Journal homepage
www.ajas.uoanbar.edu.iq
Anbar Journal of Agricultural Sciences
(University of Anbar – Agriculture College)

دور الفطريات واستخداماتها في معالجة مخلفات البيئة الهيدروكاربونية

ورقاء سعيد قاسم الطائي
جامعة الموصل– كلية العلوم– علوم حياة

علاء حميد محمد الخفاجي*
جامعة الموصل– كلية الزراعة والغابات– وقاية النبات

***المراسلة الى:** علاء حميد محمد الخفاجي، قسم وقاية النبات، كلية الزراعة والغابات، جامعة الموصل، الموصل، العراق.
البريد الالكتروني: alaahamed82@uomosul.edu.iq

Article info
Received: 2022-05-28
Accepted: 2022-07-06
Published: 2022-12-31

DOI-Crossref:
10.32649/ajas.2022.176565

Cite as:
Al-Taee, W. S. Q., and A. H. M. Alkhafagi. (2022). The role of fungi in the treatment of hydrocarbon waste. Anbar Journal of Agricultural Sciences, 20(2): 311-322.

©Authors, 2022, College of Agriculture, University of Anbar. This is an openaccess article under the CC BY 4.0 license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

الخلاصة

هدفت هذه الدراسة الى توضيح أهمية الفطريات لمعالجة تلوث التربة بالمخلفات الهيدروكاربونية. اوضحت هذه الدراسة ان لاستخدام الفطريات في المعالجة الحيوية للترب الملوثة بمركبات الهديروكاربونات الحلقية المتعددة وتواجدها بشكل طبيعي او اضافتها التربة حدوث تغيرات وانخفاضا في تراكيز المركبات الهيدروكاربونات الحلقية المتعددة وذلك باختلاف تراكيز النفط الخام وأنواع الفطريات المستخدمة في المعالجة الحيوية واهما عزلات فطرية تعود الى الجنس *Aspergillus spp* والجنس *Penicillium spp*.

Review Article

كلمات مفتاحية: المركبات الهيدروكاربونات، المعالجة الحيوية، Bioaugmentation، الفطريات والنفط الخام.

THE ROLE OF FUNGI IN THE TREATMENT OF HYDROCARBON WASTE

W. S. Q. Al-Taee[1] A. H. M. Alkhafagi*[2]
[1]Department of Biology- College of Science- University of Mosul
[2]Department of Plant Protection- College of Agriculture and Forestry- University of Mosul

***Correspondence to:** Alaa Hamed Mohamed, Department of Plant Protection, College of Agriculture and Forestry, University of Mosul, Mosul, Iraq.
Email: alaahamed82@uomosul.edu.iq

Abstract

This study aims to clarify the importance fungi, in treating soil pollution with hydrocarbon residues. The soil's physiological, physical, chemical properties, and biological diversity, are affected by the long-term existence of crude oil. The study showed that the fungi's natural presence or addition to the soil would change and decrease the concentrations of polycyclic hydrocarbons according to the different concentrations of crude oil. The most important isolates of hydrocarbon decomposers belong to *Aspergillus spp* and *Penicillium spp*.

Keywords: Hydrocarbon compounds, Biological treatment, Bioaugmentation, Fungi and crude oil.

المقدمة

تأثير التلوث بالمخلفات الهيدروكاربونية (النفط الخام ومشتقاته) على التربة: النفط الخام هو أحد أهم مصادر الطاقة في جميع أنحاء العالم، وإن استمرار العمليات المعتادة لحفر هذا المورد واستخراجه قد يسبب مشاكل بيئية خطيرة (17) إذ يشكل التلوث النفطي تهديدا عالميا للبيئة وللترب الملوثه به وللمياه، وهذا يشكل تحديا كبيرا ورئيسا للتطور البيئي (4) ولذلك أصبح التلوث بالنفط الخام مشكله عالمية في الدول الصناعية والنامية على حد سواء (40) إن بقاء النفط الخام لفترة طويلة في التربة يؤثر على جودة التربة من خلال تغيير الخصائص الفسيولوجية والفيزياوية والكيمياوية لها، فضلا عن التنوع البيولوجي فيها (38). أما فيما يخص النباتات، فأن النفط الخام يجعل التربه غير ملائمة لنمو النباتات، وذلك لأنه يسبب انخفاضا لمستويات المغذيات اللازمة لنمو النبات وبالتالي يؤدي الى تباطئ معدلات الانبات والنمو، وكذلك يؤدي الى زيادة مستويات العناصر السامة في الترب الملوثة بها مثل المركبات الاليفاتية المشعة وغير المشعة والمركبات الاروماتية الى جانب المعادن القيلة كالكادميوم والفناديوم (39 و46)

