المعالجة الحيوية للملوثات البيئية:

أساسيات ومبادئ

تأليف

أ.د. علاء الدين بيومي عبد الخالق مصطفى

أستاذ كيمياء وسمية المبيدات

قسم وقاية النبات – كلية الزراعة – جامعة عين شمس

أ.د. على سعيد محمد آل سرار

أستاذ كيمياء وسمية المبيدات

قسم وقاية النبات – كلية علوم الأغذية والزراعة

جامعة الملك سعود

د. ياسر أبو بكر عوض الله

أستاذ كيمياء وسمية المبيدات المساعد

قسم وقاية النبات – كلية علوم الأغذية والزراعة

جامعة الملك سعود

دار جامعة الملك سعود للنشر

KING SAUD UNIVERSITY PRESS

ص.ب ٦٨٩٥٣ - الرياض ١١٥٣٧ المملكة العربية السعودية

ح جامعة الملك سعود، ١٤٤١هـ (٢٠١٩م)

فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر

مصطفى، علاء الدين بيومي

المعالجة الحيوية للملوثات البيئية : أساسيات ومبادئ./ علاء الدين بيومي مصطفى ؛ علي سعيد آل سرار ؛ ياسر أبوبكر عوض الله.- الرياض، ١٤٤١هـ

٦٣٠ص، ١٧×٢٤سم

ردمك: ٧-٨٠٤-٥٠٧-٦٠٣-٩٧٨

١- تلوث البيئة ٢- مكافحة التلوث أ. آل سرار، علي سعيد (مؤلف مشارك) ؛ ب. عوض الله، ياسر أبوبكر (مؤلف مشارك) ج. العنوان

ديوي ٧, ٦١٤ ١٧٦٨/ ١٤٤١

رقم الإيداع: ١٧٦٨/ ١٤٤١

ردمك: ٧-٨٠٤-٥٠٧-٦٠٣-٩٧٨

نشر هذا الكتاب بناء على موافقة المجلس العلمي في اجتماعه الثامن عشر للعام الدراسي ١٤٣٩/ ١٤٤٠هـ المعقود بتاريخ ١٧/ ٨/ ١٤٤٠هـ الموافق ٢٢/ ٤/ ٢٠١٩م، بعد استيفائه شروط التحكيم العلمي بالجامعة.

جميع حقوق النشر محفوظة. لا يسمح بإعادة نشر أي جزء من الكتاب بأي شكل وبأي وسيلة سواء كانت إلكترونية أو آلية بما في ذلك التصوير والتسجيل أو الإدخال في أي نظام حفظ معلومات أو استعادتها بدون الحصول على موافقة كتابية من دار جامعة الملك سعود للنشر.

دار جامعة الملك سعود للنشر
KING SAUD UNIVERSITY PRESS

مقدمة الكتاب

بصورة عامة، يمكن القول بأن جودة الحياة على الأرض مرتبطة بشكل كبير بنوعية البيئة المحيطة. وكما هو معروف، فإن المكونات البيئية عديدة ومتنوعة لكن مكوناتها الأساسية تكمن في التربة، والماء، والهواء. وفيما يتعلق بالتربة، فمن الصعوبة بمكان تحديد وتعريف جودة التربة بشكل عام وذلك لأن التربة بمكوناتها تتباين من مكان إلى آخر. بمعنى آخر، فإن جودة التربة ترتبط بمكونات التربة وتركيبها وكيفية قيام هذه المكونات بوظائفها في بيئة ما. وبصفة عامة، فإن الوظائف الرئيسة للتربة يمكن وصفها بشكل عام في ضوء قدرتها على الاحتفاظ بالماء وجودة الهواء وقدرتها المستدامة في الحفاظ على إنتاجية النبات والحيوان ومن ثم ينعكس ذلك على صحة الإنسان.

