بررسی تأثیر معیارهای محیطی در کارایی فرآیند گیاه‌پالایی پساب‌های معدنی با استفاده ازروش نقشه شناختی(مطالعه موردی: معدن مس سونگون)

امیر جعفرپور[۱]، جعفر عبدالهی شریف*[۲]، ساموئل یوسفی[۳]، مصطفی جهانگشای رضائی[۴]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی معدن، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی ارومیه

۲- دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه

۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی ارومیه

۴- استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی ارومیه

(دریافت: فروردین ۱۳۹۵، پذیرش: اسفند ۱۳۹۶)

چکیده

روند رو به رشد فعالیت‌های معدنی و عدم رعایت الزامات زیست‌محیطی، باعث شده تا مقادیر هنگفتی از آلاینده‌های صنایع معدنی به واسطه دفع غیراصولی ضایعات و عدم استفاده از فناوری‌های نوین، از طریق آب وارد طبیعت شوند. در این میان، پساب کارخانه‌های تغلیظ معادن، در کنار تخریب منابع طبیعی، فشاری مضاعف بر اکوسیستم تحمیل می‌کند. در سال‌های اخیر، به کارگیری فرآیندهای زیست‌سازگار گیاه‌پالایی در تصفیه پساب کارخانه‌های تغلیظ معادن، نتایج قابل توجهی را در پی داشته است. بررسی کارایی فرآیند گیاه‌پالایی و شناسایی معیارهای مختلف محیطی مؤثر بر آن، نه تنها کاربردهای این فناوری نوین را آشکار می‌سازد، بلکه طراحان این سیستم‌های طبیعی را در خصوص اجرایی کردن آن یاری می‌کند. در این مطالعه، با توجه به اینکه در دنیای واقعی، معیارهای محیطی بر روی همدیگر نیز اثر گذراند، باید روابط متقابل بین این معیارها برای دستیابی به نتایج واقعی در نظر گرفته شود. از این رو،در این پژوهش، از روش نقشه شناختی برای بررسی اثرگذاری معیارهای محیطی بر روی کارایی گیاه‌پالایی با مد نظر قرار دادن روابط میان آنها استفاده شده است. در قالب مطالعه موردی نیز با توجه به اهمیت منطقه حفاظت‌شده ارسباران و تأثیر عوارض مخرب سد باطله معدن مس سونگون بر آن، گیاه‌پالایی پساب کارخانه تغلیظ این معدن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که «میزان فلزات سنگین موجود در سد باطله» با وزن نسبی ۰/۳۷، «میزان فلز محتوی کانسنگ» با وزن نسبی ۰/۳۴ و «میزان فلزات سنگین محلول در پساب» با وزن نسبی ۰/۳۳ مهم‌ترین معیارهای محیطی اثرگذار درکارایی فرآیند گیاه‌پالایی هستند.

کلید واژه‌ها

گیاه‌پالایی، معیارهای محیطی، نقشه شناختی، معدن مس سونگون

*عهده دار مکاتبات: *j.a.sharif@urmia.ac.ir*

۱- مقدمه

کمیابی و بهره‌برداری نادرست از منابع آب، مشکلات جدی و چشمگیری را برای توسعه پایدار و پاسداری از محیط‌زیست پدید آورده است. این موضوع، بهداشت انسان‌ها، امنیت غذایی، توسعه صنعتی و سیستم‌های اکولوژیک را در معرض خطر قرار داده است. روند رو به رشد فعالیت‌های معدنی از یک‌سو و عدم رعایت الزامات زیست‌محیطی به ویژه در کشورهای در حال توسعه از سوی دیگر، باعث شده تا مقادیر هنگفتی از آلاینده‌های این صنایع به واسطه عواملی چون دفع غیر اصولی باطله‌های معدنی و عدم استفاده از فناوری‌های جدید به منظور کاهش عوارض مخرب آنها، از طریق عواملی مانند پساب‌ها وارد محیط زیست شوند[۱]. آلودگی آب با توجه به کمبود منابع آن، اثر مستقیمی بر توسعه یک کشور دارد. از طرف دیگر، جریان دائمی آب و چرخه طبیعی آن در طبیعت، اهمیت پالایش آن را به وضوح نشان می‌دهد. از جمله صنایعی که بیش‌ترین نقش را در آلودگی آب دارند، می‌توان به فعالیت‌های معدنی و پساب حاصل از تغلیظ مواد معدنی استخراجی اشاره کرد.

با توجه به آلودگی محیط‌زیست به وسیله آلاینده‌های مختلف در اثر فعالیت‌های معدنی، طی سالیان گذشته از روش‌های فیزیکی و شیمیایی بسیاری جهت پاک‌سازی اکوسیستم‌ها استفاده شده است که اغلب با هزینه‌های فراوانی همراه هستند. از این رو، امروزه از منابع بیولوژیک محیط‌زیست جهت پاک‌سازی نقاط آلوده به انواع آلاینده‌ها کمک گرفته می‌شود. یکی از کم‌هزینه‌ترین روش‌ها جهت زدودن آلودگی‌ها از پساب، آب و خاک، فرآیندهای گیاه‌پالایی[1] است. گیاه‌پالایی، استفاده از گیاهان به تنهایی و یا همراه میکروارگانیسم‌های خاک برای تجزیه، نگهداری و یا تثبیت آلاینده‌های گوناگون موجود در خاک، رسوبات، آب‌های زیرزمینی و نیزآب‌های سطحی است[۳،۲]. سیستم‌های طبیعی تصفیه پساب کارخانه‌های تغلیظ معادن به سه دسته اصلی آبی[2]، زمینی[3] و وِتلند[4] (نیزارها) طبقه‌بندی می‌شوند. تمامی این روش‌ها بر پایه مکانیسم‌های طبیعی فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی انجام می‌شوند[۴،۵]. در تکنیک‌های مختلف زیست‌پالایی، از پتانسیل‌های طبیعی موجود در گونه‌های مختلف گیاهی در راستای جذب، تصفیه، انباشت، تبدیل و تبخیر عناصر مزاحم، فلزات سنگین، مواد شیمیایی خطرآفرین و حتی ذرات جامد معلق در پساب‌ها استفاده می‌شود.

علاوه بر این، با توجه به اهمیت منطقه حفاظت‌شده ارسباران که مجتمع مس سونگون در مجاورت آن قرار گرفته است و همچنین نظر به حجم قابل توجهی از پساب کارخانه تغلیظ این مجتمع که در سد باطله واقع در نزدیکی معدن تخلیه می‌شود و اثرات زیان‌بار و بعضاً غیر قابل جبران فراوانی در اکوسیستم منطقه دارد، استفاده از فرآیند زیست‌سازگار گیاه‌پالایی برای این معدن توصیه شده و طی بازدیدهای میدانی و انجام آزمایش‌های گلخانه‌ای و آزمایشگاهی مختلف، چندین گونه گیاهی زراعی برای کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی پساب کارخانه مذکور معرفی شده است[۶]. با توجه به اهمیت مسأله طراحی سیستم مناسب تصفیه طبیعی برای این مجتمع معدنی، لازم است روابط حاکم میان معیارهای مختلف محیطی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و بر اساس نتایج حاصل و ضمن انجام تحلیل‌های فنی و مهندسی، مناسب‌ترین الگو طراحی شده و مورد استفاده قرار گیرد. دلیل در نظر گرفتن روابط علّی و معلولی میان معیارهای مختلف محیطی آن است که در دنیای واقعی، عوامل و پارامترهای بسیاری وجود دارند که روابط پیچیده‌ای با سایر عوامل دارند؛ به طوری که از بسیاری از آنها تأثیر پذیرفته و بر بسیاری دیگر، تأثیرگذار هستند. یکی از الگوهای مناسب در این زمینه، استفاده از روش نقشه شناختی است. نقشه شناختی محدودیتی در پیچیدگی سیستم و در نظر گرفتن تعداد مفاهیم و روابط بین آنها ندارد. همچنین، نقشه شناختی با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری و فنون سناریوسازی به یک ساختار پایدار دست پیدا می‌کند که این امر منجر به کاهش وابستگی به نظرات خبرگان می‌شود. بنابراین در این تحقیق با استفاده از این روش، تأثیر فاکتورهای مختلف محیطی بر کارایی فرآیند گیاه‌پالایی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. این تأثیرها و یا به عبارت دیگر، روابط علت و معلولی که در همه علوم قابل مشاهده است. در این پژوهش در خصوص یکی از مسائل مهم محیط‌زیست معدنی به کار گرفته شده و در تشخیص معیارهای مختلف و میزان اهمیت و اثرگذاری آن بر کل سیستم و نیز بر دیگر معیارها از آن بهره گرفته شده است. از طرف دیگر، نتایج حاصل از این تحقیق، با توجه به قابلیت اجرایی شدن فرآیند گیاه‌پالایی در مجتمع مس سونگون، در طراحی سیستم

تصفیه مورد مطالعه که در قالب مطالعات امکان‌سنجی انجام گرفته است، نقش به سزایی خواهد داشت.

