD

$$N_j = e^{-K_1 t_j} L_j$$

$$N_5 = 0.968L_5$$

$$N_{5-1} = 0.973L_{5-1}$$

$$N_{5-2} = 0.973L_{5-2}$$

$$N_{5-3} = 0.973L_{5-3}$$

$$N_{5-4} = 0.973L_{5-4}$$

$$N_{5-5} = 0.973L_{5-5}$$

$$N_6 = 0.960L_6$$

۶- معادله راندمان تصفیه خانه

$$F_j = \left[1 - E_j\right] R_j$$

$$F_5 = \left[1 - E_5\right] 356 \Rightarrow F_5 + 356E_5 = 356$$

$$F_6 + 113E_6 = 113$$

۷- حداقل اکسیژن محلول لازم

$$C_5 \geq 4 \qquad M_5 \geq 4$$

$$C_{5-1} \geq 4 \qquad M_{5-1} \geq 4$$

$$C_{5-2} \geq 4 \qquad M_{5-2} \geq 4$$

$$C_{5-3} \geq 4 \qquad M_{5-3} \geq 4$$

$$C_{5-4} \geq 4 \qquad M_{5-4} \geq 4$$

$$C_{5-5} \geq 4 \qquad M_{5-5} \geq 4$$

$$C_6 \geq 4 \qquad M_6 \geq 4$$

۸- محدودیت راندمان تصفیه

$$E_5 \geq 0.40 \qquad E_5 \leq 0.95$$

$$E_6 \geq 0.40 \qquad E_6 \leq 0.95$$

معادلات هشتگانه فوق آماده حل به کمک روش بهینه سازی خطی است. خلاصه ای از پارامترهای مورد بررسی در جداول ۶ و ۷ (بر اساس دبیهای مختلف) درج شده است.

بحث و نتیجه گیری

در بخشهای پیشین، ضمن تعیین پارامترهای مؤثر در مدیریت محیط زیست رودخانه سیاهرود، نتایج حاصل از جمله راندمان تصفیه موردنیاز برای هر یک از منابع آلاینده، نمودار اکسیژن محلول، BOD و تغییرات آن در طول رودخانه و نیز اثر اکسیژن محلول در فاضلاب ورودی به رودخانه ارائه گردید.

در رودخانه سیاهرود راندمان تصفیه برای فاضلاب ورودی به ایستگاه ۴، در حدود استانداردهای متعارف سازمان حفاظت محیط زیست می باشد، اما در مورد ایستگاه ۵، که فاضلاب کارخانه نساجی شماره ۲ به آن وارد می شود (با جریان حدود ۸۵ لیتر در ثانیه و BOD حدود ۱۱۳میلی گرم در لیتر) می تواند ۶۱ تا ۸۲٪ کاهش یابد. در صورتی که میزان اکسیژن محلول در فاضلابهای تخلیه شده برابر صفر در نظر گرفته شود، راندمان ۸۸٪ موردنیاز است. در صورتی که میزان اکسیژن محلول در فاضلابهای تخلیه شده به رودخانه به ۳،۲،۱ و ۴ میلی گرم در لیتر رسانده شود، راندمان تصفیه می تواند به ترتیب ۷۴٪، ۶۹٪، ۶۵٪ و ۶۱٪ در نظر گرفته شود. ارقام فوق در حالی به دست آمده است که جریان آب در رودخانه برابر میانگین متوسط ماهیانه در خشکترین ماه سال در نظر گرفته شده است (Q = ۲۸۶ لیتر در ثانیه). در صورتی که جریان آب در رودخانه برابر میانگین حداقل ماهیانه در خشکترین ماه سال در نظر گرفته شود (Q = ۱۳۰ لیتر در ثانیه)، فقط در صورتی که اکسیژن محلول در فاضلابهای تخلیه شده به رودخانه بیشتر از ۲ میلی گرم در لیترباشد، اکسیژن محلول در رودخانه بیش از حداقل موردنیاز به دست می آید. در صورتی که اکسیژن محلول در فاضلابهای تخلیه شده برابر ۳،۲ و ۴ میلی گرم در لیتر باشد، راندمان تصفیه موردنیاز فاضلابهای تخلیه شده در ایستگاه ۵ به ترتیب می تواند برابر مقادیر ۹۲٪، ۷۶٪ و ۶۶٪ در نظر گرفته شود. ارقام و اعداد فوق نشان می دهند که وقتی جریان آب در رودخانه کمتر باشد، اثر اکسیژن محلول در