وفيما يتعلق بتلوث الماء، فقد اتسع هذا التلوث ليشمل مياه الأنهار والآبار والبحار والمحيطات بشتى أنواع الملوثات التي عرفها الإنسان وهو الأمر الذي أصبح يشكل تهديداً حقيقياً لحياته وهو الأمر الذي تزايدت معه صعوبة الحصول على مياه نظيفة صالحة للاستهلاك. من هنا نشأت فكرة إعادة تدوير المياه وتعدد طرق تنقيتها وتعقيمها لمجابهة تزايد الطلب على المياه خاصة مع تزايد التعداد البشري بشتى بقاع الأرض.

من جهة أخرى، فقد لوحظ أن هناك تزايداً كبيراً ومعنوياً في معدلات انسياب الملوثات إلى البيئة بسبب أنشطة الإنسان خلال العديد من العقود الماضية أثناء التقدم الكبير والسريع في المجال الصناعي. والآن، فإن الإنسان يحاول جاهداً أن يجد الطرق والوسائل التي تعينه على مجابهة ما ينتج من مشاكل هذا التقدم الصناعي الكبير المتركز في صورة تلوث جميع ما يحيط به من مكونات بيئية. بمعنى آخر، لوحظ أن كثرة دخول الملوثات إلى النظم البيئية بصورة أسرع وأكبر من مقدرة هذه

النظم على تنظيفها الذاتي، كان ذلك من أهم توابع حدوث تراكم لهذه الملوثات خاصة في التربة. وفي الحقيقة، فقد اتضح أن الإنتاج الموسع للمركبات الكيميائية بمختلف أنواعها مثل المذيبات العضوية، المنتجات البترولية مثل الوقود ومضافات الوقود، المبيدات، الصبغات، البلاستيك وغيرهم الكثير علاوة على المعادن قد أدى إلى حدوث تأثيرات سلبية بشكل كبير على جودة البيئة.

وحيث إن تلوث التربة والماء أصبح من المشاكل البيئية على مستوى العالم، فقد قامت العديد من الهيئات والمؤسسات العلمية باتخاذ العديد من السياسات واتباع التقنيات في محاولات عديدة جادة لمجابهة ومعالجة التربة الملوثة والماء الملوث بالعديد من دول العالم. من جهة أخرى، فقد لوحظ أنه في العديد من الدول يتم تجاهل مشكلة تلوث التربة والماء نظراً للتكاليف الاقتصادية الباهظة التي تتطلبها عملية إزالة الملوثات منهما باتباع الطرق التقليدية. وفي الأعوام الأخيرة بدأ الوعي الشعبي يتزايد وينادي بل ويطالب بضرورة اتخاذ كافة التدابير لإجراء عملية التنظيف بشكل ضروري لا حياد عنه بالقدر الذي من خلاله اضطرت العديد من الحكومات اتخاذ قرارات ووضع قوانين منظمة من شأنها تقليل حدة التلوث الموجود بالفعل في بعض الأماكن ومنع التلوث في أماكن أخرى ما زالت محتفظة بجودتها النوعية.

وفيما يتعلق بالهواء كأحد المكونات البيئية شديدة الأهمية لاستمرار حياة العديد من الكائنات الحية على وجه الأرض، فإن تلوث هذا الهواء بالعديد من الملوثات أصبح في الحياة العصرية من الأمور شديدة التعقيد والتي عقدت من خلالها العديد من المؤتمرات العلمية الدولية من أجل الإقلال من مستويات ملوثات الهواء بالعديد من دول العالم. بمعنى آخر، فإنه بالرجوع إلى تعريف "تلوث الهواء" فإنه ليس بالأمر البسيط. فيمكن لأي إنسان أن يقول أن تلوث الهواء بدأ عندما بدأ الإنسان بحرق الوقود. وبعبارة أخرى، يمكن أن يطلق على جميع الانبعاثات البشرية في الهواء اسم تلوث الهواء، لأنها تغير في طبيعة التركيب الكيميائي للغلاف الجوي الطبيعي. كذلك يمكن أن يطلق على الزيادة في التركيزات العالمية لبعض الغازات مثل ثاني أكسيد الكربون و الميثان وثاني أكسيد النيتروجين أنهما السبب في تلوث الهواء. وعلى الرغم من أنه في بعض الحالات تكون التركيزات التي تم الكشف عنها لم يثبت أنها سامة للبشر والنظام البيئي لكن يجب أولاً التفرقة بين التأثير السام والتأثير الضار. لذلك فكان يجب تعريف كلمة ضار وبالفعل تبين أن لها تأثيرًا سلبيًا على صحة الكائنات الحية.