ساختار مقاله بدین شرح است که پس از ارائه مقدمه‌ای کوتاه، در بخش دوم به پیشینه تحقیق پرداخته و مطالعات مرتبط با روش‌شناسی حاضر، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش سوم، روش نقشه شناختی به اختصار تشریح شده و به مبانی نظری آن اشاره می‌شود. در بخش چهارم، فرآیند گیاه‌پالایی معرفی و پس از آن در بخش پنجم، در قالب مطالعه موردی، ضمن معرفی معدن مس سونگون، اعمال روش نقشه شناختی بر روی داده‌های این معدن انجام می‌گیرد. تحلیل نتایج حاصل از بررسی مطالعه موردی، در بخش ششم انجام شده و نتایج حاصل از اجرای پژوهش در انتها ارائه می‌شود.

۲- پیشینه تحقیق

تا کنون مطالعات چندانی در خصوص به کارگیری روش نقشه شناختی در مهندسی معدن و مسأله مورد بررسی انجام نگرفته است؛ اما کاربردهای این روش در سایر زمینه‌های تخصصی، نشان دهنده نتایج قابل قبول و در خور توجه این روش است. به عنوان مثال، در رابطه با کاربردهای این روش در تجزیه و تحلیل سیستم‌ها، مسائل مدیریتی، اقتصادی و پیش‌بینی‌های مختلف مسائل فنی و مهندسی، مطالعات چشم‌گیری انجام گرفته است که از جمله آنها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

ژانگ و همکاران با استفاده از نقشه شناختی به رفتار انسانی در مدیریت زیست‌محیطی پرداخته و گزینه سیاست را برای اکوسیستم یک معدن زغال‌سنگ در چین شبیه‌سازی کرده و نتایج را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده است. بر اساس نتایج این پژوهش، متغیرهای اصلی برای موضوع مورد بحث مشخص و گروه‌های ذی‌نفع شناسایی و تأثیر هر یک از آنها در فرآیند تصمیم‌گیری تعیین شده است[۷]. همچنین تیکانن و همکاران از روش نقشه شناختی، برای کشف هدف-ساختار صاحبان جنگل در منطقه‌ای واقع در شمال فنلاند بهره گرفتند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که می‌توان از نقشه‌های شناختی بسط یافته در ادغام روش‌های کمی و کیفی در بررسی‌های اهداف متنوع استفاده کرد[۸]. در پژوهشی دیگر، مورهیر و همکاران نیز یک چارچوب نقشه شناختی برای پشتیبانی از ارزیابی یکپارچه زیست‌محیطی را مورد مطالعه قرار دادند. نقشه شناختی این پژوهشگران نیز مبتنی بر سناریو بوده و نتایج نشان می‌دهد که با وجود برخی تغییرات جزئی مثبت، چشم‌انداز راهبردی کلی نیز تغییر می‌کند[۹].

در زمینه مدیریت واحدهای تولیدی، لی و همکاران یک رویکرد نقشه شناختی مبتنی بر برنامه‌ریزی بازاریابی راهبردی را برای شرکت‌های صنعتی ارائه کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که نظریه نقشه‌های شناختی با ارائه روشی مبتنی بر عامل، می‌تواند در حل مسائل مرتبط بر تحلیل و استنباط مورد استفاده قرار گیرد[۱۰]. همچنین بویوک‌اؤزکان و واردال‌اوغلو در پژوهشی به تجزیه و تحلیل برنامه‌ریزی مشارکتی در صنعت خرده‌فروشی با روش نقشه شناختی پرداختند و مشخص شد که برای حل مسائل دارای چندین متغیر تصمیم‌گیری وابسته به هم که روابط علّی بین آنها حاکم است و برای کنترل و پیش‌بینی تأثیر متقابل آنها، باید از نقشه شناختی بهره برد[۱۱]. رضایی و همکاران نیز با استفاده از روش نقشه شناختی فازی، یک چارچوب تصمیم‌گیری برای ارزیابی تأمین‌کنندگان صنعت قطعات خودرویی ارائه نمودند. در این پژوهش، از روش نقشه شناختی برای تعیین وزن معیارهای ارزیابی تأمین‌کنندگان براساس روابط علّی- معلولی میان این معیارها استفاده شده است[۱۲].

در زمینه مدیریت انرژی، کیریاکاراکوس و همکاران به منظور برنامه‌ریزی محلی انرژی‌های تجدیدپذیر از سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری نقشه‌های شناختی بهره برده‌اند. آنها با طراحی و اجرای نرم‌افزاری بر اساس نقشه‌های شناختی و انجام آزمایش‌های مختلف و اعتبارسنجی نتایج حاصل از آنها و همچنین استفاده از نظر هیئت کارشناسان و خبرگان در تحلیل و ارزیابی نتایج نهایی، موفق شدند که بهترین برنامه‌ریزی را در خصوص مسأله مورد نظرشان به دست آورند[۱۳]. در پژوهش دیگری، کیریاکاراکوس و همکاران با استفاده از نقشه شناختی فازی، یک سیستم نظارتی برای سیستم‌های آب شیرین طراحی نمودند[۱۴]. اوفان و پروز در پژوهشی دیگر، به منظور درک اعتراض عمومی به زیرساخت-های انرژی در اسپانیا از نقشه شناختی استفاده کرده و موقعیت‌های مختلف در اختلاف نظر کارشناسان را با این روش مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند[۱۵].

آزاده و همکاران در پژوهشی با استفاده از یک الگوریتم ترکیبی رگرسیون فازی و روش نقشه شناختی به پیش‌بینی و بهینه‌سازی نوسانات بازار مسکن پرداختند و اولین روش ترکیبی هوشمند به منظور پیش‌بینی قیمت مسکن و بهینه‌سازی بازار را ارائه دادند[۱۶]. اولازابال و پاسکوال به مطالعه انعطاف‌پذیری و تحول شهری با استفاده از نقشه‌های شناختی پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد که عوامل متضاد متعدد در تغییر و تحول شهری نقش داشته و برای بررسی اثرات هر کدام از این عوامل، به کارگیری روش نقشه شناختی می‌تواند مفید بوده و نتایج دقیقی را حاصل کند[۱۷]. در پژوهش دیگری، یک روش ترکیبی از نقشه شناختی و تحلیل پوششی داده‌های فازی برای بررسی تأخیرات پروژه‌های ساختمانی توسط یوسفی و همکاران ارائه گردید. به نحوی که با استفاده از الگوریتم یادگیری ترکیبی، اثرگذاری هر عامل تأخیر بر عوامل سنجش ارزیابی شده و با روش تحلیل پوششی داده‌های فازی، اولویت‌بندی عوامل انجام می‌شود[۱۸]. ژانگ و همکاران از نقشه‌های شناختی فازی جهت تجزیه و تحلیل علل ریشه‌ای پروژه‌های پیچیده نظیر ساخت تونل بهره گرفتند. ایشان نشان دادند که رویکرد پیشنهادی می‌تواند به عنوان یک ابزار حمایتی از تصمیم‌گیری برای اطمینان از عملکرد رضایت‌بخش مدیران استفاده شده و کارایی پروژه‌های ساخت تونل را افزایش دهد[۱۹].

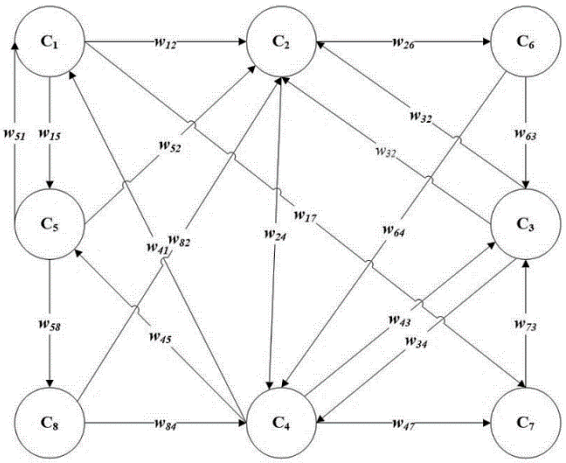
در زمینه ارزیابی عملکرد شبکه‌های درمانی، پاپاجورجیو نیز روش جدیدی را به منظورتصمیم‌گیری در انفورماتیک پزشکی با استفاده از نقشه‌های شناختی ارائه داده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که با چارچوب پیشنهادی وی می‌توان به بررسی عملکرد بخش‌های مختلف شبکه‌های درمانی پرداخت[۲۰]. در تحقیقی دیگر در این حوزه، رضایی و همکاران یک سیستم تصمیم‌گیری با استفاده از روش‌های نقشه شناختی فازی و تحلیل پوششی داده‌های گروهی ارائه نمودند. این پژوهشگران با بهره‌گیری از این سیستم، ضمن ارزیابی عملکرد مراکز درمانی نسبت به تخمین مقادیر بهینه متغیرهای خروجی این مراکز اقدام نمودند[۲۱]. در ادامه استفاده از روش نقشه شناختی در پزشکی، سالمرون و همکاران از روش نقشه شناختی فازی و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به همراه دانش پزشکان جهت تشخیص بیماری استفاده کردند. همچنین برای ارزیابی صحت ابزار پیشنهادی، آزمایشی در بیمارستانی واقع در ایران انجام شده است[۲۲].

