

Bioremediation of n-Hexadecane Contaminated Soils Using Pseudomonas aeruginosa Bacteria Isolated from Coastal Areas

Taherh Tayybi¹,
Sahand Jorfi²,
Shokuh Ghaffari³,
Raheleh Kujlu⁴

¹ BSc Student in Environmental Health Engineering, Student Research Committee, Ahvaz Jundishapur University of Medical Sciences, Ahvaz, Iran

² Assistant Professor, Department of Environmental Health Engineering, Environmental Technologies Research Center, Ahvaz Jundishapur University of Medical Sciences, Ahvaz, Iran

³ PhD in Virology, Health Research Institute, Infectious and tropical Disease Research Center, Ahvaz Jundishapur University of Medical Sciences, Ahvaz, Iran

⁴ MSc Student in Environmental Health Engineering, Ahvaz Jundishapur University of Medical Sciences, Ahvaz, Iran

(Received February 21, 2016 ; Accepted June 11, 2016)

Abstract

Background and purpose: Soil pollution to hydrocarbons in oil field zones in southern Iran and areas close to oil and gas transportation pipe lines is a major environmental problem. The current study aimed at determining the efficiency of bioremediation of n-Hexadecane contaminated soil as a model contaminant.

Materials and methods: Aged hydrocarbon contaminated soils were used as the origin of bacteria isolation. Isolation of n-Hexadecane degrading bacteria was carried out through enrichment in mineral salt medium and incubation in 31 °C in shaker incubator at 150 rpm by repetitive cultures during 6 consecutive refreshing. Finally, two pure strains were isolated and identified by PCR. Bioremediation of initial n-Hexadecane concentrations of 500, 1000 and 5000 mg/kg was investigated in eight weeks.

Results: Two *Pseudomonas aeruginosa* strains capable of n-Hexadecane biodegradation were isolated. The removal efficiencies at the end of day 56 for n-Hexadecane initial concentrations of 500, 1000 and 5000 mg/kg were 93.6%, 87.5%, and 69.62%, respectively.

Conclusion: Isolated *Pseudomonas aeruginosa* bacteria demonstrated high n-Hexadecane biodegradation potential in soil and also biosurfactant production, therefore, they could be used for bioremediation of hydrocarbon contaminated soils.

Keywords: bioremediation, soil pollution, n-Hexadecane, *Pseudomonas aeruginosa*

J Mazandaran Univ Med Sci 2016; 26(140): 127-136 (Persian).

شناسایی باکتری‌هایی با قابلیت تجزیه آلاینده‌های نفتی و ماندگاری در خاک آلوده به یک چالش تحقیقاتی تبدیل شده است. با وجود انجام تحقیقات اصلاح زیستی متعدد، تاکنون مطالعات اندکی مبنی بر کاربرد گونه‌های باکتریایی جداسازی شده از نواحی ساحلی جنوب استان نفت خیز خوزستان و کاربرد آن در تجزیه n-هگزادکان به عنوان آلاینده مدل در خاک‌های ریزدانه مناطق جنوبی شامل بندر امام خمینی انجام شده است. در میان انواع خاک‌های مورد مطالعه برای اصلاح زیستی آلاینده‌های هیدروکربنی، تمرکز بر خاک‌های با درصد بالای ذرات ریزدانه رسی محدود بوده است. ذرات رس اغلب دارای بار سطحی منفی بوده و جاذب‌های مناسبی برای آب و یون‌ها به شمار می‌روند. به دلیل سطح ویژه بالا، برخی آلاینده‌های محیطی را به شدت جذب کرده و نسبت به فرآیندهای اصلاح محیطی مقاومت نشان می‌دهند. از این رو، حذف مؤثر آلاینده هیدروکربنی از خاک‌هایی که دارای درصد قابل توجهی رس هستند (در حدود ۵۰-۲۰ درصد) به عنوان یک اولویت تحقیقاتی مطرح است. در میان انواع میکروارگانیسم‌های دارای قابلیت تجزیه n-هگزادکان، گونه‌های پسودوموناس به عنوان یکی از کارآمدترین باکتری‌ها با قابلیت مصرف این ترکیب به عنوان یگانه منبع کربن و انرژی شناخته شده‌اند (۹۸). اصلاح زیستی خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی به روش‌های زیستی به وسیله محققان دیگر بررسی شده است. تکدستان و کردانی (۲۰۱۵) حذف کل هیدروکربن‌های نفتی از خاک را به وسیله گیاه ویتور در منطقه اهواز مطالعه کردند (۱۰).