فعلى سبيل المثال، كانت انبعاثات الكلوروفلوروكربون الناتجة من الصناعات المختلفة البشرية المختلفة في مستويات آمنة لأنها خاملة في الجزء الأدنى من الغلاف الجوي الذي يطلق عليه التروبوسفير. ومع ذلك، فإنه بمجرد دخول هذه المواد الكيميائية إلى طبقة ستراتوسفير، فيمكن للأشعة فوق البنفسجية تحويلها إلى أنواع شديدة التفاعل يمكن أن يكون لها تأثير مدمر على طبقة الأوزون الاستراتوسفيري. وبالمثل، كانت انبعاثات ثاني أكسيد الكربون البشرية الناتجة عن عمليات الاحتراق آمنة لأنها ليست سامة، ولكن تراكم ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي على المدى الطويل قد يؤدي إلى تغير مناخي، يمكن أن يكون ضاراً بالإنسان والنظام الإيكولوجي. وفي الحقيقة، فإن تلوث الهواء بالعديد من الملوثات لم تكن فقط ناتجة من أنشطة الإنسان الصناعية وإنما هناك مسببات أخرى لتلوث الهواء مثل الغازات والجسيمات الناتجة من الانفجارات البركانية، والأدخنة الناتجة عن حرائق الغابات الناجمة عن الصواعق الطبيعية. أيضا، يمكن للإنسان أن يؤثر على انبعاثات المركبات العضوية المتطايرة الحيوية من خلال قطع الأشجار. والخلاصة يمكن القول بأنه قد أمكن تحديد ملوث الهواء على أنه أي مادة تنبعث في الهواء من مصدر بشري أو حيوي أو جغرافي، إما أنها ليست جزءًا من الغلاف الجوي الطبيعي أو موجودة بتركيزات أعلى من تركيزها الطبيعي، وقد يتسبب في تأثير ضار على المدى القصير أو الطويل. وفي الحقيقة، فقد نشأت فكرة المعالجة الحيوية للهواء الملوث باستخدام المعالجة النباتية (Phytoremediation) حيث تكون هناك العديد من أنواع الأشجار القادرة على امتصاص العديد من أنواع الغازات الضارة.

بناءً على ذلك، فقد كان لزاماً علينا أن نتعرف على التقنيات المتبعة في معالجة الملوثات البيئية خاصة بطرق حيوية نظراً لما تقدمه من مميزات قد افتقدتها التقنيات التقليدية غير الحيوية. ونظراً لافتقار المكتبة العربية لهذه النوعية من الكتب باللغة العربية، فقد كان الهدف من إصدار هذا الكتاب تحقيق جزء من الوعي العام سواءً على المستوى البحثي أو التعليمي وتقديم الأساسيات والمبادئ التي تعتمد عليها عمليات معالجة الملوثات البيئية حيوياً خاصة في التربة والماء الأرضي، بطرق آمنة يمكن تطبقيها في كافة بقاع الوطن العربي .

والله من وراء القصد،

المؤلفون

المحتويات

مقدمة الكتاب ..... ك

الفصل الأول: المعالجة الحيوية: تاريخها، التعرف عليها وعناصرها

١-١ مقدمة ١
١-٢ تعريف المعالجة ٣
١-٣ نظرة عامة عن المعالجة الحيوية ٣
١-٤ أساسيات المعالجة ٥
١-٥ العوامل المتحكمة في المعالجة الحيوية..... ٨
١-٦ إستراتيجيات المعالجة الحيوية ١٣
١-٧ مميزات المعالجة الحيوية ١٨
١-٨ عيوب المعالجة ١٩
١-٩ المعالجة ٢٠
١-١٠ المراجع ٢٣

