



ارزیابی وضعیت تغذیه‌گرایی مخزن سد ایلام با رویکرد فازی

حمید عدل آبادی^۱ - محمدحسین نیک سخن^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۴/۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۰/۱۶

چکیده

سنجش سطح تغذیه‌گرایی مخازن سدها به عنوان یکی از مهمترین مسائل مطرح در مدیریت کیفیت آب، همواره مورد توجه مدیران و سیاست‌گذاران بوده است. با توجه به پیچیدگی فرآیند تغذیه‌گرایی، تعیین شدت مغذی‌شدن پیکره آبی با روشی واحد و با قطعیت کامل امکان‌پذیر نمی‌باشد. تئوری فازی رویکردی است که بوسیله آن می‌توان عدم شفافیت و عدم قطعیت بین مرزهای سطوح مختلف تغذیه‌گرایی را مشخص نمود. در این تحقیق، از شاخص آنتروپی-فازی تغذیه‌گرایی و شاخص سطح تغذیه‌گرایی، جهت تعیین وضعیت تغذیه‌گرایی رولایه و زیرلایه مخزن سد ایلام در یک بازه زمانی یک‌ساله استفاده شده است. این شاخص‌ها بر اساس پارامترهای کلروفیل *a*، فسفر کل و درصد اشباع اکسیژن، تحت دو سناریو، وزن‌دهی و محاسبه شده‌اند. بر اساس سناریو یک، وزن نسبی شاخص‌ها از روش ترکیبی آنتروپی-فازی و تحلیل سلسله مراتبی محاسبه می‌گردد. در سناریو دوم، توزیع وزنی یکسان برای شاخص‌ها لحاظ شده است. نتایج نشان می‌دهد که رولایه مخزن در اکثر ماه‌ها و تحت هر دو سناریو، با قابلیت اطمینان مناسب، در سطح تغذیه‌گرایی کم قرار دارد و تنها در ماه‌های تیر و مرداد دارای سطح تغذیه‌گرایی متوسط است. زیرلایه مخزن، دارای شرایط مشابه رولایه بوده، با این تفاوت که میزان عدم قطعیت در این لایه افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: سطح تغذیه‌گرایی، تئوری فازی، تئوری آنتروپی، تحلیل سلسله مراتبی، سد ایلام

مقدمه^۲

تغذیه‌گرایی فرآیندی پیچیده و طبیعی است که به صورت تدریجی روی داده و کیفیت پیکره‌های آبی را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد (۲). این پدیده یکی از مسائل متداول در مدیریت کیفی پیکره‌های آبی است. رشد سریع جمعیت، افزایش مصرف انرژی و فعالیت‌های متنوع بشری، موجب تسریع در غنی شدن اکوسیستم‌های آبی از مواد مغذی می‌شود (۶). افزایش غلظت مواد مغذی می‌تواند منجر به رشد گیاهان آبی و شکوفایی جلبکی گردیده و اثرات نامطلوب زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی را با خود به همراه آورد. بنابراین با توجه به آثار سو این پدیده بر پیکره آبی و اکوسیستم منطقه باید به طور جدی مورد توجه مدیران و برنامه‌ریزان قرار گیرد. سطح تغذیه‌گرایی معمولاً در سه سطح یوتروفیک یا تغذیه‌گرایی

زیاد^۳، مزوتروفیک یا تغذیه‌گرایی متوسط^۴ و الیگوتروفیک یا تغذیه‌گرایی کم^۵ تعریف می‌شود. شاخص‌هایی که عموماً در تعیین این سطح‌بندی به کار می‌روند، بر مبنای علائم و آثار تغذیه‌گرایی در مخزن می‌باشند. شدت این آثار با اندازه‌گیری پارامترهایی نظیر فسفر و نیترژن کل، کلروفیل *a*، عمق سکی^۶ به عنوان شاخص میزان شفافیت آب تعیین می‌گردند. با توجه به پیچیدگی فرآیند تغذیه‌گرایی و پارامترهای مختلفی که در آن تأثیر دارند، اندازه‌گیری شدت آن با یک روش واحد و با قطعیت کامل امکان‌پذیر نمی‌باشد (۱۳).

کارلسون (۲) شاخصی را برای تغذیه‌گرایی مخزن به نام TSI^۷ معرفی نمود که تا امروز بیشترین کاربرد را در تعیین سطح تغذیه‌گرایی مخازن در مطالعات داشته است. این شاخص در واقع یک رابطه رگرسیونی برای هر کدام از پارامترهای کلروفیل *a*، کل فسفر و عمق سکی به صورت جداگانه تعریف می‌کند و عددی بین صفر (الیگوتروف

- 3 - Eutrophic
- 4 - Mesotrophic
- 5 - Oligotrophic
- 6- Secchi Depth
- 7- Trophic State Index

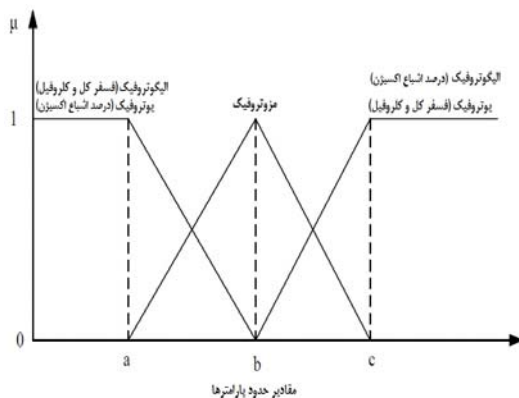
۱ و ۲- به ترتیب دانشجو دکتری و استادیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده تحصیلات تکمیلی محیط زیست، دانشگاه تهران
* نویسنده مسئول: (Email: niksokhan@ut.ac.ir)

ایجاد شده در میزان عدم قطعیت‌ها، تعریف شده است. در این سناریو توزیع یکنواخت وزن‌ها برای سه پارامتر در نظر گرفته شده است.

مواد و روش‌ها

از تئوری فازی می‌توان به عنوان ابزاری که توانایی رفع بسیاری از مشکلات معمول نظیر ناهمخوانی در داده‌های مشاهداتی و نیاز به قضاوت‌های غیرصریح و ضمنی، را دارد استفاده نمود. جهت تعیین سطح تغذیه‌گرایی مخزن، از روش ارزیابی ترکیبی فازی استفاده شده است. در این روش با استفاده از جدول سازمان همکاری و توسعه اقتصادی^۲ (OECD)، توابع عضویت فازی برای شاخص‌های تغذیه‌گرایی بر مبنای پارامترهای سفر کل، کلروفیل a و درصد اشباع اکسیژن تعریف گردیده و ماتریس ارزیابی مربوط به آن، تشکیل می‌شود. در نهایت با استفاده از تکنیک غیر فازی سازی، شاخص تغذیه‌گرایی با توجه به ضرایب وزنی پارامترهای مذکور که مطابق سناریوهای مطرح شده (استفاده از تئوری آنتروپی و تحلیل سلسله مراتبی و توزیع یکسان وزنی) به دست می‌آید، محاسبه می‌شود.

