تصمیم‌گیری بر اساس الگوریتم ژنتیک برای انتخاب گیاه مناسب به منظور گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به نفت

علی اصغر بسالت پور[۱*]، محمد علی حاج‌عباسی، امیرحسین خوشگفتارمنش و فرید شیخ الاسلام

دانشجوی دکتری گروه خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان: **a_besalatpour@ag.iut.ac.ir**

استاد گروه خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان؛ **hajabbas@cc.iut.ac.ir**

دانشیار گروه خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان؛ **amirkhosh@cc.iut.ac.ir**

دانشیار گروه کنترل دانشکده برق دانشگاه صنعتی اصفهان؛ **shiekh@cc.iut.ac.ir**

چکیده

الگوریتم ژنتیک یک روش جستجوی مؤثر در فضاهای وسیع و بزرگ بر اساس ژن‌ها و کروموزوم‌ها می‌باشد که در نهایت منجر به جهت‌گیری به سمت یافتن پاسخ بهینه در میان سایر پاسخ‌های ممکن می‌شود. در این پژوهش انتخاب مناسب‌ترین گیاه و سطح اختلاط خاک آلوده به ترکیبات نفتی با خاک غیر آلوده (سطوح ۱به۱ و ۳به۱، خاک آلوده: خاک غیر آلوده) برای گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به نفت اطراف پالایشگاه تهران از طریق بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک با روش آمار کلاسیک مقایسه شد. نتایج حاصل از انتخاب گیاهان مناسب از میان هفت گیاه مورد بررسی (اگروپایرون، فسکیو، پوکسنلیا، آفتابگردان، شبدر، کلزا و گلرنگ) در بخش مطالعات قابلیت رشد بر اساس روش آمار کلاسیک نشان داد که در هر دو سطح آلودگی ۱ به ۱ و ۳ به ۱ گیاهان اگروپایرون، فسکیو و پوکسنلیا انتخابی بهینه از میان سایر انتخاب‌های ممکن بود. این درحالیست که در روش الگوریتم ژنتیک، انتخاب ۴ گیاه اگروپایرون، فسکیو، آفتابگردان و گلرنگ مناسب‌ترین پاسخ بود. از سوی دیگر در مطالعات گیاه‌پالایی، اگروپایرون و فسکیو گیاهان مناسب جهت پالایش آلاینده‌های نفتی از خاک به روش آمار کلاسیک بودند. در حالی‌که در بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک، اگروپایرون مناسب‌ترین گیاه و سطح آلودگی ۱ به ۱ مناسب‌ترین نسبت اختلاط برای کسب بیشترین احتمال موفقیت در پالایش آلاینده‌های نفتی از خاک به روش گیاه‌پالایی بودند. همچنین کشت همزمان اگروپایرون - فسکیو در سطح آلودگی ۱ به ۱ نیز به عنوان بهینه‌ترین پاسخ از میان سایر پاسخ‌های ممکن برای کشت همزمان دو گیاه و سطح آلودگی مناسب حاصل شد. بنابراین کشت همزمان اگروپایرون– فسکیو و نسبت اختلاط ۱ به ۱ خاک آلوده و خاک غیر آلوده به منظور گیاه‌پالایی آلاینده‌های نفتی موجود در منطقه مورد مطالعه توصیه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، آمار کلاسیک، گیاه‌پالایی و آلاینده‌های نفتی

مقدمه

گیاه‌پالایی[۲] یک فناوری نسبتاً نوین پالایش خاک های آلوده است که در آن از گیاهان مقاوم و مناسب جهت حذف یا کاهش غلظت آلاینده‌های معدنی، رادیواکتیو و آلی به ویژه ترکیبات نفتی از محیط زیست استفاده می‌شود (پالفورد و واتسون ۲۰۰۳). در واقع گیاهان

۱- نویسنده مسئول، آدرس: اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده کشاورزی، گروه خاکشناسی

* دریافت: اردیبهشت ۱۳۸۸ و پذیرش: خرداد ۱۳۸۹

2- Phytoremediation

قادرند از طریق رهاسازی عناصر غذایی و ترشح ترکیبات مختلف از جمله اسیدهای آلی و ترکیبات قندی در خاک و نیز انتقال اکسیژن به ناحیه ریشه خود موجب تحریک و افزایش فعالیت جمعیت میکروبی تخریب کننده آلاینده‌های نفتی شوند (لی و همکاران ۲۰۰۲).

به منظور کسب موفقیت در گیاه‌پالایی آلاینده-های نفتی از خاک و دستیابی به بیشترین کاهش غلظت این ترکیبات از خاک، انتخاب گیاه یا گیاهان مناسب (کشت همزمان دو یا چند گیاه) که قابلیت رشد و سازگار شدن با محیط آلوده را داشته باشند ضروری است (زو و همکاران ۲۰۰۵). در واقع انتخاب گیاهان مقاوم به آلاینده‌های موجود با حداکثر جوانه زنی، رشد و نمو و سطح ویژه ریشه که نقش مؤثری بر کاهش غلظت ترکیبات نفتی داشته باشند بسیار واجد اهمیت است (آدام و دانکن ۲۰۰۲). از سوی دیگر غلظت آلاینده‌ها در خاک (نسبت اختلاط خاک آلوده با خاک غیر آلوده) نیز در استقرار پوشش گیاهی و گیاه‌پالایی آلاینده‌های نفتی تأثیرگذار است (زو و جانسون ۱۹۹۷). بنابراین با توجه به اهمیت بالای انتخاب نوع گیاه مناسب و سطح آلودگی در موفقیت یا عدم موفقیت فرایند گیاه‌پالایی در سطح وسیع، انجام یک انتخاب بهینه در فضای انتخاب‌های ممکن امری الزامی است. فناوری‌های متعدد جستجوی پاسخ بهینه از میان مجموعه پاسخ‌های ممکن در یک فضای طراحی[1] وجود دارند که در این میان الگوریتم‌های تکاملی[2] نظیر الگوریتم ژنتیک[3] از جمله روش‌های مؤثر بهینه‌سازی در فضای جستجو هستند که به نظر می‌رسد بتوانند در تصمیم‌گیری برای انتخاب گیاه مناسب برای فرایند گیاه-پالایی آلاینده‌های نفتی در خاک مؤثر واقع شوند (لیو و همکاران ۲۰۰۷).