تأثير التلوث بالمخلفات الهيدروكاربونية (النفط الخام ومشتقاته) على الكائنات الحية في التربة: إن تلوث التربة بالنفط الخام يؤدي الى تأثيرات سامة على الكائنات الحية وبالتالي تسببها في إحداث تغييرات سريعة وطويلة الامد في اعداد المجاميع الميكروبية الموجودة في التربة الملوثة اعتمادا على التركيب الكيميائي للنفط الخام والعوامل الفيزياوية والكيمياوية الخاصة بالترب الملوثة بها والتي بدورها سوف تؤدي الى توفر المغذيات اللازمة لتلك الكائنات الدقيقة وزيادة اعدادها أو يمكن أن يحدث العكس، في حين اظهر (52) تأثير تلوث التربة بالديزل على التنوع البيولوجي فيها وأظهرت النتائج التي حصلت عليها حدوث انخفاض في أعداد الأحياء المجهرية الموجودة في عينات التربة الملوثة بالديزل بالمقارنة مع العينات غير ملوثة. إن إضافة الديزل إلى التربة يؤدي إلى انخفاض أعداد الأحياء المجهرية الذاتية التغذية ويحفز نمو الاحياء المحللة للهيدروكاربونات (30)، وقد تبين في دراسة تأثير النفط الخام وزيت المحركات على انشطة الاحياء المجهرية في التربة وتحديد مصير الهيدروكاربونات النفطية الكلية، ان النفط الخام وزيت المحركات يحفزان على نمو احياء مجهرية معينة إشارة (5) ان الفطر Asergillus له القدرة العالية على النمو وإزالة مركبات الهيدروكاربونية من التربة وذلك لقدرة على

الاستحلاب والامتزاج في هذه الأوساط. ذكر (1) ان استخدام نوعين من الفطريات Asergillus turcosas وAsergillus fumigatus في المعالجة الحيوية للهدروكاربونات الاورماتية الحلقية المتعددة (PAH_s) في التربة الملوثة بتراكيز مختلفة من النفط الخام. اذ بينت النتائج التحليل باستخدام جهاز GAS Chromatography GS انخفاض واضح في تراكيز مركبات PAH_s في جميع الترب الأربعة الملوثة والمحقنة بأبواغ الفطريات المستخدمة في المعالجة الحيوية واظهر الفطر Asergillus fumigatus كفاءة عالية من الفطر Asergillus turcosas في تحطيم جميع التراكيز الملوثة للنفط الخام .والنشاط الانزيمي لهذه الاحياء في التربة (21)، في حين لاحظ (6) من خلال إجرائه دراسة على التربه الملوثة بالكيروسين والديزل، إن هذه الملوثات تؤدي إلى تثبيط الانزيمي لأحياء مجهرية اخرى موجودة في عينات التربة الملوثة ويزداد معدل التثبيط مع زيادة مستويات التلوث بالهيدروكاربونات، إن التأثيرات الحاصلة على البكتريا في الترب الملوثة بالهيدروكاربونات النفطية تتمثل في زيادة اعداد البكتريا المحللة للهيدروكاريونات ونشاطها وبعلاقة طردية مع تركيز الملوث (19 و20).

اهم الطرائق الحيوية في إزالة الملوثات النفطية من البيئات المختلفة: وتعرف هذه الطريقة بالمعالجة الحيوية Bioremediation: وتعني استخدام الكائنات الحية الدقيقة لتحليل او تحطيم الملوثات البيئة الى اشكال أقل سموماً وكذلك الى غاز ثاني اوكسيد الكاربون (CO_2) والماء (H_2O) ومن ثم اطلاقها الى البيئة لكونها غير سامة (50) تتضمن المعالجة الحيوية استخدام بكتيريا والفطريات او النباتات لتحطيم الملوثات الخطرة على صحة الانسان والبيئة وتحويلها الى مواد اقل سموماً عن طريق تفاعلات معينة تحدث خلال عمليات التمثيل الغذائي الخاصة بالكائنات الدقيقة، ولكي تكون المعالجة الحيوية فعالة يجب ان تكون هذه الكائنات الدقيقة ذات نشاط أيضي عالٍ وتمتلك مختلف انواع الأنزيمات اللازمة لتحليل الملوثات البيئية المختلفة. (28، 49 و50) تلعب المعالجة الحيوية دوراً مهماً في عمليات معالجة الترب الملوثة، حيث تمتاز بكونها منخفضة التكاليف وذات كفاءة عالية في المعالجة فضلاً عن أنها من الطرق الصديقة للبيئة إذ تكاد تخلو من اثار الجانبية تذكر على البيئة على خلاف الطرق الكيمياوية والفيزياوية المستخدمة في المعالجة والتي يمكن ان تكون لها اثار جانبية سلبية ع البيئة (43 و48). لقد اهتم الباحثون بموضوع المعالجة الترب الملوثة بالهيدوركاربونات في الآونة الاخيرة وذلك لسمومها ولكونها تسبب الأورام السرطانية والطفرات، حيث ان الكائنات الحية الدقيقة لها القدرة على تفكيك هذه الملوثات العضوية الخطرة (7 و37).

الشروط الأساسية للمعالجة الحيوية: تعدُ التربة البيئة الملائمة لنمو انواع عدة من الكائنات الحية الدقيقة وتكاثرها وبشكل خاص البكتريا Becteria والفطريات Fungi، ولكل من هذه المجاميع اهميتها الخاصة في التربة حيث أنه غالبا ما يتم التحكم في ظروف التربة ذات الصلة المباشرة بالأحياء المجهرية لتحسين النشاط الحيوي لها في تحطيم الملوثات المؤثرة بالكائنات الحية الدقيقة كتأثير تراكيز المواد السامة على كثافة تواجد الاحياء المجهرية في الموقع الملوث والنشاط الايضي الخاص بالكائنات الدقيقة الموجودة في الموقع نفسه (18 و45). إن المعالجة الحيوية للترب الملوثة بالنفط تكون فعالة للغاية إذا ما توافرت مجموعة من الظروف منها وجود اعداد

كافية من الكائنات الحية الدقية في الموقع الملوث وذات قدرة كبيرة على تحطيم الملوث، وجود مصدر للطاقة وظروف تتعلق بالتربة تتمثل في درجة حموضة التربة، قلويتها وكمية التهوية المتوفرة والمغذيات اللازمة لنمو الكائنات الدقيقة التي تقوم بإزالة الملوث من الموقع (12 و13).

