

ارزیابی پتانسیل گونه‌های *Agropyron intermedium* (Host) P. Beauv.در گیاه پالایی خاک آلوده *Dactylis glomerata* L.

به نفت خام سبک در شرایط گلخانه‌ای

- ❖ **جواد دائی‌زاده***: دانش آموخته کارشناسی ارشد مرتع‌داری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ایران.
- ❖ **مهشید سوری**: استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات مرتع، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.
- ❖ **احسان زندی اصفهان**: استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات مرتع، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.
- ❖ **جواد معتمدی**: دانشیار پژوهشی، بخش تحقیقات مرتع، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.

چکیده

هیدروکربن‌های نفتی از جمله آلاینده‌های پایدار سمی بوده که تهدیدی اساسی برای اکوسیستم به‌شمار می‌رود. گیاه پالایی، شامل استفاده از گیاهان برای پاکسازی خاک‌های آلوده، یک روش مؤثر و اقتصادی در کاهش آلودگی‌های نفتی خاک است. در این پژوهش پتانسیل گیاه پالایی گیاهان مرتعی *Agropyron intermedium* و *Dactylis glomerata* بر خاک آلوده با غلظت‌های مختلف نفت خام (۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد) برای مدت ۱۲۰ روز در شرایط گلخانه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. در انتهای تحقیق، تغییرات فاکتورهای زیستی (ارتفاع اندام‌هوایی، وزن خشک اندام‌هوایی و وزن خشک ریشه) هر کدام از گونه‌ها و تغییرات هیدروکربن‌های نفتی خاک اندازه‌گیری گردید و نتایج با استفاده از نرم‌افزار SPSS تجزیه و تحلیل شد. روند منحنی سینتیک زوال درصد ترکیبات نفتی برای محاسبه مدت زمان لازم برای تجزیه هیدروکربن‌های نفتی، ارزیابی گردید. نتایج نشان داد سه شاخص مهم فاکتورهای زیستی هر دو گونه در تیمارهای مختلف، تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد داشتند. آنالیز حاصل از تغییرات درصد ترکیبات نفتی نشان داد، گیاه *Ag.intermedium* با کاهش ۷۹/۸۱ درصد مواد نفتی در تیمار ۲۰ درصد و ۵۸/۵۴ درصد کاهش در تیمار ۵۰ درصد، توانایی بهتری نسبت به گیاه *D.glomerata* در گیاه پالایی خاک‌های آلوده به مواد نفتی را دارد. نتایج حاصل از آنالیز درصد ترکیبات نفتی نمونه‌های خاک و برازش آن با سه مدل سینتیک درجه صفر، سینتیک درجه اول و مدل هیگوچی، در هر دو گونه نشان داد که مدل سینتیک درجه اول مناسب‌ترین مدل برای شبیه‌سازی روند تغییرات مقادیر هیدروکربن‌های نفتی خاک می‌باشد.

کلید واژگان: گیاه پالایی، گیاهان مرتعی، نفت خام سبک، *Dactylis glomerata* *Agropyron intermedium*.

۱. مقدمه

گیاه‌پالایی، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۶]. با توجه به استفاده گیاهان از نورخورشید، آب و دی‌اکسیدکربن برای رشد و توسعه خود، استفاده از روش پاکسازی در محل توسط گیاهان به نهاده‌ها و حفاظت کمی احتیاج دارد [۲]. آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (EPA)^۱ نیز مناسب‌ترین و اقتصادی‌ترین روش برای پاکسازی خاک‌های آلوده را روش تصفیه در محل آلودگی (in situ) معرفی کرده است [۲۸]. اصطلاح عمومی «گیاه‌پالایی» متشکل از پیشوند یونانی phyto به معنای گیاه و ریشه لاتین remedium به معنی اصلاح و یا حذف مواد زیان‌آور می‌باشد. گیاه‌پالایی یک اصطلاح گسترده‌ای است که از سال ۱۹۹۱ برای توصیف استفاده از گیاهان به منظور کاهش حجم، تحرک و یا سمیت آلاینده‌ها در خاک، آب‌های زیرزمینی و یا دیگر رسانه‌های آلوده استفاده شده است [۱۲]. محققان مکانیسم‌هایی که به‌وسیله گیاهان می‌توانند توده آلاینده‌ها را در خاک، رسوبات و آب تحت تأثیر قرار دهند، شناسایی کرده‌اند. اگرچه تداخل یا شباهتی را می‌توان بین برخی از این مکانیسم‌ها مشاهده کرد ولی نام‌گذاری آنها متفاوت است، استخراج گیاهی^۲، تبخیر گیاهی^۳، تجزیه گیاهی^۴، تصفیه ریشه‌ای^۵، تثبیت گیاهی^۶، کنترل هیدرولیکی^۷ و تجزیه ریشه‌ای^۸ [۴۲]. تجزیه ریشه‌ای، آلاینده‌ها را در ناحیه ریزوسفر ریشه، تجزیه می‌کند. از بین تمامی مکانیسم‌ها، تجزیه ریشه‌ای مناسب‌ترین روش برای از بین بردن آلاینده‌های آلی می‌باشد [۲۱]. ریشه گیاهان با افزایش مقدار و انواع جمعیت میکروبی در ناحیه ریزوسفر (خاک اطراف ریشه) و یا در میکوریزا (تجمع قارچ و ریشه گیاه) باعث افزایش

آلودگی‌های هیدروکربن‌های نفتی مشکل جدی زیست محیطی است که به طور عمده از نشت تصادفی و تخلیه روغن یا ضایعات روغنی ایجاد می‌شود که می‌تواند برای سلامتی انسان مضر باشد [۲۳]. حضور آلاینده‌های آلی در محیط زیست نه تنها بر سلامت انسان، بلکه بر رشد و توسعه گیاهی نیز تأثیر منفی می‌گذارد. علاوه بر این، شدیداً خواص شیمیایی خاک، جمعیت و فعالیت میکروارگانیسم‌های آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۲]. وجود هیدروکربن‌ها در خاک ممکن است از طریق جریان محلول آبی در خاک و یا در انتقال اکسیژن به ریزوسفر رخ دهد. هیدروکربن‌ها ممکن است آنزیم‌ها و ترشح هورمونی گیاه را مختل نمایند. در موارد دیگر مشاهده شده است که با چسبیدن به دیواره بذر گیاهان، مانع رسیدن آب و اکسیژن به آن شده و در نتیجه باعث خفگی جنین بذر می‌شوند [۲۴]. همچنین گیاهان و میکروکروب‌های خاک آلوده به نفت برای جذب عناصر غذایی کم‌مصرف با یکدیگر رقابت می‌کنند که به سبب آن رشد گیاهان در چنین خاک‌هایی سرکوب می‌شود [۵]. هیدروکربن‌های نفتی به‌طور کلی به دو گروه اصلی تقسیم‌بندی می‌شوند: هیدروکربن‌های آلیفاتیک که شامل آلکان‌ها، آلکن‌ها، آلکین‌ها و سیکلوآلکان‌ها می‌باشند. هیدروکربن‌های آروماتیک نیز شامل منوآروماتیک‌ها و آروماتیک‌های چندحلقه‌ای (PAHs) هستند [۴۲]. تکنیک‌های بسیاری برای حذف هیدروکربن‌های نفتی در خاک‌ها و رسوبات جهت تلاش برای بازسازی محیط به کار برده می‌شوند. از جمله پاکسازی خارج از محل اصلی (ex situ) مانند: اکسیداسیون مواد شیمیایی، دفع حرارتی و سوزاندن. علاوه بر این، تکنیک‌های دیگری در روش پاکسازی در محل (in situ) مثل: زمین‌پالایی، پخش در معرض هوا، افشانه‌زیستی، هوادهی زیستی، موانع واکنش‌پذیری، زیست‌پالایی (تقویت و تحریک زیستی)، زیست‌پالایی طبیعی (کاهش طبیعی تحت کنترل) و

^۱US Environmental Protection Agency^۲Phytoextraction^۳Phytovolatilization^۴Phytodegradation^۵Rhizofiltration^۶Phytostabilization^۷Hydrauliccontrol^۸Rhizodegradation

آلوده به مواد نفتی انجام شد، مطالعه تأثیرات اسید سیتریک با وزن مولکولی پایین و سورفکتانت توپین ۸۰ در فرایند گیاه‌پالایی و همچنین پالایش گیاهی با رویکرد تقویت زیستی با استفاده از باکتری سودوموناس آئروژینوزا، انجام گرفت که مشخص شد استفاده ترکیبی از اسید سیتریک و سورفکتانت توپین ۸۰، توانایی گیاه‌پالایی یونجه را افزایش می‌دهد. همچنین به کار گیری سودوموناس، مقدار زیست‌توده خشک یونجه را تا ۷۱ درصد افزایش داد. تحقیقات ثابت کرد که بالاترین میزان حذف TPH با ۶۸ درصد در مدت ۹۰ روز، در خاک‌های با پوشش گیاه یونجه و همراه با به کار گیری سودوموناس بوده است [۳].