الگوریتم ژنتیک یک روش جستجوی رایانه‌ای مؤثر در فضاهای وسیع و بزرگ بر اساس ژن‌ها و کروموزوم‌ها می‌باشد که در نهایت منجر به جهت‌گیری به سمت یافتن یک جواب بهینه می‌شود و دقیقاً مشابه کروموزوم‌ها در سیستم‌های زیستی عمل می‌کند (بک ۱۹۹۶). در این الگوریتم باید فضای طراحی به فضای ژنتیک تبدیل شود و بنابراین الگوریتم‌های ژنتیک با یکسری متغیرهای کد شده که عمدتاً به صورت دودویی[4] هستند و یا با مقادیر واقعی داده‌ها کار می‌کند (دژانگ ۱۹۹۳). یکی از تفاوت‌های اصلی روش الگوریتم ژنتیک با سایر روش‌های بهینه‌سازی در این است که در این روش از جمعیت یا مجموعه‌ای از نقاط در یک لحظه استفاده می‌شود در حالی‌که در دیگر روش‌های بهینه‌سازی تنها در یک نقطه خاص عمل می‌شود. بنابراین الگوریتم ژنتیک تعداد زیادی از حالت‌های ممکن را در یک زمان مورد پردازش قرار می‌دهد (میشل‌وایز ۱۹۹۶). نکته جالب دیگر آن است که اصول الگوریتم ژنتیک بر پردازش تصادفی و به عبارت صحیح‌تر پردازش تصادفی هدایت شده[5] استوار است. این فرایند پردازش تا یافتن تعدادی از نسل‌های کروموزوم‌ها که برخی از معیارهای اولیه انتخاب نظیر برازندگی[6] حاصل شود ادامه می‌یابد تا آنکه با تولید متوالی نسل‌های مختلف، جمعیت کروموزومی مناسب به عنوان پاسخ بهینه استخراج شود (میشل ۱۹۹۶). در واقع در هر مرحله از بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک برخی از کروموزوم‌ها را از جمعیت کل بر اساس میزان کارایی آنها به عنوان والد انتخاب کرده تا در ایجاد نسل بعدی مورد استفاده قرار گیرند و نهایتاً پس از تولید متوالی نسل‌های مختلف، کروموزوم مناسب به عنوان راه حل ارایه شود (گولدنبرگ ۱۹۸۹).

امروزه الگوریتم ژنتیک در بسیاری از مطالعات علوم طبیعی و فنی، محیط زیست و مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آن جمله می‌توان به استفاده از این روش جستجوی پاسخ بهینه در پیش‌بینی توسعه کلروفیل α در دریاچه‌های آب شیرین (ویگام و رکنگل ۲۰۰۱)، تحلیل حساسیت مدل‌های تخمین هدررفت خاک و تولید رواناب در حوضه‌های آبخیز (ونگ ۱۹۹۷)، تخمین میزان ماده آلی خاک (کراو و همکاران ۲۰۰۶) اشاره نمود. برای مثال کین و همکاران (۲۰۰۷) استفاده از روش‌های مختلف بهینه-سازی از جمله روش الگوریتم ژنتیک را برای تصمیم‌گیری در مورد انتخاب روش مناسب و مؤثر به منظور پالایش مکان‌های آلوده به ترکیبات نفتی را توصیه نمودند. کراو و همکاران (۲۰۰۶) از بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک برای تخمین میزان ماده آلی و وزن مخصوص ظاهری خاک استفاده نمودند و به قابلیت بالای این روش برای

1- Design space
2- Evolutionary algorithms
3- Genetic algorithm
4- Binary
5- Guided random
6- Fitness Value

توسعه تخمین سایر ویژگی‌های کلیدی خاک نظیر ذخیره کربن آلی خاک اشاره نمودند. لیو و همکاران (۲۰۰۷) نیز قابلیت پیش‌بینی هدررفت سالیانه فسفر خاک به وسیله الگوریتم ژنتیک را بسیار بالا توصیف نمودند.

این پژوهش با هدف انتخاب مناسب‌ترین گیاه، بهترین کشت همزمان دو گیاه و نسبت مناسب اختلاط خاک آلوده با خاک غیر آلوده به منظور گیاه‌پالایی خاک-های آلوده به نفت مناطق اطراف پالایشگاه تهران به روش جستجوی بهینه الگوریتم ژنتیک و مقایسه نتایج حاصل از آن با نتایج حاصل از روش آمار کلاسیک انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

الف) تهیه نمونه خاک و آزمایش‌های اولیه

جهت انجام این پژوهش، خاک آلوده به هیدروکربن‌های نفتی از محل دفن پسماندها و ضایعات نفتی پالایشگاه تهران (مختصات جغرافیایی '۳۰ °۳۵ شمالی و '۲۶ °۵۱ شرقی) نمونه برداری شد. خاک غیر آلوده نیز از زمین‌های کشاورزی اطراف همان منطقه (حدود یکصدمتری) برداشت شد. خاک این منطقه دارای رژیم رطوبتی اردیک و رژیم حرارتی ترمیک بوده و به صورت Typic Calciargids در سیستم رده بندی Soil Taxonomy طبقه بندی می‌شود. نمونه خاک‌ها پس از هواخشک شدن از الک ۴ میلی‌متری عبور داده شد و سپس جهت ایجاد سطوح مختلف آلودگی، خاک آلوده و خاک غیر آلوده با نسبت‌های وزنی ۱به۱ (خاک آلوده : خاک غیر آلوده) و ۳ به ۱ (خاک آلوده: خاک غیر آلوده) که نماینده‌ای از غلظت این آلاینده‌ها در منطقه مطالعاتی می‌باشند، کاملاً با یکدیگر مخلوط شدند. آنگاه جهت همگنی و یکنواختی خاک‌ها، هر یک از سطوح خاک مذکور به مدت ۲۱ روز در حد ظرفیت زراعی آبیاری و کاملاً زیرورو و مخلوط شدند. پس از این مدت به منظور تعیین برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها و نیز تعیین غلظت کل هیدروکربن‌های نفتی[1] نمونه خاک تهیه شد. پس از عبور خاک‌ها از الک ۲ میلی‌متری، بافت خاک به روش هیدرومتری، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع، واکنش خاک در گل اشباع، فسفر قابل جذب به روش اولسن (اولسن و سامرز ۱۹۸۲)، سدیم و پتاسیم قابل جذب به روش عصاره‌گیری با استات آمونیوم و قرائت با شعله سنج، نیتروژن کل به روش کلدال (برمر و مالونی ۱۹۸۲) و آهک به روش تیتراسیون با سود (بلک و همکاران، ۱۹۶۵) تعیین شد (جدول ۱). غلظت برخی از عناصر سنگین نیز به روش عصاره‌گیری با DTPA (لیندزی و نارول ۱۹۷۸) تعیین شد (جدول ۲). برای تعیین غلظت کل هیدروکربن‌های نفتی در خاک نیز پس از عصاره‌گیری ترکیبات نفتی به روش سوکسله (کریستوفر و همکاران، ۱۹۸۸) با نسبت مساوی ان- هگزان و دی کلرومتان (روش شماره ۸۱۰۰ سازمان حفاظت محیط زیست امریکا) غلظت این ترکیبات با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی گازی (GC) و به روش ۸۳۱ سازمان حفاظت محیط زیست امریکا (۱۹۸۴) تعیین شد (جدول ۳).