با توجه به بررسی مطالعات پیشین در حوزه‌های تصمیم‌گیری، مشاهده می‌شود که روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به صورت گسترده در مسائل اولویت‌بندی تعداد محدودی گزینه، همراه با تعدادی معیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش‌ها با تجمیع چندین نظر از چندین خبره و با در نظر گرفتن معیارهای کمی و کیفی، گزینه‌های از پیش تعیین‌شده را اولویت‌بندی می‌کنند و در اکثر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، روابط علّی و معلولی میان این معیارها در نظر گرفته نمی‌شود. این در حالی است که در دنیای واقعی، هر مشخصه بر روی سایر مشخصه‌ها اثر گذاشته و تأثیر می‌پذیرد که اگر این موضوع نادیده گرفته شود، منجر به عدم اطمینان به نتایج خواهد شد. در میان روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، روش فرآیند تحلیل شبکه‌ای دارای این قابلیت است اما معایب این روش نظیر ناتوانی در مد نظر قرار دادن روابط بازگشتی بین سطوح، زمان‌بر بودن و وجود پیچیدگی در طراحی شبکه، ناتوانی در به کارگیری تعداد نامحدودی از متغیرها، هوشمند نبودن، وابستگی شدید این روش به نظرات خبرگان با وجود نبود دقت کافی در مقایسه‌های زوجی در مسائل پیچیده آن را محدود کرده است. اما روش نقشه شناختی فازی می‌تواند دارای مفاهیم و متغیرهای مختلف و بی‌شماری بوده و همزمان روابط علّی و معلولی میان مفاهیم را مد نظر قرار دهد. همچنین بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری در روش نقشه شناختی، باعث افزایش قابلیت اطمینان در تصمیم‌گیری و هوشمندی سیستم، افزایش همگرایی نقشه و دقت وزن‌های به دست آمده و کاهش وابستگی به نظر خبرگان، همچنین طرح و بررسی سناریوهای مختلف و توانایی مدلسازی سیستم‌های پویا می‌گردد و کاستی‌های روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره را پوشش می‌دهد[۲۳]. با توجه به این که تا کنون از روش نقشه شناختی در رابطه با مسائل مختلف محیط‌زیست معدنی مطالعات چندانی انجام نگرفته است، به نظر می‌رسد کاربرد و مزایای این روش می‌تواند در تحلیل معیارهای مختلف محیطی اثرگذار در کارایی فرآیند گیاه‌پالایی پساب کارخانه تغلیظ مجتمع مس سونگون نتایج ارزنده‌ای را در خصوص یافتن میزان اثرات عوامل مختلف بر گیاه‌پالایی در پی داشته باشد.

۳- روش نقشه شناختی

در دنیای واقعی عوامل زیادی وجود دارند که روابط پیچیده‌ای با سایر عوامل دارند؛ به صورتی که از بسیاری از آنها تأثیر می‌پذیرند و بر بسیاری دیگر تأثیرگذار هستند. از جمله روش‌هایی که برای نمایش این روابط وجود دارد، روش نقشه شناختی است. با توجه به توانایی نقشه شناختی فازی در مدلسازی سیستم‌های پیچیده با داده‌های محدود و کم و همچنین در دسترس نبودن یا هزینه‌بر بودن جمع‌آوری داده به خصوص درکشورهای در حال توسعه که در آن مدیریت(به ویژه مدیریت منابع) امری ضروری است، می‌توان نقشه شناختی را ابزاری بسیار مناسب برای مدلسازی معرفی کرد. این روش توانایی پیش‌بینی عددی را ندارد اما بر مبنای روابط بین مفاهیم و حالت اولیه مفاهیم می‌تواند نشان دهد که چه رخدادی در سیستم اتفاق خواهد افتاد.

اجزای اصلی این نقشه‌ها شامل گره‌ها، کمان بین گره‌ها و علامت روی این کمان‌ها است. در واقع گره‌ها بیانگر مفاهیمی هستند که سیستم را توصیف می‌کنند و کمان‌ها بیانگر روابط علت و معلولی بین مفاهیم و علامت روی کمان‌ها بیانگر نوع علیت بین مفاهیم است[۲۴]. روش نقشه شناختی فازی نیز یک نقشه شناختی است که رابطه بین اجزای یک «چشم‌انداز ذهنی» را می‌تواند برای محاسبه «قدرت تأثیر» روابط علّی- معلولی با عددی در بازه [۰،۱] یا [۱،۱-] استفاده نماید[۲۵]. برای ترسیم چنین نقشه‌ای می‌توان از داده‌های سری زمانی و نظرات خبرگان استفاده کرد. در روش نقشه شناختی مبتنی بر محاسبه، از داده‌های سری زمانی به عنوان ورودی استفاده شده و از منطق شبکه عصبی برای تخمین وزن‌های نقشه و روابط بین متغیرها استفاده می‌شود. این دیدگاه را می‌توان به دو دسته خودکار و شبه‌خودکار دسته‌بندی کرد. در شبه‌خودکار که اغلب مورد استفاده قرار می‌گیرد، برای ترسیم یک نقشه شناختی فازی به یک سری ورودی نیاز است که از دانش و تجربه فرد خبره در زمینه مورد مطالعه به دست می‌آید و بر مبنای آن، مفاهیم و روابط علّی- معلولی بین مفاهیم قابل ترسیم است. شایان ذکر است که برای تدوین یک نقشه شناختی خوب باید دانش، تجربه و سناریونویسی را با هم به کار بست تا بتوان به نتیجه مطلوب رسید. در شکل ۱، نمونه نقشه شناختی فازی به همراه اجزای آن نشان داده شده است.



شکل ۱: نمونه نقشه شناختی فازی

در شکل ۱، C_iها بیانگر گره‌ها یا مفاهیم هستند که به وسیله کمان‌های وزن‌دار با هم در ارتباط هستند. هر ارتباط بین دو مفهوم C_i و C_j دارای وزنی برابر W_{ij} است که بیانگر درجه علیت و نوع رابطه بین مفاهیم است. به نحوی که $Wij>0$ نشان‌دهنده یک ارتباط علّی- معلولی مثبت، $Wij<0$ بیانگر یک ارتباط علّی- معلولی منفی و $W_{ij}=0$ نشان‌دهنده عدم وجود رابطه بین دو مفهوم است.

برای تبیین یک نقشه شناختی باید مراحل شش‌گانه‌ای را انجام داد. این مراحل عبارتند از:

- تعیین مفاهیم تأثیرگذار بر سیستم و تعیین ارتباط بین این مفاهیم
- وزن‌دهی به این ارتباطات و مفاهیم براساس مطالعات میدانی و نظر خبرگان
- انتخاب روش محاسبه و توابع حدی
- آزادگذاری تمام مفاهیم (گره‌ها) در ارتباط با دیگر مفاهیم
- محاسبه نتیجه برهم‌کنش بین مفاهیم در هر سیکل
- ادامه این روند تا رسیدن به شرایط توقف نظیر رسیدن به رفتار آشوب‌ناکی از سیستم یا رسیدن به تعداد تکرار موردنظر

در روش ترسیم نقشه شناختی، تخمین دقیق وزن‌های نقشه توسط خبرگان مسأله‌ای ضروری است. در سال‌های اخیر، از الگوریتم‌های یادگیری برای افزایش دقت وزن‌ها، همگرایی نقشه و کاهش وابستگی به نظر خبرگان استفاده شده است. این الگوریتم‌ها در سه گروه الگوریتم‌های یادگیری بر اساس هبین[۵]، الگوریتم‌های یادگیری بر اساس جمعیت و الگوریتم‌های ترکیبی دسته‌بندی می‌شوند[۲۶]. همچنین، با

توجه به داده‌های این پژوهش که بر اساس نظر خبرگان است، از بین الگوریتم‌های سه‌گانه معرفی‌شده، الگوریتم‌های یادگیری ترکیبی بهترین گزینه خواهد بود. این الگوریتم‌ها، ترکیبی از الگوریتم هبین (مبتنی بر قانون هب) و روش‌های فراابتکاری هستند و برای اصلاح وزن نقشه‌هایی که به صورت ترکیبی از داده‌های سری زمانی و نظرات خبرگان تشکیل می‌شوند، مناسب هستند. لازم به توضیح است با توجه به پژوهش‌های جدید، الگوریتم‌های ترکیبی دیگری بر اساس قانون دلتا نیز ارائه شده است[۲۷]. در این پژوهش، از بین الگوریتم‌های این دسته نیز الگوریتم یادگیری ترکیبی از هبین غیرخطی و تکامل تفاضلی[۶] استفاده می¬شود. دلیل استفاده از الگوریتم یادگیری هبین غیرخطی این است که وزن‌های غیر صفر را در تکرارهای مختلف به روزرسانی کرده و رابطه‌های بین مفاهیم تعیین‌شده در نقشه اولیه را حفظ می‌کند. همچنین، دلیل استفاده از الگوریتم تکاملی تفاضلی، قدرتمند و سریع بودن آن برای جستجو در دسته مسائل بهینه‌سازی در فضاهای پیوسته است[۲۸]. در واقع، الگوریتم تکاملی تفاضلی به منظور غلبه بر نقص اصلی الگوریتم ژنتیک، یعنی فقدان جستجوی محلی در این الگوریتم ارائه شده است. داشتن حافظه‌ای برای حفظ اطلاعات جواب‌های مناسب در جمعیت فعلی، از مزایای این الگوریتم محسوب می‌شود. در ادامه، شبه‌کد الگوریتم هبین غیرخطی (مرحله اول الگوریتم NHL-DE) و شبه‌کد الگوریتم تکامل تفاضلی (مرحله دوم الگوریتم NHL-DE) نشان داده شده که در این پژوهش نگاشته و مورد استفاده قرار گرفته است.