خاک به‌عنوان محیط مؤثری که می‌تواند با بهره‌گیری از فرایند جذب سطحی برخی از مواد آلی را در خود جذب نماید، در کاهش غلظت آلاینده‌های نفتی مؤثر است. با توجه به طولانی بودن فرایند گیاه‌پالایی، تعیین مدت زمان لازم برای حذف آلاینده از خاک می‌تواند کمک شایانی برای مدیریت طرح‌های زیست‌پالایی در مناطق آلوده باشد. مدل‌های مختلفی همچون مدل سینتیک درجه اول، سینتیک درجه صفر و هیگوجی برای شبیه‌سازی فرایند و همچنین محاسبه زمان لازم به‌منظور پالایش خاک، ارائه گردیده است [۴۰]. پژوهشگران در گیاه‌پالایی آلاینده‌های فنانترن و پایرن در حضور گیاه لولیوم (*Lolium multiflorum* Lam.) مشاهده کردند که پالایش این مواد، با مدل سینتیک درجه اول هماهنگی دارد و مقادیر عددی ثابت سرعت واکنش بیشتر از تیمار بدون گیاه بود [۱۴]. کاشت گیاه برموداگراس (*Cynodon dactylon* L. Pers.) در خاک آلوده به پایرن نشان داد که تجزیه پایرن از سینتیک درجه اول پیروی می‌کند. مقدار تجزیه پایرن در خاک ریزوسفر برموداگراس به طور معنی‌داری بیشتر از خاک خارج از محیط ریزوسفری و شاهد بدون کشت به دست آمد [۲۲].

در انجام یک طرح گیاه‌پالایی موارد مهمی مثل

تجزیه بیولوژیکی آلاینده در خاک شده، علاوه بر آن تجزیه تراوشات ریشه می‌تواند منجر به متابولیسم هم-زمان آلاینده‌ها در ناحیه ریزوسفر شود. طیف گسترده‌ای از آلاینده‌های آلی مانند هیدروکربن‌های نفتی، هیدروکربن‌های حلقوی، آفت‌کش‌ها، حلال‌های کلر، پنتاکلوروفنل (PCP)، بی‌فنیل‌های چندکلره (PCBs)، بنزن، تولوئن، ارتوزایلین و سورفکتانت‌ها را می‌توان با این روش حذف کرد [۹]. در بررسی کارایی گیاه‌پالایی گونه گیاهی *Avicennia schaueriana* در مقایسه با زیست پالایی باکتریایی رسوبات آلوده به هیدروکربن‌های نفتی محققان به این نتیجه رسیدند که گونه گیاهی در حذف نسبتی از هیدروکربن‌ها به اندازه ۸۷ درصد مؤثر بود [۲۷]. در ارزیابی گیاه‌پالایی گونه *Rizophora mangle* L. نیز مشخص شد که این گیاه کارایی بیشتری از زیست‌پالایی در پالایش این نوع رسوبات داشت. رشد باکتری در ریزوسفر این گیاه تا حدود $10^6 \times 10^3$ CFU افزایش داشت [۲۶].

محققان در مطالعه تأثیر کاشت گندم (*Triticum aestivum* L.) در اصلاح خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی آروماتیک حلقوی فنانترن و پیرن به این نتیجه رسیدند که میزان تجزیه پیرن از ۱۵ و ۱۸ درصد بدون کاشت گندم به ترتیب به ۶۵ و ۷۰ درصد با حضور گیاه افزایش یافت. همچنین در خاک‌هایی که با ماده فنانترن آلوده شده بودند، تجزیه این ماده از خاک بدون گیاه از ۹۷ و ۸۷ درصد به ترتیب به ۱۰۰ و ۹۸ درصد از خاک با کاشت گیاه افزایش پیدا کرد [۳۸]. بررسی توانایی گیاه پالایی شبدر ایرانی (*Trifolium resupinatum* L.) با نسبت‌های آلودگی ۱:۱ و ۱:۲، نشان داد که بیشترین کاهش هیدروکربن‌های نفتی در ماه اول حاصل شد. در نسبت ۱:۱ میزان آلودگی نفتی از $150/3$ mg/kg به $14/05$ mg/kg و در نسبت ۱:۲ میزان مواد نفتی از $965/21$ mg/kg به $36/9$ mg/kg کاهش پیدا کرد [۲۱]. در پژوهشی که با بررسی پتانسیل گیاه‌پالایی یونجه (*Medicago sativa* L.) در خاک‌های

آب، هوا و همچنین از طریق ورود پساب و ضایعات نفتی به داخل خاک، اثرات و پیامدهای غیرقابل جبرانی بر محیط زیست وارد می‌نمایند. وجود این مواد در خاک، خطر انتقال به آب‌های سطحی و زیرزمینی، مسمومیت و بیماری برای انسان و سایر موجودات زنده را به دنبال دارد. بنابراین، با توجه به قرار گرفتن صنایع پتروشیمی و کارخانجات مرتبط با مواد و فرآورده‌های نفتی در همجواری عرصه‌های طبیعی و زراعی در شهرستانهای ارومیه و مهاباد استان آذربایجان غربی، پژوهش حاضر، به منظور بررسی میزان تغییرات زیست‌توده گیاهی *Dactylis glomerata* و *Agropyron intermedium* تحت تأثیر هیدروکربن‌های نفتی و همچنین بررسی میزان تغییرات غلظت هیدروکربن‌های نفتی با استفاده از گیاهان مذکور انجام پذیرفت.

۲. روش‌شناسی تحقیق

۲.۱. نمونه برداری و اندازه‌گیری ویژگی‌های

خاک مورد استفاده

در این پژوهش، برای بررسی مکانیزم تجزیه ریشه‌ای، خاک مورد نیاز، از مراتع همجوار تأسیسات پتروشیمی ارومیه با مختصات جغرافیایی $37^{\circ} 20' 34''$ عرض شمالی و با توجه به عمق معمول مؤثر در فرآیند گیاه‌پالایی، از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری [۳۱، ۱۰، ۱] تهیه شد و پس از انتقال به آزمایشگاه، در هوای آزاد خشک گردید خاک به خوبی کوبیده شد تا کلوخه‌ها خرد شوند. بعد از برهم زدن، از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد که مطابق استانداردهای آشتو و انستیتو تکنولوژی ماساچوست مرز ذرات ماسه و شن است [۸]. با توجه به تأثیر مهم خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک بر کارایی فرایندهای مؤثر بر کاهش هیدروکربن‌های نفتی خاک [۴۱]، برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک تهیه شده، مطابق روش‌های

استفاده از گیاهان بومی، سریع‌الرشد، مقاوم و با کاشت آسان را باید در نظر داشت [۶]. گیاهان مختلف (از قبیل گراس‌ها، بوته‌ای‌ها، فورب‌ها، درختان و درختچه‌ها به‌ویژه سوزنی برگان) در اجتماع با ریزجانداران می‌توانند تجزیه آلاینده‌های هیدروکربنی خاک‌های آلوده را افزایش دهند [۳۳]. در طراحی یک پروژه گیاه‌پالایی، استفاده از گونه‌های بومی منطقه در اولویت است تا از خطر تهاجم گونه‌های وارداتی جلوگیری شود. علاوه بر این، گیاه باید رشد سریع، سرسختی و تحمل بالا و همچنین کشت و نگهداری آسان داشته باشد. گونه‌های گیاهی خشکی‌زی که دارای سیستم ریشه‌ای گسترده هستند به دلیل تجزیه بیشتر آلاینده‌ها برای گیاه‌پالایی مؤثر تشخیص داده شده اند [۹]. گراس‌ها با سیستم‌های ریشه‌ای افشان در سطح خاک، بیشترین سطح تماس را در بین گونه‌های گیاهی دارند و می‌توانند به اعماق زیاد خاک نفوذ کنند و در جذب و تبدیل آلاینده‌های هیدروکربنی بسیار مؤثر عمل می‌کنند [۳۴]. خانواده گندمیان یا گراس‌ها شامل حدود ۱۲۰۰۰ گونه و در حدود ۷۰۰ جنس در سراسر جهان می‌باشد [۳۶]. *Agropyron intermedium* (Host) P. Beauv. گونه‌ای است چندساله از تیره گندمیان، زیر تیره Pooideae و طایفه گندم (Triticeae) و جنس *Agropyron* در زبان انگلیسی به آن Intermediate wheatgrass گفته می‌شود. دارای ریشه‌ای عمیق ۹۰ تا ۱۲۰ سانتی‌متر بوده و در تثبیت خاک کاربرد دارد [۱۶]. *Dactylis glomerata* L. گونه‌ای است چندساله از تیره گندمیان، زیر تیره Pooideae، طایفه Festuceae، در زبان انگلیسی به نام‌های Orchard grass (علف باغ) و Cocksfoot (گیاه داکتیلیس) نیز معروف می‌باشد. با ریشه‌های عمیق و متراکم در حفاظت از خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۷].

با گسترش روزافزون صنعت، از جمله صنایع پتروشیمی، تولیدات نفتی و مواد وابسته به آن، آلودگی‌های نفتی افزایش یافته و این آلودگی‌ها از طریق

فتومتر، pH خاک در گل اشباع با دستگاه pH متر، میزان مواد آلی خاک با روش اکسیداسیون و والکی بلاک می‌باشند [۴۳].