ب) مطالعات جوانه زنی و رشد اولیه

در بخش اول مطالعات گیاه‌پالایی آلاینده‌های نفتی، ابتدا جوانه‌زنی و قابلیت رشد اولیه هفت گیاه آفتابگردان (*Helianthus annus* L.)، گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.)، کلزا (*Brassica napus* L.)، شبدر (*Trifolium repens* L.)، اگروپایرون (*Agropyron smithi* L.)، فسکیو (*Festuca arundinacea* L.) و پوکسنلیا (*Puccinellia distance* L.) در محیط گلخانه مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور از هر یک از تیمارهای مورد مطالعه، حدود یک کیلوگرم نمونه خاک در گلدان-هایی با قطر دهانه ۷۵ و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متری ریخته شد. سپس بذر گیاهان مذکور در عمق ۱ تا ۲ سانتی‌متری سطح گلدان‌ها کشت شد. آفتابگردان، گلرنگ و کلزا به دلیل دارا بودن ارزش اقتصادی و نیز کشت توسط کشاورزان در منطقه مورد مطالعه و سایر گیاهان نیز به سبب اینکه در منابع (چینیو و همکاران ۱۹۹۷، آدام و دانکن ۲۰۰۲، اسمیت و همکاران ۲۰۰۵) به عنوان گیاهان با قابلیت پالایش بالای هیدروکربن‌های نفتی معرفی شده‌اند انتخاب شدند. در طول دوره آزمایش، رطوبت خاک‌ها در حد ظرفیت زراعی نگه داشته شد که برای این منظور زمان آبیاری طی چند روز اول دوره آزمایشی از طریق نمونه-برداری مستقیم از نمونه شاهد و تعیین وزنی رطوبت خاک و سپس در طول دوره بر حسب مشاهده روزانه وضعیت گیاهان و کنترل تصادفی رطوبت به صورت وزنی تعیین می‌گردید. در نهایت با شمارش روزانه تعداد بذرهای جوانه زده در طول دوره ۱۴ روزه، درصد و سرعت جوانه زنی بذر هر گیاه نسبت به تعداد بذر کاشته شده مشخص شد. برای بررسی مقاومت و پایداری هر گیاه در سطوح مختلف آلودگی، گیاهان تا ۸ هفته پس از دوره جوانه زنی نگه داشته شدند. پس از این مدت گیاهان برداشت شده و جهت تعیین عملکرد ماده خشک گیاهی در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد تا رسیدن به وزن ثابت در خشک کن قرار داده شدند.

1- Total Petroleum Hydrocarbons, TPHs

ج) مطالعات گیاه‌پالایی

جهت مطالعات گیاه‌پالایی از هر یک از نمونه خاک‌های مورد مطالعه، حدود ۳ کیلوگرم در گلدان‌های با قطر دهانه ۱۵۰ و ارتفاع ۲۵۰ میلی‌متری و در ۴ تکرار ریخته شد. سپس بذر گیاهان انتخاب شده از مرحله مطالعات جوانه‌زنی و قابلیت رشد اولیه در عمق ۱ تا ۲ سانتی متری سطح گلدان‌ها کشت شد. از هر یک از سطوح خاک‌های مورد مطالعه، نمونه شاهد بدون کشت گیاه نیز جهت حذف اثرات محیطی بر غلظت آلاینده‌های نفتی در نظر گرفته شد. پس از مدت ۱۸ هفته از کاشت گیاهان، نمونه خاک جهت تعیین غلظت TPHs در تیمارهای گیاهی از خاک اطراف ریشه و در تیمار شاهد (بدون گیاه) از زیر سطح شنی قرار داده شده بر روی خاک برداشت شد. سپس ریشه و اندام هوایی گیاهان مورد مطالعه از یکدیگر جدا و در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد تا رسیدن به وزن ثابت در خشک کن قرار داده شدند. فعالیت و تنفس میکروبی در خاک ریزوسفری هر یک از گیاهان مورد مطالعه در تیمارهای مختلف و همچنین در خاک تیمار شاهد (بدون گیاه) نیز به روش آلف (۱۹۹۵) تعیین شد.

د) تجزیه آماری داده‌ها به روش آمار کلاسیک

در مطالعات جوانه‌زنی و رشد اولیه، طرح آماری کرت‌های خرد شده در قالب طرح پایه‌ای کاملاً تصادفی و در مطالعات گیاه‌پالایی، طرح آماری کاملاً تصادفی در قالب آزمایش فاکتوریل با دو عامل گیاه (در سه سطح) و غلظت آلودگی (در سه سطح) استفاده شد. تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم افزار آماری SAS و مقایسه میانگین‌ها به روش LSD انجام گرفت.

ه) بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک

هدف از بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک، دستیابی به بهترین پاسخ در میان فضای پاسخ‌های ممکن است. برای استفاده از این روش مفاهیم زیر باید مشخص شود:

۱- تعریف تابع هدف[1] یا تابع هزینه[2]: تابع هدف، در واقع بیانگر هدف و خواسته مورد نظر از طرح یک مسأله است. به عبارت دیگر، تابع هدف شاخصی از نحوه عملکرد افراد در فضای مسأله است. در اکثر مسایل بهینه‌سازی، تعیین مقدار یک تابع هدف به صورت بیشینه یا کمینه هدف اصلی است (لیو و همکاران ۲۰۰۷). برای مثال در مسأله‌ای که هدف کمینه‌سازی باشد، مناسب‌ترین فرد که به نسل بعد منتقل می‌شود آن فرد است که تابع هدفش کم‌ترین مقدار را داشته باشد. در این پژوهش مقادیر بیشینه توابع هدف در بخش‌های مختلف تعیین شد.

۲- فرایند مقداردهی اولیه جمعیت[3]: طی این فرایند مقادیر اولیه ویژگی‌های مورد نظر برای تولید جمعیت اولیه به منظور اعمال بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک ایجاد می‌شود. به طور کلی دو روش تصادفی و تجربی یا اعمال نظر شده[4] برای آغاز تولید جمعیت اولیه استفاده می‌شود که در روش تصادفی ویژگی‌های مورد نظر کاملاً تصادفی و بدون هیچگونه اطلاعات قبلی از ویژگی مطلوب محتمل[5] در تولید جمعیت اولیه استفاده می‌شوند. در روش تجربی تولید جمعیت بر اساس آگاهی پیشین از ویژگی بهینه محتمل صورت می‌گیرد (لیو و همکاران ۲۰۰۷). در این پژوهش نیز از روش تصادفی برای تولید جمعیت‌های اولیه استفاده شد.

۳- تولید مجدد جمعیت[6]: از آنجا که همواره جمعیت اولیه تولید شده به ویژه در روش تصادفی، بهترین پاسخ را فراهم نمی‌آورد لذا یک الگوریتم ژنتیک به صورت پی در پی تا رسیدن به بهترین پاسخ به ساخت جمعیت‌های جدید بر اساس جمعیت‌های اولیه ادامه می‌یابد که در این راستا بهترین جمعیت‌ها، شانس بیشتری برای تولید مثل مجدد خواهند داشت (لیو و همکاران ۲۰۰۷). در این پژوهش نیز اندازه جمعیت[7] ۱۰۰ و حداکثر تعداد نسل‌ها ۵۰ در نظر گرفته شد.