حسینی پناه و تکدستان (۲۰۱۶) اصلاح کننده‌های حفاری آلوده به هیدروکربن‌های نفتی را با استفاده از کرم خاکی مطالعه نمودند (۱۱). رضایی کلاتتری و همکاران (۲۰۱۳) بهبود اصلاح زیستی خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای را با استفاده از مواد هیومیکی مطالعه نمودند (۱۲). در پژوهش فعلی، نمونه‌برداری از سواحل، رسوبات و خاک دارای سابقه

خاک شناسایی شده‌اند (۲). از آن‌جا که n-alkanes ملکول‌های غیرقطبی فاقد گروه‌های عاملی هستند، از جنبه شیمیایی بسیار خنثی بوده و برای فعال‌سازی نیازمند انرژی خارجی هستند. میکروارگانیسم‌ها با بهره‌گیری از آنزیم‌ها و مسیرهای تجزیه متابولیکی می‌توانند n-alkanes را به عنوان منبع انرژی و کربن مصرف نمایند (۳). لکن تجزیه طبیعی آن‌ها به دلیل حلالیت پایین در آب و تمایل اندک به غشای دیواره سلولی بسیار کند است. از این رو چگونگی تهییج میکروارگانیسم‌ها به بهبود قابلیت‌های تجزیه n-آلکان‌ها بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته است (۴). n-هگزادکان به عنوان یک هیدروکربن آلیفاتیک دارای زنجیره متوسط ($C_{16}H_{34}$) یک ترکیب نماینده هیدروکربن‌های آلیفاتیک موجود در نفت و یک جزء عمده موجود در گازوئیل است. این ترکیب به دلیل حلالیت اندک در آب (۰/۹ میکروگرم بر لیتر در آب مقطر) و قابلیت تجزیه پذیری از طریق مسیرهای متابولیکی، به عنوان آلاینده مدل این پژوهش انتخاب شده است. روش‌های اصلاح فیزیکی، شیمیایی و زیستی مختلفی برای آلودگی زدایی از خاک آلوده پیشنهاد و اجرایی شده‌اند. روش‌های زیستی به دلیل قابلیت سازگاری بهتر، ارزان بودن، پویایی دینامیکی و بازده قابل قبول در بازه‌های زمانی میان مدت و بلندمدت به عنوان گزینه ارجح بسیاری از متخصصان برای حذف آلاینده‌های خطرناک مدنظر قرار می‌گیرند (۵). روش‌های اصلاح زیستی در قالب تحریک زیستی یا افزایش زیستی به صورت فناوری‌های در محل نظیر تهویه زیستی، زیست افشانی هوا، اصلاح گیاهی و لندفارمینگ یا فناوری‌های خارج از محل شامل کمپوست، توده‌های زیستی یا زیست راکتورهای دوغابی مورد مطالعه قرار گرفته و اجرایی شده‌اند (۶،۷). با این وجود اصلاح زیستی در محل با مشکلاتی نظیر زمان طولانی مورد نیاز به دلیل فقدان میکروارگانیسم‌های توانمند و شکست سوبه باکتریایی تلقیح شده در رقابت میکروارگانیسم‌های بومی به هنگام کاربردهای عملی مواجه است. لذا جداسازی و

آلودگی به هیدروکربن‌های نفتی در بندر امام خمینی با هدف جداسازی سویه‌های سودوموناس تجزیه کننده n-هگزادکان و تعیین اثر عوامل مؤثر بر تجزیه n-هگزادکان به‌عنوان هدف اصلی این پژوهش تعریف گردید.

مواد و روش‌ها

مواد

مواد شیمیایی مورد استفاده در پژوهش به شرح زیر است که از شرکت‌های مرک، فلوکا و دکتر مجللی خریداری شده و همگی دارای درجه آزمایشگاهی بوده‌اند: استون، متانول، نوترینت برات، نوترینت آگار، آگار، n-هگزان، n-هگزادکان، عصاره مخمر، NaCl، K_2HPO_4 ، $\text{CuSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ، NH_4NO_3 ، KH_2PO_4 ، $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ، $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ، $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ، Na_2MoO_4 ، $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ، H_3BO_3 ، $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ، $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

محیط کشت

محیط کشت نمکی (MSM) مورد استفاده شامل (g/L) K_2HPO_4 ۶/۳، KH_2PO_4 ۱/۸، عصاره مخمر ۱، $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ۰/۱، $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ۰/۱، $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ۰/۱، $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ۰/۱ و ۱ میلی‌لیتر محلول عناصر جزئی بود. ترکیب محلول عناصر جزئی متشکل از (g/L): H_3BO_3 ۰/۰۳، $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ۰/۰۱، $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ۰/۰۲، NaMoO_4 ۰/۰۰۶، $\text{CuSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ۰/۰۱ بود (۱۳). pH همه محلول‌ها با استفاده از محلول‌های اسید کلریدریک و هیدروکسید سدیم بر روی ۷ تنظیم (اندازه‌گیری به وسیله pH متر دیجیتال مارک Hack) و کلیه محیط‌های کشت استریل شدند. n-هگزادکان با خلوص ۹۸ درصد از مرک خریداری شده و به عنوان یگانه منبع کربن و انرژی به میزان ۵ درصد حجمی / حجمی به محیط‌های کشت اضافه شد.