الفصل الثاني: مقدمة في المعالجة الحيوية

٢-١ حجم مشكلة التلوث البيئي بالمواد الخطرة ٢٥
٢-٢ الملوثات العامة للماء الأرضي.....٢٧

٢-٢-١ الهيدروكربونات البترولية ٣٠
٢-٢-٢ المركبات الكلورينية ٣٣
٢-٢-٣ مبيدات الآفات ٣٥
٢-٢-٤ ملوثات ناشئة..... ٣٧
٢-٣ التطور التاريخي للتقنية الحيوية البيئية والمعالجة الحيوية ٤٠
٢-٤ مميزات وعيوب عمليات المعالجة الحيوية..... ٤٨
٢-٥ المراجع المختارة..... ٥٢

الفصل الثالث: آليات تحول الملوثات

٣-١ مقدمة..... ٥٥
٣-٢ عمليات التحول الكيميائي ٥٦
٣-٢-١ التحلل المائي..... ٥٦
٣-٢-٢ تفاعلات الأكسدة والاختزال الكيميائي ٦٧
٣-٣ عمليات التثبيت وتغير الشكل (الحالة..... ٧٠
٣-٤ الامتزاز ٧١
٣-٥ الترسيب ٧٥
٣-٦ التطاير ٧٦
٣-٧ تكوين المعقدات..... ٧٦
٣-٨ قائمة المراجع ٧٨

الفصل الرابع: أساسيات الهدم الحيوي

٤-١ مقدمة..... ٨١
٤-٢ المحرك البكتيري ٨٢
٤-٣ الفسيولوجيا البكتيرية ٨٣

٤-٤ الأيض البكتيري ٨٥
٤-٥ التعبير الجيني ٨٨
٤-٦ تعريف مصطلحات الهدم الحيوي ٩٥
٤-٧ متطلبات الهدم الحيوي ٩٩
٤-٨ احتواء الملوثات على مركبات صعبة الهدم ١٠٨
٤-٩ التأقلم ١١١
٤-١٠ الآليات الشائعة للتحولات الحيوية ١١٥
٤-١١ تأثير طبيعة تركيب الملوث العضوي على هدمه الحيوي ١٣٥
٤-١٢ التعاون بين أنواع ميكروبية مختلفة لتحفيز الهدم الحيوي ١٣٧
٤-١٣ حركيات الهدم الحيوي ١٤٤
٤-١٤ المراجع المختارة ١٤٦

الفصل الخامس: تقنيات المعالجة الحيوية

٥-١ مقدمة ١٥١
٥-٢ اعتبارات خاصة عند المعالجة المكانية ١٥٣
٥-٣ المعاملات الفيزيوكيميائية ١٥٥
٥-٤- المعاملات البيولوجية ١٦٠
٥-٥ نظرة عامة لإستراتيجيات المعالجة الحيوية ١٦١
٥-٦ المعالجة الحيوية الهوائية مقابل اللاهوائية ١٦٤
٥-٧ التحفيز الحيوي مقابل التلقيح الحيوي ١٦٤
٥-٨ المعالجة الحيوية خارج موقع التلوث مقابل داخله ١٦٦
٥-٩ المعالجة الحيوية الميكروبية مقارنة بالنباتية ١٧١
٥-١٠ الطرق العامة لتحقيق المعالجة الحيوية المكانية ١٧٩
٥-١١ اختيار المادة المغذية ونظام توصيل المادة المحفزة ١٨٣
٥-١٢ المراجع المختارة ١٨٥