۴- عملگرهای ترکیب و جهش[8]: عملگرهای ترکیب و جهش به منظور بهبود کیفیت جمعیت‌ها در خلال فرایند تولید مجدد اعمال می‌شوند. عملگر ترکیب به صورت تصادفی محلی در طول یک جفت کروموزوم را انتخاب نموده و مقدار ژن‌های آنها را با توجه به محل ترکیب جابه جا می نماید. این عملگر معمولاً به صورت تک نقطه‌ای[9]، دو نقطه‌ای[10] و یا چند نقطه‌ای[11] اعمال می‌شود. این درحالیست که عملگر جهش به صورت تصادفی موجب

1- Objective Function
2- Cost Function

3- Population Initialization
4- Biased
5- Unbiased
6- Population Reproduction
7- Population Size
8- Crossover and Mutation Operators
9- Single Point
10- Two Points
11- Multi points

تغییر در مقدار یک ژن از کروموزوم به صورت مستقل می‌شود و اثری بر روی سایر ژن‌ها ندارد (لیو و همکاران ۲۰۰۷). در این پژوهش عملگر ترکیب به صورت تک نقطه‌ای با احتمال ۰/۷ و عملگر جهش با احتمال ۰/۰۰۱ اعمال شد. شکل ۱ مراحل مختلف فرایند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

الف) مطالعات جوانه‌زنی و رشد اولیه

مقادیر میانگین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در مطالعات جوانه‌زنی و رشد اولیه به منظور انتخاب گیاهان مناسب برای مطالعات گیاه‌پالایی در جدول ۴ آمده است. نتایج حاصل از تجزیه آماری به روش آمار کلاسیک نشان داد که وجود هیدروکربن‌های نفتی در خاک بر جوانه‌زنی بذر آفتابگردان، گلرنگ، اگروپایرون و شبدر بی اثر بود اما موجب تأخیر در شروع جوانه‌زنی بذر کلزا در سطوح ۱ به ۱ و ۳ به ۱ نسبت به خاک غیر آلوده و همچنین تأخیر و کاهش جوانه‌زنی بذرهای فسکیو و پوکسنلیا در این سطوح آلودگی نسبت به خاک غیر آلوده گردید. شبدر و کلزا، نسبت به وجود این آلاینده‌ها در خاک پایداری کمتری داشته و پس از گذشت چهار تا پنج هفته از آزمایش خشک شدند و در نتیجه فاقد عملکرد ماده خشک گیاهی در انتهای دوره آزمایشی بودند. مقدار کاهش رشد و عملکرد ماده خشک گیاهی نیز برای گلرنگ و آفتابگردان در سطح ۳ به۱ بیشتر از سطح ۱ به ۱ بود ولی کاهش معنی‌دار آماری (در سطح ۵ درصد آزمون LSD) در رشد فسکیو و اگروپایرون تنها در سطح ۳ به ۱ مشاهده شد و برای سطح ۱ به ۱ کاهش رشد نسبتاً ناچیز بود. برای پوکسنلیا نیز اختلاف معنی‌داری از لحاظ کاهش رشد و عملکرد ماده خشک گیاهی در هیچ یک از سطوح آلودگی ۱ به ۱ و ۳ به ۱ دیده نشد. بنابراین در تصمیم‌گیری بر اساس روش آمار کلاسیک، گیاهان فسکیو، اگروپایرون و پوکسنلیا به سبب دوام و عملکرد ماده خشک گیاهی نسبتاً مناسب جهت مطالعات بعدی گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده منطقه پیشنهاد شدند. این درحالیست که گیاهان آفتابگردان، گلرنگ، شبدر و کلزا به سبب رشد نامناسب و عملکرد ماده خشک گیاهی کم در انتهای دوره جوانه زنی و رشد اولیه برای استفاده در مطالعات بعدی گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به نفت منطقه مورد مطالعه پیشنهاد نشدند (بسالت پور و همکاران ۱۳۸۶).

در مطالعات بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک در این بخش (مطالعات جوانه‌زنی و رشد اولیه) به منظور انتخاب چهار گیاه مناسب از میان هفت گیاه مورد بررسی که دارای بیشترین درصد و سرعت جوانه‌زنی، دوام رشد و بازده اقتصادی باشند از تابع هدف شماره ۱ استفاده شد.

تابع هدف شماره ۱: $F_{obj} = 0.1G_R + 0.1G_P + 0.1D_{MY} + 0.3(S)^2 + 0.2E + 0.2(C_L)^2$

در این تابع، G_R سرعت جوانه زنی بذر گیاهان مختلف، G_P درصد جوانه زنی، D_{MY} عملکرد ماده خشک گیاهی در انتهای دوره مطالعات جوانه زنی و رشد اولیه، S توانایی هر گیاه برای دوام و ادامه رشد در سطوح مختلف آلودگی، E ارزش اقتصادی هر گیاه در واحد سطح و C_L سطح آلودگی می باشد.

نتایج نشان داد که در هر دو سطح آلودگی ۱ به ۱ و ۳ به ۱ چهار گیاه اگروپایرون، فسکیو، آفتابگردان و گلرنگ به عنوان پاسخ بهینه از میان سایر انتخاب‌های ممکن بود. به عبارت دیگر به نظر می‌رسد که این چهار گیاه نسبت به سایر گیاهان مورد مطالعه دارای قابلیت بیشتری برای انتخاب و استفاده در مطالعات گیاه‌پالایی بر اساس روش انتخاب بهینه الگوریتم ژنتیک بودند. از سوی دیگر به نظر می رسد که عدم رشد مناسب و دوام شبدر و کلزا تا پایان آزمایش و ارزش اقتصادی پایین‌تر پوکسنلیا نسبت به دیگر گیاهان علفی و درصد جوانه زنی کم‌تر بذور این گیاه نسبت به دیگر گیاهان (به غیر از فسکیو) که به عنوان دو پارامتر اصلی در قالب تابع هدف به الگوریتم وارد شده‌اند، مهمترین عوامل عدم وجود این گیاهان در میان پاسخ بهینه الگوریتم در مطالعات جوانه‌زنی و رشد اولیه باشند. در روش آمار کلاسیک قضاوت‌ها تنها بر اساس ویژگی‌های کمی قابل اندازه‌گیری نظیر سرعت و درصد جوانه‌زنی و عملکرد ماده خشک گیاهی صورت گرفت اما در روش انتخاب بهینه الگوریتم ژنتیک علاوه بر ویژگی‌های کمی اندازه گیری شده، برخی از عوامل کیفی مؤثر نظیر قابلیت دوام رشد هر گیاه، ارزش اقتصادی آن و اثر سطوح مختلف آلاینده‌ها در خاک نیز به صورت کمی به تابع هدف وارد شد و لذا تصمیم‌گیری با اطمینان بالاتری امکان پذیر می باشد. بنابراین چهار گیاه اگروپایرون، فسکیو، آفتابگردان و گلرنگ به عنوان پاسخ بهینه از مطالعات جوانه‌زنی و رشد اولیه برای مطالعات گیاه-پالایی انتخاب شدند.