جداسازی باکتری‌های تجزیه کننده n-هگزادکان

جداسازی و غنی‌سازی باکتری‌های تجزیه کننده پیرن بر اساس روش جرفی و همکاران (۲۰۱۳) انجام

شد (۱۴). به‌طور خلاصه ۱۰ گرم خاک آلوده از مناطق نفتی آلوده جنوب ایران به آزمایشگاه منتقل و بخشی از آن به یک ارلن مایر ۲۵۰ میلی‌لیتری حاوی ۱۰۰ میلی‌لیتر محیط کشت معدنی بافر فسفات‌اضافه و به مدت ۱۰ دقیقه به وسیله یک همزن مغناطیسی به شدت هم زده شد. سپس ته نشین شده و فاز محلول روئین آن به عنوان منبع جداسازی باکتری در نظر گرفته شد. در ادامه ۵ میلی‌لیتر از این فاز محلول روئین به یک ارلن ۲۵۰ میلی‌لیتری حاوی ۹۵ میلی‌لیتر محیط کشت معدنی نمکی استریل منتقل گردید. ارلن‌های حاوی محیط کشت در دمای ۳۱ درجه سانتی‌گراد بر روی یک شیکر انکوباتور با دور rpm ۱۵۰ به مدت ۷ روز گرماگذاری شدند. رشد با پیش جذب در OD_{600} پایش شد. پس از ۷ روزه ۵ میلی‌لیتر از محیط‌های محلول غنی‌سازی به ارلن مایرهای تازه و استریل حاوی محیط کشت معدنی به علاوه n-هگزادکان اضافه شد.

این عمل به مدت شش هفته تداوم یافت. برای جداسازی گونه‌های خالص تجزیه کننده n-هگزادکان، ۱ میلی‌لیتر از فاز محلول روئین کشت در انتهای هفته ششم، تا 10^{-4} ترقیق و بر روی محیط کشت جامد اختصاصی (n-هگزادکان + آگار + محیط کشت معدنی) کشت داده شد. این محیط‌های کشت به مدت ۴۸ تا ۷۲ ساعت در انکوباتور با دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد گرماگذاری شدند. کلونی نشان دهنده رشد قابل توجه بر روی محیط کشت اختصاصی به عنوان گونه‌های تجزیه کننده n-هگزادکان انتخاب و در اسلنت نوترینت آگار در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. دو گونه خالص با کدهای S₁ و S₂ برای مرحله اصلاح زیستی انتخاب شدند.

شناسایی باکتری‌ها

شناسایی اولیه گونه‌های S₁ و S₂ براساس روش‌های فوتوایبی شامل نتایج مثبت آزمون‌های کاتالاز و اکسیداز، رشد در دمای ۴۲ درجه سانتی‌گراد، همولیز بتا در محیط بلاد آگار، تولید پیگمان سبز-آبی در

محیط نوترینت آگار، بوی خاص کلونی‌ها و مشاهده میکروسکوپی باسیل‌های گرم منفی فاقد اسپور انجام شد (۱۵). به منظور شناسایی قطعی سویه‌ها، DNA باکتری به روش boiling استخراج گردید. در ابتدا یک کلونی از باکتری در ۲۰ میکرولیتر آب دیونیزه به شکل سوپانسون در آورده شد و به مدت ۱۵ دقیقه در ۹۵ درجه سانتی‌گراد در ترموسایکلر قرار گرفت. سپس با دور rpm ۱۰۰۰۰ به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ گردید و محلول رویی که حاوی DNA باکتری بود، برای PCR استفاده شد. PCR با استفاده از پرایمرهای عمومی RD1 و FD1 به منظور تکثیر ژن 16s rna به طول تقریبی ۱۵۰۰ جفت باز صورت گرفت. پس از تکثیر، محصول PCR جهت تعیین توالی به شرکت Bioneer کره جنوبی ارسال گردید (۱۶).