الفصل السادس: المعالجة النباتية للملوثات البيئية: أساسيات ومفاهيم

٦-١ مقدمة ١٨٩
٦-٢ عمليات المعالجة النباتية ١٩١
٦-٣ امتصاص و أيض المركبات العضوية بواسطة النبات: نموذج الكبد الأخضر ١٩٧
٦-٤ طرق تطبيق المعالجة النباتية ٢٠٤
٦-٥ زيادة كفاءة وموثوقية المعالجة النباتية باستخدام وسائل حديثة ٢٠٥
٦-٦ مساهمات كل من النبات والكائنات الدقيقة في المعالجة النباتية ٢٠٦
٦-٧ تحسين المعالجة النباتية باستخدام التقنية الحيوية ٢٠٧
٦-٨ مميزات المعالجة النباتية ٢٠٨
٦-٩ معوقات المعالجة النباتية ٢٠٩
٦-١٠ الاعتبارات البيئية للمعالجة النباتية ٢١١
٦-١١ استعادة الملوثات المعدنية من النباتات ٢١٧
٦-١٢ تكلفة المعالجة النباتية ٢١٨
٦-١٣ تنقية التربة والمياه الملوثة بالمواد المشعة ٢١٩
٦-١٤ التطبيقات الحالية للمعالجة النباتية والاتجاهات المستقبلية ٢٢٠
٦-١٥ المراجع المختارة ٢٢٢

الفصل السابع: المعالجة الفطرية للملوثات البيئية: أساسيات ومفاهيم

٧- ١ مقدمة ٢٢٩
٧-٢ السمات البيئية للفطريات ٢٣٢
٧-٣ الشكل الظاهري للفطريات ٢٣٣
٧-٤ قياس النمو ٢٣٤
٧-٥ الهدم والتدهور الحيوي الفطري ٢٣٥
٧-٦المفاعلات الحيوية الفطرية ٢٣٦

٧-٧ طرق الكشف عن الفطريات الهادمة ٢٣٧
٧-٨ الفطريات كدلائل بيئية ٢٣٩
٧-٩ المعالجة الفطرية ٢٤٠
٧-١٠ فطر العفن الأبيض في المعالجة الحيوية ٢٤١
٧-١١ بيئة المعالجة الفطرية ٢٤٣
٧-١٢ الهندسة الوراثية في المعالجة الفطرية ٢٤٤
٧-١٣ التنوع الفطري وهدم الملوثات ٢٤٦
٧-١٤ الإنزيمات الهادمة و الهدم ٢٤٩
٧-١٥ هدم الملوثات العضوية المستعصية ٢٦٢
٧-١٦ معالجة المعادن وأشباه المعادن ٢٦٣
٧-١٧ التطبيقات البيئية المحتملة ٢٦٤
٧-١٨ الاستنتاج والاتجاهات المستقبلية ٢٦٩
٧-١٩ قائمة المراجع ٢٧٠

الفصل الثامن: الهدم الحيوي والمعالجة الحيوية للمبيدات

٨-١ مقدمة ٢٧٩
٨-٢ التأثيرات المفيدة للمبيدات ٢٩٢
٨-٣ أضرار المبيدات ٢٩٤
٨-٤ المبيدات والبيئة ٢٩٤
٨-٥ الهدم الحيوي ٢٩٩
٨-٦ العوامل المؤثرة على هدم المبيدات في التربة ومياه الصرف ٣٠٠
٨-٧ المبيدات الكلورينية العضوية ٣٠٥
٨-٨ المبيدات الفوسفورية العضوية ٣١٢
٨-٩ المبيدات الكرباماتية ٣١٦

٨-١٠ المعالجة الحيوية ٣١٨
٨-١١ تعريف المعالجة الحيوية وتاريخها ٣١٩
٨-١٢ أنواع المعالجة الحيوية ٣٢٠
٨-١٣ تقنيات المعالجة الحيوية: التطوير والتطبيق ٣٢٠
٨-١٤ المعالجة الحيوية للمبيدات ٣٢١
٨-١٥ قائمة المراجع ٣٢٨