در این مقاله، به منظور تعیین وضعیت تغذیه‌گرایی مخزن در دو بخش مجزای زیر لایه و رولایه، مجموعه‌های فازی برای سه سطح تغذیه‌گرایی الیگوتروفیک، مزوتروفیک و یوتروفیک بر اساس پارامترهای فسفر کل، کلروفیل a و درصد اشباع اکسیژن، تعریف شده‌اند. نوع توابع عضویت فازی در نظر گرفته شده مثلثی و دوزنقه‌ای می‌باشد. شکل ۱، نمودار تپ تابع عضویت فازی پارامترهای شاخص در این مقاله را نمایش می‌دهد. a، b و c حدود تعریف شده در مجموعه‌های فازی هستند. این حدود و توابع عضویت از شاخص OECD استخراج گردیده است. جدول ۱، حدود بالا و پایین مورد استفاده در این مطالعه را نمایش می‌دهد.



2- Organization of Economic Cooperation and Development

کامل) تا ۱۰۰ (یوتروف کامل) به دست می‌آید. مشکلی که در تقسیم‌بندی سطوح تغذیه‌گرایی با توجه به این شاخص و یا شاخص‌های مشابه وجود دارد، آنست که عملاً مرز واضح و مشخصی بین سطوح تغذیه‌گرایی وجود ندارد و به همین دلیل برخی تقسیم‌بندی‌ها در تعریف محدوده شاخص‌ها اشکال دارد (۸).

شاخص فازی، شاخصی چند معیاره است که کلیه پارامترهای موثر در ارزیابی را از طریق فرآیند تجمیع معیارها لحاظ می‌نماید. همچنین این رویکرد، ابزار مناسبی را برای تحلیل عدم قطعیت در تعیین سطوح مغذی شدن مخازن فراهم می‌آورد. تاکنون شاخص‌هایی برای سنجش سطح تغذیه‌گرایی مخازن سدها با رویکرد فازی ارائه شده است (۹). با این وجود، مشکل اصلی شاخص‌هایی که از رویکرد فازی جهت بررسی سطح تغذیه‌گرایی استفاده می‌کنند، تعیین وزن نسبی پارامترها با توجه به میزان اهمیت آن‌ها، در نظر نگرفتن اهمیت پارامترها بر اساس شرایط داده‌ها، تکیه بر تحلیل ذهنی کارشناس، و میزان عدم قطعیت حاکم بر داده‌های مورد استفاده است. تئوری آنتروپی، امکان اندازه‌گیری میزان بی‌نظمی یا به عبارت دیگر میزان عدم قطعیت در یک سیستم را ایجاد می‌کند (۱۳). آنتروپی به عنوان یک معیار کمی از عدم قطعیت همراه با یک توزیع احتمالاتی است (۱۱). هر چه مقادیر درجه بی‌نظمی یک سیستم بیشتر باشد مقدار آنتروپی آن بیشتر است. به عبارت دیگر مقادیر بزرگتر آنتروپی نشان‌دهنده تصادفی بودن بیشتر داده‌ها و اطلاعات کمتری است که از داده‌ها قابل استخراج می‌باشد (۱۴). از مفهوم آنتروپی در مسائل مربوط به مدیریت کمی و کیفی آب استفاده شده است (۷). همچنین در زمینه کاربرد تئوری آنتروپی در وزن‌دهی معیارها جهت ارزیابی‌های کیفی، مطالعات گوناگونی انجام گرفته است (۴ و ۱۵). طاهریون و همکاران (۱۳)، شاخص فازی- آنتروپی تغذیه‌گرایی مخزن^۱ (EFEI)، را به منظور استفاده در پایش وضعیت کیفی مخزن با در نظر گرفتن عدم قطعیت سطوح تغذیه‌گرایی و عدم قطعیت داده‌ها، معرفی کرد.

با توجه به مطالب ذکر شده، در این مقاله، وضعیت تغذیه‌گرایی رولایه و زیر لایه مخزن سد ایلام با استفاده از رویکرد فازی و شاخص EFEI در طول یک‌سال و به صورت ماهانه بررسی گردیده، و نتایج با معیار سنتی اندازه‌گیری سطح تغذیه‌گرایی (TSI) مقایسه شده است. به منظور تعیین وزن نسبی پارامترهای کلروفیل a، فسفر کل و درصد اکسیژن اشباع در این مطالعه، دو سناریو تعریف گردیده است. در سناریو یک، وزن پارامترها از تئوری آنتروپی و تحلیل سلسله مراتبی (AHP) محاسبه شده و سپس ترکیب می‌گردد. سناریو دو، برای بررسی و تحلیل نتایج حاصل از سناریو یک و بررسی تفاوت‌های

1- Entropy- based Fuzzy Eutrophication Index (EFEI)

شکل ۱ - نمودار تیب تابع عضویت فازی پارامترهای شاخص

جدول ۱- حدود بالا و پایین توابع فازی

شاخص	a	b	c
کلروفیل a (µg/L)	۱/۷	۴/۷	۱۴
فسفر کل (µg/L)	۸	۲۷	۸۴
درصد اشباع اکسیژن	۱۰	۴۵	۸۰

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{X_{ij} - \min\{X_{ij}\}}{\max\{X_{ij}\} - \min\{X_{ij}\}} : \text{maximum} \\ \frac{\max\{X_{ij}\} - X_{ij}}{\max\{X_{ij}\} - \min\{X_{ij}\}} : \text{minimum} \end{cases} \quad (4)$$

مقدار آنتروپی i امین شاخص توسط معادله ۵ بدست می‌آید (۱۵).

$$H_i = -k \sum_{j=1}^n [f_{ij} \cdot \ln f_{ij}] \quad (5)$$

در این رابطه، $k = 1/Ln n$ و $f_{ij} = r_{ij} / \sum_{j=1}^n r_{ij}$ است.