فاضلاب بر راندمان تصفیه موردنیاز بسیار زیادتر است. در مورد رودخانه سیاهرود پیشنهاد می گردد که اکسیژن محلول فاضلابهای ورودی برابر ۴ میلی گرم در لیتر در نظر گرفته شود. زیرا علاوه بر آنکه در اغلب شرایط (از لحاظ شدت جریان فاضلاب در رودخانه)، شرط حداقل اکسیژن محلول در طول رودخانه تأمین می گردد، هزینه قابل توجهی برای تصفیه فاضلاب کارخانه نساجی شماره ۲ به دست می آید. در صورتی که فاضلاب در کارخانه فوق از حدود متعارف که شامل تصفیه اولیه و ثانویه می باشد، به تصفیه ساده تر با راندمان کمتر (برای مثال برکه های بی هوازی) محدود گردد، حدود ۴۳۵ میلیون ریال در هزینه احداث تصفیه خانه و حدود ۲۱۰ مگاوات در سال در مصرف برق صرفه جویی می شود. با فرض هزینه ۱۰۰ ریال برای هر کیلووات، معادل ۲۱ میلیون ریال صرفه جویی در سال خواهد شد. لازم به ذکر است که راندمان تصفیه در برکه های بی هوازی در ماههای سرد سال کاهش می یابد (تا حدود ۴۰٪)، اما کاهش فوق بسیار کمتر از افزایش قدرت خودپالایی رودخانه ها در ماههای سرد سال (به دلیل کاهش درجه حرارت آب و افزایش شدت جریان در رودخانه) می باشد.

صرفه جویی در مصرف برق، سودهای فراوان دیگری نیز دارد، چرا که برای تهیه برق از انرژیهای فسیلی استفاده می شود که خود موجب نشر آلاینده های مختلف به هوا سپهر می گردد. از میان این آلاینده ها که عمدتاً اثرات سوء زیست محیطی دارند گازهای گلخانه ای به دلیل معضل گرمایش جهانی از اهمیت ویژه ای برخوردار هستند. بدین سبب با صرفه جویی در مصرف برق، در نهایت میزان نشر گازهای گلخانه ای کمتر خواهد شد. علاوه بر این هزینه های اجتماعی ناشی از بخش برق نیز کاهش می یابد. از طرف دیگر از مصرف انرژیهای فسیلی که گرانقیمت و با ارزش هستند جلوگیری شده و به حفظ ذخایر کشور کمک می گردد.

با اعمال موارد فوق، نه تنها پهنه آبی سیاهرود از لحاظ زیست محیطی، به نحوی شایسته حفظ می شود بلکه سود اقتصادی نیز کسب خواهد شد.

یادداشتها

Q_j = میزان جریان در ابتدای قطعه J

L_j = BOD در ابتدای قطعه J

F_j = غلظت BOD فاضلاب تخلیه شده در ابتدای قطعه J

C_j = اکسیژن محلول در ابتدای قطعه J

q_j = دبی فاضلاب ورودی در ابتدای قطعه J

M_j = اکسیژن محلول در انتهای قطعه J

G_j = اکسیژن محلول فاضلاب ورودی در ابتدای قطعه J

C_s = غلظت اکسیژن اشباع

t_j = زمان حرکت آب در طول قطعه J

K_j = ضریب اکسیژن گیری در قطعه J

r_j = ضریب اکسیژن دهی در قطعه J

N_j = BOD در انتهای قطعه J

R_j = غلظت BOD فاضلاب تصفیه شده در ابتدای قطعه J

تشکر و قدردانی

اعتبار مالی تحقیق حاضر در قالب طرح کلی بررسی آلودگی های آب، خاک و هوای استان مازندران توسط اداره کل محیط زیست آن استان تأمین گردیده است. این پروژه در دانشکده محیط زیست و به مدیریت آقای دکتر ناصر رازقی به انجام رسیده است.