مرحله اول: الگوریتم هبین غیرخطی

گام ۱: دریافت وضعیت مفهوم ورودی A^0و ماتریس وزنی اولیه W^0،

گام ۲: برای هر تکرار (k) گام‌های ۳ الی ۵ را انجام می‌دهد:

گام ۳: محاسبه $A^{(k)}$ با توجه به رابطه (۱):

$$A_i^{(k+1)} = f\left(A_i^{(k)} + \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{N} A_j^{(k)}.w_{ij}^{(k)} \right) \quad (۱)$$

گام ۴:به روزرسانی وزن‌ها با توجه به رابطه (۲):

$$W_{ji}^{(k)} = \gamma.W_{ji}^{(k-1)} + \eta\, A_i^{(k-1)}\left(A_j^{(k-1)} - sgn\left(W_{ji}^{(k+1)} A_i^{(k-1)}\right)\right) \quad (۲)$$

گام ۵: ادامه دادن تازمانیکه شرایط خاتمه‌دهنده برآورده شوند (با در نظر گرفتن دو شرط برای اتمام الگوریتم).

گام ۶: ارسال وزن نهایی $W_{NHL}^{(k+1)}$ به مرحله دوم.

مرحله دوم: الگوریتم تکامل تفاضلی

گام ۱: مقداردهی اولیه جمعیت الگوریتم تکامل تفاضلی در همسایگی $W_{NHL}^{(k+1)}$ و درون محدودیت‌های وزنی پیشنهادی،

گام ۲: تکرار برای هرحالت مفهوم ورودی (k)،

گام ۳: تکرار گام‌های ۴ الی ۶ به ازای هر جمعیت ($i=1,...,NP$)،

گام ۴: جهش[۷] ($W_i^{(k)}$) به منظور تعیین بردار جهش‌یافته[۸]،

گام ۵: ترکیب[۹] (بردار جهش‌یافته) به منظور تعیین بردار آزمایشی[۱۰]،

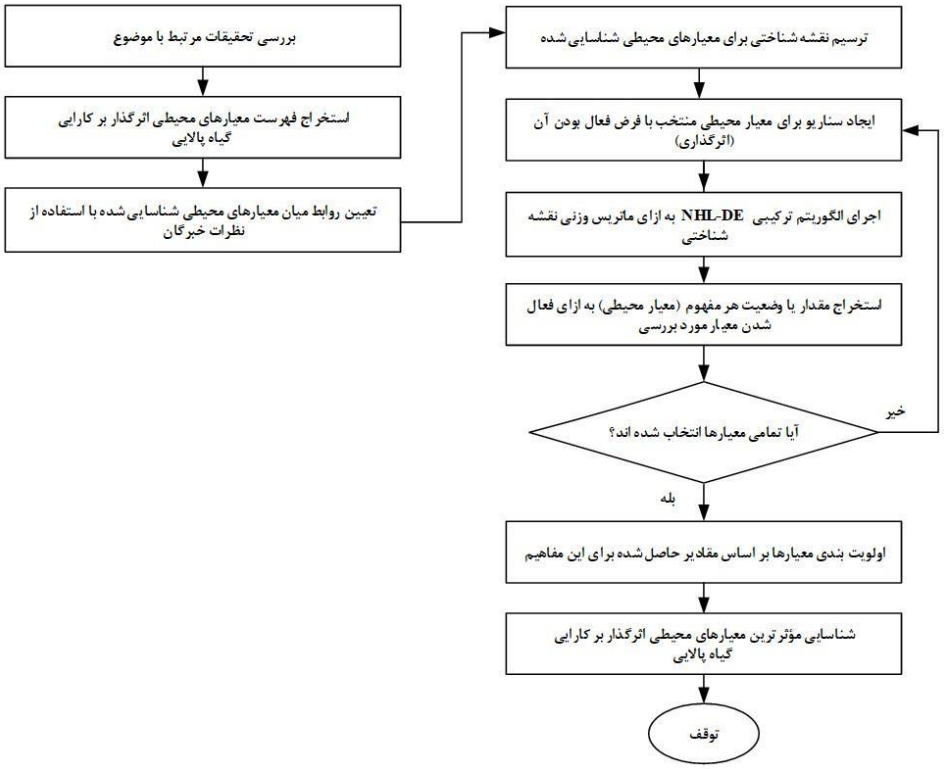
گام۶: اگر (بردار آزمایشی) F کوچک‌تر یا مساوی $F(W_i^{(k)})$ باشد، بردار آزمایشی برای نسل بعدی پذیرفته است.

گام ۷:ادامه دادن تا زمانی که شرط خاتمه برآورده شود.

در شبه‌کد ارائه‌شده، A^0 بیانگر ماتریس حالت اولیه سیستم، W^0 بیانگر ماتریس وزنی اولیه بین متغیرها، $A^{(k)}$و $A^{(k+1)}$ بیانگر مقادیر جدید متغیرها در تکرار k و $k+1$، η و γ بیانگر اعدادی مثبت و بسیار کوچک (نرخ یادگیری)، $W_{ji}^{(k)}$ و $W_{ji}^{(k+1)}$ بیانگر مقادیر به روزشده وزن‌ها بین متغیرهای i و jدر تکرار k و $k+1$، $W_{NHL}^{(k+1)}$ بیانگر ماتریس وزنی نهایی بین متغیرها در مرحله اول، sgn بیانگر تابع علامت و NP[۱۱] نشانگر تعداد جمعیت هستند.

در این پژوهش معیارهای محیطی اثرگذار بر کارایی گیاه‌پالایی به عنوان ورودی اولیه روش نقشه شناختی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در واقع، پس از شناسایی معیارهای محیطی اثرگذار بر کارایی گیاه‌پالایی پساب‌های معدنی، نقشه

شناختی با در نظر گرفتن این معیارها ترسیم می‌شود. دلیل استفاده از این روش، شناسایی روابط علّی-معلولی بین معیارهای محیطی اثرگذار بـر کارایی گیاه‌پالایی پساب‌های معدنی و چگونگی اثرگذاری هر معیار بر کارایی گیاه‌پالایی است. بنابراین، معیارهای محیطی شناسایی‌شده به عنوان مفاهیم نقشه شناختی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تعیین روابط علّی-معلولی بین مفاهیم در نقشه شناختی و وزن‌دهی به روابط شناسایی‌شده، توسط خبرگان موضوع صورت می‌گیرد. همچنین، تعیین مؤثرترین معیارهای شناسایی‌شده با فرض فعال بودن هر یک از معیارهای شناسایی‌شده در نقشه شناختی واجرای الگوریتم یادگیری ترکیبی حاصل می‌شود که نشان‌دهنده میزان اثرگذاری هر معیار محیطی بر کارایی فرآیند گیاه‌پالایی پساب‌های معدنی است. در ادامه، رویکرد پیشنهادی تحقیق برای بررسی معیارهای محیطی اثرگذار بر کارایی فرآیند گیاه‌پالایی که در این پژوهش به کار گرفته می‌شود، در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲: رویکرد پیشنهادی تحقیق بر اساس روش نقشه شناختی

۴- فرآیندهای گیاه‌پالایی

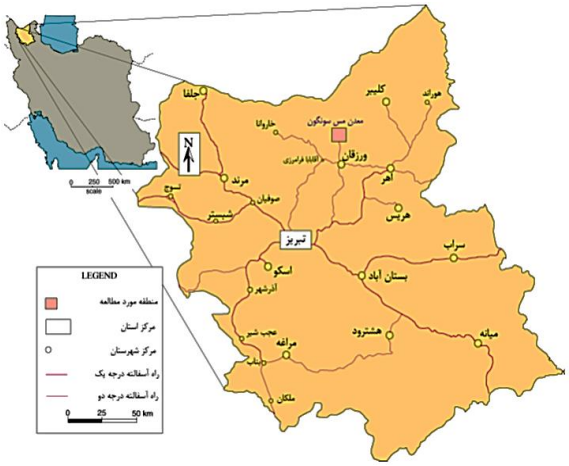
امروزه در کشورهای توسعه‌یافته، کنترل انواع مختلف آلاینده‌های صنایع معدنی از اهمیت بالایی برخوردار است. از این‌رو، همواره سعی پژوهشگران بر این بوده است تا با ارائه راهکارهای نوین، ضمن افزایش بازدهی و کاهش هزینه، انواع باطله‌هایی را که بخش مهمی از آن را فلزات سنگین تشکیل می‌دهند، با روشی اصولی دفع کنند. در این میان، بخشی از آلاینده‌ها از نظر ساختاری، ترکیبی مشابه ترکیبات طبیعی دارند که از بین بردن آنها توسط میکروارگانیسم‌های موجود در آب و خاک یا روش‌های بیولوژیکی امکان‌پذیر است[۲۹]. این در حالی است که بخش اصلی پساب‌های معدنی، متشکل از عناصر فلزی سنگین و غیرفلزی است که عموماً سمی هستند و چون تخریب آنها به کندی صورت می‌گیرد، تجمعاتی را تشکیل می‌دهند که در صورت بی‌توجهی به این امر، آسیب‌ها و خطرات جبران‌ناپذیری مانند از بین رفتن اکوسیستم منطقه و یا راه یافتن پساب به آبخوان‌های زیرزمینی به وجود می‌آید که می‌تواند علاوه بر تحمیل هزینه‌های سنگین مالی، خطرات جانی برای اهالی منطقه نیز به همراه داشته باشد. بر این اساس در سال‌های اخیر تدوین، طراحی و کاربردهای عملیاتی راهکارهای زیست‌سازگار نوین به منظور کاهش عوارض مخرب زیست‌محیطی پساب‌های معدنی، جایگاه ویژه‌ای در معادن مختلف کشورهایی نظیر امریکا، استرالیا و کانادا یافته است. با توجه به مقبولیت