همچنین زمانی که $f_{ij} = 0$ شود $f_{ij} \cdot \ln f_{ij} = 0$ می‌گردد. وزن آنتروپی شاخص‌های مورد نظر از رابطه ۶ محاسبه می‌گردد.

$$w_i = \frac{1 - H_i}{m - \sum_{i=1}^m H_i} \quad (6)$$

روش تحلیل سلسله مراتبی برای مقایسه زوجی شاخص‌ها استفاده شده است. با توجه به اینکه از این روش بسیار استفاده شده است (۵)، در این قسمت تنها به ذکر شیوه ترکیب وزن‌های بدست آمده از هر دو روش پرداخته خواهد شد. وزن‌های بدست آمده از این روش به صورت زیر می‌باشد:

$$\lambda = [\lambda_{Chla} \quad \lambda_p \quad \lambda_{HO}] \quad (7)$$

رابطه ۸ چگونگی ترکیب وزن‌های محاسبه شده را تشریح می‌نماید (۱۳).

$$w_i^* = \frac{\lambda_i \cdot w_i}{\sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot w_i} \quad (8)$$

جهت انجام فرآیند تجمیع، از روش میانگین وزنی استفاده شده است (۴). به عبارت دیگر تجمیع نتایج با ضرب ماتریس عضویت فازی و بردار وزنی تعیین می‌شود.

$$B = W^* \times R = [b_e \quad b_m \quad b_o] \quad (9)$$

که در معادله فوق b_e ، b_m ، b_o مولفه‌هایی هستند که درجه عضویت شرایط تغذیه‌گرایی مخزن را به ترتیب به هر یک از سطوح الیگوتروف، مزوتروفیک و یوتروفیک نشان می‌دهد. در این مقاله، غیرفازی سازی به روش حداکثرسازی عضویت تغذیه‌گرایی در ماتریس B انجام می‌شود که به صورت رابطه ۱۰ نشان داده شده است (۱۳).

$$E = \max(b_e, b_m, b_o) \quad (10)$$

که در آن E سطح حاکم تغذیه‌گرایی مخزن است. جهت تعیین مقدار عددی سطح تغذیه‌گرایی مخزن می‌توان با نسبت دادن ضرایب (وزن‌ها) به مولفه‌های عضویت ماتریس نتیجه B و ترکیب جمع آن‌ها مطابق معادله ۱۱ اقدام نمود (۱۲).

پس از تعریف توابع عضویت (μ مقدار درجه عضویت)، ماتریس روابط فازی تشکیل می‌گردد که در آن سطرها، درجه عضویت پارامترهای شاخص و ستون‌ها سطوح تغذیه‌گرایی تعریف شده می‌باشند (رابطه ۱).

$$M = \begin{bmatrix} \mu_{chle} & \mu_{chlm} & \mu_{chlo} \\ \mu_{pe} & \mu_{pm} & \mu_{po} \\ \mu_{HOe} & \mu_{HOm} & \mu_{HOo} \end{bmatrix} \quad (1)$$

در رابطه بالا، اندیس‌های e ، m و o به ترتیب برای سه سطح یوتروفیک، مزوتروفیک و الیگوتروفیک استفاده شده‌اند. مهمترین مسئله در روش ارزیابی ترکیبی فازی تعیین وزن‌های نسبی مناسب برای پارامترهای شاخصی که در فرآیند ارزیابی دخالت دارند، می‌باشد. در این مقاله جهت وزن‌دهی معیارها از دو سناریو استفاده شده است. در سناریو یک، وزن‌های نسبی بر اساس ترکیب روش وزن‌دهی آنتروپی و روش تحلیل سلسله مراتبی محاسبه شده و در سناریو دو، توزیع وزنی یکسان در نظر گرفته شده است. بنابراین تحت سناریو دو به هر شاخص وزن ۰/۳۳ اختصاص یافته است.

روش وزن‌دهی آنتروپی

نخستین مرحله در این روش تشکیل ماتریس داده‌ها می‌باشد. در این ماتریس، سطرها به شاخص‌ها ($i: 1, 2, \dots, m$) و ستون‌ها به داده‌ها ($j: 1, 2, \dots, n$) اختصاص می‌یابد. بدین ترتیب یک ماتریس 3×12 بدست می‌آید:

$$R = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

به منظور یکسان‌سازی مقادیر شاخص، ماتریس ۲ استاندارد می‌شود (۱۵):

$$R = (r_{ij})_{m \times n} \quad (3)$$

بر اساس رابطه ۴ واضح است که $r_{ij} \in [0,1]$ است. در این رابطه معیار حداکثر مربوط به شاخص‌هایی است که مقادیر بزرگتر آن مطلوب است و معیار حداقل شاخص‌هایی را مد نظر دارد که مقادیر کمتر آن بهتر است.

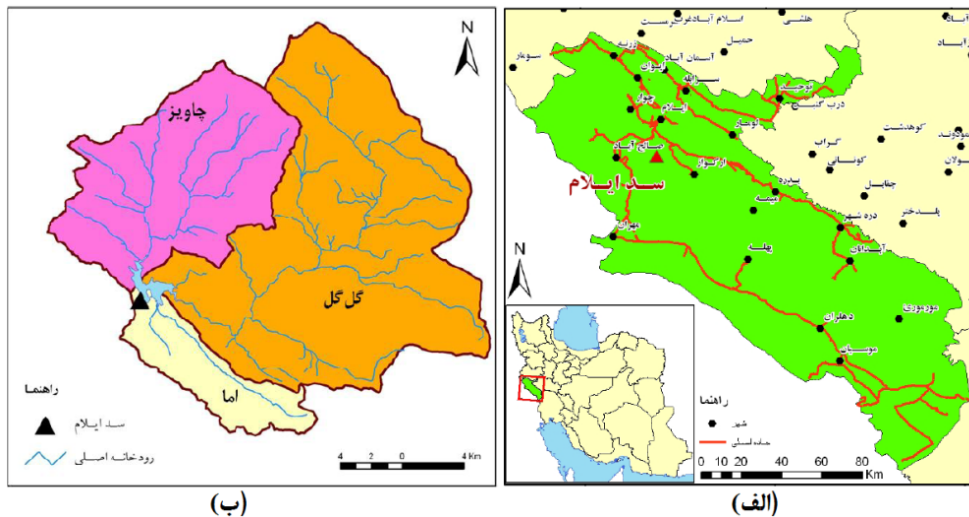
$$EFEI = 1 \times b_o + 2 \times b_m + 4 \times b_e \quad (11)$$

نتایج و بحث

به منظور بررسی وضعیت تغذیه‌گرایی مخزن سد با رویکرد فازی، در ابتدا با توجه به داده‌های جدول ۲، که اطلاعات مربوط به غلظت فسفر، کلروفیل و درصد اکسیژن اشباع در رولایه و زیرلایه مخزن سد است، ماتریس درجه عضویت برای هر ماه تشکیل شد. سپس، اهمیت نسبی شاخص‌ها با دو روش وزن‌دهی آنتروپی و تحلیل سلسله مراتبی، و توزیع وزنی یکسان بین متغیرها بدست آمد. با استفاده از وزن‌های محاسبه شده، درجه عضویت هر ماه به هر یک از سه حالت مغذی بودن، تعیین گردید و در نهایت شاخص EFEI محاسبه شد.

منطقه مورد مطالعه

سد ایلام در ۲۲ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان ایلام و بر روی رودخانه کنجانچم (محل تلاقی سه رودخانه گل‌گل، اما و چاویز) قرار دارد (شکل ۲). این سد، مهم‌ترین منبع تامین آب شرب شهر ایلام می‌باشد. مخزن سد چم‌گردلان به دلیل ورود فاضلاب روستاهای بالادست، فضولات حیوانی، زه‌آب‌های کشاورزی و شیرابه زباله و موارد متعدد دیگر دچار تهدیدات جدی در بحث کیفیت آب شده است. بنابراین پرداختن به مشخصات کمی و کیفی آب امری ضروری تلقی می‌گردد (۱). جدول ۲، اطلاعات کیفی مربوط به رولایه و زیرلایه مخزن سد ایلام را برای سال ۱۳۸۹ نمایش می‌دهد.