منابع مورد استفاده

- صابری، مجید. ۱۳۷۶. بررسی خودپالایی رودخانه های سیاهرود، تجن، چالوس، پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران.
- افشین، یدا... ۱۳۶۱. رودخانه های ایران. جاماب.
- مهندسین مشاور. ۱۳۷۳. مطالعات طرح جامع آب مازندران. جاماب.
- خاتمی، سیدهادی. ۱۳۶۴. بررسی خودپالائی رودخانه سیاهرود. سازمان حفاظت محیط زیست استان مازندران.
- شریعت، محمود.۱۳۷۵. بهسازی رودخانه. دانشگاه علوم پزشکی تهران.
- کارآموز، محمد. استادرحیمی، آزاده. زهرایی، بنفشه. و صفوی، حمیدرضا. ۱۳۷۵. مدلهای خودپالائی رودخانه ها. مجله آب و فاضلاب. شماره ۱۹.
- کاظمی، زیبا. ۱۳۷۶. بررسی آلودگی ناشی از فلزات سنگین در آب و رسوبات رودخانه سیاهرود. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده محیط زیست. دانشگاه تهران.

- مشتاق، جلیل. ۱۳۷۴. مطالعات مهندسی رودخانه چالوس و ژئوشیمی رسوبات آن. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده محیط زیست. دانشگاه تهران.
- منزوی، م.ث. ۱۳۶۶. فاضلاب شهری. ج ۲: تصفیه فاضلاب. انتشارات دانشگاه تهران.
- مهندسین مشاور. ۱۳۷۵. طرح فاضلاب سازی. گزارش مطالعات مرحله اول. مبانی. مهاب قدس.
- وزارت نیرو. ۱۳۶۴. بخش آبهای سطحی، آمار جریان آب رودخانه های ایران، قسمت اول: حوضه آبریز دریای مازندران. امور آب، دفتر بررسی های منابع آب.
- مهندسین مشاور. ۱۳۷۲. آمار دبی رودخانه های سیاهرود، تجن و چالوس. ۷۰-۱۳۴۳. تماب.

- Benefield, L. D. and Clifford, W. R. 1979. Biological Process Design for Wastewater Treatment. Pergamon Press.

- Masters G. M. 1972. Introduction to Environmental Engineering & Science. Prentice Hall Book Company.

- National Institute of Hydrology. 1986. Dissolved Oxygen Modelling in Rivers. NIH, N.Y.

- Steel, E. W. and McGhee T.J. 1979. Water Supply and Sewerage. McGraw Hill Book Company. Second Edition.

- The Ministry of Energy. 1996. The Recognition Report of Waste Water Disposal of the City of Sari. Mazandran Water and Waste Water Co.

- Thomann, R. V. 1972. System Analysis & Water Quality Management. McGraw Hill Book Company.

- HEC-5. 1986. Simulation of Flood Control and Conservation Systems-Appendix on Water Quality Analysis. US Army Crops of Engineers-Hydrologic Engineering Center. sa./D/11-5.

جدول شماره ۱: نام و مشخصات ایستگاههای نمونه برداری از آب رودخانه سیاهرود (۱۳۷۴)