استاندارد خاک‌شناسی تعیین شد (جدول ۱) که شامل بافت خاک به روش هیدرومتری، هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع، فسفر قابل جذب به روش اولسن [۲۹]، نیتروژن کل به روش کج‌لدال، سدیم و پتاسیم قابل جذب به روش عصاره‌گیری با استات آمونیوم و قرائت با فلیم

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک استفاده شده

| مقدار | واحد | ویژگی خاک |
|-------|-------|-------------------------------------|
| ۲/۵۶ | ds/m | EC هدایت الکتریکی |
| ۷/۴۱ | | pH اسیدیته |
| ۴۴ | | SP درصد اشباع |
| ۳۱/۳ | % | T.N.V درصد آهک (Caco _۳) |
| ۰/۴۷ | % | O.C درصد کربن آلی |
| ۰/۰۵ | % | T.N درصد ازت کل |
| ۳/۵ | mg/kg | Pava فسفر قابل جذب |
| ۳۲۰ | mg/kg | Kava پتاسیم قابل جذب |
| ۵۴ | % | Clay درصد رس |
| ۳۰ | % | Silt درصد لای |
| ۱۶ | % | Sand درصد شن |
| رسی | | Tex بافت خاک |
| ۴۶/۰ | mg/l | Na سدیم محلول در عصاره |
| ۵۴۴/۰ | mg/l | Ca کلسیم محلول در عصاره |
| ۸۴/۰ | mg/l | Mg منیزیم محلول در عصاره |
| ۱/۳۸ | % | Cu مس |
| ۷/۳۱ | % | Fe آهن |
| ۷/۹۹ | % | Mn منگنز |
| ۰/۰۱۴ | % | Zn روی |
| ۳۰ | | Fc درصد رطوبت مزرعه‌ای |

وزنی - وزنی (۲۵ گرم نفت خام در کیلوگرم خاک)، مقدار ۰/۳۸۹ لیتر از نفت خام بنگستان با دانسیته ۹۰۰ گرم بر لیتر به نسبت ۱ به ۳ در استون حل شد و به خاک اسپری گردید. مقدار نفت خام و استون مورد استفاده در جدول (۲) ارائه شده است.

۲.۲. آلوده‌سازی مصنوعی خاک

برای آلوده‌سازی مصنوعی خاک مورد مطالعه، نفت خام سبک از شرکت ملی پخش فرآورده‌های نفتی ایران تهیه گردید. خاک‌های جمع‌آوری شده را به صورت لایه نازکی درآورده و به خوبی کوبیده شدند. برای آلوده کردن ۱۴ کیلوگرم از خاک جمع‌آوری شده با غلظت ۲/۵ درصد

جدول ۲. نفت خام و استون مورد استفاده جهت آلوده کردن خاک

| درصد وزنی - وزنی آلودگی | نسبت نفت به استون | استون (L) | نفت خام (L) |
|-------------------------|-------------------|-----------|-------------|
| ۲/۵ | ۱ به ۳ | ۱/۱۶۴ | ۰/۳۸۹ |

نگهداری آب در خاک (FC) به طور منظم انجام گرفت. برای ایجاد شرایط یکسان محیطی، گلدان‌ها در طول تحقیق به طور تصادفی جابجا شدند.

۴.۲. اندازه‌گیری هیدروکربن نفتی کل خاک (TPH)

در پایان هر ماه و در چهار مرحله، نمونه‌های خاک با استفاده از اسپاتول از ناحیه ریزوسفر گیاهان و از تیمارهای مختلف برداشت و میزان TPH آن اندازه‌گیری گردید. روش تعیین مقدار هیدروکربن نفتی بر اساس روش استاندارد آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (EPA ۴۱۳،۱) انجام گرفت [۱۸]. به این صورت که یک گرم خاک با ۱۰ میلی‌لیتر دی‌کلرومتان مخلوط گردید و به مدت پنج دقیقه تکان داده شد تا نفت موجود در خاک توسط حلال جدا شد. مخلوط به دست آمده به مدت پنج دقیقه با دور ۳۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ گردید. از محلول رویی یک میلی‌لیتر برداشت شد و به ویال منتقل گشته و به مدت ۴۸ ساعت رها گردید. پس از این مدت وزن آنچه در ویال باقی مانده بود به‌عنوان TPH برحسب میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک تعیین شد. میزان هیدروکربن نمونه‌های خاک استخراج و با مقدار اولیه هر تیمار مقایسه و درصد تغییرات هر تیمار مشخص شد.

۵.۲. اندازه‌گیری فاکتورهای زیستی گیاهان

Dactylis glomerata و *Agropyron intermedium*

با توجه به اینکه جرم زیست‌توده گیاه می‌تواند در کارایی گیاه‌پالایی مؤثر واقع گردد [۳۲]، لذا در پایان

جهت یکنواخت شدن اجزای آلودگی در بافت خاک، به مدت یک ماه در دمای اتاق انکوباته گردید [۳۱]. بعد از دوره یک ماهه انکوباته، خاک غیر آلوده به نسبت‌های ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد با خاک آلوده مخلوط شد. مقدار یک کیلوگرم خاک از تیمارهای مختلف به گلدان‌های آزمایشی منتقل و از تیمارهای آماده شده به تعداد ۵ تکرار تهیه گردید. در این پژوهش، تیمار صفر درصد به‌عنوان تیمار شاهد در نظر گرفته شد. در ابتدای پژوهش و بعد از تهیه تیمارها در نسبت‌های معین، مقدار هیدروکربن اولیه هر تیمار تعیین و به‌عنوان TPH اولیه در نظر گرفته شد.

۳.۲. انتخاب گیاهان برای فرایند گیاه‌پالایی

با استناد به سوابق پژوهش‌های انجام گرفته، مطالعات کتابخانه‌ای و با توجه به معیارهای تعیین شده در انتخاب گیاهان مناسب برای گیاه‌پالایی، همانند ویژگی‌های مورفولوژی، سیستم ریشه‌ای، نحوه کشت، سرعت رشد و بومی بودن، در انجام پژوهش حاضر، دو گیاه مرتعی *Dactylis glomerata* و *Agropyron intermedium* انتخاب شدند. پس از تعیین گیاهان، بذر گیاهان مرتعی مورد استفاده در پژوهش حاضر، از شرکت پاکان بذر اصفهان تهیه شد. از بذره‌های گیاهان مرتعی *D.glomerata* و *Ag.intermedium* تهیه شده، به تعداد ۲۰ بذر سالم انتخاب و هر کدام در ۲۵ گلدان (۵ تیمار در ۵ تکرار) کاشته شد. بذره‌های آگروپایرون در عمق ۱/۵ تا ۲/۵ سانتی‌متری و بذره‌های علف باغ در عمق ۱ تا ۱/۵ سانتی‌متری خاک قرار گرفتند [۲۵]. به مدت ۴ ماه گلدان‌ها تحت شرایط دمایی 25 ± 5 درجه سانتی‌گراد در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه، قرار گرفتند. آبیاری به صورت ۲ تا ۳ بار در هفته در ۷۰ درصد ظرفیت

^۱ The U.S Environmental Protection Agency ۴۱۳،۱

زمان مورد نیاز برای تجزیه آلاینده با در نظر گرفتن جرم آلاینده باقیمانده در هر زمان خاص از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$t = -(\ln(y/y_0))/k \quad (3)$$

۲.۶.۲. مدل سینتیک درجه صفر

در مدل سینتیک درجه صفر، مقدار آلاینده تجزیه شده در مقابل زمان رسم شد.

$$y = kt \quad (4)$$

که در این رابطه، y مقدار آلاینده تجزیه شده بر حسب کیلوگرم بر کیلوگرم، k ثابت واکنش بر حسب یک بر روز و t زمان بر حسب روز است.

۳.۶.۲. مدل هیگوچی

در مدل هیگوچی مقدار آلاینده تجزیه شده در مقابل ریشه دوم زمان رسم گردید.

$$y = kt^{1/2} \quad (5)$$

که در این رابطه، y مقدار آلاینده تجزیه شده بر حسب کیلوگرم بر کیلوگرم، k ثابت واکنش بر حسب یک بر روز و t زمان بر حسب روز است.

۷.۲. تحلیل آماری داده‌ها

جهت تحلیل داده‌ها و بررسی اختلاف میانگین‌ها در تیمارهای مختلف از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۸ استفاده گردید. بدین صورت که مقایسه تغییرات مقادیر فاکتورهای جوانه‌زنی و فاکتورهای زیستی مربوط به هر کدام از گونه‌های *Agropyron intermedium* و *Dactylis glomerata* در قالب آزمون‌های تجزیه واریانس یکطرفه (ANOVA) انجام شد. مقایسه درصد تغییرات هیدروکربن‌های نفتی در دو گونه *Ag.intermedium* و *D.glomerata* با توجه به نرمال بودن داده‌ها، توسط آزمون t مستقل انجام گرفت.

تحقیق، گیاهان از خاک خارج شده و با آب شستشو داده شدند تا خاک از آن‌ها کاملاً جدا گردد. ارتفاع اندام هوایی گیاهان در تیمارهای مختلف با خط‌کش میلی‌متری اندازه‌گیری گردید. وزن تر ریشه و اندام هوایی با ترازوی دیجیتالی با دقت یک هزارم میلی‌گرم ثبت شد. ریشه و اندام هوایی گیاهان جدا شده و برای تعیین عملکرد ماده خشک گیاهی به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون قرار گرفتند. بعد از خشک شدن، مجدداً با همان ترازو توزین شدند.