تقانات المعالجة الحيوية Bioremediation technologies: هنالك توجه في جميع العالم الى تطوير طرق المعالجة للمواقع الملوثة، وهي طريق تمتاز بالبساطة والسرعة وغير المكلفة والفعّالة بما يضمن إمكانية تطبيقها في هذه المواقع للحيلولة دون انتشار الملوثات على نطاق واسع او تسربه الى المياه الجوفية، وبالتالي دخولها في السلسلة الغذائية للإنسان والكائنات الحية الأخرى (16). إن تقانات المعالجة الحيوية يمكن ان تساعد الى ازالة الملوثات النفطية حيث ان الاحياء المجهرية الاصلية الموجودة بشكل طبيعي في المواقع الملوثة للهيدروكاربونات النفطية قد تكيفت مع هذه البيئات وبإمكانها تحليل هذه الملوثات كما ان بالإمكان ادخال الانواع معينة من الكائنات الحية الدقيقة الى هذه المواقع الملوثة لتحليل الملوثات النفطية بعد توفير الظروف المناسبة لها (25 و42) حيث تمتاز الكائنات الدقيقة بانها تحلل الملوثات الى مواد مفيدة غير ضارة للبيئة على اقل تقدير. تتضمن عملية المعالجة الحيوية للمواقع الملوثة استخدام تقانات عدة للمعالجة بالاعتماد على أسلوب العلاج سواء أكان داخل الموقع الملوث In situ أم خارجه Ex situ حيث يقصد بالعلاج داخل الموقع إجراء المعالجة داخل الموقع الملوث مباشرة دون نقل التربة أو تغير نسجته وقومه، أما العلاج خارج الموقع فيقصد به حفر التربة ونقلها خارج الموقع الملوث ومن ثم تطبيق احدى الاستراتيجيات الملائمة للعلاج ولكل من هذه الاستراتيجيات معداتها وأساليبها الخاصة بها اعتمادا على الموقع ونوع الملوث، إن لكل من تقانات المعالجة الحيوية داخل الموقع وخارجه إيجابيات وسلبيات حيث تمتاز المعالجة داخل الموقع بكونها لا تحتاج إلى عمليات حفر التربة ونقلها من الموقع الملوث وهذا سوف يخفض التكلفة المرتبة على عملية المعالجة، كذلك فانه يمكن معالجة مساحات واسعة من المواقع الملوثة بوساطة هذه الطريقة فضلا عن ذلك تمتاز هذه الطريقة بكون كمية الغبار الناتجة من المعالجة أقل مما هي عليه اثناء المعالجة خارج الموقع حيث تنبعث منها كميات كبيرة من الغبار البيئة المحيطة وخصوصاً خلال عمليات نقل التربة ومن مساوئ المعالجة داخل الموقع انها تكون قليلة الفعالية في الترب الطينية شديدة التعليق حيث لا يمكن توزيع الاوكسجين بكميات كافية خلال طبقات التربة فضلاً عن انها بطيئة وتحتاج الى فترة طويلة لمعالجة الموقع الملوث. أما فيما يخص خارج الموقع فتمتاز بسهولة ادارتها والتحم فيها واستغراقها فترة زمنية أقصر في معالجة المواقع الملوثة مما جعلها واسعة الاستخدام فضلا عن فعاليتها في معالجة انواع مختلفة من الملوثات وفي مختلف انواع الترب الا انه من مساوئ هذه الطريقة انها تحتاج الى عمليات حفر التربه الملوثة ونقلها وبالتالي زيادة التكلفة عملية المعالجة (8 و25) وان المعالجة الحيوية للتربة الملوثة بالهيدوركاربونات النفطية تتضمن تطبيق مجموعة من التقانات الشائعة الاستخدام في هذا المجال وهي Bioaugmentation، Bioventing، Biopile، Composting (34).

Bioventing: هذه التقانة تتضمن زيادة حقن الاوكسجين في الموقع الملوث ولاسيما في المناطق غير المشبعة منها، حيث ان هذا الاجراء سوف يزيد من التحلل الحيوي للملوثات في التربة عن طريق زيادة نشاط الكائنات

الحية الدقيقة الموجودة بالأصل في نفس الترب ويتم تحسن هذه التقانة وزيادة كفاتها من خلال اضافة المغذيات اللازمة للكائنات الدقيقة وتوفير ظروف الرطوبة الملائمة لها، وقد لاقت هذه التقانة استحساناً كبيراً اكثر من غيرها من تقانات المعالجة الحيوية في التعامل مع المواقع الملوثة بالبترول (10 و32). ان كمية الاوكسجين المتوفر في المواقع الملوثة تلعب دوراً مهماً في المعالجة الحيوية، حيث لوحظ أنه عند حقن الاوكسجين في موقع ملوث بالتولوين بمعدل 407.52 م^3/ دقيقة سوف يحصل انخفاض اكبر في تركيز التولوين من التربة بالمقارنة مع حقن 8.504 م^3/ دقيقة من الهواء مما يفسر زيادة نشاط الاحياء المجهرية التي تقوم بعملية التحلل عند حصولها على كمية كافية من الاوكسجين (33)، كما توصل (24) خلال دراسته الى انه ازدادت فعالية المعالجة الحيوية للترب الملوثة ب Phenanthrene (احد الهيدوركاربونية العطرية المتطايرة) عند حقن التربة الملوثة بكمية كافية من الهواء ولاحظ إزالته نحو 93% من الملوث المذكور آنفاً.