آماده سازی خاک

نمونه خاک از نواحی مجاور پتروشیمی بندر امام خمینی در جنوب استان خوزستان و از لایه‌های ۱ تا ۲۰ سانتی‌متری عمق خاک برداشته شد. این نمونه از الک با مش ۲ عبور داده شد و به منظور استخراج ترکیبات آلی احتمالی، سه مرتبه با استون شسته و در معرض هوای محیط خشک گردید. سپس اتوکلاو شده و در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد در یخچال نگهداری شد. برای آلوده‌سازی خاک به غلظت ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۵۰۰۰ mg/kg n-هگزادکان در n هگزان انحلال داده شده و پس از عبور از صافی PTFE، به وسیله سرنگ به نمونه‌های خاک (۲۰ گرم خاک) تزریق شد. نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در زیر هود و در شرایط استریل نگه داشته شده تا حلال n-هگزان کاملاً تبخیر گردد (۱۷).

اصلاح زیستی

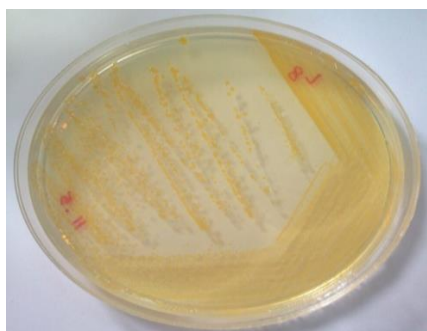
همه مطالعات به صورت ناپیوسته در ارلن مایرهای ۲۵۰ میلی‌لیتری انجام شد. به هر ارلن مایر، ۲۰ گرم خاک از پیش آماده شده، ۱۰۰ میلی‌لیتر محیط کشت معدنی، ۵ میلی‌لیتر بذر میکروبی با $OD_{600} = 1$ (کنسرسیون

مخلوطی از ۲ گونه خالص جداسازی شده تجزیه کننده n-هگزادکان) اضافه گردید. سپس نمونه‌ها در دمای ۳۱ درجه سانتی‌گراد بر روی شیکر انکوباتور با دور rpm ۱۵۰ قرار گرفتند. پیش از گرماگذاری نمونه‌ها، pH آن‌ها با استفاده از محلول‌های اسید کلریدریک و هیدروکسید سدیم بر روی 7 ± 0.2 تنظیم شد. نمونه‌های شاهد شامل نمونه‌های فاقد جرم باکتریایی بودند. نمونه‌ها به مدت ۵۶ روز، هر هفته یک مرتبه مورد پایش قرار گرفتند. با توجه به تناوب پایش هفته‌ای یک بار، سه سطح غلظتی و یک نمونه کنترل (در مجموع چهار نمونه) و کل دوره پایش ۵۶ روز، این مطالعه در مجموع شامل ۳۲ نمونه برای سنجش n-هگزادکان و نیز ۳۲ نمونه برای پایش تغییرات دانسیته باکتریایی بود. با لحاظ کردن سه تکرار به ازای هر نمونه، مجموع کل نمونه‌های سنجش n-هگزادکان، ۹۶ عدد بود.

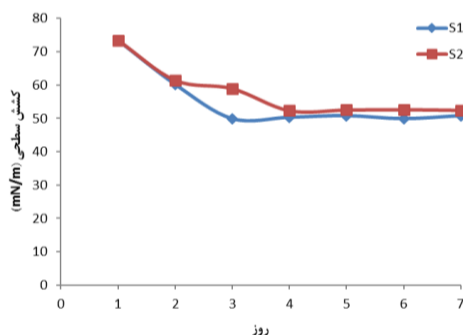
روش‌های آزمایشگاهی

تغییرات دانسیته باکتریایی به روش محتمل‌ترین تعداد (MPN) پایش گردید (۱۴، ۱۸). استخراج n-هگزادکان از خاک و سنجش آن به وسیله دستگاه GC-FID بر اساس روش 350°C آژانس حفاظت محیط زیست امریکا به ترتیب زیر انجام شد. روش شامل توزین ۳ گرم خاک اصلاح شده به روش زیستی و سه مرتبه استخراج به مدت ۳۰ دقیقه با شیکینگ با دور rpm ۱۸۰ و در ادامه اولتراسونیک به مدت ۱۰ دقیقه و استفاده از مخلوط حلال تری‌کلرواتان و متانول (۱:۲ حجمی/حجمی) بود. آنالیز n-هگزادکان از طریق آنالیز کروماتوگرافی گازی (Chrompack CP 9001) مجهز به دتکتور یونیزاسیون شعله (FID) و برخوردار از ستون کاپیلاری HP5 (۳۰ متر \times 0.32×0.25 میکرومتر) تعیین شد. دمای ستون با نرخ ۱۵ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه از ۶۰ به ۲۹۰ درجه سانتی‌گراد افزایش داده شد و به مدت ۵ دقیقه در این دما نگه داشته شد. دمای انژکتور و دتکتور به ترتیب بر روی ۲۴۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد

مخلوط کشت مایع سویه S1 در روز ۳ به $49/9$ mN/m و سویه S2 در روز چهارم به $52/3$ mN/m کاهش یافت.