عمومی فرآیندهای مختلف فناوری گیاه‌پالایی و نظر به سازگاری آنها با محیط‌زیست و نیز مزایای قابل توجه این فناوری نوظهور، این فرآیندها در دو دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته و هم‌اکنون مراحل تجاری شدن خود را طی می‌کنند[۳۰]. به عنوان مثال، ۳۰ درصد پروژه‌های تحقیقاتی سازمان محیط‌زیست ایالات متحده آمریکا (EPA) در سال‌های اخیر به پروژه‌های گیاه‌پالایی فلزات سنگین و مواد رادیواکتیو اختصاص داشته است[۳۱].

گیاهان، فلزات را از خاک، آب و هوا جذب می‌کنند، ولی بیش‌ترین جذب از طریق خاک صورت می‌پذیرد. جذب از طریق خاک نه‌تنها به مقدار کلی یک فلز، بلکه به عوامل متعددی نظیر دسترسی آن به ریشه و انتقال آن از طریق فاز ریشه- خاک نیز وابسته است[۱]. مقدار کلی یک فلز در خاک نیز خود متأثر از کانسنگ اولیه و فعالیت‌های معدنکاری در آن ناحیه است. گیاه بیش‌انباشتگر به‌عنوان گیاهی که قادر است فلزات را در اندام‌های هوایی خود تا ۱۰ الی ۵۰۰ برابر بیش‌تر از گیاهان معمولی انباشت نماید، تعریف شده است. برای هر نوع خاص از آلاینده‌ها، فرآیند گیاه‌پالایی متفاوتی وجود دارد که ممکن است در برگیرنده انواع مختلفی از گیاهان باشد. فناوری گیاه‌پالایی روش‌های گوناگونی داشته و با توجه به مکانیسم عمل و فرآیندهایی که آن را انجام می‌دهند، اسامی متنوعی برای آنها گذاشته شده است[۳۲]. به طور کلی، گیاهان در تصفیه محیط‌زیست، چندین فرآیند اصلی را به کار می‌برند که عبارتند از: استخراج گیاهی[۱۲]، تثبیت گیاهی[۱۳]، تغییرشکل گیاهی، تجمع گیاهی[۱۴] یا تجمع در محیط ریشه گیاه توسط فعالیت میکروب‌های خاک، تبخیر گیاهی[۱۵] و پالایش ریشه‌ای[۱۶] که فیلتر کردن آب از توده ریشه‌ها توسط گیاه است[۳۱،۲].

۵- مطالعه موردی

مجتمع مس سونگون در استان آذربایجان‌شرقی، در ۱۲۰ کیلومتری شمال‌شرقی تبریز، ۷۵ کیلومتری شمال‌غرب شهرستان اهر و ۲۵ کیلومتری شمال شهرستان ورزقان، در یک ناحیه کوهستانی واقع شده است (شکل۳). زمستان‌های سرد و یخبندان و تابستان‌های نیمه‌گرم و معتدل از خصوصیات آب‌و هوایی این منطقه است. میانگین بیشینه دمای هوا در تابستان ۳۳ درجه و کمینه دما در زمستان ۲۰- درجه سلسیوس ثبت شده است. مقدار بیشینه بارندگی در محل، حدود ۳۵۰ میلی‌متر در سال و مقدار رطوبت نسبی در سال، بین ۵۲ تا ۸۵ درصد متغیر است[۳۳]. بر اساس آخرین مطالعات اکتشافی، ذخیره قطعی معدن ۸۰۶ میلیون تن و ذخیره قابل استخراج آن ۳۸۸ میلیون تن برآورد شده است. کانسار سونگون از نوع پورفیری است و عملیات استخراج کانسنگ آن به صورت معدنکاری روباز انجام می‌گیرد[۳۴].



شکل۳: موقعیت مجتمع مس سونگون و راه‌های دسترسی به آن

در فرآیند پرعیارسازی طراحی‌شده برای کارخانه تغلیظ مس سونگون که برای دو فاز ۶ ساله و ۲۵ ساله طراحی شده است، کانسنگ مس استخراج‌شده پس از خردایش اولیه به کمک سنگ‌شکن ژیراتوری، توسط نوار نقاله وارد انبار مواد دانه‌درشت می‌شود. سپس مواد خردشده به کمک آسیای نیمه‌خودشکن و گلوله‌ای، آسیا شده و در ادامه تحت فرآیند فلوتاسیون قرار می‌گیرد. عملیات فلوتاسیون در سه مرحله رافر، کلینر و رمق‌گیری انجام می‌شود. پس از عملیات فلوتاسیون، پساب کارخانه فرآوری که تقریباً معادل خوراک ورودی است، مسأله‌ساز شده و نیاز به مدیریت مناسب دارد[۶]. با توجه به وزن مخصوص حدود ۱/۵ برای سنگ خردشده معدن، حجم کل باطله تولید شده حدود ۲۵۰ میلیون مترمکعب برآورد می‌شود که باید در سد باطله‌ای که بدین منظور در مجاورت معدن ساخته شده است، تخلیه شود. از سوی دیگر، روش فرآوری مورد استفاده در فرآیند تغلیظ، فلوتاسیون است و دوغاب ماده معدنی با درصد جامد ۳۰ و آب ۷۰ درصد باید برای انجام عملیات پرعیارسازی ایجاد شود[۳۳]. در عملیات فلوتاسیون از مواد شیمیایی مانند کلکتورها[۱۷]، کف‌سازها[۱۸]، بازدارنده‌ها[۱۹]، فعال‌کننده‌ها[۲۰] و تنظیم‌کننده‌های pH[۲۱] استفاده می‌شود که میزان مصرف

آنها در کارخانه فرآوری مجتمع مس سونگون در جدول ۱ ارائه شده است[۳۴].

جدول۱: انواع و مقادیر مواد شیمیایی مصرفی در عملیات پرعیارسازی کارخانه تغلیظ مس سونگون[۳۳]

نوع ماده شیمیایی		مقدار مصرف (cc/min)
کلکتور	Z11	۱۴۲۳
	TC15	۱۸۰
	Flomin	۲۳۸۳
کف‌ساز	A65	۶۰
	A70	۱۱۰
کمک‌کلکتور	گازوئیل	۲۷۰

هدف از اضافه کردن این مواد شیمیایی در فرآیند فلوتاسیون، تغییر شرایط عملیاتی، افزایش نرخ فلوتاسیون و افزایش راندمان است[۳۳]. لازم به ذکر است که حجم بزرگی از این مواد از پساب دورریز کارخانه قابل بازیابی نیستند و خطراتی برای محیط زیست پیرامون کارخانه تغلیظ و سد باطله به همراه دارند. نظر به امکان آلودگی آب‌های زیرزمینی، خشکسالی اخیر و محدودیت منابع آب در منطقه، لزوم طراحی فرآیند کارخانه با دیدگاه تصفیه زیست‌سازگار پساب کارخانه تغلیظ و کاربردهای مجدد آن، شدیداً احساس می‌شود. از سوی دیگر، در فاز اول، تنها ۲/۱ درصد از هفت میلیون تن خوراک ورودی کارخانه، به کنسانتره تبدیل شده و ۹۷/۹ درصد از خوراک، باید در سد باطله تخلیه شود که این امر، دقت و حساسیت مضاعفی را در بررسی راهکارهای زیست‌سازگار طلب می‌کند. اهمیت زیست‌محیطی فعالیت‌های مجتمع مس سونگون با در نظر گرفتن قرارگیری محدوده این مجتمع معدنی در مجاورت منطقه حفاظت‌شده ارسباران و نیز وجود مزارع کشاورزی، مرتع‌ها و جنگل‌های انبوه و همچنین جاری شدن چندین رودخانه آشکارتر می‌شود. ذخیره‌گاه زیست‌کره ارسباران در فاصله ۷ کیلومتری شمال‌غربی کانسار مس سونگون واقع شده و به دلیل اهمیت اکولوژیکی خاص خود، در سال ۱۹۷۲ توسط یونسکو به عنوان «ذخیره‌گاه بیوسفر» به ثبت رسیده است.