۶.۲. تعیین مدل‌های ریاضی مناسب گیاه‌پالایی

برای شبیه‌سازی فرایند و همچنین محاسبه زمان لازم به منظور پالایش خاک، داده‌های حاصل از آنالیز TPH خاک در دوره‌های زمانی مشخص، با سه مدل سینتیک درجه اول، سینتیک درجه صفر و هیگوچی در نرم افزار Curve Expert ۱,۳ مورد برازش قرار گرفتند.

۱.۶.۲. مدل سینتیک درجه اول

مطابق روابط (۱) تا (۳) با استفاده از معادله سینتیک درجه اول سرعت تجزیه آلاینده‌های خاک و زمان مورد نیاز برای واکنش محاسبه گردید [۳۵،۱].

$$k = U/y. \quad (1)$$

که در این رابطه، k ثابت واکنش درجه اول بر حسب یک بر روز، U سرعت تجزیه آلاینده بر حسب $g/kgday/k$ و y میزان اولیه آلاینده بر حسب کیلوگرم بر کیلوگرم است.

$$y = y_0 \times e^{-kt} \quad (2)$$

که در این رابطه، y غلظت آلاینده باقیمانده بر حسب کیلوگرم بر کیلوگرم، y_0 غلظت آلاینده در زمان صفر بر حسب کیلوگرم بر کیلوگرم، k ثابت سرعت واکنش تجزیه بیولوژیکی درجه اول بر حسب یک بر روز و t زمان بر حسب روز است.

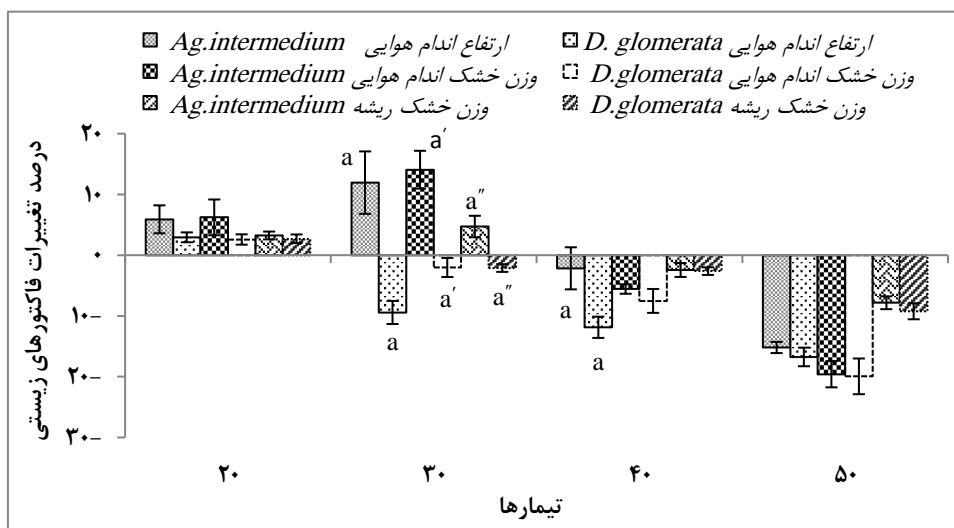
۳. نتایج

۱.۳. تغییرات فاکتورهای زیستی

نتایج حاصل از آنالیز تغییرات فاکتورهای زیستی دو گونه *Dactylis glomerata* و *Agropyron intermedium* در تیمارهای مختلف نشان می‌دهد که در تیمارهای ۳۰ و ۴۰ درصد بین ارتفاع اندام هوایی دو گونه تفاوت معنی‌دار وجود دارد. اثر تیمار ۳۰ درصد بر وزن خشک اندام هوایی و بین وزن خشک ریشه‌های هر دو گیاه مورد مطالعه در سطح آماری ۵ درصد معنی‌دار است.

تغییرات فاکتورهای زیستی دو گونه *D. glomerata* و *Ag. intermedium* در تیمارهای مختلف در شکل (۱) نشان داده شده است. ارتفاع، وزن خشک اندام هوایی و وزن خشک ریشه گیاه آگروپایرون در تیمارهای ۲۰ و ۳۰ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش

یافته است ولی در تیمارهای ۴۰ و ۵۰ درصد، کاهش پیدا کرد. گیاه داکتیلیس فقط در تیمار ۲۰ درصد نسبت به تیمار بدون آلودگی ارتفاع، وزن خشک اندام هوایی و وزن خشک ریشه بیشتری داشت و در تیمارهای دیگر با کاهش فاکتورهای زیستی مواجه شد. بیشترین درصد افزایش ارتفاع اندام هوایی، وزن خشک اندام هوایی و وزن خشک ریشه نسبت به تیمار شاهد، در گیاه آگروپایرون و در تیمار ۳۰ درصد به ترتیب به میزان ۱۱/۹۴٪، ۱۴/۰۷٪ و ۴/۷۲٪ مشاهده گردید. بیشترین درصد کاهش فاکتورهای زیستی نیز در گیاه داکتیلیس و تیمار ۵۰ درصد به ترتیب به میزان ۱۶/۷۵٪، ۱۹/۹۴٪ و ۹/۲۳٪ حاصل شد. در گیاه داکتیلیس، ارتفاع اندام هوایی ۲/۹۴٪، وزن خشک اندام هوایی ۲/۵۸٪ و وزن خشک ریشه ۲/۶۹٪ در تیمار ۲۰ درصد نسبت به شاهد افزایش داشت.



شکل ۱. میزان تغییرات فاکتورهای زیستی گیاهان *D. glomerata* و *Ag. intermedium* در تیمارهای مختلف آلودگی نفتی

هیدروکربن‌های نفتی در تیمارهای ۲۰ و ۳۰ درصد در زمان‌های مشخص از مدت پژوهش توسط دو گیاه *Dactylis glomerata* و *Agropyron intermedium* را نشان می‌دهد. با سپری شدن مدت انجام پژوهش، میزان هیدروکربن تجزیه شده توسط گیاهان آگروپایرون و

۲.۳. بررسی تغییرات TPH

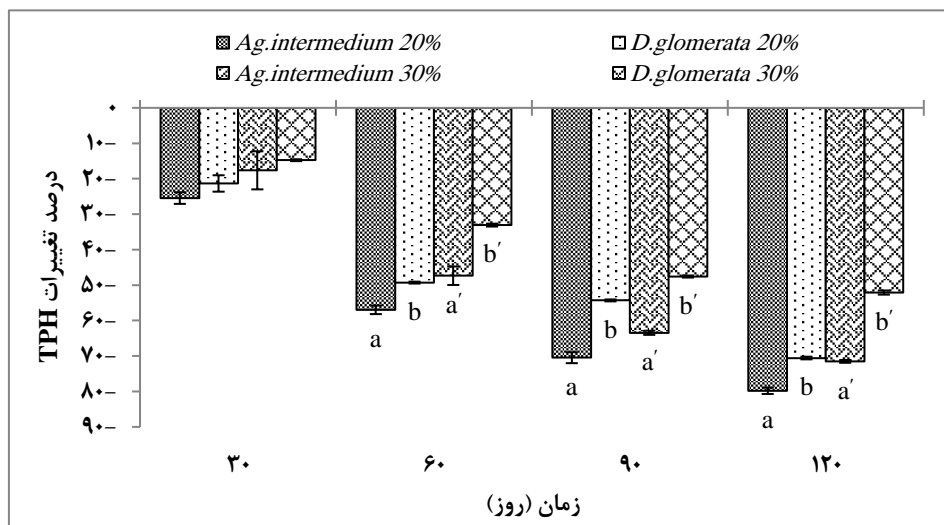
۱.۲.۳. بررسی تغییرات TPH در تیمارهای ۲۰ و ۳۰ درصد

۳۰ درصد

شکل (۲) نتایج حاصل از بررسی تغییرات

آگروپایرون و در تیمار ۲۰ درصد به ثبت رسید. گیاه آگروپایرون در مدت ۱۲۰ روز میزان TPH را در تیمار ۲۰ درصد، ۷۹/۸۱ درصد و در تیمار ۳۰ درصد ۷۱/۵۱ درصد کاهش داد. در این مدت، میزان تجزیه آلودگی نفتی خاک توسط گیاه داکتیلیس در تیمار ۲۰ درصد ۷۰/۵۷ درصد و در تیمار ۳۰ درصد، ۵۲/۱ درصد به ثبت رسید.