الفصل التاسع: المعالجة الحيوية للمعادن

٩- ١ مقدمة ٣٣٧
٩- ٢ تلوث (اتساخ) التربة ٣٤٦
٩- ٢-١ التلوث (الاتساخ) بالمعادن الثقيلة ٣٤٧
٩- ٢-٢ مصادر المعادن الثقيلة في بيئة التربة ٣٥٣
٩- ٣ تفاعلات المعادن الثقيلة في التربة ٣٥٤
٩- ٤ الكائنات الحية الدقيقة بالتربة: التركيب وأدوات التحليل ٣٥٧
٩- ٤-١ الكائنات الحية الدقيقة والتلوث (الاتساخ) بالمعادن الثقيلة ٣٥٩
٩- ٤-٢ استخدام الكائنات الحية الدقيقة في المعالجة الحيوية للمياه الملوثة بالمعادن الثقيلة ٣٦٠
٩- ٤-٣ آلية الامتزاز الحيوي ٣٦٢
٩- ٥ طرق بيولوجية للمعالجة: المعالجة الحيوية ٣٦٣
٩- ٦ المعالجة الحيوية للمعادن من خلال الخلايا النامية ٣٦٥
٩- ٧ توظيف البروتينات المعدنية النباتية والميكروبية في المعالجة الحيوية للماء الملوث بالمعادن ... ٣٧٦
٩- ٨ المعالجة النباتية ٣٧٧
٩- ٩ قائمة المراجع ٣٨٥

الفصل العاشر: المعالجة الحيوية للمنتجات البترولية

١٠-١ مقدمة ٣٩٩
١٠-٢ الزيت الخام ٤٠٢
١٠-٣ العوامل المؤثرة على التدهور الحيوي للهيدروكربونات البترولية ٤٠٣
١٠-٤ المعالجة الحيوية للهيدروكربونات: التعريف والتقنية ٤١٤
١٠-٥- ٥ التحفيز الحيوي مقابل التزايد الحيوي ٤١٩
١٠-٦ المعالجة الحيوية لانسكابات الزيت البحرية ٤٢٢
١٠-٧ المعالجة الحيوية للتربة الملوثة ٤٢٤
١٠-٨ المعالجة الحيوية للماء الأرضي والطبقة الصخرية المائية الملوثة بالزيت ٤٢٦
١٠-٩ المعالجة الفطرية للهيدروكربونات البترولية ٤٢٧
١٠-١٠ المعالجة النباتية للتربة الصحراوية الملوثة بزيت البترول ٤٤٣
١٠-١١ قائمة المراجع ٤٤٨

الفصل الحادي عشر: المعالجة الحيوية للمتفجرات

١١-١ مقدمة ٤٦١
١١-٢ خصائص المتفجرات ودخولها ومآلها في البيئة ٤٦٦
١١-٢-١ متفجرات مجموعة نيتروأروماتيك ٤٦٦
(أ) تحول مادة (TNT) بواسطة البكتيريا الهوائية ٤٧٣
(ب) تحول مادة (TNT) بواسطة البكتيريا اللاهوائية ٤٧٧
(ب-١) تحول مادة (TNT) بواسطة بكتيريا ميثانوجين وبكتيريا التخمر ٤٧٧
(ب-٢) بكتيريا اختزال الكبريتات ٤٧٩
(ج) تحول وهدم مادة (TNT) بفعل الفطريات ٤٧٩
١١-٢-٢ متفجرات مجموعة نيترامين ٤٨١
(أ) كيمياء ومصير مركبات نيترامين في البيئة ٤٨٣

(ب) الهدم الحيوي لمركبات نيترامين تحت الظروف اللاهوائية ٤٨٥
(جـ) الهدم الحيوي لمركبات نيترامين تحت الظروف الهوائية..... ٤٨٩
(د) الهدم الحيوي لمركبات نيترامين بواسطة الفطريات ٤٩٠
١١-٣ التحولات الحيوية للمركبات المتفجرة ٤٩١
١١ - ٣-١ مادة (TNT) ومتفجرات النيتروأروماتيك ٤٩١
١١-٣-٢ متفجرات مجموعة النيترامين..... ٤٩٣
١١-٣-٣ عمليات معاملة التربة لمعالجة المتفجرات ٤٩٤
١١-٣-٤ الإزالة النباتية لسمية المتفجرات..... ٤٩٧
١١-٣-٥ المعالجة النباتية للمتفجرات بواسطة النباتات البرية والمحولة وراثياً..... ٥٠٠
١١-٣-٦ استخدام النباتات المحولة وراثياً في المعالجة النباتية للمتفجرات ٥١٣
١١-٤ قائمة المراجع ٥١٧