۶- تجزیه و تحلیل نتایج

این تحقیق به بررسی تأثیر معیارهای محیطی در کارایی فرآیند گیاه‌پالایی پساب کارخانه تغلیظ معدن مس سونگون با استفاده از روش نقشه شناختی پرداخته است. همان‌طور که گفته شد، در گام نخست، تحقیقات مرتبط با موضوع مورد بررسی قرار گرفته و نتیجه حاصل از این مطالعات کتابخانه‌ای در کنار مطالعات میدانی با توجه به مطالعه موردی، منجر به شناسایی ۱۱معیار محیطی اثرگذار بر کارایی فرآیند گیاه‌پالایی پساب‌های معدنی شده که در جدول ۲ ارائه شده است. معیارهای محیطی شناسایی‌شده در چهار دسته شرایط جوی، معیارهای پساب کارخانه فرآوری، معیارهای سد باطله و ویژگی‌های کانی‌شناسی کانسنگ معدنی تقسیم‌بندی شده‌اند.

جدول ۲: معیارهای محیطی مؤثر برکارایی فرآیندگیاه‌پالایی پساب‌های معدنی(C_1)

ردیف	دسته اصلی معیارها	معیار محیطی	نماد
۱	معیارهای دسته شرایط جوّی	برودت هوا	C_2
		میزان نزولات جوّی	C_3
۲	معیارهای دسته مربوط پساب کارخانه‌ی فرآوری	میزان فلزات سنگین محلول در پساب	C_4
		میزان داروهای شیمیایی موجود در پساب	C_5
۳	معیارهای دسته مربوط به سد باطله	میزان فلزات سنگین موجود در سد باطله	C_6
		تخلخل	C_7
		دانه‌بندی	C_8
		میزان همگنی خاک	C_9
۴	معیارهای دسته ویژگی‌های کانی-شناسی کانسنگ معدنی	نوع کانی	C_{10}
		میزان فلز محتوی کانسنگ	C_{11}
		درجه آزادی	C_{12}

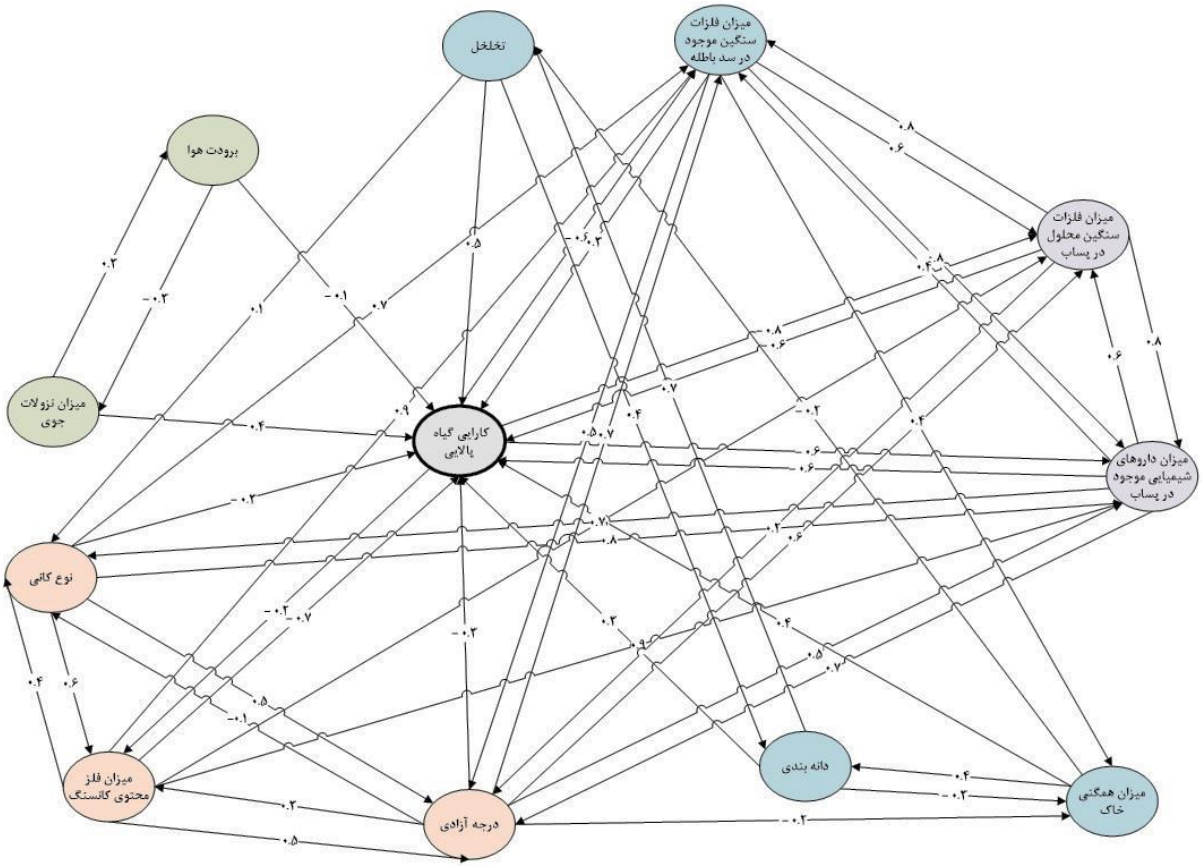
با توجه به جدول ۲، نقشه شناختی معیارهای محیطی مؤثر بر کارایی فرآیند گیاه‌پالایی پساب‌های معدنی ترسیم شده و ماتریس روابط علّی- معلولی بین این ۱۲ مفهوم (یازده معیار محیطی و یک مفهوم کارایی گیاه‌پالایی) تشکیل

می‌شود که در جدول ۳ ارائه شده است. درایه‌های این ماتریس، اعدادی هستند که با توجه به تجمیع نظرات خبرگان، تکمیل شده و نشانگر میزان اثرگذاری هر مفهوم بر مفاهیم دیگر یا به عبارت دیگر وزن روابط میان مفاهیم است. وزن‌دهی به رابطه‌های شناسایی‌شده توسط خبرگان موضوع یعنی تعدادی از کارشناسان سازمان صنایع و معادن و نظام مهندسی معدن استان‌های آذربایجان‌شرقی و غربی، برخی از اعضای هیئت علمی دانشکده مهندسی معدن دانشگاه‌های ارومیه و صنعتی ارومیه، دو نفر از کارشناسان مرکز تحقیقات جهاد کشاورزی استان آذربایجان‌غربی و دو نفر از مسئولین بخش محیط‌زیست مجتمع مس سونگون صورت گرفت. نقشه شناختی استخراج‌شده که نشان‌دهنده روابط علّی-معلولی معیارهای محیطی و کارایی گیاه‌پالایی است، در شکل ۴ نمایش داده شده است. نظر به نقشه شناختی ارائه شده در شکل ۴ و استفاده از الگوریتم یادگیری ترکیبی، سعی می‌شود تا نحوه اثرگذاری یازده معیار محیطی بر روی کارایی فرآیند گیاه‌پالایی ارزیابی گردد. بدین منظور، سناریوهایی تعریف شده و فرض می‌شود که تنها یکی از معیارهای یازده گانه به عنوان فاکتور مؤثر بر کارایی فرآیند گیاه‌پالایی باشد. این عمل منجر به فعال شدن یا اثرگذار بودن معیار محیطی مورد بررسی بر کارایی فرآیند گیاه‌پالایی می‌شود. با در نظر گرفتن وزن‌های نقشه شناختی، الگوریتم یادگیری ترکیبی هبین غیرخطی- تکامل تفاضلی اجرا می‌شود. اجرای این الگوریتم برای تمامی معیارهای محیطی و به ازای ماتریس وزنی توسط نرم‌افزار MATLAB صورت گرفت. پس از اجرای هر سناریو با توجه به ماتریس وزنی مورد بررسی، ساختار پایدار سیستم با تغییر مقادیر سایر مفاهیم به دست آمد. در این میان، مقدار مفهوم «کارایی گیاه‌پالایی» در هر سناریو به عنوان شاخصی برای اولویت‌بندی معیارهای یازده گانه مورد استفاده قرار گرفته و مقادیر آن در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۳: معیارهای محیطی مؤثر برکارایی فرآیندگیاه‌پالایی پساب‌های معدنی

معیار	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}
C_1	۰	۰	۰	-۰/۸	-۰/۶	-۰/۶	۰	۰	۰	۰	-۰/۲	۰
C_2	-۰/۱	۰	-۰/۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C_3	۰/۴	۰/۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C_4	-۰/۶	۰	۰	۰	۰/۸	۰/۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۲
C_5	-۰/۶	۰	۰	۰/۶	۰	۰/۴	۰	۰	۰	۰/۷	۰	۰/۷
C_6	۰/۳	۰	۰	۰/۶	۰/۸	۰	۰	۰	۰/۴	۰	۰	۰/۵
C_7	۰/۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۴	۰	۰/۱	۰	۰
C_8	۰/۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۷	۰	-۰/۳	۰	۰	۰
C_9	۰/۴	۰	۰	۰	۰	۰	-۰/۲	۰/۴	۰	۰	۰	۰
C_{10}	-۰/۳	۰	۰	۰	۰/۸	۰/۷	۰	۰	۰	۰	۰/۶	۰/۵
C_{11}	-۰/۷	۰	۰	۰/۸	۰/۹	۰/۹	۰	۰	۰	۰/۴	۰	۰/۵
C_{12}	-۰/۳	۰	۰	۰/۶	۰/۵	۰/۷	۰	۰	-۰/۲	-۰/۱	۰/۳	۰

با توجه به جدول ۴، پر واضح است که معیارهای «میزان فلزات سنگین موجود در سد باطله» از معیارهای دسته مربوط به پساب کارخانه فرآوری، «میزان فلز محتوی کانسنگ» از معیارهای دسته ویژگی‌های کانی‌شناسی کانسنگ معدنی و «میزان فلزات سنگین محلول در پساب» از معیارهای دسته مربوط به سد باطله به ترتیب بیش‌ترین اثرگذاری را بر کارایی فرآیند گیاه‌پالایی داشته و معیار «دانه‌بندی»، کم‌ترین تأثیر را داشته است.