Bioaugmentation: وهي احدى تقانات المعالجة الحيوية والتي يتم فيها اضافة سلالات معينة من الكائنات الحية الدقيقة او أنزيمات خاصة الى الموقع الملوث المراد معالجته بيولوجيا وإن البكتريا هو الكائن المجهري الاكثر شيوعا في هذا المجال (31) ان نجاح تقانة Bioaugmentation في المعالجة الحيوية يعتمد على العديد من العوامل التي يجي مراعاتها قبل الشروع وباستخدام هذه التقانة في عمليات المعالجة، وهذه العوامل هي عوامل إحيائية وغير إحيائية فالعوامل غير الاحيائية تتضمن معرفة التركيب الكيمياوي للملوث المستهدف في المعالجة، تركيزها فضلاً عن الخصائص الفيزياوية والكيمياوية للتربة أما العوامل الاحيائية فتتمثل باختيار سلالات من الكائنات الحية الدقيقة التي تمتلك القدرة على تحلل الملوثات وكذلك على التنافس بنجاح مع الاحياء المجهرية الأصلية الموجودة في التربة، عليه فأنه في بعض الاحيان يتم اللجوء إلى استخدام الكائنات الحية الدقيقة المعدلة وراثياً عند تطبيق هذه التقانة في المعالجة الحيوية (41).

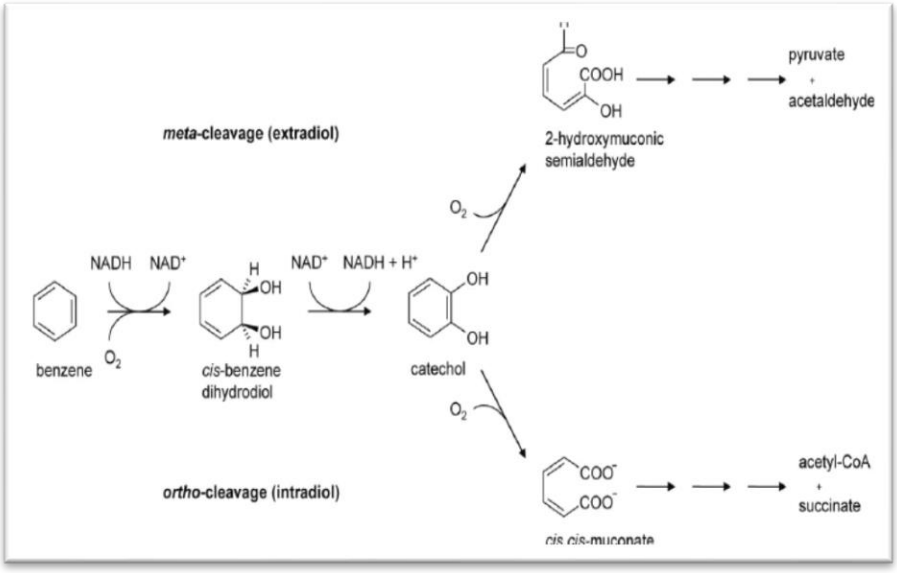
Biopile: وهي احدى تقانات المعالجة الحيوية خارج الموقع الملوث تستخدم على نطاق واسع لعلاج مجموعة واسعة من الملوثات البتروكيمياوية، وتتضمن هذه التقانة تجميع التربة الملوثة على شكل اكوام في موقع معين ومن ثم تحفيز نشاط الاحياء المجهرية في تحليل الملوثات من خلال توفير ظروف نمو مثالية لها (27)، وهذا يعني حقن الاوكسجين بكميات كافية وضبط درجة الحموضة pH ومستويات الرطوبة واضافة المغذيات (النتروجين والفسفور) الى اكوام التربة الملوثة التي تم تجميعها حيث ان هذه الاجراءات سوف تعزز من نشاط الاحياء المجهرية في تحطيم الملوثات العضوية (29) لقد أثبتت التجارب الميدانية والمختبرية نجاح تقانة ال Biopile في المعالجة الترب الملوثة بأنواع مختلفة من الهيدوركاربونات (29 و55) إذ ذكر نجاح تقنية Biopile في إزالة نسبه 42% من الهيدوركاربونات النفطية الملوثة للتربة لمنطقة نورمان ويلز في كندا، كما توصّل الباحثون من خلال نتائج المستحصلة الى إمكانية استخدام تقنية Biopile في معالجة الملوثات لمختلف انواع الترب سواء كانت تربة رملية او طينية (3، 15 و51).

Composting: وهي عبارة عن وسيلة بيولوجية لمعالجة المواقع الملوثة وإخضاع جميع الظروف الخاصة بالكائنات الحية الدقيقة تحت سيطرة والتحكم فيها، حيث تتضمن العملية حفر التربة واضافة مواد المحسنة لها مثل نشارة الخشب والسماد العضوي والمخلفات النباتية (عادة نبات البطاطا)، ومن ثم خلطها وجعل درجة حرارة المحيط ما بين 54_65 مْ، فضلاً عن التحكم بكميات الاوكسجين ومستوى الرطوبة ودرجة الحموضة pH في الموقع المستهدف للمعالجة إذ أن هذه الاجراءات سوف تزيد من فعالية العلاج لأنها سوف تقوم بزيادة نشاط الكائنات الدقيقة في تحليلها للملوثات العضوية مثل أنواع الهيدوركاربونات (34). إن استخدام تقنية Composting المعززة بزراعة النباتات أثبتت فعاليتها في إزالة المعادن الثقيلة من الترب الملوثة بالمخلفات الصناعية (53) كما اظهرت النتائج التي حصلت عليها (46).