ب) مطالعات گیاه‌پالایی

میانگین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در مطالعات گیاه‌پالایی در جدول ۵ آورده شده است. تجزیه آماری نتایج حاصل از مطالعات گیاه‌پالایی به روش آمار کلاسیک نشان داد که وجود هیدروکربن‌های نفتی در خاک موجب کاهش معنی‌دار (در سطح ۵ درصد آزمون LSD) رشد و عملکرد ماده خشک اندام هوایی و ریشه در همه تیمارهای

گیاهی در مقایسه با تیمار شاهد شد. بیشترین میزان کاهش غلظت TPHs در مقایسه با شاهد نیز در ریزوسفر اگروپایرون و فسکیو به ویژه در سطح پایین‌تر آلودگی (سطح ۱به۱) بود. آفتابگردان تأثیر معنی‌داری بر کاهش غلظت این آلاینده‌های نفتی در هیچ یک از تیمارها نداشت. اگروپایرون در سطح ۳به۱، نقش مؤثرتری نسبت به فسکیو در افزایش فعالیت و تنفس میکروبی در خاک داشت ولی اختلاف معنی‌داری بین آفتابگردان و گلرنگ با تیمار شاهد (بدون کشت گیاه) در این تیمار مشاهده نشد. بنابراین با توجه به نتایج مقایسه آماری به روش کلاسیک، اگروپایرون و فسکیو جهت گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده منطقه توصیه شدند.

در بخش مطالعات گیاه‌پالایی برای انتخاب مناسب‌ترین گیاه برای توصیه کشت در منطقه و همچنین دو گیاه مناسب برای کشت همزمان در هر سطح آلودگی به صورت جداگانه (سطوح C_1 و C_2) بر اساس روش الگوریتم ژنتیک از تابع هدف شماره ۲ استفاده شد. به منظور تعیین مناسب‌ترین گیاه و سطح آلودگی و نیز مناسب‌ترین کشت همزمان دو گیاه و سطح آلودگی برای کسب بالاترین امکان موفقیت در گیاه‌پالایی آلاینده‌های نفتی در خاک نیز از تابع هدف شماره ۳ استفاده گردید.

تابع هدف شماره ۲: $F_{obj} = 0.2R_b + 0.1S_b + 0.3(Res)^2 + 0.4(TPH_R)^2$

تابع هدف شماره ۳: $F_{obj} = 0.2R_b + 0.1S_b + 0.1(Res)^2 + 0.4(TPH_R)^2 + 0.1(C_L)^2$

در این توابع R_b عملکرد ماده خشک ریشه، S_b عملکرد ماده خشک اندام هوایی، Res تنفس میکروبی ریزسازواره‌های خاک، TPH_R میزان کاهش غلظت کل آلاینده‌های نفتی در خاک و C_L سطح آلودگی می‌باشد.

نتایج بهینه‌سازی انتخاب مناسب‌ترین گیاه به روش الگوریتم ژنتیک به منظور توصیه کشت در منطقه برای گیاه‌پالایی آلاینده‌های نفتی در هر سطح آلودگی به صورت جداگانه نشان داد که در هر دو سطح آلودگی ۱ به ۱ و ۳ به ۱ اگروپایرون نسبت به سایر گیاهان (فسکیو، آفتابگردان و گلرنگ) پاسخ مناسب‌تری بود. به بیان دیگر به نظر می‌رسد که اگروپایرون به سبب رشد و نمو مناسب‌تر و نقش مؤثرتر بر کاهش غلظت آلاینده‌های نفتی در خاک نسبت به سایر گیاهان می‌تواند به عنوان بهترین انتخاب جهت کشت در منطقه مورد مطالعه برای گیاه‌پالایی این آلاینده‌ها مورد توجه قرار گیرد. از سوی دیگر پاسخ بهینه برای کشت همزمان دو گیاه به منظور کاهش بیشتر غلظت TPHs در خاک برای هر سطح آلودگی به صورت جداگانه نیز کشت همزمان اگروپایرون- فسکیو بود. به بیان دیگر به نظر می‌رسد که کشت همزمان دو گیاه اگروپایرون و فسکیو نسبت به سایر پاسخ‌های ممکن دیگر، نقش مؤثرتری بر کاهش غلظت این ترکیبات آلاینده که هدف نهایی فرایند گیاه‌پالایی است داشته باشد.

نتایج حاصل از بهینه‌سازی پاسخ‌های ممکن برای انتخاب مناسب‌ترین گیاه و نیز بهترین سطح آلودگی به منظور کسب بیشترین احتمال موفقیت در پالایش آلاینده-های نفتی از خاک به روش گیاه‌پالایی نیز نشان داد که گیاه اگروپایرون و سطح آلودگی ۱به۱ (نسبت اختلاط ۱ به ۱ خاک آلوده با خاک غیر آلوده) مناسب‌ترین پاسخ بود. به نظر می‌رسد که غلظت کمتر TPHs در خاک در این سطح که به سبب اثرات سمیتی کمتر امکان رشد و نمو و استقرار گیاه بیشتر می‌باشد (اسمیت و همکاران، ۲۰۰۵)، گیاه‌پالایی آلاینده‌های نفتی نسبت به سطح ۳به۱ (نسبت اختلاط ۳به۱ خاک آلوده با خاک غیر آلوده) با موفقیت بیشتری همراه می‌باشد. از سوی دیگر کشت همزمان اگروپایرون- فسکیو و سطح آلودگی ۱به۱ نیز به عنوان بهینه‌ترین پاسخ از میان سایر پاسخ‌های ممکن برای کشت همزمان دو گیاه و سطح آلودگی مناسب بود. به نظر می‌رسد که کشت همزمان این دو گیاه علفی به سبب دارا بودن ریشه‌های با طبیعت فیبری که نسبت به سایر ریشه‌ها محیط مناسب‌تر و با سطح ویژه بالاتری را برای فعالیت و توسعه جمعیت میکروبی در محیط ریزوسفر خود فراهم می‌آورند و نقش مؤثرتری بر تجزیه و تخریب آلاینده‌های نفتی در خاک دارند، نسبت به سایر انتخاب‌ها مطلوب‌تر بوده است (آپریل و سیمز ۱۹۹۰).