الفصل الثاني عشر: المعالجة الحيوية لمركبات ثنائية الفينيل عديدة الكلور (PCBs)

١٢-١ مقدمة..... ٥٢٩
١٢-١-١ خصائص مركبات PCBs ٥٣٢
١٢-١-٢ استخدامات مركبات PCBs ٥٣٥
١٢-١-٣ مصادر مركبات PCBs..... ٥٣٥
١٢-١-٤ التأثيرات الصحية والبيئية لمركبات PCBs ٥٣٧
١٢-٢ التحول البيولوجي لمركبات PCBs..... ٥٤٠
١٢-٣ تحديات في مجال هدم مركبات PCBs ٥٤٩
١٢-٤ المعالجة الحيوية للتربة والرواسب الملوثة بالمركبات ثنائية الفينيل عديدة الكلور..... ٥٥٠
١٢-٥ تقنيات المعالجة الحيوية اللاهوائية للرواسب ٥٦١
١٢-٦ تقنيات المعالجة الحيوية الهوائية للتربة والبيئات الطبيعية الأخرى ٥٦٣
١٢-٧ تقنيات المعالجة الحيوية اللاهوائية-الهوائية المتتابعة للبيئات الطبيعية..... ٥٦٧

١٢-٨ الهدم الفطري لمركبات PCBs ٥٦٨
١٢-٨-١ الفطريات الخيطية..... ٥٦٨
١٢-٨-٢ الخمائر ٥٧٠
١٢-٨-٣ فطريات العفن الأبيض..... ٥٧١
١٢-٨-٤ الهدم والمعدنة ٥٧١
١٢-٨-٥ النواتج والمسالك الأيضية ٥٧٢
١٢-٨-٦ دور المنجنيز في هدم مركبات PCBs ٥٧٥
١٢-٨-٧ المعالجة الحيوية لمركبات PCBs في التربة..... ٥٧٧
١٢-٨-٨ التحول الحيوي لمركبات PCBs بفعل إنزيمات لاكيز..... ٥٧٧
١٢-٩ مقارنة بين النظام الفطري والبكتيري ٥٧٨
١٢-١٠ المعالجة النباتية لمركبات PCBs ٥٨٠
١٢-١١ قائمة المراجع ٥٩٠

الفصل الثالث عشر: تطبيقات التقنية النانوية في معالجة الملوثات

١٣-١ مقدمة..... ٦٠١
١٣-٢ الجسيمات النانوية في المعالجة الحيوية للملوثات السامة..... ٦٠٢
١٣-٣ ما الجسيمات النانوية ؟ ٦٠٣
١٣-٤ الجسيمات النانوية في الطبيعة..... ٦٠٤
١٣-٥ الجسيمات النانوية ودورها في المعالجة الحيوية ٦٠٥
١٣-٦ الجسيمات النانوية في تنقية المياه ٦٠٨
١٣-٧ المحفزات النانوية والجسيمات النانوية النشطة في تفاعلات الأكسدة والاختزال..... ٦١٢
١٣-٨ الأغشية الفعالة ذات التراكيب النانوية..... ٦١٣
١٣-٩ الجسيمات النانوية النشطة حيوياً ٦١٣
١٣-١٠ جسيمات ديندرايمرز تزيد من الترشيح الفائق ٦١٥

١٣-١١ عيوب المواد النانوية في تنقية المياه ٦١٥
١٣-١٢ التخليق الحيوي للجسيمات النانوية وخفض سمية المعادن ٦١٦
١٣-١٣ البكتيريا مغناطيسية الحركة: أعجوبة الطبيعة ٦١٧
١٣-١٤ التخليق الحيوي لجسيمات الزرنيخ النانوية ٦١٨
١٣-١٥ التخليق الحيوي لجسيمات السيلينيوم والتيلريوم النانوية..... ٦١٨
١٣-١٦ التخليق الحيوي لجسيمات الكادميوم النانوية ٦١٩
١٣-١٧قائمة المراجع ٦٢٠
كشاف الموضوعات ٦٢٥