التحلل الحيوي للهيدروكاربونات بوساطة الفطريات: تعد التربة البيئة الملائمة لنمو اعداد كبيرة من الفطريات المتنوعة وانتشارها وهي من الكائنات الحية التي تتميز بقدرتها على تحليل. الملوثات العضوية وتفكيكها (14) لقد كثرت الدراسات في السنين الاخيرة حول استخدام الفطريات في معالجة الحيوية للتربة الملوثة بالنفط الخام وذلك لامتلاكها هذه الكائنات انظمة انزيمية خاصة قادرة على تفكيك المركبات الهيدوركاربونية واستخدامها مصدرا للكاربون، فضلاً نموها السريع وقدرتها على العيش تحت ظروف قاسية نوعاً ما مثلا (pH منخفض مغذيات قليلة ومحتوى مائي قليل) (26، 36 و44) وامكانية الفطريات في معالجة الترب الملوثة بالهيدوركاربونات وتم اختيار اجناس من الفطريات لهذا الغرض وهي *Aspergillus versicolor*، *Bionectria ochroleuca chermisinum*، *Trichoderma virens*، *flavus* و*Penicillium* حيث اظهرت النتائج قدرة عالية للفطريات على تحليل الهيدوركاربونات، وشخّص (35) الفطر *Penicillium janthinellum* من عينات تربة ملوثة بالهيدوركاربونات النفطية في الهند ودرس امكانية استخدام هذا الفطر في التحليل الحيوي للكيروسين حيث بينت النتائج ان نسبه 95%، 63%، 58% من تراكيز الكيروسين 1%، 3%، 5% على التوالي قد تحلل بفعل نشاط الفطر *Penincillium janthinellum* خلال فترة التحضين بلغ 16 يوماً، ولاحظ (22) وجود ثمانية سلالات مختلفة من الفطريات في عينات التربة المأخوذة من ثلاث مواقع ملوثة بالنفط في ولاية بايلسا بنيجريا وهذه السلالات هي ومن ثم استخدمت هذه العزلات الفطرية في تنظيف الترب الملوثة بالنفط لامتلاكها قدرة كبيرة على التحليل الحيوي للهيدروكاربونات النفطية ووجد الباحثان (16) اثناء دراستهما إمكانية الفطريات المعزولة من الترب الملوثة بالنفط في إزالة الهيدوركاربونات النفطية من المياه والتربة بان هذه الكائنات تملك أنظمة انزيمية خاصة تمكنها من تحطيم مختلف انواع المركبات الهيدوركاربونية التي تعجز البكتريا عنها.

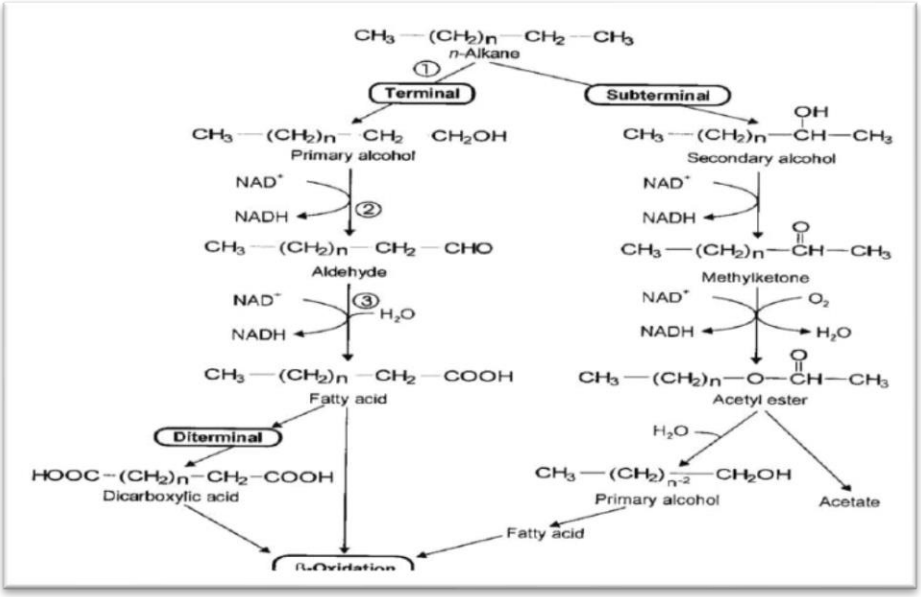
العمليات الايضية للفطريات في تحليل المركبات الهيدروكاربونية: ان الفطريات التي تفرز انزيم Dioxygenase. ذكر (2) ان انزيمات الفطريات المعزولة من التربة والي كانت تمثل Asergillus fumigatus والفطر Asergillus nidulans و Asergillus niger و Asergillus flavs والفطر Rhizopus كانت لها القدرة على تحليل المخلفات الهيدروكاربونية في الترب الملوثة بالنفط وكشفت الدراسة ان هذه الفطريات لها القدرة على النمو واستغلال المركبات الهديروكاربونية اذ سجل الفطر Rhizopus اعلى معدل للنمو وجاء