در پژوهش‌هایی مشابه زو و همکاران (۲۰۰۵) نیز به نقش مؤثرتر کشت همزمان ذرت - رای گراس بر کاهش غلظت ترکیبات نفتی در خاک اشاره نمودند. شواب و بنکس (۱۹۹۴) نیز با بررسی تجزیه و تخریب آلاینده‌های نفتی در خاک در حضور گیاهان مختلف گزارش کردند که تجزیه این ترکیبات در خاک به نوع ترکیب و غلظت آن و نیز نوع گونه گیاهی وابسته است، بنابراین انجام یک انتخاب بهینه نقش بسیار مهمی در کسب موفقیت در فرایند گیاه پالایی دارد. ندونوری و همکاران (۲۰۰۰) اثر حضور گیاهان مختلف بر کاهش غلظت TPHs در خاک طی فرایند گیاه‌پالایی را مورد بررسی قرار دادند و دو گیاه رای گراس و اگوستین گراس را جهت پالایش خاک‌های آلوده به نفت منطقه مورد مطالعه خود پیشنهاد نمودند. مرکل و همکاران (۲۰۰۵) نیز گیاه علفی *Brachiaria brizantha* را به عنوان پاسخ بهینه برای کاهش غلظت ترکیبات نفتی از خاک نسبت به دیگر گیاهان مورد مطالعه خود معرفی کردند. کین و همکاران (۲۰۰۷) استفاده از روش‌های

مختلف بهینه‌سازی از جمله روش الگوریتم ژنتیک را برای تصمیم‌گیری در مورد انتخاب روش مناسب و مؤثر به منظور پالایش مکان‌های آلوده به ترکیبات نفتی را توصیه نمودند.

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که در مقایسه با نتایج حاصل از مطالعه پیشین بر اساس روش آمار کلاسیک (بسالت پور و همکاران ۱۳۸۶) که در هر دو سطح آلودگی خاک به ترکیبات نفتی انتخاب گیاهان اگروپایرون، فسکیو و پوکسنلیا به عنوان پاسخ بهینه از میان سایر انتخاب‌های ممکن در بخش مطالعات اولیه قابلیت رشد پیشنهاد شده بود، در روش انتخاب بهینه الگوریتم ژنتیک، چهار گیاه اگروپایرون، فسکیو، آفتابگردان و گلرنگ نسبت به دیگر گیاهان (پوکسنلیا، شبدر و کلزا) دارای قابلیت بیشتری برای انتخاب و استفاده در مطالعات گیاه‌پالایی بودند. در مطالعات گیاه‌پالایی نیز، اگروپایرون و فسکیو گیاهان مناسب جهت پالایش آلاینده‌های نفتی از خاک به روش آمار کلاسیک پیشنهاد شدند. این درحالیست که بررسی نتایج بهینه‌سازی انتخاب مناسب‌ترین گیاه در روش الگوریتم ژنتیک به منظور توصیه کشت در منطقه برای گیاه‌پالایی آلاینده‌های نفتی در هر سطح آلودگی به صورت جداگانه بیان‌گر آن بود که در هر دو سطح آلودگی ۱ به ۱ و ۳ به ۱ اگروپایرون نسبت به گیاهان دیگر (فسکیو، آفتابگردان و گلرنگ) پاسخ بهتری بود. از سوی دیگر پاسخ بهینه برای کشت همزمان دو گیاه به منظور کاهش بیشتر غلظت TPHs در خاک برای هر سطح آلودگی به صورت جداگانه نیز کشت همزمان اگروپایرون- فسکیو بود. نتایج حاصل از بهینه‌سازی پاسخ‌های ممکن برای انتخاب مناسب‌ترین گیاه و نیز مناسب‌ترین سطح آلودگی بر اساس روش الگوریتم ژنتیک به منظور کسب بیشترین احتمال موفقیت در امکان پالایش آلاینده‌های نفتی در خاک به روش گیاه‌پالایی نیز نشان داد که گیاه اگروپایرون و سطح آلودگی ۱به۱ مناسب‌ترین پاسخ است.

از آنجا که در بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک علاوه بر عوامل کمی اندازه‌گیری شده، برخی از فاکتورهای کیفی مؤثر نیز به صورت کمی قابل ورود به تابع هدف است، به نظر می‌رسد که این روش انتخاب بهینه علاوه بر آنکه نسبت به سایر روش‌های مرسوم آماری دارای سرعت انتخاب و بازدهی بیشتری می‌باشد از قابلیت اطمینان بالاتری نیز برای تصمیم‌گیری در فضای طراحی برخوردار باشد. بنابراین استفاده از این روش‌های نوین جستجوی بهینه در فضاهای وسیع جستجو به منظور انتخاب گیاه مناسب برای پالایش خاک‌های آلوده به وسیله گیاهان (گیاه‌پالایی) که انتخاب گیاه مناسب حساس‌ترین مرحله آن است، توصیه می‌گردد.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

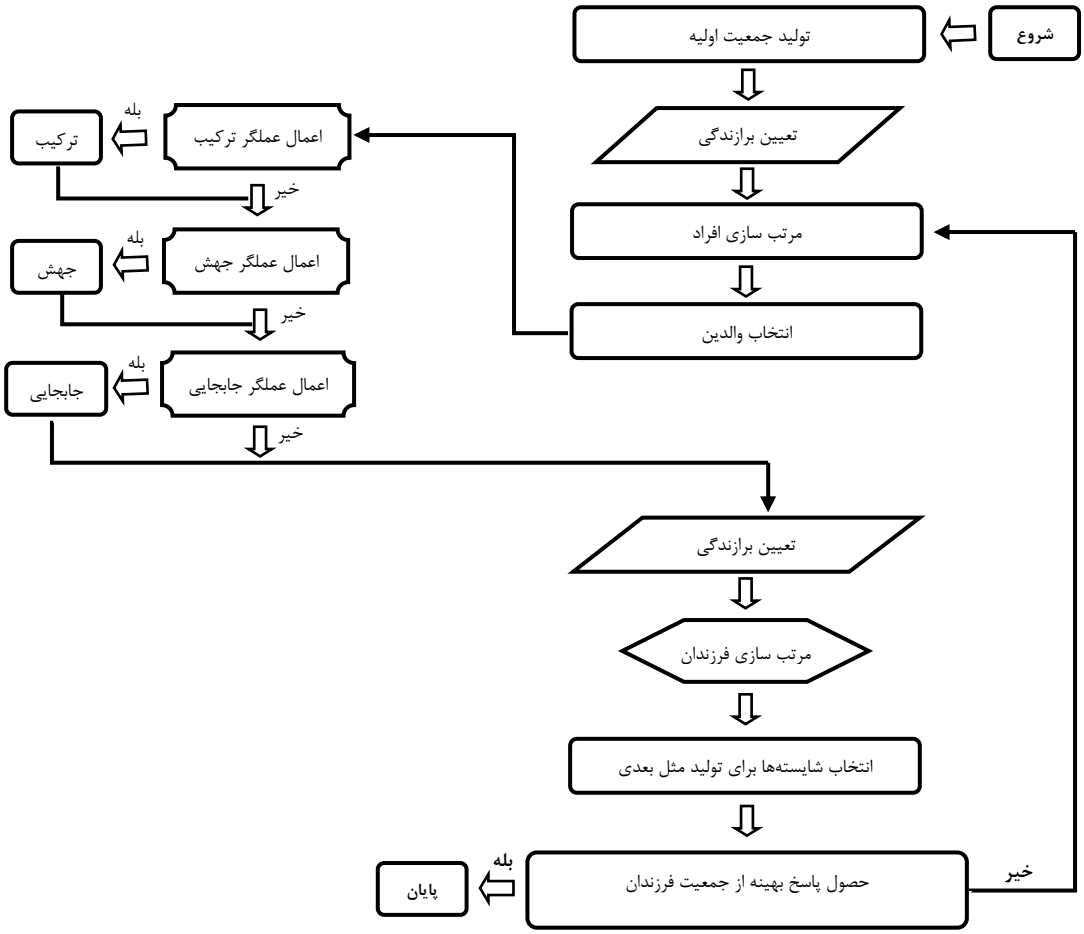
تیمار	بافت	آهک (درصد)	مواد آلی (درصد)	نیتروژن کل (درصد)	pH	ECe (dS/m)	فسفر ($mg\ kg^{-1}$)	پتاسیم ($mg\ kg^{-1}$)	سدیم ($mg\ kg^{-1}$)
خاک آلوده	لوم	۲۴/۵	۱۰/۲	۱/۲	۶/۹	۹/۸	۱۵۰	۱۴۴	۳۱
خاک غیر آلوده	لوم	۲۹/۵	۱/۰	۰/۱	۷/۸	۷/۴	۴۵	۱۲۱	۱۵
سطح ۱به۱	لوم	۲۳/۷	۴/۷	۰/۶	۷/۷	۷/۸	۷۳	۱۲۵	۱۸
سطح ۳به۱	لوم	۲۰/۵	۷/۵	۰/۹	۷/۱	۸/۱	۱۲۳	۱۲۸	۲۶