تصویر شماره ۱: کشت‌های خالص باکتری‌های پseudomonas آئروژینوزا جداسازی شده دارای قابلیت تجزیه n-هگزادکان، الف) سویه S1 و ب) سویه S2



نمودار شماره ۱: تغییرات کشش سطحی کشت‌های خالص سویه‌های S1 و S2 گونه‌های پseudomonas آئروژینوزا

بازده حذف n-هگزادکان

بازده حذف حذف n-هگزادکان در انتهای روز ۵۶ به ازای غلظت‌های اولیه ۵۰۰، ۱۰۰۰ و 5000 mg/kg به ترتیب ۹۳/۶ درصد، ۸۷/۵ درصد و ۶۹/۶۲ درصد بود (نمودار شماره ۲). به عبارت دیگر میزان n-هگزادکان تجزیه شده به ازای غلظت اولیه 100 mg/kg معادل

تنظیم شدند (۲۰، ۱۹). نوع خاک با آنالیز دانه‌بندی و عناصر موجود در خاک از طریق آنالیز فلورسنس اشعه ایکس (XRF) تعیین گردیدند. دستگاه XRF با مارک فیلیپس و مدل PW2404 ساخت کشور هلند بود.

یافته‌ها

نوع خاک

نمونه خاک انتقالی حاوی $41/9$ درصد رس، $40/7$ درصد سیلت و $17/4$ درصد ماسه با تخلخل $24/7$ درصد و از نوع رسی-سیلانی بود. نتایج آنالیز XRF برای شناسایی اجزاء موجود در خاک در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

جدول شماره ۱: مشخصات فیزیکی و شیمیایی نمونه خاک مورد استفاده در پژوهش دست آمده از آنالیز XRE

شاخص	میزان (درصد)	شاخص	میزان (درصد)
ماسه	۴۱/۹	SiO ₂	۵۹/۱۵
رس	۴۰/۷	P ₂ O ₅	۰/۱۸
سیلت	۱۷/۴	K ₂ O	۳/۳۵
تخلخل	۲۱/۳	CaO	۸/۵۲
رطوبت	۱۱/۰۹	TiO ₂	۰/۳۱
L.O.I	۹/۲۶۲	Fe ₂ O ₃	۲/۶۸۵
Na ₂ O	۱/۷۳	Cu	۰/۰۸۲
MgO	۱/۱۵	Sr	۰/۰۲۳
Al ₂ O ₃	۱۳/۵۵	Zr	۰/۰۰۸

نوع باکتری‌ها

آنالیز نتایج تعیین توالی با استفاده از پایگاه اطلاعات NCBI و blastn نشان داد که سویه‌های S1 و S2 قطعاً به جنس پseudomonas گونه آئروژینوزا تعلق دارند و قرابت ژنتیکی آن‌ها با سایر سویه‌های پseudomonas آئروژینوزا به ترتیب ۹۸ و ۹۹ درصد می‌باشد. تصاویر کشت‌های خالص در تصویر شماره ۱ نشان داده شده است.

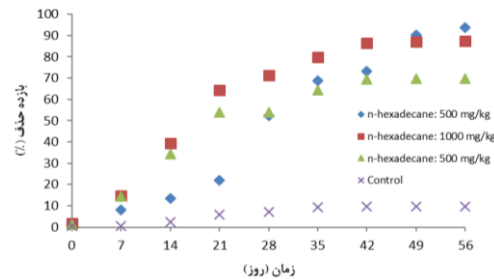
قابلیت تولید بیوسورفکتانت

پتانسیل تولید بیوسورفکتانت کشت‌های خالص سویه‌های S1 و S2 پseudomonas آئروژینوزا با اندازه‌گیری تغییرات کشش سطحی به عنوان شاخص از حضور بیوسورفکتانت در کشت‌های خالص هر سویه پایش گردید (نمودار شماره ۱). کم‌ترین مقادیر کشش سطحی