شکل ۲- الف) موقعیت سد ایلام نسبت به شهر ایلام ب) حوضه سد ایلام و رودخانه‌های آن (۱)

جدول ۲- اطلاعات کیفی رولایه و زیرلایه مخزن سد ایلام (۱)

ماه	غلظت شاخص‌ها در رولایه			غلظت شاخص‌ها در زیرلایه		
	HO% of saturation	Chla(µg/l)	TP (µg/l)	HO% of saturation	Chla(µg/l)	TP (µg/l)
فروردین	۸۸/۸۹	۰/۲۴	۳۰۲/۸۴	۸۸/۸۹	۰/۳۴	۳۲۵/۰۸
اردیبهشت	۷۲/۲۲	۰/۵۸	۳۱۷/۴۵	۷۷/۷۸	۰/۸۸	۳۲۳/۶۱
خرداد	۶۷/۷۸	۱/۲۳	۳۰۶/۰۴	۷۵/۵۶	۱/۹۸	۳۱۱/۲۴
تیر	۵۰/۰۰	۲/۶۷	۲۹۱/۲۶	۵۳/۳۳	۴/۳۲	۲۹۷/۸۰
مرداد	۴۲/۲۲	۵/۵۳	۲۷۹/۸۱	۴۴/۴۴	۶/۹۸	۲۸۷/۳۰
شهریور	۶۱/۱۱	۲/۶۸	۲۷۰/۷۲	۶۷/۸۵	۲/۰۲	۲۷۷/۳۷
مهر	۵۷/۷۸	۱/۷۱	۲۵۶/۷۳	۶۷/۴۸	۱/۹۳	۲۶۰/۲۷
آبان	۵۰/۰۰	۲/۷۱	۳۵۹/۸۵	۵۲/۲۲	۲/۶۱	۳۷۴/۱۳
آذر	۴۴/۴۴	۳/۲۸	۶۰۸/۴۴	۵۳/۳۳	۱/۹۵	۶۱۷/۶۳
دی	۶۰/۰۰	۲/۲۸	۶۴۳/۱۲	۷۵/۵۶	۰/۹۱	۶۴۷/۷۷
بهمن	۷۲/۲۲	۱/۵۷	۶۷۱/۳۲	۸۰/۵۶	۰/۶۰	۶۷۴/۳۶
اسفند	۷۵/۵۶	۱/۳۸	۶۶۸/۳۳	۸۷/۷۸	۰/۵۳	۶۷۰/۳۱

$$\lambda = [\lambda_p \quad \lambda_{Chla} \quad \lambda_{HO}] = \begin{bmatrix} 0.47 & 0.41 & 0.12 \end{bmatrix} \quad (15)$$

روابط ۱۶ و ۱۷ بردار وزنی ترکیبی را برای رولایه و زیرلایه رولایه (W_{epi}^* و W_{hypo}^*) نشان می‌دهد. همچنین رابطه ۱۸، بردار وزنی را در حالت توزیع یکسان نشان داده است.

$$W_{epi}^* = [w_{Chla}^* \quad w_p^* \quad w_{HO}^*] = \begin{bmatrix} 0.82 & 0.16 & 0.02 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$W_{hypo}^* = [w_{Chla}^* \quad w_p^* \quad w_{HO}^*] = \begin{bmatrix} 0.72 & 0.25 & 0.03 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$W = [w_p \quad w_{Chla} \quad w_{HO}] = \begin{bmatrix} 0.33 & 0.33 & 0.33 \end{bmatrix} \quad (18)$$

در تحلیل با رویکرد فازی و توزیع وزنی غیر یکسان، کلروفیل a از لحاظ هر دو معیار فازی-آنترپوی و AHP، مهمترین پارامتر بوده و بنابراین در معیار ترکیب شده نیز این پارامتر بالاترین اهمیت را دارد. بدین ترتیب در این تحلیل، سطح تغذیه‌گرایی عمده‌تاً بر مبنای تغییرات کلروفیل a تعیین می‌شود. از طرف دیگر درصد اکسیژن اشباع در این مطالعه کمترین تاثیر را در تعیین وضعیت تغذیه‌گرایی مخزن داشته است. جدول ۳، وضعیت تغذیه‌گرایی رولایه مخزن را تحت دو سناریوی وزن دهی نمایش می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که بر اساس میزان درجه عضویت، تحت سناریو یک، در اکثر ماه‌های سال وضعیت غالب رولایه مخزن، الیگوتروفیک بوده و تنها در در ماه‌های تیر و مرداد در حالت مزوتروفیک قرار دارد.

در ادامه برای انجام مقایسه، شاخص‌های TSI برای فسفر و کلروفیل محاسبه، و سپس از مقدار میانگین آن‌ها برای سنجش وضعیت مغذی شدن استفاده گردید. وزن شاخص‌ها بر اساس مقدار آنترپوی برای رولایه و زیرلایه مخزن به ترتیب، به شرح زیر می‌باشد:

$$W_{epi} = [w_p \quad w_{Chla} \quad w_{HO}] = \begin{bmatrix} 0.18 & 0.77 & 0.05 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$W_{hypo} = [w_p \quad w_{Chla} \quad w_{HO}] = \begin{bmatrix} 0.26 & 0.65 & 0.09 \end{bmatrix} \quad (13)$$

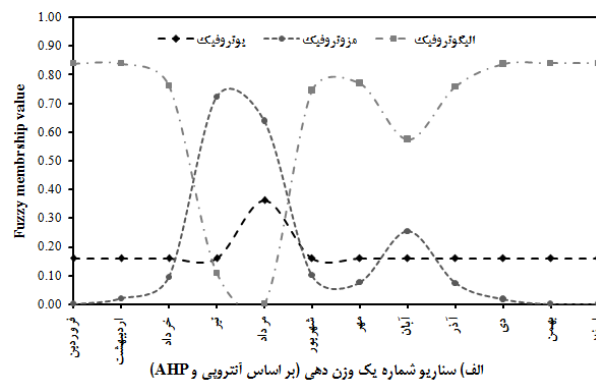
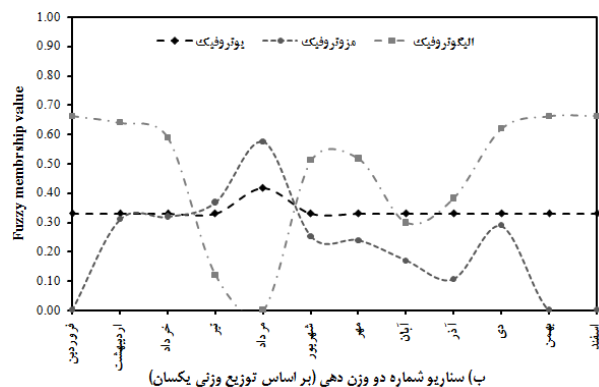
مطابق روابط ۱۲ و ۱۳ در رولایه و زیرلایه، کلروفیل a دارای بالاترین مقدار اطلاعات مفید و در نتیجه حداقل محتوای آنترپوی است. از طرف دیگر درصد اکسیژن اشباع کمترین مقدار اطلاعات موجود و بالاترین محتوای آنترپوی را دارد. در روش تحلیل سلسله مراتبی، اهمیت پارامترهای شاخص بر اساس قضاوت متخصص و نوع کاربری پیکره آبی تعیین شد. ماتریس مقایسه زوجی برای پارامترهای شاخص مورد بحث به شکل رابطه ۱۴ نشان داده شده است.