شماره ایستگاه	نام ایستگاه	موقعیت جغرافیایی	عمق	فاصله از سرچشمه	مکان
۱	پل پرچینک	طول: ۵۳°-۰۱` و عرض: ۳۶°-۲۷`	۷۰ سانتی متر	۳/۶۵ کیلومتر	بالادست رودخانه
۲	پل ری کنده	طول: ۵۲°-۵۹` و عرض: ۳۶°-۲۷`	۶۰ سانتی متر	۷۰ کیلومتر	نزدیکی روستای ری کنده
۳	میان رود	طول: ۵۲°-۵۴` و عرض: ۳۶°-۲۷`	۵۰ سانتی متر	۱۹ کیلومتر	نزدیکی روستای میان رود
۴	پل راه آهن قائم شهر	طول: ۵۲°-۵۴` و عرض: ۳۶°-۲۸`	۹۰ سانتی متر	۲۶ کیلومتر	قائم شهر
۵	پل کمربندی قائم شهر-جویبار	طول: ۵۲°-۵۴` و عرض: ۳۶°-۲۹`	۵۰ سانتی متر	۲۷ کیلومتر	بین قائم شهر – جویبار
۶	رکابدار کلا	طول: ۵۲°-۵۴` و عرض: ۳۶°-۳۲`	۸۰ سانتی متر	۳۲ کیلومتر	نزدیکی روستای رکابدارکلا
۷	پل آزان	طول: ۵۲°-۵۵` و عرض: ۳۶°-۳۴`	۷۰ سانتی متر	۳۶ کیلومتر	پل قدیمی آزان
۸	بین محله کلا و واسوکلا	طول: ۵۲°-۵۶` و عرض: ۳۶°-۳۷`	۷۰ سانتی متر	۴۰/۶ کیلومتر	بین روستاهای محله کلاوواسوکلا
۹	پل لاریم به بهمنمیر	طول: ۵۲°-۵۶` و عرض: ۳۶°-۴۳`	۱۰۰سانتی متر	۶۷ کیلومتر	پل لاریم
۱۰	مصب رودخانه سیاهرود	طول: ۵۲°-۵۸` و عرض: ۳۶°-۴۶`	۲۰۰سانتی متر	۷۵/۵ کیلومتر	۵۰ متری محل ورودی به دریا

جدول شماره ۲: پارامترهای فیزیکی و شیمیایی رودخانه سیاهرود در ۱۰ ایستگاه نمونه برداری(۱۳۷۴)

ایستگاه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
درجه حرارت	۱۸	۱۸	۱۸	۱۹	۲۰	۱۹	۱۹	۱۹	۱۹	۲۰
BOD	۰/۲	۰/۹	۱/۷	۱۶/۲	۲۹/۶	۱۶/۳	۳	۲/۶	۲	۱/۷
DO	۸/۷	۸/۶	۷/۸	۶/۲	۴/۸	۴/۲	۷/۹	۸/۳	۸/۶	۸/۶
دبی	۰/۵	۰/۷	۱/۲	۱/۴	۲/۸	۲/۶	۲/۹	۳/۰۱	۳/۲	۳/۳
سرعت	۰/۲	۰/۸	۰/۸۵	۰/۹۵	۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۹۳	۰/۹۱	۰/۷۵	۰/۲۵

جدول شماره ۳: نتایج نمونه فاضلاب کارخانه های اطراف رودخانه سیاهرود(۱۳۷۴)

فاکتور	کارخانه نساجی شماره۱	کارخانه نساجی شماره۲	کارخانه کنسروسازی
PH	۷/۳۱	۷/۷۲	۶/۳۵
BOD	۱۷۵	۶۴	۶۰۰
COD	۲۹۸	۱۰۶	۸۵۶
آمونیاک	۴	۱/۲	۳۳/۵
نیترات	۳/۶	۰/۸	–
ازت آلی	۲۲	۱۰	۷۰
ازت کلی	۲۹/۶	۱۲	۱۰۳/۵
مواد معلق	۱۱۶	۱۵۴	۱۱۰۰
مواد قابل ته نشینی	۲/۵	۰/۵	۳۰
قلیائیت کل	۴۶۸	۲۶۴	۴۵۲
کلرورها	۱۳۸	۱۷۴	۱۲۲
سولفورها	۰/۸۹۶	۳/۵	–
دترجنت	–	–	۰/۹۶
نوع فاضلاب از نظر BOD	ضعیف	ضعیف	قوی

جدول شماره ۴: اندازه گیریهای انجام شده توسط سازمان حفاظت محیط زیست در طول رودخانه سیاهرود (خاتمی ۱۳۶۴)