بحث

کشت مخلوط باکتریایی مشتمل بر دو سویه پسودوموناس آئروژینوزا با کدهای S1 و S2 برای تجزیه زیستی n-هگزادکان مورد استفاده قرار گرفت. در پژوهش فعلی بازده حذف n-هگزادکان به ازای غلظت های اولیه ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۵۰۰۰ mg/kg به ترتیب ۹۳/۶ درصد، ۸۷/۵ درصد و ۶۹/۶۲ درصد پس از ۵۶ روز واکنش زیستی بود که بسیار بیش تر از مقدار ۹/۸ درصد به دست آمده در نمونه های شاهد بود. بازده حذف به موازات افزایش غلظت اولیه n-هگزادکان کاهش یافت، لکن میزان کلی بار حذف شده در غلظت های بالاتر بسیار بیش تر است. تجمع بار سمی متابولیت های واسطه تولیدی، کیمیت بالای بار اولیه آلی، کمبود دانسیته باکتریایی اولیه به ازای غلظت های بالاتر n-هگزادکان و فقدان زمان کافی برای متابولیسم و تکثیر بار باکتریایی مورد نیاز و نیاز به زمان واکنش بالاتر از علل کاهش بازده حذف در زمان واکنش مساوی به ازای غلظت های اولیه n-هگزادکان متفاوت بود. در مطالعه ای به وسیله پرتوی نیا و همکاران (۲۰۱۰)، بازده حذف n-هگزادکان با غلظت اولیه ۱۰۰۰۰ mg/kg در یک بیوراکتور دوغابی با استفاده از باکتری های غنی سازی شده بر اساس TOC پس از ۹ روز ۵۴ درصد بود که با غلظت های اولیه ۵۰۰۰ mg/kg در مطالعه فعلی قابل مقایسه است (۲۱). n-هگزادکان یک آلایندة فاز غیر آبی به شمار رفته و با توجه به ضرورت محلول بودن آلایندة برای تجزیه باکتریایی، یکی از دلایل احتمالی حذف و تجزیه n-هگزادکان در نمونه های خاک آلوده، علاوه بر انحلال بسیار جزئی n-هگزادکان، تولید ترکیبات پلیمری خارج سلولی (EPS) از این باکتری ها و نیز انتشار آن ها در محلول واکنش پس از مرگ این باکتری ها باشد. این امر به افزایش دسترسی زیستی به آلایندة آبگریز کمک می نماید، هر چند که خصوصیات این EPS ها شامل غلظت بحرانی میسلوم، شاخص امولوسیون کنندگی و

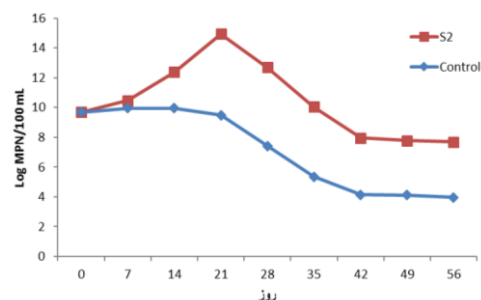
۹۳/۶ mg/kg، به ازای غلظت اولیه ۱۰۰۰ mg/kg معادل ۸۷/۵ mg/kg و به ازای غلظت اولیه ۵۰۰۰ mg/kg معادل ۳۴/۸۱ mg/kg بود. بازده حذف در نمونه شاهد فاقد بذر باکتریایی تنها ۹/۸ درصد بود.



نمودار شماره ۲: تغییرات بازده حذف زیستی n-هگزادکان به وسیله کشت مخلوط باکتری های سویه های S1 و S2 پسودوموناس آئروژینوزا

تغییرات دانسیته باکتریایی

تغییرات دانسیته باکتریایی کشت مخلوط باکتریایی مورد استفاده در تجزیه زیستی n-هگزادکان در نمودار شماره ۳ نشان داده شده است. بیش ترین دانسیته باکتریایی در روز ۲۱ با دانسیته باکتریایی معادل $14/9 \log \text{MPN}/100 \text{ mL}$ و کم ترین مقدار معادل $7/69 \log \text{MPN}/100 \text{ mL}$ در روز ۵۶ از ابتدای آغاز فرایند تجزیه زیستی مشاهده گردید. هم چنین تغییرات دانسیته باکتریایی در نمونه های شاهد فاقد آلودگی آلی، حاکی از روند کاهش دانسیته باکتریایی در دوره زمانی مورد مطالعه و کاهش دانسیته باکتریایی از $9/69 \log \text{MPN}/100 \text{ mL}$ در روز صفر به $3/95 \log \text{MPN}/100 \text{ mL}$ در روز ۵۶ بود.