داکتیلیس افزایش یافت. تغییرات TPH بین دو گیاه در زمان‌های ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ روز معنی‌دار بود. در تمام دوره‌های زمانی، میزان تجزیه TPH توسط گیاه آگروپایرون در هر تیمار بیشتر از گیاه داکتیلیس بود. کمترین تغییر در ۳۰ روز اول با (۱۴/۷۶)٪ کاهش در غلظت هیدروکربن‌های نفتی در گیاه داکتیلیس و در تیمار ۳۰ درصد و بیشترین تغییر در روز ۱۲۰ ام با (۷۹/۸۱)٪ کاهش در مقدار آلودگی نفتی در گیاه



شکل ۲. مقایسه تغییرات TPH در تیمارهای ۲۰ و ۳۰ درصد بین گونه‌های *Dactylis glomerata* و *Ag.intermedium* در تیمارهای مختلف با استفاده از آزمون چنددامنه دانکن

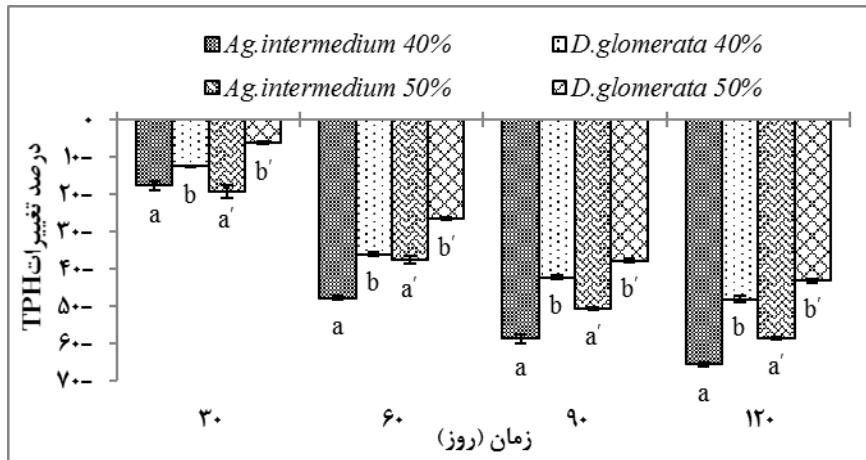
داکتیلیس بود. کمترین میزان کاهش در روز ۳۰ با (۶/۲۳)٪ در گیاه داکتیلیس و در تیمار ۵۰ درصد و بیشترین میزان کاهش در روز ۱۲۰ ام با (۶۵/۵۷)٪ در گیاه آگروپایرون و در تیمار ۴۰ درصد به ثبت رسید.

پس از پایان ۱۲۰ روز، در تیمار ۴۰ درصد، گیاه آگروپایرون ۶۵/۵۷ درصد و گیاه داکتیلیس ۴۸/۱ درصد از میزان هیدروکربن خاک را تجزیه کردند. در این مدت و در تیمار ۵۰ درصد، گیاه آگروپایرون ۵۸/۵۴ درصد و گیاه داکتیلیس ۴۳/۲۲ درصد از میزان هیدروکربن خاک را کاهش دادند.

۲.۲.۳. بررسی تغییرات TPH در تیمارهای ۴۰ و ۵۰ درصد

۵۰ درصد

میزان تغییرات TPH توسط دو گیاه *Agropyron intermedium* و *Dactylis glomerata* در زمان‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ روز در تیمارهای ۴۰ و ۵۰ درصد در شکل (۳) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تأثیر تمام دوره‌های زمان پژوهش، بر میزان تغییرات هیدروکربن‌های نفتی معنی‌دار بود. با گذشت زمان، هر دو گیاه *Ag.intermedium* و *Da.glomerata* مقدار هیدروکربن خاک را کاهش دادند که مقدار کاهش در تمام مدت پژوهش، توسط گیاه آگروپایرون بیشتر از گیاه



شکل ۳. مقایسه تغییرات TPH در تیمارهای ۴۰ و ۵۰ درصد بین گونه‌های *Ag.intermedium* و *D.glomerata* در تیمارهای مختلف با استفاده از آزمون چنددامنه دانکن

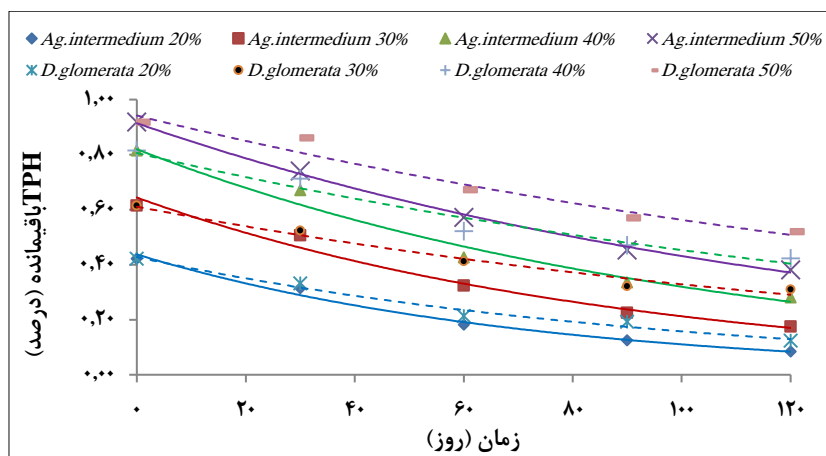
از مدل‌های یاد شده در جدول (۳) ارائه گردید. مطابق جدول (۳)، در تمامی تیمارهای دو گیاه *Dactylis glomerata* و *Agropyron intermedium* ضرایب همبستگی در مدل سینتیک درجه اول بالاترین مقدار و با کمترین خطای استاندارد حاصل شد. در این مدل، با افزایش غلظت آلودگی نفتی، مقادیر k ثابت سرعت واکنش در هر کدام از گیاهان مورد مطالعه، کاهش یافت. این مقدار در گیاه آگروپایرون، 0.133 بر روز در تیمار ۵۰ درصد و 0.076 بر روز در تیمار ۲۰ درصد به دست آمد. مقادیر ثابت سرعت واکنش در گیاه داکتیلیس، 0.098 بر روز در تیمار ۲۰ درصد و 0.051 بر روز در تیمار ۵۰ درصد حاصل شد. مقادیر $t_{1/2}$ نیمه عمر ماده آلاینده در مدل سینتیک درجه اول در هر یک از دو گیاه مورد مطالعه با افزایش درصد آلودگی نفتی، بیشتر شد. کمترین مقدار نیمه عمر ماده آلاینده در تیمار ۲۰ درصد، ۵۲ روز و در گیاه آگروپایرون و بیشترین آن در تیمار ۵۰ درصد با ۱۳۶ روز در گیاه داکتیلیس به دست آمد.

۳.۳. بررسی روند تجزیه نفت خام با استفاده از

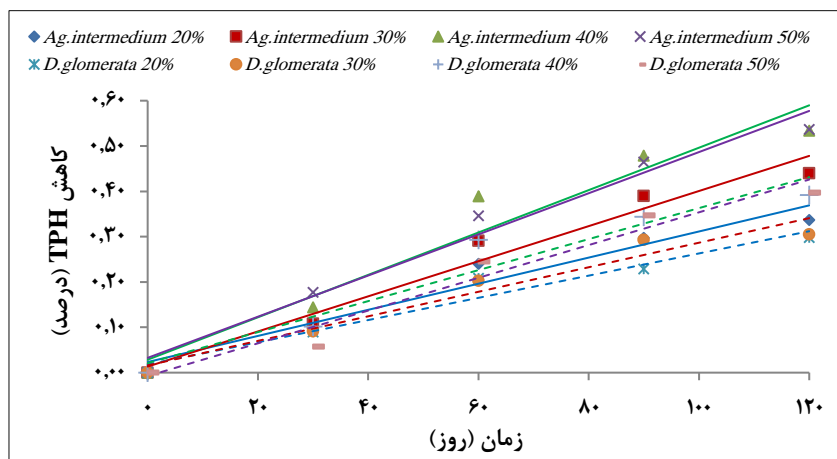
مدل‌های سینتیک

روند تجزیه TPH خاک در تیمارهای ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد توسط گیاهان *Agropyron intermedium* و *Dactylis glomerata* در مدل‌های سینتیک درجه اول، سینتیک درجه صفر و هیگوجی در شکل (۴) ارائه گردید. در مدل سینتیک درجه اول، نمودار درصد TPH باقیمانده در زمان رسم شد. در این مدل، مقدار هیدروکربن باقیمانده در تمام تیمارهای مربوط به گیاه آگروپایرون کمتر از گیاه داکتیلیس است. در مدل‌های سینتیک درجه صفر و هیگوجی، نمودار درصد کاهش TPH در زمان رسم شد. مطابق شکل، در همه تیمارها، درصد کاهش TPH توسط گیاه آگروپایرون بیشتر از گیاه داکتیلیس می‌باشد.

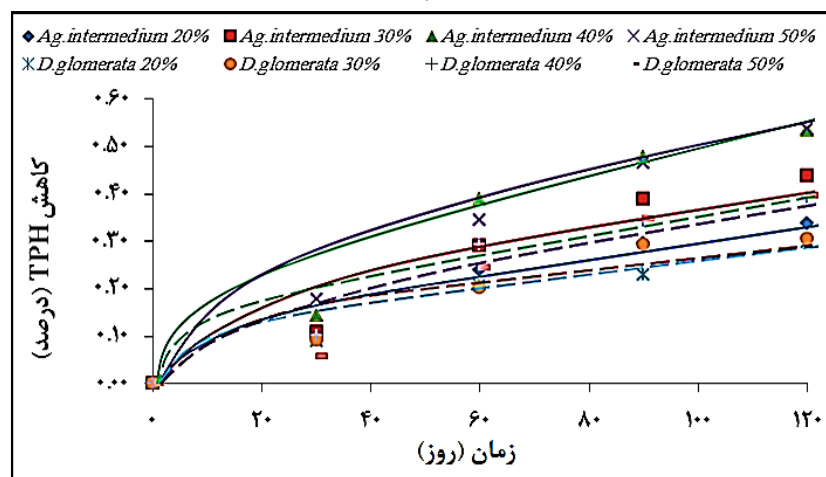
طبق نتایج حاصل از برازش داده‌های تجزیه TPH با سه مدل سینتیک درجه اول، سینتیک درجه صفر و هیگوجی، توابع و مقادیر ضرایب واکنش (ثابت سرعت واکنش)، ضرایب همبستگی و خطای استاندارد هر کدام