ایستگاه	بهار					تابستان					پاییز					زمستان					فاصله دو ایستگاه ازهم کیلومتر
	درجه حرارت (سانتی گراد)	BOD_5 (میلی گرم در لیتر)	DO (میلی گرم در لیتر)	دبی (متر مکعب برثانیه)	سرعت (متربر ثانیه)	درجه حرارت (سانتی گراد)	BOD_5 (میلی گرم در لیتر)	DO (میلی گرم در لیتر)	دبی (متر مکعب برثانیه)	سرعت (متربر ثانیه)	درجه حرارت (سانتی گراد)	BOD_5 (میلی گرم در لیتر)	DO (میلی گرم در لیتر)	دبی (متر مکعب برثانیه)	سرعت (متربر ثانیه)	درجه حرارت (سانتی گراد)	BOD_5 (میلی گرم در لیتر)	DO (میلی گرم در لیتر)	دبی (متر مکعب برثانیه)	سرعت (متربر ثانیه)	
۱	۱۸/۳	۴/۶۳	۷	۰/۲۵	۰/۳۷	۲۱/۳	۰/۴۳	۸/۱۶	۰/۲۹	۰/۳۲	۱۶/۵	۰/۸۶	۸/۲۵	۰/۵۶	۰/۳۵۳	۶/۷	۱/۶۵	۱۱/۷	۰/۵۹	۰/۴۲	۲-۱ ۵/۲۵
۲	۲۳	۲۳/۶۳	۴/۶۵	۰/۳۱	۰/۶۲	۲۲/۶	۲۲/۰۳	۴/۲	۰/۴۹	۰/۶۹	۲۰/۶	۲۳/۹	۶/۲	۲/۸۶	۰/۹۴	۸/۶	۴/۶۳	۱۰/۱	۲/۱۲	۰/۵۷	۳-۲ ۲۰
۳	۱۷	۰/۹۵	۹/۳	۰/۵۵	۰/۳۸	۲۲/۸	۲/۶	۶/۰۳	۱/۰۱	۰/۹۴	۱۷/۵	۲/۷۳	۸/۱۳	۲/۶۷	۰/۷۵	۶	۲/۱۶	۱۱/۳۳	۵/۳۵	۰/۹۴	۴-۳ ۱۳//۷۵
۴	۲۲/۳	۴/۹	۷/۷	۰/۵۹	۰/۰۹	۲۶	۱	۵/۴۳	۰/۷۷	۰/۱۵	۱۷/۸	۱/۸۶	۷/۳۵	۳/۰۲	۰/۳۱	۷/۳	۲	۱۰/۷	۵/۳۸	۰/۲۶	۵-۴ ۲۱/۵

جدول شماره ۵: مشخصات جریان و پارامترهای در نظر گرفته شده جهت بررسی خودپالایی رودخانه سیاهرود