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} Chla & TP & HO\% \end{matrix} \\ \begin{matrix} Chla \\ TP \\ HO\% \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 5 & 7 \\ 0.2 & 1 & 7 \\ 0.143 & 0.143 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (14)$$

پس از محاسبه میانگین هندسی سطرها، استانداردسازی (تبدیل اعداد ستون‌ها به محدوده صفر و یک) انجام شده و بردار وزن (λ) محاسبه می‌شود:

جدول ۳- وضعیت تغذیه‌گرایی رولایه مخزن سد ایلام

ماه	سناریو شماره یک وزن دهی (بر اساس آنترپوی و AHP)			سناریو شماره دو وزن دهی (بر اساس توزیع وزنی یکسان)				
	وضعیت غالب	درجه عضویت به سطوح تغذیه‌گرایی			وضعیت غالب	درجه عضویت به سطوح تغذیه‌گرایی		
		سطح اول	سطح دوم	سطح سوم		سطح اول	سطح دوم	سطح سوم
فروردین	الیگوتروفیک	۰/۱۶	۰/۰۰	۰/۸۴	الیگوتروفیک	۰/۳۳	۰/۰۰	۰/۶۶
اردیبهشت	الیگوتروفیک	۰/۱۶	۰/۰۲	۰/۸۴	الیگوتروفیک	۰/۳۳	۰/۳۱	۰/۶۴
خرداد	الیگوتروفیک	۰/۱۶	۰/۰۹	۰/۷۶	الیگوتروفیک	۰/۳۳	۰/۳۲	۰/۵۹
تیر	مزوتروفیک	۰/۱۶	۰/۷۲	۰/۱۱	مزوتروفیک	۰/۳۳	۰/۳۷	۰/۱۲
مرداد	مزوتروفیک	۰/۳۶	۰/۶۴	۰/۰۰	مزوتروفیک	۰/۴۲	۰/۵۷	۰/۰۰
شهریور	الیگوتروفیک	۰/۱۶	۰/۱۰	۰/۷۵	الیگوتروفیک	۰/۳۳	۰/۲۵	۰/۵۱
مهر	الیگوتروفیک	۰/۱۶	۰/۰۸	۰/۷۷	الیگوتروفیک	۰/۳۳	۰/۲۴	۰/۵۲
آبان	الیگوتروفیک	۰/۱۶	۰/۳۵	۰/۵۷	الیگوتروفیک	۰/۳۳	۰/۱۷	۰/۳۰
آذر	الیگوتروفیک	۰/۱۶	۰/۰۷	۰/۷۶	الیگوتروفیک	۰/۳۳	۰/۱۱	۰/۳۸
دی	الیگوتروفیک	۰/۱۶	۰/۰۲	۰/۸۴	الیگوتروفیک	۰/۳۳	۰/۲۹	۰/۶۲
بهمن	الیگوتروفیک	۰/۱۶	۰/۰۰	۰/۸۴	الیگوتروفیک	۰/۳۳	۰/۰۰	۰/۶۶
اسفند	الیگوتروفیک	۰/۱۶	۰/۰۰	۰/۸۴	الیگوتروفیک	۰/۳۳	۰/۰۰	۰/۶۶



شکل ۳- مقادیر عضویت سطوح تغذیه‌گرایی رولایه مخزن

رولایه مخزن تحت سناریوهای یک و دو وجود دارد. بدین معنا که تحت سناریو یک، در اکثر ماه‌های سال میزان قطعیت در تعیین سطوح تغذیه‌گرایی با توجه به درجه عضویت آن‌ها بالا بوده، به گونه‌ای که در اکثر موارد سطح الیگوتروفیک با قطعیت تقریباً ۸۰ درصد حاکم است. همچنین در دو ماه تیر و مرداد، با قطعیت تقریباً ۷۰ درصد سطح مزوتروفیک حاکم شده است. با توجه به درجه عضویت‌های مربوط به سطح یوتروفیک، در هر ماه امکان حاکم شدن شرایط بسیار مغذی در رولایه، تقریباً ۱۶ درصد بوده که این مقدار قابل ملاحظه‌ای نمی‌باشد. تحت سناریو یک، بیشترین عدم اطمینان مربوط به آبان ماه است. در این ماه وضعیت تغذیه‌گرایی مخزن با ۵۷ درصد قطعیت در سطح الیگوتروفیک تعیین شده است.

تحت سناریو دو (شکل ۳-ب)، مقادیر درجه عضویت سه سطح تغذیه‌گرایی به یکدیگر نزدیک می‌شود. این بدان معنا است که تحت این سناریو، عدم قطعیت افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته است. علی‌رغم مشابه بودن وضعیت غالب مغذی بودن تحت هر دو سناریو، میزان قطعیت در تعیین وضعیت الیگوتروفیک تقریباً ۱۰ درصد کاهش یافته و به میزان تقریباً ۶۰ درصد رسیده است. این درحالی است که احتمال حاکم شدن شرایط یوتروفیک به ۳۰ درصد افزایش یافته است. در ماه‌های تیر و آبان میزان عدم قطعیت به حداکثر مقدار خود می‌رسد به نحوی که در تیر ماه تنها با ۴ درصد اختلاف وضعیت مخزن در سطح مزوتروفیک قرار گرفته و در آبان این مقدار به حداقل مقدار خود، یعنی ۳ درصد می‌رسد. این نکته مشخص است که بیشترین عدم قطعیت‌ها در فصول تابستان و پاییز رخ داده است. که دلیل آن می‌تواند حاکم شدن شرایط لایه‌بندی حرارتی در تابستان و وقوع اختلاط مخزن در پاییز باشد. جدول ۴، وضعیت تغذیه‌گرایی زیرلایه مخزن را تحت دو سناریو پیشنهاد شده برای وزن دهی نمایش می‌دهد.