نمودار شماره ۳: تغییرات دانسیته باکتریایی کشت مخلوط حاوی گونه های پسودوموناس در دوره اصلاح زیستی

حدود ۹/۸ درصد برای غلظت اولیه ۵۰۰ mg/kg بود. این کاهش به اثرات مربوط به جذب سطحی آلاینده توسط ذرات خاک نسبت داده می‌شود. نمونه خاک مورد بررسی با حدود ۴۰ درصد رس می‌تواند نقش یک جاذب را ایفا کرده و آلاینده مورد بررسی را به روش جذب سطحی حذف نماید. جذب هیدروکربن‌های آبگریز در مطالعات دیگر مورد تأیید بوده است (۱۴). این امر با افزایش آبگریزی آلاینده تشدید می‌شود. افزایش دانسیته باکتری‌های کشت مخلوط به $14/9 \log \text{MPN}/100 \text{ mL}$ و روند نزولی دانسیته باکتریایی از $9/69 \log \text{MPN}/100 \text{ mL}$ در روز صفر به $3/95 \log \text{MPN}/100 \text{ mL}$ در روز ۵۶ در نمونه‌های شاهد، حاکی از غلبه مکانیزم تجزیه زیستی بر جذب سطحی بود. با توجه به نتایج به دست آمده از پژوهش فعلی می‌توان نتیجه‌گیری نمود که باکتری‌های سودوموناس آئروژینوزا جداسازی شده قابلیت بسیار مناسبی در تجزیه زیستی n-هگزاکان و سایر هیدروکربن‌های مشاور دارند.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از طرح تحقیقاتی مورد حمایت کمیته تحقیقات دانشجویی دانشگاه علوم پزشکی جندی شاپور به شماره ۹۳۵۹۵ می‌باشد.

References

1. Freydoni R, Farhadi Z, Bakhtiari A, Saravi H. Integrated Use of n-Alkanes and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Source Identification Petroleum Hydrocarbons at 5, 15 and 30 m Depths in Noshahr and Amir Abad Ports, Caspian Sea. *J Mazandaran Univ Med Sci* 2013; 23(101): 56-65 (Persian).
2. Agamuthu P, Tan YS, Fauziah SH. Bioremediation of hydrocarbon contaminated soil using selected organic wastes. *Procedia Environ Sci* 201; 18: 694-702.
3. Ying W, Jiang F, Qianxin L, Xianguo L, Xiaoyu W, Guoping W. Effects of crude oil contamination on soil physical and chemical properties in Momogewet land of China. *Chin Geogr Sci* 2013; 23(6):708-715.
4. Silva N, Rufino RD, Luna, JM, Santos VA, Sarubbo LA. Screening of Pseudomonas species for biosurfactant production using low-cost substrates. *Biocatal Agric Biotechnol* 2014; 3(2): 132-139.
5. Maddela NR, Masabanda M, Leiva-Mora M. Novel diesel-oil degrading bacteria and fungi

قدرت کاهش کشش سطحی درمقایسه با بیوسورفکتانت‌های خالصی نظیر سورفکتین و رامولپید بسیار ضعیف‌تر می‌باشد. این فرضیه با اندازه‌گیری کشش سطحی محلول کشت تأیید شد (۲۲). کشش سطحی محلول کشت برای سویه S1 در روز ۳ به $49/9 \text{ mN/m}$ و برای سویه S2 در روز چهارم به $52/3 \text{ mN/m}$ کاهش یافت که قابلیت ترشح EPS و بیوسورفکتانت را به وسیله سویه‌های S1 و S2 تأیید می‌نماید. EPS ها دارای سرهای آبدوست و آبگریز بوده و قادر به عرضه خصوصیات سطحی متنوعی بوده و انحلال هیدروکربن‌های آبگریز را ارتقاء می‌دهد. در اولین مرحله، یک سری نیروهای جاذبه نظیر واکنش متقابل آبگریزی EPS و n-هگزاکان را به هم نزدیک می‌کند (۲۳). واکنش متقابل EPS و هیدروکربن‌های آبگریز، خود به خودی و گرم‌آزاد بوده و پیوند آن‌ها تحت تاثیر غالب واکنش‌های متقابل آبگریزی است. از سوی دیگر آنزیم‌های درون EPS ها شامل اکسیدورداکتازها و هیدرولازها نقش مهمی در تجزیه n-هگزاکان دارند. برخی ترکیبات سمی مقاوم به وسیله اکسیدورداکتازهایی نظیر لاکاز، پلی فنول اوکسیداز و کاتالاز که با تجزیه هیدروکربن‌ها در ارتباطند، تجزیه می‌شوند (۲۴). این عوامل در تجزیه n-هگزاکان آبگریز مؤثر بوده‌اند. نمونه‌های شاهد فاقد کنسرسیون میکروبی در زمان واکنش یکسان نشان‌دهنده رخداد چیزی در