شکل ۴: نقشه شناختی معیارهای محیطی مؤثر بر کارایی فرآیند گیاه‌پالایی پساب معدن مس سونگون

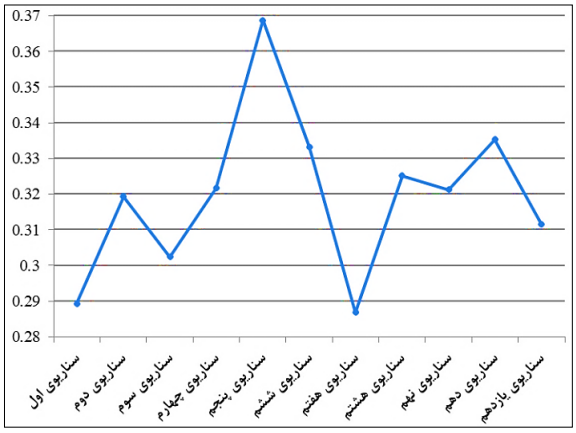
جدول ۴: اولویت‌بندی معیارهای محیطی مؤثر بر کارایی فرآیند گیاه‌پالایی پساب‌های معدنی

ردیف	معیار محیطی فعال	میزان اثرگذاری معیار محیطی بر «کارایی گیاه‌پالایی»	رتبه
۱	برودت هوا	۰/۲۸۹۳	۱۰
۲	میزان نزولات جوی	۰/۳۱۹۳	۷
۳	میزان فلزات سنگین محلول در پساب	۰/۳۳۳۳	۳
۴	میزان داروهای شیمیایی موجود در پساب	۰/۳۲۱۷	۵
۵	میزان فلزات سنگین موجود در سد باطله	۰/۳۶۸۸	۱
۶	تخلخل	۰/۳۰۲۴	۹
۷	دانه‌بندی	۰/۲۸۶۸	۱۱
۸	میزان همگنی خاک	۰/۳۲۵۲	۴
۹	نوع کانی	۰/۳۲۱۳	۶
۱۰	میزان فلز محتوی کانسنگ	۰/۳۳۵۳	۲
۱۱	درجه آزادی	۰/۳۱۱۵	۸

به منظور اعتبارسنجی این نتایج، داده‌های حاصل از تحقیقات آزمایشگاهی به دست‌آمده از مطالعه امکان‌سنجی به کارگیری فرآیند گیاه‌پالایی در معدن مس سونگون مورد تحلیل قرار گرفت و مشخص گردید که رتبه‌بندی تأثیر معیارهای مختلف محیطی بر کارایی فرآیند گیاه‌پالایی توسط روش نقشه شناختی، همخوانی مناسبی با شرایط واقعی دارد.

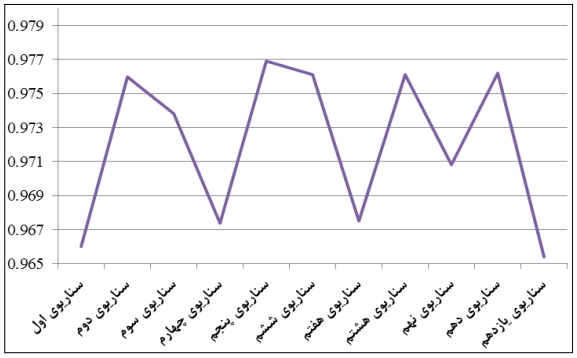
در شکل ۵، روند تغییرات کارایی فرآیند گیاه‌پالایی به ازای سناریوهای مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با در نظر گرفتن روابط علّی-معلولی میان معیارهای مختلف محیطی، روند تغییرات در منحنی غیر قابل پیش‌بینی است. پر واضح است که بیش‌ترین اثرگذاری مربوط به سناریوی پنجم است که تأثیر فراوان میزان فلزات سنگین

موجود در سد باطله بر کارایی فرآیند گیاه‌پالایی مورد استفاده برای پساب کارخانه تغلیظ مس سونگون را نشان می‌دهد. این اثر قابل توجه، با نتایج حاصل از آزمایش‌های گلخانه‌ای و بررسی‌های آزمایشگاهی نیز کاملاً تطابق دارد؛ نتایج آزمایش‌ها نیز نشان می‌دهد که میزان فلزات سنگین موجود در سد باطله، بیش‌ترین اثرگذاری را بر روند رشد گیاهان انتخابی و در نتیجه، بر کارایی فرآیند گیاه‌پالایی طراحی‌شده برای معدن مس سونگون دارد[۶]. از طرف دیگر، کم‌ترین اثرگذاری توسط سناریوی هفتم (مربوط به معیار دانه‌بندی) بر کارایی گیاه‌پالایی اعمال شده است. تأثیر اندک دانه‌بندی محیط کشت گیاهان بیش‌انباشتگر انتخاب شده برای فرآیند گیاه‌پالایی پساب مذکور در واقعیت نیز با توجه به نتایج آزمایشگاهی قابل مشاهده بوده و اثرگذاری معیارهای مرتبط با خصوصیات فیزیکوشیمیایی پساب به مراتب بیش‌تر از خصوصیات کمی و کیفی محیط کشت بوده است.



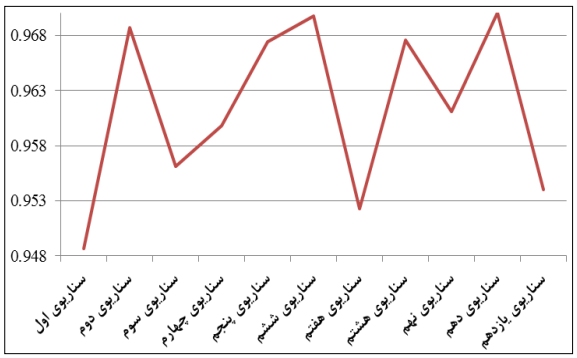
شکل ۵: روند تغییرات کارایی گیاه‌پالایی به ازای سناریوهای مختلف

شکل ۶ نیز روند تغییرات معیار میزان فلزات سنگین موجود در سد باطله(سناریوی پنجم) را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵ و مقایسه آن با شکل ۶، مشاهده می‌شود که مقدار اثرگذاری این معیار در سناریوی پنجم که مربوط به همان معیار است بر کارایی گیاه‌پالایی، دارای بیش‌ترین تأثیراست. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نیز تأثیر فراوان این مفهوم را نشان می‌دهد اما میزان اثرگذاری آن بر کارایی فرآیند گیاه‌پالایی را مشخص نمی‌کند که این نقص، با به کارگیری روش نقشه شناختی رفع شده است.



شکل ۶: روند تغییرات میزان فلزات سنگین موجود در سد باطله به ازای سناریوهای مختلف

همچنین با توجه به شکل ۷ که روند تغییرات میزان فلز محتوی کانسنگ(دومین معیار اثرگذار بر هدف سیستم) به ازای سناریوهای مختلف را نشان می‌دهد، تأثیر سایر معیارهای محیطی بر روی این معیار قابل مشاهده است. نتایج آزمایشگاهی نیز تأثیر فراوان این معیار را در کنار معیارهایی نظیر میزان فلزات سنگین محلول در پساب و میزان همگنی خاک نشان می‌دهد که با نتایج حاصل از این پژوهش مطابقت دارد. همچنین لازم به ذکر است که تغییرات در هر دو معیار میزان فلزات سنگین موجود در سد باطله و میزان فلز محتوی کانسنگ مشابه هم بوده و از روندی تقریباً یکسان تبعیت می‌کنند. با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌شود که بیش‌ترین تغییرات در سناریوی دهم به وقوع پیوسته است که این سناریو نیز مربوط به معیار میزان فلز محتوی کانسنگ است.