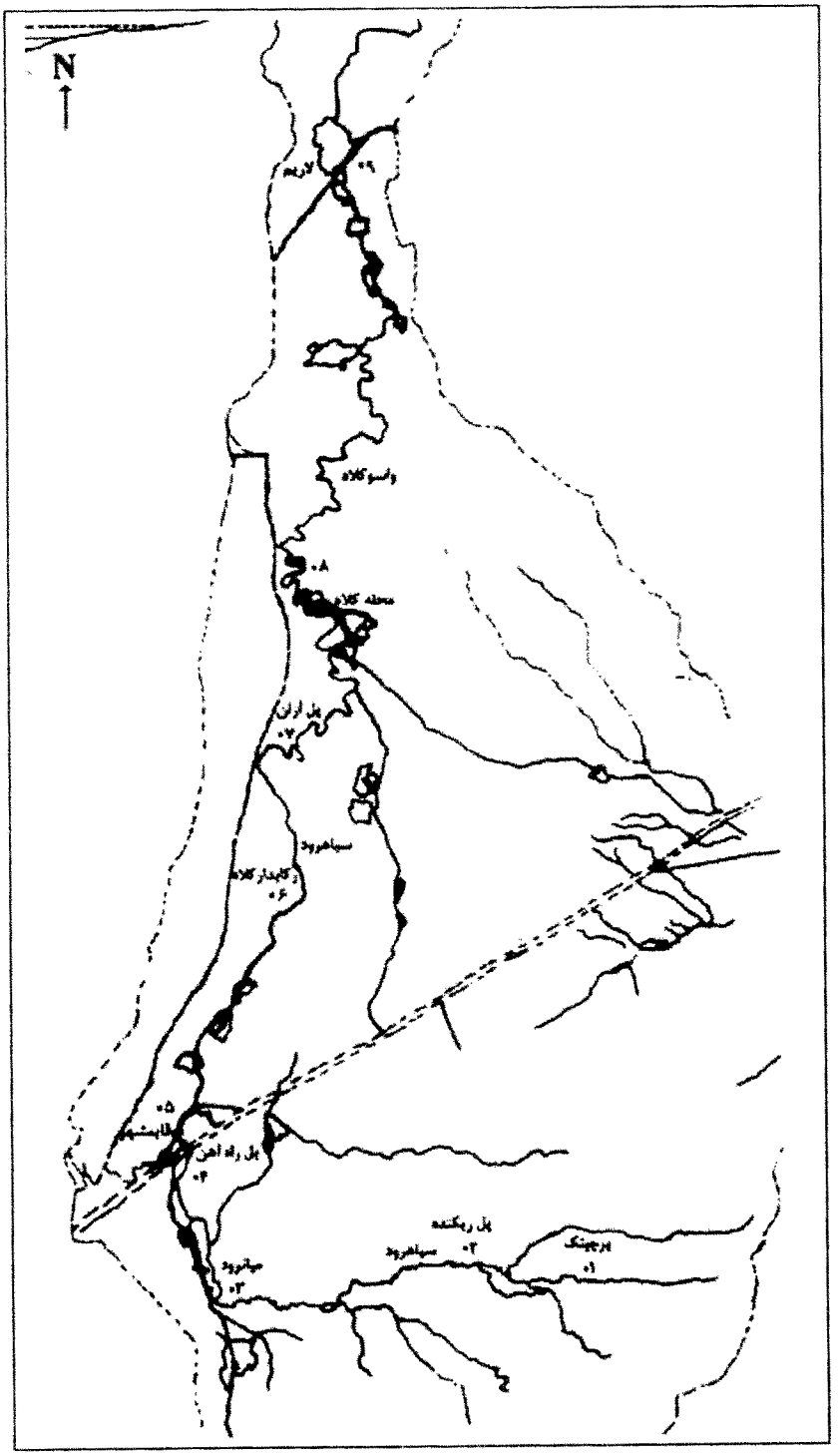
پارامتر / شماره ایستگاه	کیلومتر	جریان فاضلاب ورودی (مترمکعب در ثانیه)	BOD فاضلاب ورودی (میلی گرم در لیتر)	جریان آب (مترمکعب در ثانیه)	سرعت آب (متردرثانیه)	عمق متوسط آب (متر)	درجه حرارت آب (سانتی گراد)	غلظت اکسیژن اشباع (میلی گرم درلیتر)	K_r (روز)	K_d (روز)	زمان (ساعت)
۴	۲۶/۰۰۰	۰/۱۸۴	۳۵۶	۰/۲۸۶ ۰/۱۳۰	۱/۴۵ ۱/۳۶	۰/۳۱۱ ۰/۲۸۵	۲۲/۸	۸/۷۳	۶/۲۸ ۶/۸۱	۳/۳۸ ۳/۵۰	۰/۲۳
۵	۲۷/۲۰۰	۰/۰۸۵۱	۱۱۲/۸	۰/۲۸۶ ۰/۱۳۰	۱/۴۵ ۱/۳۶	۰/۳۱۱ ۰/۲۸۵	۲۲/۸	۸/۷۳	۶/۲۸ ۶/۸۱	۳/۳۸ ۳/۵۰	۰/۲۵ ۱/۲۵
۶	۳۳/۷۰۰	-	-	۰/۲۸۶ ۰/۱۳۰	۱/۴۵ ۱/۳۶	۰/۳۱۱ ۰/۲۸۵	۲۲/۸	۸/۷۳	۶/۲۸ ۶/۸۱	۳/۳۸ ۳/۵۰	۱/۳۳

جدول شماره ۶: خلاصه نتایج آنالیز رایانه ای جهت بهینه سازی درصد تصفیه منابع آلاینده در رودخانه سیاهرود(Q= ۰/۲۸۶ مترمکعب در ثانیه)