- from Ecuadorian Amazon rainforest. *Water Sci Technol* 2015; 71(10): 1554-1561.
6. Kang Y, Park YJ, Jung J, Park W. Inhibitory effect of aged petroleum hydrocarbons on the survival of inoculated microorganism in a crude-oil- contaminated site. *J Microbiol Biotechnol* 2009; 19(12): 1672-1678.
 7. Sun J, Xu L, Tang Y, Chen F, Wu X. Simultaneous degradation of phenol and n-hexadecane by *Acinetobacter* strains. *Bioresource Tech* .2012; 123: 664-668.
 8. Chung TP, Tseng HY, Juang RS. Mass transfer effect and intermediate detection for phenol degradation in immobilized *Pseudomonas putida* systems. *Process Biochem* 2003; 38(10): 1497-1507.
 9. Yuan Y, Guo S, Li F, Li T. Effect of an electric field on n hexadecane microbial degradation in contaminated soil. *Int Biodeterior Biodegradation* 2013; 77: 78-84.
 10. Kardani M, Takdastan A. Removal of Total Petroleum Hydrocarbons Using *Vetiveria Zizanioides* and Microbial Population Changes in Soil Contaminated with Oil in Ahvaz. *J Mazandaran Univ Med Sci* 2015; 25(131): 87-97 (Persian).
 11. Hosseini Panah E, Takdastan A. Feasibility of Total Petroleum Hydrocarbon Removal from Drill Cutting with Digested Sludge Using Earth Worm. *J Mazandaran Univ Med Sci* 2016; 25(133): 319-324 (Persian).
 12. Rezaei Kalanaty R, Badkoubi A, Mohseni-Bandpei A, Esrafil A, Jorfi S, Dehghanifard E, Baneshi M. Modification of PAHs Biodegradation with Humic Compounds. *Soil Sediment Contam* 2013; 22(2): 185-198.
 13. Nayak A, Vijaykumar M. and Karegoudar T. Characterization of biosurfactant produced by *Pseudoxanthomonas* sp. PNK-04 and its application in bioremediation. *Int Biodeterior Biodegradation* 2009; 63(1): 73-79.
 14. Jorfi S, Rezaee A, Mohebbali G, Jaafarzadeh N. Application of biosurfactant produced by *Pseudomonas aeruginosa* SP4 for bioremediation of soils contaminated to pyrene. *Soil Sediment Contam* 2013; 22(8): 890-911.
 15. Hosokawa R, Sakaguchi N, Okuyama H. Establishment and characterization of turbine oil-degrading bacterial consortia. *Int Biodeterior Biodegradation* 2010; 64(8): 519-524.
 16. Cenis JL. Rapid extraction of fungal DNA for PCR amplification. *Nucleic Acids Res* 1992; 20(9): 2380.
 17. Jorfi S, Rezaee A, Jaafarzadeh N, Mohebbali G. Pyrene removal from contaminated soils by modified Fenton oxidation using iron nano oxides. *J Environ Health Sci Eng* 2013; 11(1): 17-24.
 18. Eaton AD, Franson MA. *Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater*, twenty first ed. Washington DC: American Public Health Association; 2005.
 19. Viguera G, Shirai K, Hernández-Guerrero M, Morales M, Revah S. Growth of the fungus *Paecilomyces lilacinus* with n-hexadecane in submerged and solid-state cultures and recovery of hydrophobin proteins. *Process Biochem* 2014; 49(10): 1606-1611.
 20. USEPA, 2007. Method 3550C, Ultrasonic Extraction. Available from: <http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/3550c.pdf>
 21. Partovinia A, Naeimpoor F, Hejazi P. Carbon content reduction in a model reluctant clayey soil: Slurry phase n-hexadecane bioremediation. *J Hazard Mater* 2010; 181(1-3): 133-139.

22. Jia C, Li P, Li X, Tai P, Liu W, Gong Z. Degradation of pyrene in soils by extracellular polymeric substances (EPS) extracted from liquid cultures. *Process Biochem* 2011; 46(8): 1627-163.
23. Hilliou L, Freitas F, Oliveira R, Reis MAM, Lespineux D, Grandfils C, et al. Solution properties of an exopolysaccharide from a *Pseudomonas* strain obtained using glycerol as sole carbon source. *Carbohydr Polym* 2009; 78(3): 526-532.
24. Gianfreda L, Rao M. Potential of extra cellular enzymes in remediation of polluted soils: a review. *Enzyme Microb Technol* 2004; 35(4): 339-354.