همانطور که در جدول ۲ مشخص است، غلظت کلروفیل در رولایه مخزن کم بوده و درصد اشباع اکسیژن رولایه زیاد می‌باشد. بنابراین با توجه به اینکه کلروفیل بیشترین وزن نسبی برای تعیین وضعیت تغذیه‌گرایی را به خود اختصاص داده است و در اکثر ماه‌ها مقدار درجه عضویت برای کلروفیل به وضعیت الیگوتروفیک، یک و نزدیک یک است، تاثیر این متغیر بسیار زیاد بوده و تا حد زیادی تعیین کننده شرایط حاکم بر مخزن است. بنابراین دلیل قرار گرفتن سطح تغذیه‌گرایی رولایه در حالت‌های کم و متوسط را می‌توان این موضوع دانست. بر اساس سناریو دو، مقدار درجه عضویت به سطح یک (الیگوتروفیک) کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته و درجه عضویت به سطوح دو و سه افزایش یافته است. این بدان معنی است که با توزیع وزنی یکسان (۰/۳۳) به علت زیاد بودن غلظت فسفر و کم بودن درصد اشباع اکسیژن در رولایه، احتمال قرار گرفتن رولایه مخزن در سطوح تغذیه‌گرایی متوسط و زیاد افزایش یافته است. با این وجود وضعیت غالب تغذیه‌گرایی، مشابه حالت قبل می‌باشد. شکل ۳، مقادیر درجه عضویت مربوط به سه سطح تغذیه‌گرایی را برای رولایه مخزن با در نظر گرفتن دو سناریو نمایش می‌دهد.

نکته قابل توجه در شکل ۳، مقادیر درجه عضویت ماه‌های سال به وضعیت یوتروفیک می‌باشد. مشاهده می‌گردد در اکثر ماه‌ها، مقدار درجه عضویت برای سناریو یک، برابر ۰/۱۶ و برای سناریو دو، برابر ۰/۳۳ است. دلیل این امر، غلظت بسیار زیاد فسفر در رولایه می‌باشد. با توجه به غلظت فسفر، درجه عضویت برای تمام ماه‌ها برای این پارامتر برابر یک شده و با ضرب شدن آن در میزان وزن نسبی در نظر گرفته شده (۰/۱۶ و ۰/۳۳)، درجه عضویت کلی برای هر ماه برابر مقدار وزن‌ها گردیده است. این مقدار برای مرداد ماه تغییر یافته که دلیل آن می‌تواند افزایش غلظت کلروفیل a و کاهش درصد اکسیژن اشباع باشد. تغییرات روند نمودارهای الف و ب در شکل ۳، نشان می‌دهد که عدم قطعیت متفاوتی در تعیین وضعیت مغذی بودن

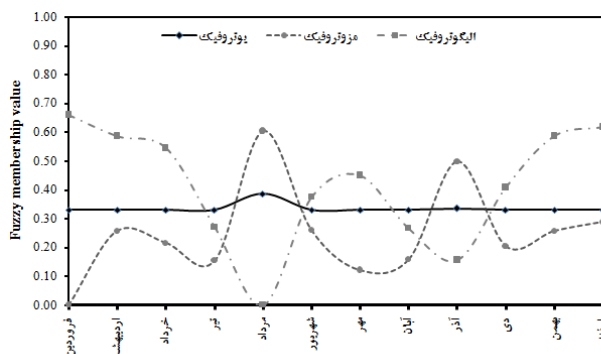
جدول ۴- وضعیت تغذیه‌گرایی زیر لایه مخزن سد ایلام

ماه	سناریو شماره یک وزن دهی (بر اساس آنتروپی و AHP)				سناریو شماره دو وزن دهی (بر اساس توزیع وزنی یکسان)			
	درجه عضویت سطوح تغذیه‌گرایی		EFEI	وضعیت غالب	درجه عضویت سطوح تغذیه‌گرایی		EFEI	وضعیت غالب
	سطح اول	سطح دوم			سطح سوم	سطح سوم		
فروردین	۰/۷۵	۰/۰۰	۰/۲۵	الیگوتروفیک	۰/۶۶	۰/۱۰۰	۰/۳۳	الیگوتروفیک
اردیبهشت	۰/۷۴	۰/۰۲	۰/۲۵	الیگوتروفیک	۰/۵۹	۰/۲۶	۰/۳۳	الیگوتروفیک
خرداد	۰/۷۴	۰/۰۲	۰/۲۵	الیگوتروفیک	۰/۵۴	۰/۲۱	۰/۳۳	الیگوتروفیک
تیر	۰/۴۹	۰/۲۴	۰/۲۵	الیگوتروفیک	۰/۲۷	۰/۱۵	۰/۳۳	یوتروفیک
مرداد	۰/۰۰	۰/۶۸	۰/۳۲	مزوتروفیک	۰/۰۰	۰/۶۰	۰/۳۹	مزوتروفیک
شهریور	۰/۵۰	۰/۲۵	۰/۲۵	الیگوتروفیک	۰/۳۷	۰/۲۶	۰/۳۳	الیگوتروفیک
مهر	۰/۷۳	۰/۰۱	۰/۲۵	الیگوتروفیک	۰/۴۵	۰/۱۲	۰/۳۳	الیگوتروفیک
آبان	۰/۴۸	۰/۲۵	۰/۲۵	الیگوتروفیک	۰/۲۷	۰/۱۶	۰/۳۳	یوتروفیک
آذر	۰/۳۴	۰/۴۱	۰/۲۵	مزوتروفیک	۰/۱۶	۰/۵۰	۰/۳۴	مزوتروفیک
دی	۰/۵۹	۰/۱۵	۰/۲۵	الیگوتروفیک	۰/۴۱	۰/۲۰	۰/۳۳	الیگوتروفیک
بهمن	۰/۷۴	۰/۰۲	۰/۲۵	الیگوتروفیک	۰/۵۹	۰/۲۶	۰/۳۳	الیگوتروفیک
اسفند	۰/۷۵	۰/۰۳	۰/۲۵	الیگوتروفیک	۰/۶۲	۰/۲۹	۰/۳۳	الیگوتروفیک

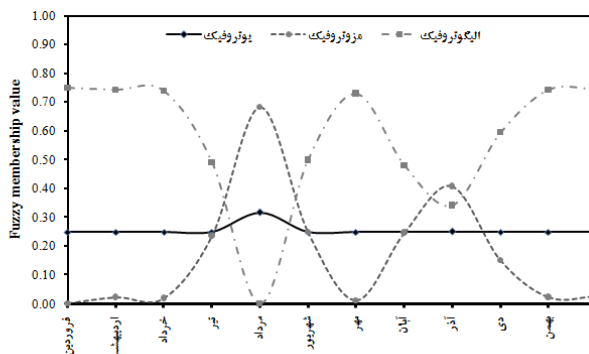
ملاحظه است. با آغاز پاییز و شروع اختلاط مخزن، سطح تغذیه‌گرایی زیر لایه از الیگوتروفیک، به یوتروفیک و مزوتروفیک تغییر وضعیت یافته است. شکل ۴، مقادیر درجه عضویت مربوط به سه سطح تغذیه‌گرایی را برای رولایه مخزن با در نظر گرفتن دو سناریو نمایش می‌دهد.