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴. (الف) منحنی سینتیک درجه اول، (ب) منحنی سینتیک درجه صفر و (ج) منحنی هیگوجی در تیمارهای مختلف دو گیاه *D.glomerata* و *Ag.intermedium*

جدول ۳. توابع و مقادیر مختلف k در مدل‌های مختلف دو گیاه *D. glomerata* و *Ag. intermedium*

| هیگوچی | سینتیک درجه صفر | سینتیک درجه اول | مدل | |
|--------------------|------------------------|---------------------------------|----------------|------------------------|
| | | | | تیمار ۲۰ درصد |
| $y = 0.03t^{0.5}$ | $y = 0.0244 + 0.0029t$ | $y = 0.432 \times e^{-0.0133t}$ | تابع | <i>Ag. intermedium</i> |
| ۰/۹۷ | ۰/۹۷ | ۰/۹۹ | ضریب همبستگی | |
| ۰/۰۲ | ۰/۰۳ | ۰/۰۱۷ | خطای استاندارد | |
| $y = 0.025t^{0.5}$ | $y = 0.018 + 0.00245t$ | $y = 0.426 \times e^{-0.0098t}$ | تابع | <i>D. glomerata</i> |
| ۰/۹۷ | ۰/۹۷ | ۰/۹۹ | ضریب همبستگی | |
| ۰/۰۳ | ۰/۰۳ | ۰/۰۱۸ | خطای استاندارد | |
| | | | | تیمار ۳۰ درصد |
| $y = 0.037t^{0.5}$ | $y = 0.005 + 0.0039t$ | $y = 0.642 \times e^{-0.0106t}$ | تابع | <i>Ag. intermedium</i> |
| ۰/۹۴ | ۰/۹۷ | ۰/۹۸ | ضریب همبستگی | |
| ۰/۰۶ | ۰/۰۵ | ۰/۰۴ | خطای استاندارد | |
| $y = 0.027t^{0.5}$ | $y = 0.016 + 0.0027t$ | $y = 0.617 \times e^{-0.0064t}$ | تابع | <i>D. glomerata</i> |
| ۰/۹۶ | ۰/۹۷ | ۰/۹۹ | ضریب همبستگی | |
| ۰/۰۳ | ۰/۰۳ | ۰/۰۲ | خطای استاندارد | |
| | | | | تیمار ۴۰ درصد |
| $y = 0.047t^{0.5}$ | $y = 0.028 + 0.0046t$ | $y = 0.83 \times e^{-0.0096t}$ | تابع | <i>Ag. intermedium</i> |
| ۰/۹۶ | ۰/۹۷ | ۰/۹۹ | ضریب همبستگی | |
| ۰/۰۶ | ۰/۰۶ | ۰/۰۳ | خطای استاندارد | |
| $y = 0.034t^{0.5}$ | $y = 0.021 + 0.0034t$ | $y = 0.816 \times e^{-0.0064t}$ | تابع | <i>D. glomerata</i> |
| ۰/۹۶ | ۰/۹۶ | ۰/۹۸ | ضریب همبستگی | |
| ۰/۰۵ | ۰/۰۵ | ۰/۰۳ | خطای استاندارد | |
| | | | | تیمار ۵۰ درصد |
| $y = 0.046t^{0.5}$ | $y = 0.032 + 0.0045t$ | $y = 0.91 \times e^{-0.0076t}$ | تابع | <i>Ag. intermedium</i> |
| ۰/۹۷ | ۰/۹۸ | ۰/۹۹ | ضریب همبستگی | |
| ۰/۰۴ | ۰/۰۴ | ۰/۰۱ | خطای استاندارد | |
| $y = 0.033t^{0.5}$ | $y = 0.036t - 0.0076$ | $y = 0.941 \times e^{-0.0051t}$ | تابع | <i>D. glomerata</i> |
| ۰/۹۲ | ۰/۹۷ | ۰/۹۸ | ضریب همبستگی | |
| ۰/۰۶ | ۰/۰۴ | ۰/۰۳ | خطای استاندارد | |

داد. ارتفاع اندام هوایی، وزن خشک اندام هوایی و وزن خشک ریشه گیاه *Agropyron intermedium* در تیمار ۲۰ درصد و گیاه *Dactylis glomerata* در تیمار ۳۰ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت. نتایج مشابهی

۴. بحث و نتیجه گیری

۱.۴. تغییرات فاکتورهای زیستی

مطابق نتایج، آلودگی نفتی موجود در خاک، فاکتورهای زیستی گیاهان مورد مطالعه را تحت تأثیر قرار

کاهش یافته است [۱۳]. مسمومیت ایجاد شده به سبب وجود آلاینده‌های نفتی در خاک و همچنین ایجاد محدودیت در رشد و توسعه ریشه و کاهش قابلیت جذب آب و عناصر غذایی، عوامل اصلی کاهش رشد و عملکرد ماده خشک گیاهی در خاک آلوده بوده است [۱۹].

۲.۴. بررسی تغییرات TPH

ارزیابی درصد تغییرات TPH توسط دو گونه *Dactylis glomerata* و *Agropyron intermedium* تحت زمان‌های مختلف نشان داد که در تمام تیمارها، دو گیاه مورد مطالعه میزان آلودگی نفتی خاک را کاهش دادند. مقدار کاهش آلودگی نفتی خاک به نوع گیاه و انتخاب صحیح آن بستگی دارد. به طوری که اختلاف معنی‌داری بین دو گیاه مورد مطالعه در کاهش غلظت هیدروکربن‌های نفتی دیده شد. گیاه *Ag. intermedium* به دلیل مقاومت بالا و عملکرد بهتر زیست‌توده گیاهی در فرایند گیاه‌پالایی مؤثرتر از گیاه *D. glomerata* عمل نمود. کارایی گیاه آگروپایرون در حذف مقادیر TPH خاک در تمامی تیمارها، بیشتر از گیاه داکتیلیس به ثبت رسید. ریشه گیاهان با ایجاد محیط و شرایط مناسب برای رشد و فعالیت میکروارگانیسم‌ها، منجر به کاهش آلاینده‌های نفتی خاک می‌گردد. نتایج مطالعه مقایسه گیاه‌پالایی گیاهان یونجه (*Medicago sativa*)، کتان (*Linum usitatissimum*) و *Agropyraon elongatum* نشان داد که گیاه آگروپایرون علاوه بر رشد بهتر از سایر گونه‌های مورد مطالعه، توانایی بیشتری در حذف آلاینده‌های نفتی دارد [۳۳]. در بررسی پاکسازی آلودگی نفتی خاک با کاشت سه گیاه جو (*Hordeum vulgare*)، ماش (*Vicia sativa*) و لوبیا (*Phaseolus vulgaris*) مشخص شد که گیاه جو با ۴۵/۷۸ درصد، بیشتر از گیاهان دیگر توانسته است میزان آلودگی خاک را کاهش دهد [۳۷]. در این راستا، تحقیقی که بر روی توانایی گیاه‌پالایی دو گیاه *Kochia scoparia* و *Linum usitatissimum* انجام شد، مقدار تجزیه هیدروکربن‌های نفتی به ترتیب

در مطالعه توانایی گیاه‌پالایی گونه *Polypogon monspeliensis* در پالایش خاک‌های آلوده به نفت نیز با افزایش ارتفاع اندام هوایی در تیمارهای ۱۰ و ۲۰ درصد و افزایش وزن تر و خشک ریشه در تیمارهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد، به دست آمد، که علت آن می‌تواند مرتبط با فعالیت بیشتر میکروارگانیسم‌های رایزوسفری این گیاه و در نتیجه افزایش جذب مواد معدنی از خاک باشد [۲۸]. در پژوهشی دیگر افزایش معنی‌دار میزان رشد گیاه علف گندمی بیابانی (*Agropyron desertorum*) در تیمار ۲۰ درصد نسبت به سایر تیمارهای تحت تأثیر هیدروکربن‌های نفتی گزارش شده است [۱۱] که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد. با افزایش غلظت مواد نفتی، در گیاه آگروپایرون و در تیمارهای ۴۰ و ۵۰ درصد و در گیاه داکتیلیس در تیمارهای بالای ۲۰ درصد، ارتفاع اندام هوایی، وزن خشک اندام هوایی و وزن خشک ریشه نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت. آلودگی‌های نفتی موجود در خاک و با غلظت‌های بالا، رشد گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تأثیرات فیزیکی نفت بر روی گیاهان شامل پوشاندن قسمت‌های هوایی گیاه شده و سدی در برابر اشعه‌های مورد نیاز فتوسنتز ایجاد می‌کند. همچنین ضمن پوشاندن سطح خاک، موجب عدم تهویه کامل خاک نیز می‌شود [۴]. *Agropyraon elongatum* در سطوح بالاتر آلودگی نفتی (بیش از ۱۰ درصد)، کاهش ارتفاع بوته، عملکرد ریشه و اندام هوایی آگروپایرون را به همراه داشت [۳۳]. به سبب حضور آلاینده‌های نفتی در خاک و ویژگی آب‌گریزی این ترکیبات، قابلیت دسترسی رطوبت و عناصر غذایی برای ریشه این گیاهان کاهش یافته و لذا سبب محدودیت رشد و استقرار ریشه در خاک‌های آلوده شده است [۷]. طبق نتایج حاصل از تحقیقات مشابه، اندام هوایی گیاهان ذرت (*Zea mays*) و سورگوم (*Sorghum bicolor*) در سطوح مختلف خاک آلوده به نفت خام سبک از ۶۰/۶ سانتی‌متر در تیمار شاهد به ۱۱/۳ سانتی‌متر در گیاه سورگوم نیز از ۴۵/۵ سانتی‌متر در تیمار شاهد به ۷ سانتی‌متر در تیمار ۲/۵٪