بعده الفطر Asergillus fumigatus والفطر Asergillus flavs وأقلها الفطر Asergillus nidulans وAsergillus niger بتركيز 1 و3% على زيت الحمادة وزيت الشرارة. ذكر (1) ان لاستخدام الفطريات المدروسة حققت نسبة إزالة لمركبات الهيدروكاربونات الاورماتية الحلقية المتعددة في النفط الخام PAH_S حيث حقق الفطر Asergillus fumigatus بلغت 59.57 و47.22 و37.99 و31.59% للتراكيز 5 و10 و15 و20% على التوالي بينما حقق الفطر Asergillus turcosas نسبة إزالة 38.42 و32.91 و26.59 12.51% للتراكيز 5 و10 و15 و20% على التوالي وبذلك تكون الازالة المحققة لمركبات PAH_S تتناسب بشكل عكسي مع التراكيز النفط الخام الملوثة لنماذج الترب والتي لها القدرة على تحطيم المركبات الاروماتية وتحويلها الى Catechols وبوجود عملية Ortho-Cleavage يتم فتح الحلقة الاروماتية لهذة المركبات وإنتاج Muconic acid والذي يتحلل فيما بعد لينتج البايروفيت والاستيلديهايد (23) كما في الشكل 1. ان التركيب الكيماوي للمركبات الهيدروكاربونية تلعب دورا في تحديد طريقة تحليل هذه الملوثات البيئية من قبل الفطريات فقد أوضح (9) ان العمليات الايضية للمركبات الاروماتية الحلقية تتم في غياب الاوكسجين حيث يتم إزالة الهيدروجين Dehyddrogenation من هذه المركبات ليتكون الكيتون ان تكسر المركبات الاروماتية الحلقية يؤدي الى تكوين الالديهايدات والاحماض الكاربوكسيلة التي تحلل بعملية B-oxidation (11). مسار عملية ايض المركبات الهيدروكاربونية في الظروف الهوائية وغير الهوائية. ان الالكانات المكونة من السلاسل الكاربونية C_{10} - C_{24} يمكن ان تحلل مباشرة بوجود انزيم oxygenase حيث تبدأ العملية بإضافة ذرة او ذرتين من الاوكسجين الي الالكانات منتجة كحولات أولية او احماض كاربوكسيلة بعد ذلك تهاجم النهايات المثيلية لهذة الاحماض الهوائية. ان مركب Acety-CoA يدخل دورة حامض الستريك حيث يتم اكسدتة الى ماء وثاني أوكسيد الكاربون وكما هو موضح في الشكل 2 اما في حالة غياب الاوكسجين الذي يعمل كمستلم للالكترونات (ظروف لاهوائية) فأن النترات هي التي تعمل كمستلم للالكترونات منتجة كحولات واستر والتي تتاكسد فيما بعد من خلال دورة B-oxidation (54).



شكل 1 مراحل الأيض الهوائي للمركبات الأروماتية بفعل الفطريات.

Figure 1 Stages of aerobic metabolism of aromatic compounds by fungi, showing the metabolic processes of cyclic aromatic compounds that occur in the absence of oxygen, where hydrogen is removed from these compounds to form the ketone, which breaks down the cyclic aromatic compounds and leads to the formation of aldehydes and carboxylic acids that are decomposed by B. - Oxidation process.



شكل 2 مراحل الايض الهوائي لمركبات الاليفاتية بفعل الفطريات.

Figure 2 The stages of aerobic metabolism of aliphatic compounds by fungi, which show that alkanes consisting of carbon chains C10 - C24 are directly decomposed in the presence of the oxygenase enzyme. The process begins by adding one or two atoms of oxygen to the alkanes, to produce primary alcohols or carboxylic acids. The methyl ends of these acids are then attacked. Aerobic Acety-CoA enters the citric acid cycle, where it is oxidized to water and carbon dioxide. In the absence of oxygen, which acts as an electron acceptor (anaerobic conditions), it is nitrate that acts as an electron acceptor, producing alcohols and esters, which are subsequently oxidized through the B oxidation cycle.

المصادر

1. Abdullah, O. A. (2020). Mycoremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils Polluted with Crude Oil. Master thesis. college of Environmental Sciences University of Mosul.
2. Abul-Ghaith, S. M. K., and Ahlam, Q. M. Z. (2020). Isolation, identification and testing of the efficiency of some fungi in hydrocarbon decomposition from oil-contaminated soils. Journal of Applied Sciences, 4: 78-90
3. Akbari, A., and Ghoshal, S. (2014). Pilot-scale bioremediation of a petroleum hydrocarbon-contaminated clayey soil from a sub-Arctic site. Journal of Hazardous Materials, 280: 595-602.
4. Akpe, A. R., Esumeh, F. I., Aigere, S. P., Umanu, G., and Obiazi, H. (2015). Efficiency of plantain peels and guinea corn shaft for bioremediation of crude oil polluted soil. Journal of microbiology Research, 5(1): 31-40.
5. Al-Hawash, A. B., Zhang, X., and Ma, F. (2019). Removal and biodegradation of different petroleum hydrocarbons using the filamentous fungus Aspergillus sp. RFC-1. Microbiologyopen, 8(1): e00619.
6. Alrumman, S. A., Standing, D. B., and Paton, G. I. (2015). Effects of hydrocarbon contamination on soil microbial community and enzyme activity. Journal of King Saud University-Science, 27(1): 31-41.
7. Asghar, H. N., Rafique, H. M., Zahir, Z. A., Khan, M. Y., Akhtar, M. J., Naveed, M., and Saleem, M. (2016). Petroleum hydrocarbons-contaminated soils: remediation approaches. In Soil science: agricultural and environmental prospectives. Springer, Cham, 105-129.
8. Assadi, M. M., Ardeshiri, M., Sheykhzadeh, H., and Jahangiri, M. (2014). The bioremediation of crude oil contaminated soil. Petroleum Science and Technology, 32(12): 1497-1504.
9. Atlas, R. M. and Bartha, R. (1998). Fundamentals and application. In: *Microbial ecology*. 4th edition. Benjamin/ Cumming Publishing Company, Inc, California, USA, 523-530.
10. Azubuike, C. C., Chikere, C. B., and Okpokwasili, G. C. (2016). Bioremediation techniques–classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 32(11): 1-18.
11. Balba, M. T., Al-Awadhi, N., and Al-Daher, R. (1998). Bioremediation of oil-contaminated soil: microbiological methods for feasibility assessment and field evaluation. Journal of microbiological methods, 32(2): 155-164.
12. Brito, E. M., De la Cruz Barrón, M., Caretta, C. A., Goñi-Urriza, M., Andrade, L. H., Cuevas-Rodríguez, G., ... and Guyoneaud, R. (2015). Impact of hydrocarbons, PCBs and heavy metals on bacterial communities in Lerma River, Salamanca, Mexico: investigation of hydrocarbon degradation potential. Science of The Total Environment, 521: 1-10.
13. Chakraborty, J., and Das, S. (2014). Biosurfactant-Based bioremediation of toxic metals. Microbial biodegradation and bioremediation, 12: 167-201.