جدول ۲- غلظت (میلی گرم بر کیلوگرم) برخی از عناصر سنگین موجود در خاک‌های مورد مطالعه

تیمار	آهن	مس	کادمیم	نیکل	روی	کروم	کبالت	آلومینیوم	منگنز
خاک آلوده	۶۲/۴	۸۹/۱	۶/۳	۲/۷	۱۲/۰	۰/۲۷	۱/۵۲	۱۴/۲	۳۹/۳
خاک غیر آلوده	۱۴/۷	۵/۴	<۰/۰۲	۰/۱	۱۸/۵	۰/۱۵	۱/۶۳	۹/۴	۱۸/۰
سطح ۱به۱	۳۱/۳	۴۳/۲	۲/۱	۰/۹	۱۵/۴	۰/۱۹	۱/۵۹	۱۲/۲	۲۹/۱
سطح ۳به۱	۴۵/۴	۶۳/۱	۴/۶	۱/۳	۱۱/۸	۰/۲۴	۱/۳۲	۱۲/۹	۳۵/۰

جدول ۳- غلظت کل هیدروکربن های نفتی (TPHs) در خاک در تیمارهای مختلف

تیمار	غلظت ($mg\ kg^{-1}$)
خاک آلوده	۱۰۴۲۳۳
خاک غیر آلوده	<۵۰
سطح ۱به۱	۴۰۳۶۶
سطح ۳به۱	۶۹۷۶۶



شکل ۱- مراحل مختلف فرایند بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک (باوی و صالحی، ۱۳۸۷)

جدول ۴- نتایج آزمایش‌های جوانه‌زنی و رشد اولیه گیاهان مورد مطالعه در خاک غیر آلوده، سطوح ۱به۱ و ۳به۱ (خاک آلوده: خاک غیر آلوده)

تیمار	آفتابگردان	گلرنگ	شبدر	کلزا	اگروپایرون	فسکیو	پوکسنلیا
				سرعت جوانه زنی			
خاک غیر آلوده	۳/۴ a*	۲/۷ a	۱۳/۸ a	۳/۲ a	۲/۲ a	۱/۲ a	۵/۱ a
سطح ۱به۱	۳/۳ a	۲/۶ a	۱۳/۷ a	۳ a	۲/۱ a	۰/۸ b	۳/۱ b
سطح ۳به۱	۳/۲ a	۲/۵ a	۱۳/۵ a	۲/۷ b	۱/۹ a	۰/۶ b	۲/۵ c
				درصد جوانه زنی			
خاک غیر آلوده	۸۹/۵ a	۸۶ a	۷۷/۶ a	۸۴/۵ a	۷۲/۷ a	۱۴/۴ a	۲۳/۵ a
سطح ۱به۱	۸۹/۱ a	۷۶ a	۶۹/۳ a	۷۳/۷ a	۶۸/۸ a	۲ b	۱۲/۹ b
سطح ۳به۱	۸۶/۵ a	۷۲/۷ a	۶۱/۳ a	۶۵ b	۶۳/۸a	۰/۹ b	۶/۹ c
				عملکرد ماده خشک ($mg\ pot^{-1}$)			
خاک غیر آلوده	۲۸۷۵ a	۹۷۴ a	۴۳۷ a	۵۶۵ a	۱۲۲۱ a	۸۵۶ a	۶۴۱ a
سطح ۱به۱	۲۱۲۱ b	۵۸۵ b	ب.ع.	ب.ع.	۹۳۱ a	۶۴۹ a	۵۸۹ a
سطح ۳به۱	۱۴۵۷ c	۲۶۴ c	ب.ع.	ب.ع.	۶۰۱ b	۲۳۸ b	۴۸۷ a

* اعداد هر ستون در هر آزمایش که دارای حداقل یک حرف مشترک می‌باشند، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون LSD هستند.

ب.ع. بدون عملکرد ماده خشک گیاهی در انتهای دوره آزمایش

جدول ۵- میانگین نتایج مطالعات گیاه‌پالایی آلاینده‌های نفتی در حضور گیاهان مورد مطالعه در سطوح مختلف

تیمار	عملکرد ماده خشک ریشه (g pot $^{-1}$)	عملکرد ماده خشک اندام هوایی (g pot $^{-1}$)	تنفس میکروبی نسبت به شاهد بدون گیاه (Mg C-CO_2/kg soil h)	کاهش TPHs نسبت به شاهد (درصد)
		آفتابگردان		
خاک غیر آلوده	۰/۳۵ [a*]	۷/۱ [a]	۰/۱	-
سطح ۱به۱	۰/۲۸ [a]	۴/۶ [b]	۰/۵۷	۱۴/۶۹
سطح ۳به۱	۰/۲ [b]	۱/۹ [c]	۰/۳۲	۱۲/۴۷
		گلرنگ		
خاک غیر آلوده	۰/۲۳ [a]	۲/۲۷ [a]	۰/۰۲	-
سطح ۱به۱	۰/۱۱ [b]	۰/۸۴ [b]	۰/۱۵	۱۰/۹۷
سطح ۳به۱	<۰/۰۱ [c]	۱/۸۹ [c]	۰/۱۲	۱۰/۱۹
		فسکیو		
خاک غیر آلوده	۲/۰۳ [a]	۶/۶۸ [a]	۰/۳۳	–
سطح ۱به۱	۰/۸۵ [b]	۱/۸۹ [b]	۲/۷۷	۶۹/۸۲
سطح ۳به۱	۰/۶۲ [b]	۱/۳۱ [b]	۲/۷۲	۴۲/۳۲
		اگروپایرون		
خاک غیر آلوده	۱/۹۶ [a]	۷/۲۶ [a]	۰/۱۶	-
سطح ۱به۱	۱/۱۵ [b]	۴/۵۱ [b]	۲/۶۷	۷۰/۸۳
سطح ۳به۱	۰/۷۳ [c]	۲/۹۳ [c]	۳/۳۶	۴۴/۳۳

* اعداد هر ستون برای هر گیاه که دارای حداقل یک حرف مشترک می‌باشند، فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون LSD هستند.