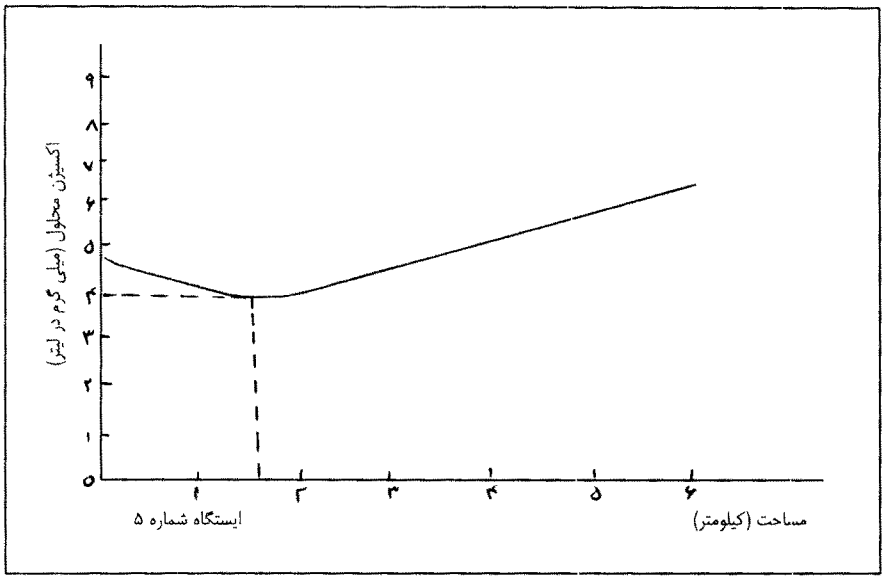
روش بهینه سازی	حداقل سازی مجموع راندمانهای تصفیه					حداقل سازی مجموع راندمانهای مساوی تصفیه					حداقل سازی حداکثر راندمان تصفیه				
	غلظت اکسیژن در فاضلاب ورودی به رودخانه					غلظت اکسیژن در فاضلاب ورودی به رودخانه					غلظت اکسیژن در فاضلاب ورودی به رودخانه				
شرح	۴	۳	۲	۱	۰	۴	۳	۲	۱	۰	۴	۳	۲	۱	۰
راندمان تصفیه در ایستگاه ۴	۹۵	۹۵	۹۵	۹۵	۹۵	۹۱	۹۱	۹۲	۹۳	۹۳	۹۱	۹۱	۹۲	۹۳	۹۳
راندمان تصفیه در ایستگاه ۵	۶۱	۶۵	۶۹	۷۴	۸۲	۹۱	۹۱	۹۲	۹۳	۹۳	۹۱	۹۱	۹۲	۹۳	۹۳
فاصله محل حداقل اکسیژن محلول تا ایستگاه ۴	۲۰/۷	۱۹/۷	۱۷/۷	۱۴/۷	۱۰/۷	۲۰/۷	۱۸/۷	۱۶/۷	۱۴/۷	۱۰/۷	۲۰/۷	۱۸/۷	۱۶/۷	۱۴/۷	۱۱/۷
حداقلBOD5 در آخرین ایستگاه	۸/۸	۸/۴	۷/۹	۷/۴	۶/۶	۸/۷	۸/۳	۷/۸	۷/۳	۶/۵	۸/۹	۸/۵	۸/۰	۷/۵	۶/۷

جدول شماره ۷: خلاصه نتایج آنالیز رایانه ای جهت بهینه سازی درصد تصفیه منابع آلاینده در رودخانه سیاهرود(Q= ۰/۱۳۰ مترمکعب در ثانیه)