شکل ۷: روند تغییرات میزان فلز محتوی کانسنگ به ازای سناریوهای مختلف

۷- نتیجه‌گیری

به کارگیری فرآیندهای زیست‌سازگار گیاه‌پالایی در تصفیه پساب کارخانه‌های تغلیظ معادن نتایج قابل توجهی را در پی داشته است. بررسی کارایی فرآیند گیاه‌پالایی و

شناسایی معیارهای مختلف محیطی، نه تنها ابعاد گسترده‌ای از کاربرد این فناوری نوین را آشکار می‌سازد، بلکه طراحان این سیستم‌های تصفیه طبیعی را در خصوص اجرایی کردن آن یاری می‌کند. در این پژوهش، به تحلیل تأثیر معیارهای محیطی بر کارایی گیاه‌پالایی پرداخته شد. برای دستیابی به نتایج قابل قبول، جهت اطلاع از روابط علّی- معلولی میان فاکتورهای مختلف محیطی از روش نقشه شناختی با مد نظر قرار دادن روابط میان آنها استفاده شد. در قالب مطالعه موردی نیز گیاه‌پالایی پساب کارخانه تغلیظ معدن مس سونگون مورد بررسی قرار گرفته است. رتبه‌بندی معیارهای مختلف بر اساس میزان اثرگذاری بر فرآیند گیاه‌پالایی نشان می‌دهد که «میزان فلزات سنگین موجود در سد باطله»، «میزان فلز محتوی کانسنگ» و «میزان فلزات سنگین محلول در پساب» مهم‌ترین معیارهای محیطی بوده و تأثیر فراوانی در کارایی فرآیند گیاه‌پالایی دارند.نتایج حاصل تطابق مناسبی با نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی را نشان می‌دهد و حکایت از کاربرد مؤثر روش نقشه شناختی برای تعیین معیارهای اثرگذار در فرآیند گیاه‌پالایی دارد. استفاده از متغیرهای زبانی جهت تعریف دقیق تر معیارها و وزن‌دهی روابط میان مفاهیم نقشه شناختی و همچنین بهره‌گیری از روش مدلسازی ساختاری تفسیری به منظور تعیین معیارهای ریشه‌ای از پیشنهادات توسعه این تحقیق است.

مراجع

[1] Dhir, B. (2013). Phytoremediation: Role of Aquatic Plants in Environmental Clean-up. Springer.

[2] Lasat, M. M. (2002). Phytoextraction of toxic metals. Journal of environmental quality, 31(1), 109-120.

[3] Harvey, P. J., Campanella, B. F., Castro, P. M., Harms, H., Lichtfouse, E., Schäffner, A. R., & Werck-Reichhart, D. (2002). Phytoremediation of polyaromatic hydrocarbons, anilines and phenols. Environmental Science and Pollution Research, 9(1), 29-47.

[4] Crites, R. W., Middlebrooks, E. J., & Reed, S. C. (2006). Natural Wastewater Systems; New York: CRC / Taylor & Francis.

[5] Vymazal, J., & Kröpfelová, L. (2008). Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow (Vol. 14). Springer Science & Business Media.

[6] Jafarpour, A., Sharif, J. A., & Eivazi, A. (2017). Reducing Destructive Environmental Impacts of Sungun Copper Mine Effluents with using of Phytoremediation Processes. International Journal of Pure & Applied Bioscience, 5(2), 43-55.

[7] Zhang, H., Song, J., Su, C., & He, M. (2013). Human attitudes in environmental management: Fuzzy Cognitive Maps and policy option simulations analysis for a coal-mine ecosystem in China. Journal of environmental management, 115, 227-234.

[8] Tikkanen, J., Isokääntä, T., Pykäläinen, J., & Leskinen, P. (2006). Applying cognitive mapping approach to explore the objective-structure of forest owners in a Northern Finnish case area. Forest Policy and Economics, 9(2), 139-152.

[9] Mourhir, A., Rachidi, T., Papageorgiou, E. I., Karim, M., & Alaoui, F. S. (2016). A cognitive map framework to support integrated environmental assessment. Environmental Modelling & Software, 77, 81-94.

[10] Lee, K. C., Lee, H., Lee, N., & Lim, J. (2013). An agent-based fuzzy cognitive map approach to the strategic marketing planning for industrial firms. Industrial Marketing Management, 42(4), 552-563.

[11] Büyüközkan, G., & Vardaloğlu, Z. (2012). Analyzing of CPFR success factors using fuzzy cognitive maps in retail industry. Expert Systems with Applications, 39(12), 10438-10455.

[12] Rezaee, M.J., Yousefi, S., Baghery, M., & Kakaei, S. (2017). A Decision Making Framework for Evaluating Suppliers of Automotive Parts Industry Based on Cognitive Map. Journal of Industrial Engineering, 51 (1), 59-75. (In Persian with English abstract)

[13] Kyriakarakos, G., Patlitzianas, K., Damasiotis, M., & Papastefanakis, D. (2014). A fuzzy cognitive maps decision support system for renewables local planning. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 39, 209-222.

[14] Kyriakarakos, G., Dounis, A. I., Arvanitis, K. G., & Papadakis, G. (2017). Design of a Fuzzy Cognitive Maps variable-load energy management system for autonomous PV-reverse osmosis desalination systems: A simulation survey. Applied Energy, 187, 575-584.

[15] Upham, P., & Pérez, J. G. (2015). A cognitive mapping approach to understanding public objection to energy infrastructure: The case of wind power in Galicia, Spain. Renewable Energy, 83, 587-596.

[16] Azadeh, A., Ziaei, B., & Moghaddam, M. (2012). A hybrid fuzzy regression-fuzzy cognitive map algorithm for forecasting and optimization of

housing market fluctuations. Expert Systems with Applications, 39(1), 298-315.

[17] Olazabal, M., & Pascual, U. (2016). Use of fuzzy cognitive maps to study urban resilience and transformation. Environmental Innovation and Societal Transitions, 18, 18-40.

[18] Yousefi, S., Kakaei, S., & Rezaee, M.J. (2017).A hybrid method using fuzzy cognitive map-DEA to study the delays in construction projects. Journal Industrial Management Studies, 15(45), 177-207. (In Persian with English abstract)

[19] Zhang, L., Chettupuzha, A. A., Chen, H., Wu, X., & AbouRizk, S. M. (2017). Fuzzy cognitive maps enabled root cause analysis in complex projects. Applied Soft Computing, 57, 235-249.

[20] Papageorgiou, E. I. (2011). A new methodology for decisions in medical informatics using fuzzy cognitive maps based on fuzzy rule-extraction techniques. Applied Soft Computing, 11(1), 500-513.

[21] Rezaee, M. J., Yousefi, S., & Hayati, J. (2016). A decision system using fuzzy cognitive map and multi-group data envelopment analysis to estimate hospitals' outputs level. Neural Computing and Applications, doi:10.1007/s00521-016-2478-2.

[22] Salmeron, J. L., Rahimi, S. A., Navali, A. M., & Sadeghpour, A. (2017). Medical diagnosis of Rheumatoid Arthritis using data driven PSO–FCM with scarce datasets. Neurocomputing, 232, 104-112.

[23] Rezaee, M. J. and Yousefi, S. (2017). An intelligent decision making approach for identifying and analyzing airport risks. Journal of Air Transport Management, doi: 10.1016/j.jairtraman.2017.06.013.

[24] Papageorgiou, E. I., Stylios, C., & Groumpos, P. P. (2006). Unsupervised learning techniques for fine-tuning fuzzy cognitive map causal links. International Journal of Human-Computer Studies, 64(8), 727-743.

[25] Kosko, B. (1986). Fuzzy cognitive maps. International Journal of man-machine studies, 24(1), 65-75.

[26] Papageorgiou, E. I., & Kannappan, A. (2012). Fuzzy cognitive map ensemble learning paradigm to solve classification problems: Application to autism identification. Applied Soft Computing, 12(12), 3798-3809.

[27] Rezaee, M. J., Yousefi, S., & Babaei, M. (2017). Multi-stage cognitive map for failures assessment of production processes: An extension in structure and algorithm. Neurocomputing, 232, 69-82.

[28] Storn, R., & Price, K. (1997). Differential evolution–a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. Journal of global optimization, 11(4), 341-359.

[29] Ashraf, M., & Aksoy, A. (2015). Phytoremediation for Green Energy. M. Öztürk, & M. S. A. Ahmad (Eds.). Springer.

[30] Mensah, A. K. (2015). Role of revegetation in restoring fertility of degraded mined soils in Ghana: A review. International Journal of Biodiversity and Conservation, 7(2), 57-80.

[31] Ashraf, M., Özturk, M. A., & Ahmad, M. S. A. (2010). Plant adaptation and phytoremediation. New York: Springer.

[32] Andersen, R. G. (2006). In situ characterization and quantification of phytoremediation removal mechanisms for naphthalene at a creosote-contaminated site (Doctoral dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University).

[33] Bagherian, A. (2006). The concentration process of copper in the Sungun Copper Mine concentrator plant. Report of National Iranian Copper Industries (In Persian).

[34] Moosazadeh, A. (2011). Familiarity with important issues in the design and implementation of the water and effluent disposal system of copper mines. Technical Report. The effluent disposal and tailings dam units of Sungun Copper Mine. Report of National Iranian Copper Industries (In Persian).

[1]. Phytoremediation
[2]. Aquatic
[3]. Terrestrial
[4]. Wetland
[5]. Hebbian
[6]. Non linear Hebbian- differential evolution (NHL-DE)
[7]. Mutation
[8].Mutant_Vector
[9]. Crossover
[10]. Trial_Vector
[11]. Number of Population
[12]. Phytoextraction
[13]. Phytostabilization
[14]. Phytostimulation
[15]. Phytovolatilization
[16]. Rhizofiltration
[17]. Collectors
[18]. Frothers
[19]. Depressants
[20]. Activators
[21]. Regulators