14. Chandrashekar, M. A., Pai, K. S., and Raju, N. S. (2014). Fungal diversity of rhizosphere soils in different agricultural fields of Nanjangud taluk of Mysore district, Karnataka, India. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 3(5): 559-566.
15. Chemlal, R., Abdi, N., Lounici, H., Drouiche, N., Pauss, A., and Mameri, N. (2013). Modeling and qualitative study of diesel biodegradation using biopile process in sandy soil. International Biodeterioration and Biodegradation, 78: 43-48.
16. Chikere, C. B., and Azubuike, C. C. (2014). Characterization of hydrocarbon utilizing fungi from hydrocarbon polluted sediments and water. Nigerian Journal of Biotechnology, 27: 49-54.
17. Chorom, M., Sharifi, H. S., and Motamedi, H. (2010). Bioremediation of a crude oil-polluted soil by application of fertilizers.. Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering, 7(4): 319-326.
18. Daldoul, G., Souissi, R., Souissi, F., Jemmali, N., and Chakroun, H. K. (2015). Assessment and mobility of heavy metals in carbonated soils contaminated by old mine tailings in North Tunisia. Journal of African Earth Sciences, 110: 150-159.
19. De la Cueva, S. C., Rodríguez, C. H., Cruz, N. O. S., Contreras, J. A. R., and Miranda, J. L. (2016). Changes in bacterial populations during bioremediation of soil contaminated with petroleum hydrocarbons. Water, Air, and Soil Pollution, 227(3): 1-12.
20. Di Martino, C., López, N. I., and Iustman, L. J. R. (2012). Isolation and characterization of benzene, toluene and xylene degrading Pseudomonas sp. selected as candidates for bioremediation. International Biodeterioration and Biodegradation, 67: 15-20.
21. Dindar, E., Şağban, F. O. T., and Başkaya, H. S. (2015). Variations of soil enzyme activities in petroleum-hydrocarbon contaminated soil. International Biodeterioration and Biodegradation, 105: 268-275.
22. Egbo, W. M., Onyewuchi, A., and Gideon, A. (2018). Screening of hydrocarbon degrading fungi in crude oil polluted soil isolated in the Niger Delta. African Journal of Environmental Science and Technology, 12(5): 172-176.
23. Eltis, L. D., and Bolin, J. T. (1996). Evolutionary relationships among extradiol dioxygenases. Journal of Bacteriology, 178(20): 5930-5937.
24. Frutos, F. J. G., Escolano, O., García, S., Babín, M., and Fernández, M. D. (2010). Bioventing remediation and ecotoxicity evaluation of phenanthrene-contaminated soil. Journal of hazardous materials, 183(1-3): 806-813.
25. Gall, J. E., Boyd, R. S., and Rajakaruna, N. (2015). Transfer of heavy metals through terrestrial food webs: a review. Environmental monitoring and assessment, 187(4): 1-21.
26. George-Okafor, U., Tasie, F., and Muotoe-Okafor, F. (2009). Hydrocarbon degradation potentials of indigenous fungal isolates from petroleum contaminated soils. Journal of Physical and natural sciences, 3(1): 1-6.
27. Germaine, K. J., Byrne, J., Liu, X., Keohane, J., Culhane, J., Lally, R. D., Kiwanuka, S., Ryan, D., and Dowling, D. N. (2015). Ecopiling: A combined

phytoremediation and passive biopiling system for remediating hydrocarbon impacted soils at field scale. Frontiers in Plant Science, 5(756): 1-6.