فهرست منابع:

۱. بسالت پور، ع.ا.، م.ع. حاج عباسی، ا.م. خوشگفتار منش و م. افیونی. ۱۳۸۶. واکنش برخی از گیاهان به آلاینده‌های نفتی موجود در اطراف پالایشگاه تهران. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، ۴۴ (الف): ۱۳-۲۴.

۲. باوی، ا. و م. صالحی. ۱۳۸۷. الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی سازه‌های مرکب. چاپ اول. انتشارات عابد. ص ۷۵.

3. Adam, G. and H. Duncan. 2002. Influence of diesel fuel on seed germination. J. Environ. Pollut. 120: 363-370.
4. Alef, K. 1995. Soil Respiration. p. 214-216. In: Alef, K. and Nannipieri, P. (Eds.), Methods in applied soil microbiology and biochemistry, chapter 5, Harcourt brace & company publishers.
5. April, W. and R.C. Sims. 1990. Evaluation of prairie grasses for stimulating polycyclic aromatic hydrocarbon treatment in soil. Chemosphere. 20: 253-265.
6. Back, T. 1996. Evolutionary Algorithms in Theory and Practice. Oxford University Press, Oxford, UK.
7. Black, C.A., Evans D.D., White J.L., Ensminger L.E. and F.E. Clark. 1965. In: Page, A.L. (Ed.), Methods of soil analysis, Part 2. American Society of Agronomy, Madison, Wis.
8. Bremner, J.M. and C.S. Mulvaney. 1982. Nitrogen-total. p. 595-624. In: Page, A.L. (Ed.), Methods of soil analysis, Part 2, American Society of Agronomy, Madison, Wis.
9. Chaineau, C.H., Morel J.L. and J. Oudot. 1997. Phytotoxicity and plant uptake of fuel oil hydrocarbons. J. Eviron. Qual. 26: 1478-1483.
10. Christopher, S., Hein P., Marsden J. and A.S. Shurleff. 1988. Evaluation of methods 3540 (soxhlet) and 3550 (Sonication) for evaluation of appendix IX analyses from solid samples. S-CUBED, Report for EPA contract 68-03-33-75, work assignment No.03, Document No. SSS-R-88-9436.

11. Crowe, A.M., McClean C.J. and M.S. Cresser. 2006. An application of genetic algorithms to the robust estimation of soil organic and mineral fraction densities. Environ. Model. Software. 21: 1503-1507.
12. De Jong, K.A. 1993. Genetic algorithms are NOT function optimizers. In: Whitley, L.D. (Ed.), Foundations of Genetic Algorithms 2. San Mateo, CA, USA.
13. Goldberg, DE. 1989. p. 415. In: Addison-Wesley (Ed.), Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning.
14. Li, C.H., Ma B.L. and T.O. Zhang. 2002. Soil bulk density effects on soil microbial population and enzyme activities during the growth of maize (*Zea Mays*) planted in large pots under field exposure. Plant. Sci. 82: 147- 154.
15. Lindsay, W.L. and W.A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. Am. Soil Sci. Soc. J. 42: 421-428.
16. Liu, Sh., Butler D., Brazier R., Heathwaite L. and S. Khu. 2007. Using genetic algorithm to calibrate a water quality model. Sci. Total Environ. 374: 260-272.
17. Merkl, N., Karft R.S. and C. Infant. 2005. Assessment of tropical grasses and legumes for phytoremediation of petroleum contaminated soils. Water, Air, Soil Pollut. 165: 195-209.
18. Michalewicz, Z. 1996. Genetic Algorithms + Data Structures = Evolutionary Programs. (Third Eds.). Springer-Verlag, Berlin.
19. Mitchell, M. 1996. An Introduction to Genetic Algorithms. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA.
20. Nedunuri, K.V., Govindaraju R.S., Banks M.K., Schwab A.P. and Z. Chen. 2000. Evaluation of phytoremediation for field scale degradation of total petroleum hydrocarbons. Environ. Engine. 126: 483-490.
21. Olsen, S.R. and L.E. Sommers. 1982. Phosphorus. pp. 403-431. In: Page, A.L. (Ed.), Methods of soil analysis, Part 2, American Society of Agronomy, Madison, Wis.
22. Pulford, I.D. and C. Watson. 2003. Phytoremediation of heavy metal contaminated land by tree- a review. J. Environ. Int. 29: 529-40.
23. Qin, X.S., Huang, G.H. and A. Chakma. 2007. A Stepwise-Inference-Based Optimization System for Supporting Remediation of Petroleum-Contaminated Sites. Water, Air, Soil Pollut. 185: 349–368
24. Schwab, A.P. and M.K. Banks. 1994. Biologically mediated dissipation of Polyaromatic hydrocarbons in the root zone. p.132-141. In: Anderson, T. and J. Coats (Eds.), Bioremediation through rhizosphere technology, American Chemistry Society, Washington, DC.
25. Smith, M.J., Flowers T.H., Duncan H.J. and J. Alder. 2005. Effects of PAHs on germination and subsequent growth of grasses and legumes in freshly contaminated soil and soil with aged PAH residues. J. Environ. Pollute. 101: 1-7.
26. U.S. EPA. 1984. Interalaboratory Comparison Stunt: Methods for volatile and semi–volatile compounds, Environmental monitoring systems laboratory, office of research and development, Las Vegas, NV, EPA. 600/4- 84- 027.
27. Wang, Q.J. 1997. Using genetic algorithms to optimize model parameters. Environ. Model. Software. 12: 27-34.
28. Whigham, P.A. and F. Recknagel. 2001. Predicting chlorophyll-α in freshwater lakes by hybridizing process-based models and genetic algorithms. Ecol. Model. 146: 243-251.
29. Xu, J.G. and R.L. Johnson. 1997. Nitrogen dynamics in soils with different hydrocarbon contents planted to barley and field pea. Canadian J. Soil Sci. 77: 453-458.
30. Xu S.Y., Chen Y.X., Wu W.X., Wang K.X., Lin Q. and X.Q. Liang. 2005. Enhanced dissipation of phenantherene and pyrene in spiked soils by combined plants cultivation. Sci. Total Environ. 363: 206–215.