مشابه رولایه مخزن، تحت سناریو یک، مشاهده می‌گردد زیر لایه با قطعیت بالایی در اکثر ماه‌ها سال دارای سطح تغذیه‌گرایی الیگوتروفیک است (تقریباً ۸۰ درصد) و تنها در آذر ماه دارای عدم قطعیت زیاد می‌باشد. نکته قابل توجه در زیر لایه مخزن، نزدیک بودن درجه عضویت ماه‌های تابستان و پاییز به هر سه سطح تغذیه‌گرایی است، که نشان دهنده افزایش عدم قطعیت می‌باشد. بر اساس سناریو دو (شکل ۴- ب)، عدم قطعیت زیادی در ماه‌های شهریور، آبان و دی وجود دارد. در ماه شهریور تنها با اختلاف ۴ درصد سطح تغذیه‌گرایی در وضعیت الیگوتروفیک قرار گرفته است.

زیر لایه مخزن، دارای وضعیتی مشابه رولایه است (جدول ۴). بر اساس سناریو یک، این لایه ده ماه از سال دارای سطح تغذیه‌گرایی الیگوتروفیک و دو ماه دارای سطح مزوتروفیک است. با توجه به اینکه کلروفیل بیشترین وزن نسبی (۰/۷۳) برای تعیین وضعیت تغذیه‌گرایی در زیر لایه را به خود اختصاص داده است، تاثیر این متغیر بسیار زیاد بوده و تا حد زیادی تعیین کننده شرایط حاکم بر مخزن است. به علت کاهش وزن نسبی کلروفیل a در زیر لایه نسبت به رولایه، قطعیت سطح تغذیه‌گرایی غالب، در مقایسه با رولایه کاهش یافته است. متناوباً با افزایش وزن نسبی فسفر، احتمال قرار گرفتن زیر لایه در وضعیت یوتروفیک، افزایش یافته و از ۱۶ درصد به ۲۵ درصد رسیده است. تحت سناریو دو، رفتار زیر لایه، تفاوت محسوسی با رولایه داشته که دلیل آن افزایش غلظت کلروفیل و فسفر و کاهش غلظت اکسیژن محلول است. در این لایه سطح تغذیه‌گرایی در تیرماه در وضعیت یوتروفیک قرار داشته که در مقایسه با سناریو یک قابل

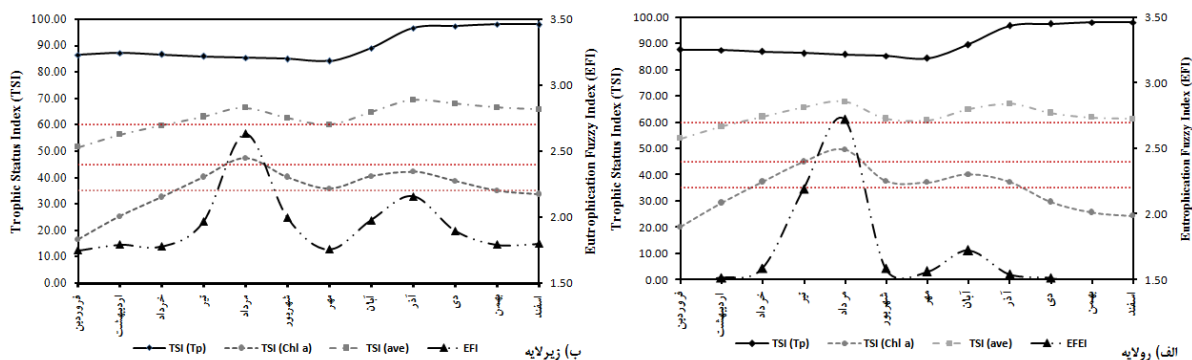


ب) سناریو شماره دو وزن دهی (بر اساس توزیع وزنی یکسان)



الف) سناریو شماره یک وزن دهی (بر اساس آنتروپی و AHP)

شکل ۴- مقادیر عضویت سطوح تغذیه‌گرایی زیر لایه مخزن



شکل ۵- نمودار تغییرات شاخص TSI و EFEI در رولایه و زیرلایه مخزن سد

تئوری مجموعه‌های فازی نواحی مرزی بین سطوح مختلف تغذیه‌گرایی در نظر گرفته شد و از ترکیب تئوری آنتروپی و تحلیل سلسله مراتبی، برای تعیین وزن نسبی هر شاخص استفاده شد. در نهایت از توزیع وزنی یکسان برای بررسی و مقایسه نتایج تحلیل استفاده گردید. سه پارامتر شاخص کلروفیل a، فسفر کل و درصد اشباع اکسیژن در رولایه و زیرلایه مخزن برای ارزیابی سطح تغذیه‌گرایی در نظر گرفته شد.

نتایج این مطالعه نشان داد:

الف) رولایه مخزن در اکثر ماه‌ها و تحت هر دو سناریو، با قابلیت اطمینان مناسب، در سطح تغذیه‌گرایی کم قرار دارد، و تنها در ماه‌های تیر و مرداد دارای سطح تغذیه‌گرایی متوسط است. همچنین میزان عدم قطعیت در رولایه پایین بوده و نتایج دارای قابلیت اطمینان مناسبی هستند. غلظت بالای فسفر در رولایه، مهمترین دلیل وجود آمدن اختلاف و عدم قطعیت در تعیین وضعیت مغذی شدن رولایه شناخته شد.

ب) زیرلایه مخزن، دارای شرایط مشابه رولایه بوده، با این تفاوت که میزان عدم قطعیت در این لایه افزایش یافته است. همچنین، احتمال قرار گرفتن زیرلایه در سطح تغذیه‌گرایی زیاد (یوتروفیک) بیشتر از رولایه بوده که دلیل آن را می‌توان غلظت بالای فسفر در زیرلایه دانست.

ج) نتایج این تحلیل نشان داد که با در نظر گرفتن وزن‌های نسبی یکسان، مرزهای مشترک سطوح تغذیه‌گرایی در رویکرد فازی افزایش یافته و بدین ترتیب موجب افزایش عدم قطعیت می‌گردد.

به طور کلی می‌توان چنین استنباط نمود که مخزن سد ایلام با توجه به معیارهای مطرح شده، دارای سطح تغذیه‌گرایی کم است. اما این نکته که غلظت فسفر در مخزن بسیار بیشتر از حد استاندارد بوده و بر اساس شاخص TSI در تمام ماه‌ها در وضعیت فوق مغذی قرار دارد، نیز نباید فراموش شود. در هر صورت نتایج این تحقیق نشان داد که تئوری فازی عدم شفافیت بین مرزهای سطوح مختلف تغذیه‌گرایی را مشخص می‌نماید و عدم قطعیت‌های موجود را نمایان می‌سازد.

با توجه به مطالب ذکر شده، میزان عدم قطعیت تحت سناریو دو افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. بنابراین، سناریو یک از قابلیت اطمینان بیشتری برخوردار بوده و برای مقایسه با معیار TSI مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۵، نمودار تغییرات شاخص TSI و EFEI را برای رولایه و زیرلایه نمایش می‌دهد.