خاک را کاهش داد. از سویی دیگر با محاسبه $t_{1/2}$ ؛ نیمه عمر ماده آلاینده در مدل سینتیک درجه اول هر یک از تیمارهای دو گیاه مورد مطالعه مشاهده شد که حذف ۵۰ درصد آلاینده‌های نفتی، در تیمار ۲۰ درصد گیاه آگروپایرون و طی زمان ۵۲ روز رخ داد. در صورتی که این میزان کاهش آلودگی در گیاه داکتیلیس، در تیمار ۵۰ درصد و در طول ۱۳۶ روز اتفاق افتاد. به عبارتی دیگر با افزایش غلظت آلاینده‌های نفتی خاک، مدت زمان زیادی جهت پالایش خاک آلوده صرف خواهد شد که به نوع گیاه و عملکرد آن نیز بستگی دارد. نتایج تحقیق بر روی گیاه پالایی سرب توسط گیاهان نی، تیفا و برموداگراس و بررسی معادلات سینتیک، نشان داد که گیاه نی با ضریب ثابت واکنش بالاتر از دو گونه دیگر و نیمه عمر ماده آلاینده کمتر، کارایی بهتری در حذف آلودگی خاک نسبت به گونه‌های دیگر دارد [۴۰].

نتایج این پژوهش گویای آن است که وجود هیدروکربن‌های نفتی، متناسب با میزان غلظت آنها در خاک، موجب کاهش رشد و عملکرد ماده خشک اندام هوایی و ریشه دو گیاه *Agropyron intermedium* و *Dactylis glomerata* شد. با مقایسه رفتار دو گیاه مورد مطالعه در رشد زیست توده و تأثیر فاکتورهای زیستی در کاهش TPH و همچنین بررسی روند تجزیه مواد نفتی در تیمارها و دوره‌های زمانی مختلف و برآزش آن در مدل‌های سینتیک، می‌توان نتیجه گرفت که گیاه *Agropyron intermedium* نسبت به گیاه *Dactylis glomerata* توانایی بیشتری در گیاه‌پالایی هیدروکربن‌های نفتی خاک را دارد.

با توجه به اینکه گیاه‌پالایی نسبت به سایر روش‌های پاکسازی به زمان بیشتری نیاز دارد، لذا انتخاب مناسب گیاهان قوی و بومی با توجه به نوع سیستم ریشه‌ای آنها امری مهم تلقی می‌گردد. در صورت کشت گیاه آگروپایرون در اراضی همجوار با صنایع پتروشیمی، این گونه، نقش مؤثری در زدودن خاک‌های آلوده به مواد نفتی این مناطق خواهد داشت.

۸۷/۶۳ و ۶۵/۲۹ درصد گزارش گردید [۳۹]. در خاک‌های کشاورزی، *Agropyraon smithii* در مقایسه با *Festuca arundinacea* نقش مؤثرتری بر کاهش غلظت هیدروکربن‌های نفتی در تیمار زمین‌پالایی داشت [۷]. تولید سریع و بالای زیست توده، ریشه‌های وسیع و یک سیستم دفاعی قوی از جمله معیارهای کلی موفقیت یک گیاه در گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده می‌باشد [۳۴].

نفت خام با کاهش شاخص‌های رشد در گیاه، همچون ارتفاع، تعداد برگ، سطح برگ، کلروزیس و مرگ سلول‌های برگ، وزن خشک و تر گیاه، منجر به کاهش بیوماس ریشه می‌شود [۳۰] که در تحقیق حاضر، با افزایش غلظت آلاینده‌ها در خاک و تأثیر بر روی فاکتورهای زیستی دو گونه مورد مطالعه، میزان تجزیه هیدروکربن‌های نفتی نیز کاهش پیدا کرد. مطالعات پیشین در ارزیابی گیاه‌پالایی گیاه وتیور (*Vetiveria Zizanioides*) [۲۰] و گیاه جارو (*Bassia scoparia*)، کارایی بهتر حذف مواد نفتی را در غلظت‌های پایین آلاینده‌های نفتی گزارش کردند [۱۵].

۳.۴. بررسی روند تجزیه نفت خام با استفاده از

مدل‌های سینتیک

با مقایسه مقادیر ضریب همبستگی و خطای استاندارد مدل‌های مختلف در هر دو گونه *Dactylis glomerata* و *Agropyron intermedium* مشاهده گردید که مدل سینتیک درجه اول مناسب‌ترین مدل برای شبیه‌سازی روند تغییرات مقادیر TPH خاک می‌باشد. در مطالعه مشابهی که جهت بررسی مدل‌های سینتیک حذف آلودگی نفتی خاک در حضور گیاه ری‌گراس (*Lolium perenne*) انجام شد، بهترین برآزش با مدل سینتیک درجه اول صورت گرفت و ثابت سرعت واکنش و نیمه عمر ماده آلاینده به ترتیب ۰/۰۰۹۸ بر روز و ۷۱ روز به دست آمد [۱]. در پژوهش حاضر، مقادیر k ؛ ثابت سرعت واکنش مدل سینتیک درجه اول در تمام تیمارها، نشان داد که گیاه آگروپایرون با ضریب واکنش بالاتر نسبت به گیاه داکتیلیس، درصد بیشتری از TPH

References

- [۱] Abedi Koupai, J., Ghaheri, E., Eslamian, S.S. and Hosseini, H. (۲۰۱۳). Investigation the Kinetic Models of Biological Removal of Petroleum Contaminated Soil Around Oil Pipeline Using Ryegrass. Journal of Water & Wastewater, ۱, ۶۲-۶۸ (In Persian).
- [۲] Afzal, M., Khan, S., Iqbal, S. and Khan, Q.M. (۲۰۱۳). Plant-bacteria partnerships for the remediation of hydrocarbon contaminated soils. Chemosphere, ۹۰, ۱۳۱۷-۱۳۳۲.
- [۳] Agnello, A.C. (۲۰۱۴). Potential of alfalfa for use in chemically and biologically assisted phytoremediation of soil co-contaminated with petroleum hydrocarbons and metals. PhD thesis, University of Cassino studies and the Southern Lazio, ۲۴۸p
- [۴] Anigboro, A. and Tonukari, N. (۲۰۰۸). Effect of crude oil on invertase and amylase activities in Cassava leaf extract and germinating Cowpea seedlings. Asian Journal of Biological Sciences, ۱, ۵۶-۶۰.
- [۵] Askary Mehrabadi, M., Amini, F. and Sabeti, P. (۲۰۱۴). Evaluation of phytoremediation of petroleum hydrocarbon and heavy metals with using *Catharanthus roseus*. Iranian Journal of Plant Biology, ۶(۲۱), ۱۱۱-۱۲۶ (In Persian).
- [۶] Baah, B. (۲۰۱۱). Phytoremediation of hydrocarbon contaminated soil- a case study at newmont ghana gold limited - ahafo kenyasi, M.Sc. Thesis, Department of Environmental Science, Kwame Nkrumah University of Science and Technology, ۱۱۱p.
- [۷] Besalatpour, A.A., Hajabbasi, M.A., Dorostkar, V. and Torabi, GH. (۲۰۱۰). Reclamation of Petroleum-Contaminated Soils Using Combined Landfarming-Phytoremediation Method. Journal of Water and Soil Science, ۱۴(۵۳), ۱۲۹-۱۴۳ (In Persian).
- [۸] Daryabeigi Zand, A., Nabi Bidhendi, Gh., Mehrdadi, N. and Shirdam, R. (۲۰۱۱). The Influence of Petroleum Hydrocarbon Pollution on plant growth and efficiency of plants in hydrocarbon removal from soil. Journal of Environmental Science and Technology, ۱۲(۴), ۴۱-۵۷ (In Persian).
- [۹] Dhir, B. (۲۰۱۳). Phytoremediation: Role of Aquatic Plants in Environmental Clean-Up, Springer New Delhi Heidelberg New York Dordrecht London, Pp, ۱۰-۱۵.
- [۱۰] Doni, S., Macci, C., Peruzzi, E., Arenella, M., Ceccanti, B. and Masciandaro, G. (۲۰۱۲). In situ phytoremediation of a soil historically contaminated by metal, hydrocarbons and polychlorobiphenyls. Journal of Environment Monitoring, ۱۴, ۱۳۸۳-۱۳۹۰.
- [۱۱] Etemadi, N., Saraeian, Z., Haghghi, M., HajAbbasi, M. A. and Afyuni, M. (۲۰۱۵). The effects of petroleum contaminated soil on germination and morphophysiological characteristics of wheatgrass (*Agropyron desertorum*) for landscape design. Journal of Plant Process and Function, ۴(۱۱), ۸۷-۹۸ (In Persian).
- [۱۲] Etim, E. E. (۲۰۱۲). Phytoremediation and Its Mechanisms: A Review. International Journal of Environment and Bioenergy, ۲(۳), ۱۲۰-۱۳۶.
- [۱۳] Eze, C. N., Ugwu, C. C., Eze, E. A. and Eze, U. S. (۲۰۱۴). Evaluation of germination, shoot growth and rhizofungal flora of *Zea mays* and *Sorghum bicolor* in soil contaminated with varying levels of Bonny light crude oil. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, ۳(۱), ۲۵۳-۲۶۳.