28. Ghori, Z., Iftikhar, H., Bhatti, M. F., Nasar-um-Minullah, Sharma, I., Kazi, A. G., and Ahmed, P. (2016). Phytoextraction: The Use of Plants to Remove Heavy Metals from Soil. Plant Metal Interaction: Emerging Remediation Techniques. Elsevier Inc, 385–409.
29. Gomez, F., and Sartaj, M. (2013). Field scale ex-situ bioremediation of petroleum contaminated soil under cold climate conditions. International Biodeterioration and Biodegradation, 85: 375-382.
30. Hawrot-Paw, M., Wijatkowski, A., and Mikiciuk, M. (2015). Influence of diesel and biodiesel fuel-contaminated soil on microorganisms, growth and development of plants. Plant, Soil and Environment, 61(5): 189-194.
31. Herrero, M., and Stuckey, D. C. (2015). Bioaugmentation and its application in wastewater treatment: a review. Chemosphere, 140: 119-128.
32. Höhener, P., and Ponsin, V. (2014). In situ vadose zone bioremediation. Current Opinion in Biotechnol, 27: 1-7.
33. Hong, S. U. I., and Xingang, L. I. (2011). Modeling for volatilization and bioremediation of toluene-contaminated soil by bioventing. Chinese Journal of Chemical Engineering, 19(2): 340-348.
34. Iosob, G. A., Prisecaru, M., Stoica, I., Călin, M., and Cristea, T. O. (2016). Biological remediation of soil polluted with oil products: an overview of available technologies. Universitatea" Vasile Alecsandri" din Bacău, 25(2): 89-101.
35. Khan, S. R., Nirmal, J. I., Kumar, R. N., and Patel, J. G. (2015). Biodegradation of kerosene: Study of growth optimization and metabolic fate of P. janthinellum SDX7. Brazilian Journal of Microbiology, 46(2): 397-406.
36. Kota, M. F., Husaini, A. A. S. A., Zulkharnain, A., and Roslan, H. A. (2014). Bioremediation of crude oil by different fungal genera. Asian Journal of Plant Biology, 2(1): 11-18.
37. Koul, B., and Taak, P. (2018). Chemical methods of soil remediation. In: Biotechnological strategies for effective remediation of polluted soils. Cham, Springer, Switzerland, 77-84.
38. Marinescu, M, Lacatusu, A., Gament, E., Plopeanu, G., and Carabulea, V. (2017). Bioremediation potential of native hydrocarbons degrading bacteria in crude oil polluted soil. The Journal of Agricultural Science. 74(1): 19-25.
39. Minai-Tehrani, D., Tavakoli Temah, A., Rashidfarokhi, A., Noormohammadi, A., Khodakarami, A., and Talebi, M. (2012). The effect of light crude oil-contaminated soil on the growth and germination of Sorghum bicolor. Sorghum. The European Journal of Plant Science and Biotechnology, 6(1): 81-84.
40. Mittal, A., and Singh, P. (2009). Isolation of hydrocarbon degrading bacteria from soils contaminated with crude oil spills. Indian Journal of Experimental Biology, 47: 760-765.
41. Mrozik, A., and Piotrowska-Seget, Z. (2010). Bioaugmentation as a strategy for cleaning up of soils contaminated with aromatic compounds. Microbiological research, 165(5): 363-375.

42. Mukwaturi, M., and Lin, C. (2015). Mobilization of heavy metals from urban contaminated soils under water inundation conditions. Journal of Hazardous Materials, 285: 445-452.
43. Nwadibe, E. C. (2010). Ecological impact of petroleum hydrocarbon pollution and efficacy of some bioremediation techniques for contaminated arable lands. Thesis (Ph.D.), Department of Microbiology, University of Nigeria.
44. Olukunle, O. F., Boboye, B., and Ikuomola, O. T. (2012). Indigenous bacteria and fungi responsible for bioremediation of oil-polluted soils in Ondo soils in Ondo State, Nigeria. Environtropica, 8: 138-148.
45. Paul, E. A. (2015). Soil microbiology, ecology and biochemistry. 4th ed. Colorado State University, USA.
46. Sari, G. L., and Trihadiningrum, Y. (2019). Bioremediation of petroleum hydrocarbons in crude oil contaminated soil from wonocolo public oilfields using aerobic composting with yard waste and rumen residue amendments. Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, 7(3): 482-492.
47. Shevchik, L., and Romaniuk, O. (2016). The optimal way of biological cleaning of oil-contaminated soils. Mediterranean Journal of Biosciences, 1(3): 109-113.
48. Siddiqui, F. I., and Osman, S. B. A. B. S. (2013). Simple and multiple regression models for relationship between electrical resistivity and various soil properties for soil characterization. Environmental earth sciences, 70(1): 259-267.
49. Simpanen, S. (2016). Evaluation of in situ remediation methods in soils contaminated with organic pollutants.
50. Sonawdekar, S. (2012). Bioremediation: A boon to hydrocarbon degradation. International Journal of Environmental Sciences, 2(4): 2408-2424.
51. Subhasis, G., and Snelgrove, J. (2010). Biopile bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soils from a sub-Arctic site. Thesis (M.Sc.), Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University.
52. Sutton, N. B., Maphosa, F., Morillo, J. A., Abu Al-Soud, W., Langenhoff, A. A., Grotenhuis, T., ... and Smidt, H. (2013). Impact of long-term diesel contamination on soil microbial community structure. Applied and environmental microbiology, 79(2): 619-630.
53. Taiwo, A. M., Gbadebo, A. M., Oyedepo, J. A., Ojekunle, Z. O., Alo, O. M., Oyeniran, A. A., ... and Taiwo, O. T. (2016). Bioremediation of industrially contaminated soil using compost and plant technology. Journal of hazardous materials, 304: 166-172.
54. Xenia, M. E., and Refugio, R. V. (2016). Microorganisms metabolism during bioremediation of oil contaminated soils. Journal of Bioremediation and Biodegradation, 7(2): 1000340.
55. Xu, Y., Sun, G. D., Jin, J. H., Liu, Y., Luo, M., Zhong, Z. P., and Liu, Z. P. (2014). Successful bioremediation of an aged and heavily contaminated soil using a microbial/plant combination strategy. Journal of Hazardous Materials, 264: 430-438.