در بررسی شاخص‌های TSI برای فسفر و کلروفیل a و در نتیجه، تصمیم‌گیری بر مبنای میانگین آن‌ها، ملاحظه می‌گردد که در اکثر ماه‌های سال، رولایه مخزن در وضعیت فوق مغذی (هایپرتروفیک) قرار دارد ($TSI > 60$) و تنها در دو ماه اول سال شرایط یوتروفیک حاکم است. بر اساس شاخص فسفر، رولایه مخزن در تمام سال در حالت فوق مغذی قرار داشته که دلیل آن غلظت زیاد این متغیر است. بر اساس شاخص کلروفیل a، رولایه مخزن در اکثر ماه‌ها در وضعیت مزوتروفیک بوده و تنها در مرداد ماه به سطح تغذیه‌گرایی یوتروفیک می‌رسد. همچنین در بهار و زمستان وضعیت تغذیه‌گرایی الیگوتروفیک است. تغییرات شاخص TSI در زیرلایه، مشابه رولایه است. بر اساس شاخص فسفر، زیرلایه در تمام ماه‌های سال در وضعیت هایپرتروفیک قرار داشته و بر اساس شاخص کلروفیل a، زیرلایه پنج ماه در وضعیت الیگوتروفیک، شش ماه در سطح مزوتروفیک و یک ماه در سطح یوتروفیک قرار دارد.

با بررسی شاخص EFEI می‌توان مشاهده نمود، روند تغییرات این شاخص در هر دو لایه مشابه تغییرات شاخص TSI می‌باشد. با این تفاوت که سطوح تغذیه‌گرایی پایین‌تری را نشان می‌دهد. همچنین، شاخص EFEI، میزان اختلاف بین سطوح تغذیه‌گرایی در هر ماه را به صورت واضح‌تری نمایش می‌دهد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله وضعیت تغذیه‌گرایی سد ایلام در دو بخش زیرلایه و رولایه، به وسیله شاخص فازی- آنتروپی تغذیه‌گرایی مخزن (EFEI) و شاخص TSI، تحت دو سناریو وزن‌دهی بررسی گردید. با استفاده

اطمینان تصمیمات را با توجه به لحاظ عدم قطعیتها، افزایش دهد. برای ادامه مطالعات پیشنهاد می‌شود وزن‌ها برای هر ماه از سال به صورت جداگانه تعیین شده و بر اساس همان ماه تحلیل شود.

مقایسه نتایج در زیرلایه و رولایه نشان می‌دهد در مواردی که عوامل ایجاد کننده عدم قطعیتها بیشتر است، رویکرد فازی کاربردی‌تر و موثرتر خواهد بود. بنابراین، این شاخص می‌تواند به عنوان ابزاری مفید و کارآمد به مدیران و تصمیم‌گیرندگان کمک نموده و قابلیت

منابع

- ۱- طرح تأمین آب درازمدت ایلام. ۱۳۹۰. مطالعات تکمیلی محیط‌زیست، جلد اول. شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس.
- 2- Andersen J.H., Schlüter L., and Ærtebjerg G. 2006. Coastal eutrophication: recent developments in definitions and implications for monitoring strategies. *Journal of Plankton Research*, 28(7):621-628.
- 3- Carlson R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanog.* 22(2):361-369.
- 4- Chen S., Wang X., and Zhao X. 2008. An attribute recognition model based on entropy weight for evaluating the quality of groundwater sources, *J China Univ Mining & Technol*, 18:72-75
- 5- Duque W.O., Huguet N.F., Domingo J.L., and Schuhmacher M. 2006. Assessing water quality in rivers with fuzzy inference systems: A case study, *Environment International*, 32:733-742.
- 6- Glibert P.M. and Burkholder J.A.M. 2011. Harmful algal blooms and eutrophication: "strategies" for nutrient uptake and growth outside the Redfield comfort zone. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 29(4):724-738.
- 7- Karamouz M., Ahamadi A., and Taheriyoun M. 2007. Entropy based optimization model of waste- load allocation, *World Environmental and Water Resources Congress*, Florida.
- 8- Lu R, Lo. L., and Hu J. 1999. Analysis of reservoir water quality using fuzzy synthetic evaluation, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 13:327-336.
- 9- Lu R., and Lo S. 2002. Diagnosing reservoir water quality using self-organizing maps and fuzzy theory, *Water Research*, 36:2265-2274.
- 10- OECD. 1982. *Eutrophication of water: monitoring, Assessment and Control*, Organization for Economic Cooperation and Development, Paris.
- 11- Shannon C. 1948. A mathematical theory of communication bell system tech. *Journal*, 27:379-423.
- 12- Silvert W. 2000. Fuzzy indices of environmental conditions, *Ecol. Model.* 130:111-119.
- 13- Taheriyoun M., Karamuz M., and Baghvand A. 2010. Development of an entropy-based fuzzy eutrophication index for reservoir water quality evaluation. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 7(1).
- 14- Zeleny M. 1982. *Multiple criteria decision making*. McGraw-Hill, New York.
- 15- Zhi-hong Z.Yi.Y. and Jing-nan S. 2006. Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy evaluation for water quality assessment, *Journal of environmental Science*, 18(5):1020-1023.



Evaluation of Eutrophication in the Ilam Reservoir Using Fuzzy Approach

H. Abdolabadi¹ - M.H. Niksokhan^{2*}

Received: 23-06-2013

Accepted: 06-01-2014

Abstract

Assessing the level of reservoir's Eutrophication has been regarded as one of the main issues in the water quality management by managers and policy makers. Estimating the eutrophication level is not possible by a determined method and complete certainty with respect to the high complexity of this phenomenon. Fuzzy theory is an approach by which the lack of transparency and uncertainty can be determined between the levels of eutrophication. In this study, Entropy- based Fuzzy Eutrophication Index (EFEI) and Trophic State index (TSI) were used for the trophic level classification of the Ilam reservoir epilimnion and hypolimnion during a year. These indexes were weighted with two scenarios based on the chlorophyll a, total phosphorus and oxygen saturation parameters. In the first scenario, the relative weights of indexes were calculated by the combination of entropy- based fuzzy approach and analytical hierarchy process. In second scenario, equal weight was considered for all parameters. The results showed that based on both scenarios and in most months of the year the trophic level of the epilimnion was oligotrophic with suitable certainty and it was only mesotrophic in July and August. In the hypolimnion, the trophic level was similar to the epilimnion, but uncertainties have been increased.

Keywords: Eutrophication Level, Fuzzy Theory, Entropy Theory, Analytical Hierarchy Process, Ilam Reservoir

1,2- PhD Student and Assistant Professor, Department of Environment Engineering, Graduate Faculty of Environment, Tehran University

(*-Corresponding Author Email: niksokhan@ut.ac.ir)