- [۱۴] Gao, Y., Ling, W. and Wong, M. H. (۲۰۰۶). Plant-accelerated dissipation of phenanthrene and pyrene from water in the presence of a nonionic-surfactant. *Chemosphere*, ۶۳, ۱۵۶۰-۱۵۶۷.
- [۱۵] Hegazy, A.K., Moubasher, H.A., Mohamed, N.H., Moustafa, Y.M., Kabiell, H.F. and Hamad, A.A. (۲۰۱۵). Phytoremediation of soils polluted with crude petroleum oil using *Bassia scoparia* and its associated rhizosphere microorganisms. *International Biodeterioration & Biodegradation*, ۹۸, ۱۱۳-۱۲۰.
- [۱۶] <http://plants.usda.gov/core/profile?symbol=THIN6> (۲۰/۶/۲۰۱۶).
- [۱۷] <http://plants.usda.gov/core/profile?symbol=DAGL> (۲۰/۶/۲۰۱۶).
- [۱۸] Hutchinson S.L., Schwab A.P. and Banks M.K. (۲۰۰۱). Phytoremediation of Aged Petroleum Sludge: Effect of Irrigation Techniques and Scheduling. *Journal of Environmental Quality*, ۳۰, ۱۵۱۶-۱۵۲۲.
- [۱۹] Irajy Asiabadi, F., Mirbagheri, S.A. and Soleymani, M. (۲۰۱۶). Evaluation the Phytoremediation of Oil-contaminated Soils Around Isfahan Oil Refinery. *Journal of Water & Wastewater*, ۳, ۳۸-۴۷ (In Persian).
- [۲۰] Kardani M. and Takdastan, A. (۲۰۱۵). Removal of Total Petroleum Hydrocarbons Using *Vetiveria Zizanioides* and Microbial Population Changes in Soil Contaminated with Oil in Ahvaz. *Journal of Mazandaran University of Medical Sciences*, ۲۵(۱۳۱), ۸۷-۹۷ (In Persian).
- [۲۱] Khoramnejadian, Sh., Matinfar, F. and Khoramnejadian. Sh. (۲۰۱۳). Phytoremediation of petroleum hydrocarbons by native plants of Damavand region. *Global Journal of Medicinal Plant Research*, ۱(۱), ۸-۱۱.
- [۲۲] Krutz, L. J., Beyrouy, C. A., Gentry, T. J., Wolf, D. C. and Reynolds, C. M. (۲۰۰۵). Selective enrichment of a pyrene degrader population and enhanced pyrene degradation in Bermuda grass rhizosphere. *Biol Fertil Soils*, ۴۱, ۳۵۹-۳۶۴.
- [۲۳] Lu, G., Liao, Ch., Xu, W., Deng, F., Liang, X., Guo, Ch. and Dang, Zh. (۲۰۱۶). Biosurfactant-enhanced phytoremediation of soils contaminated by crude oil using maize (*Zea mays*. L). *Ecological Engineering*, ۹۲, ۱۰-۱۷.
- [۲۴] Masu, S., Popa, M., Morariu, F., Lixandru, B. and Popescu, D. (۲۰۱۴). Prospects of using leguminous species in phytoremediation of total petroleum hydrocarbons polluted soils. *Scientific Papers: Animal Science and Biotechnologies*, ۴۷(۱), ۱۷۲-۱۷۶.
- [۲۵] Mogimi, J. (۲۰۰۵). Introduction some of important rangeland species for improvement of Iranian rangelands, ۱st Edition, Arvan press, ۶۶۹p (In Persian).
- [۲۶] Moreira, I.T.A, Oliveira, O.M.C., Triguís, J.A., Dos Santos, A.M.P., Queiroz, A.F.S., Martins, C.M.S., Silva, A.C.S. and Jesus, R.S. (۲۰۱۱). Phytoremediation using *Rizophoramangle* L. in mangrove sediments contaminated by persistent total petroleum hydrocarbons (TPH's). *Microchemical Journal*, ۹۹, ۳۷۶-۳۸۲.
- [۲۷] Moreira, I.T.A, Oliveira, O.M.C., Triguís, J.A., Queiroz, A.F.S., Ferreira, S.L.C., Martins, C.M.S., Silva, A.C.S. and Falcao, B.A. (۲۰۱۳). Phytoremediation in mangrove sediments impacted by persistent total petroleum hydrocarbons (TPH's) using *Avicennia schaueriana*. *Marine Pollution Bulletin*, ۶۷, ۱۳۰-۱۳۶.
- [۲۸] Norouzihajiabdol, f., Farzamisepehr, M. and Farajzadeh, M.A. (۲۰۱۳). Phytoremediation Potential of *Polypogon monspeliensis* L. in remediation of petroleum polluted soils. *Journal of Plant Environmental Physiology*, ۸(۱), ۷۵-۸۷ (In Persian).

- [۲۹] Olsen, S.R. and Sommers, L.E. (۱۹۸۲). Phosphorus. In: Methods of soil analysis, Part ۲. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin (eds.). Pp, ۴۰۳-۴۳۱.
- [۳۰] Omosun, G., Markson, A.A. and Mbanasor, O. (۲۰۰۸). Growth and anatomy of *Amaranthus Hybridus* as affected by different crude oil concentrations. American-Eurasian Journal of Scientific Research, ۳(۱), ۷۰-۷۴.
- [۳۱] Parseh, I., Alavi Bakhtiarvand, S.N., Ahmadimoghadam, M. and Jafarzadeh, N. (۲۰۱۳). Greenhouse Assessment of Phytoremediation Efficiency for Petroleum Contaminants in Clay and Saline Soil. Journal of Health Services Research & Policy, ۸(۷), ۱۲۷۲-۱۲۷۹ (In Persian).
- [۳۲] Parseh, I., Alavi Bakhtiarvand, S.N., Ahmadimoghadam, M., Jafarzadeh, N., Chehrazhi, M. and Chorom, M. (۲۰۱۴). Assessment of Phytoremediation Efficiency on reducing oil hydrocarbons from clay-silt soil using *Aeluropus littoralis*. Iranian Journal of Health and Environment, ۷(۱), ۷۳-۸۴ (In Persian).
- [۳۳] Parvanak, K., Hosseini Boldaji, S.A. (۲۰۱۵). Evaluating Some Plant Species for the Refinement of Petroleum Sludge and their Growth Response to Petroleum Pollution, Quarterly Plant and Ecosystem, ۱۱(۴۴), ۴۳-۵۴ (In Persian).
- [۳۴] Rahnama, A. and Alaie, E. (۲۰۱۵). Phytoremediation, Principles and Applications, ۱st Edition, Research Institute of Petroleum Industry Press, ۶۴۴ p (In Persian).
- [۳۵] Schnoor, J. L. (۱۹۹۷). Phytoremediation. The University of Iowa, Department of Civil and Environmental Engineering and Center for Global and Regional Environmental Research, ۳۷p.
- [۳۶] Schuler, L. and Behling, H. (۲۰۱۱). Poaceae pollen grain size as a tool to distinguish past grasslands in South America: a new methodological approach. Vegetation History and Archaeobotany, ۲۰, ۸۳-۹۶.
- [۳۷] Seyed Alikhani, S., Shorafa, M., Tavassoli, A. and Ebrahimi, S.S. (۲۰۱۱). The Effect of Plants' Growth at Different Densities on Soil Petroleum Hydrocarbons Remediation. Journal of Water and Soil, ۲۵(۵), ۹۶۱-۹۷۰ (In Persian).
- [۳۸] Shahsavari, E., M.Adetutu, E., Taha, M. and S.Ball, A. (۲۰۱۵). Rhizoremediation of phenanthrene and pyrene contaminated soil using wheat. Journal of Environmental Management, ۱۵۵, ۱۷۱-۱۷۶.
- [۳۹] Shirdam, R., Daryabeigi Zand, A., Nabi bidhendi, G.R. and Mehrdadi, N. (۲۰۰۹). Removal of Total Petroleum Hydrocarbons (TPHs) from Oil-Polluted Soil in Iran. Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering, ۲۸(۴), ۱۰۵-۱۱۳.
- [۴۰] Taheri ghannad, S. and Afrous, A. (۲۰۱۶). Kinetic equations for the biological removal of lead from industrial wastewater using indigenous species of aquatic plants in Khuzestan. Journal of Environmental Studies, ۴۱(۴), ۸۶۷-۸۷۸ (In Persian).
- [۴۱] Tang, j., Lu, X., Sun, Q. and Zhu, W. (۲۰۱۲). Aging effect of petroleum hydrocarbons in soil under different attenuation conditions. Agriculture, Ecosystems and Environment, ۱۴۹, ۱۰۹- ۱۱۷.
- [۴۲] Van Epps, A. (۲۰۰۶). Phytoremediation of Petroleum Hydrocarbons, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, ۱۷۱p.
- [۴۳] Walkley, A. and Black, I.A. (۱۹۳۴). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science, ۳۷, ۲۹-۳۸.