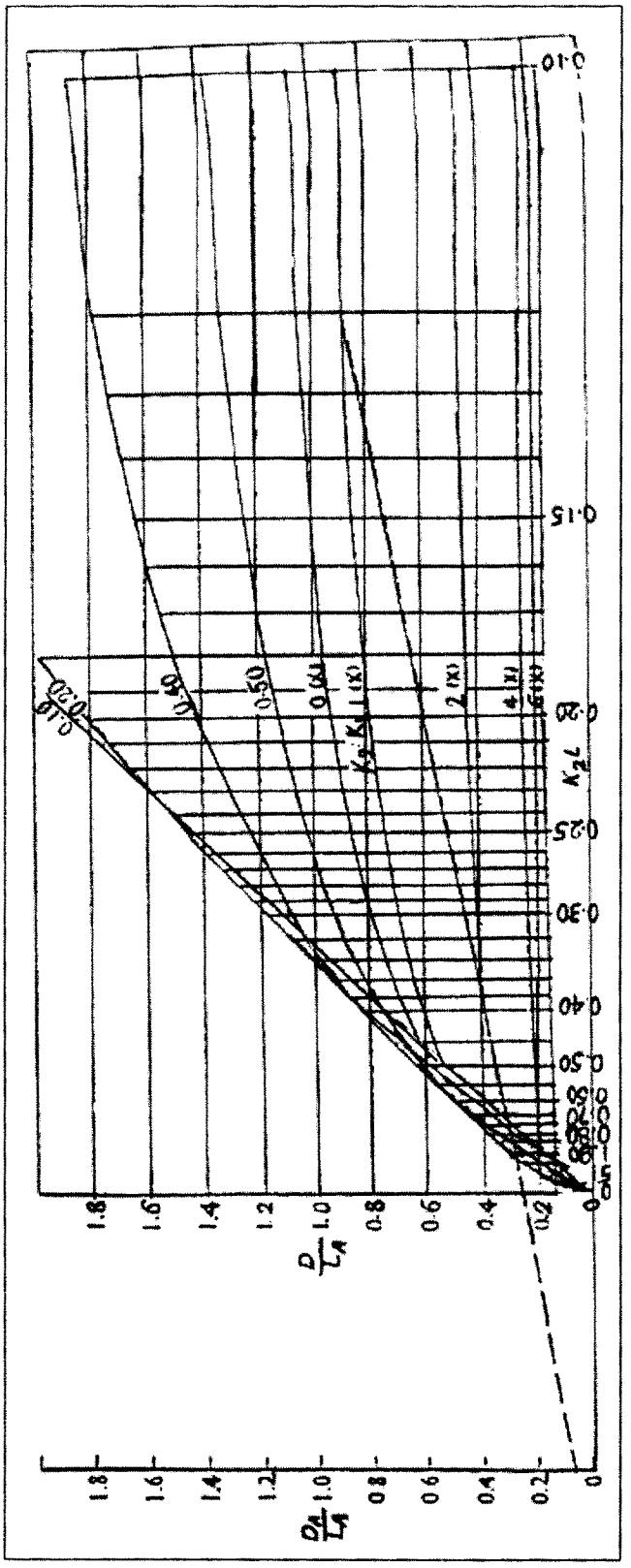
روش بهینه سازی	حداقل سازی مجموع راندمانهای تصفیه					حداقل سازی مجموع راندمانهای مساوی تصفیه					حداقل سازی حداکثر راندمان تصفیه				
	غلظت اکسیژن در فاضلاب ورودی به رودخانه					غلظت اکسیژن در فاضلاب ورودی به رودخانه					غلظت اکسیژن در فاضلاب ورودی به رودخانه				
شرح	۴	۳	۲	۱	۰	۴	۳	۲	۱	۰	۴	۳	۲	۱	۰
راندمان تصفیه در ایستگاه ۴	۹۵	۹۵	۹۵	-	-	۹۱	۹۳	۹۵	-	-	۹۱	۹۳	۹۵	-	-
راندمان تصفیه در ایستگاه ۵	۶۶	۷۶	۹۲	-	-	۹۱	۹۳	۹۵	-	-	۹۱	۹۳	۹۵	-	-
فاصله محل حداقل اکسیژن محلول تا ایستگاه ۴	۱۱/۷	۸/۷	۳/۲	-	-	۱۰/۷	۷/۷	۳/۲	-	-	۱۰/۷	۷/۷	۳/۲	-	-
حداقلBOD5 در آخرین ایستگاه	۵/۷	۴/۹	۳/۶	-	-	۵/۴	۴/۷	۳/۵	-	-	۵/۷	۴/۹	۳/۶	-	-



شکل شماره ۱: ایستگاههای نمونه برداری از آب رودخانه سیاهرود(۱۳۷۴)



شکل شماره ۲: افت اکسیژن محلول در مهرماه در رودخانه سیاهرود (۱۳۷۴)



شکل شماره ۳: دیاگرام برای محاسبه افت اکسیژن محلول (روش تورماس)