الفصل الخامس

تنقية المياه الملوثة باستخدام النباتات في الأراضي الرطبة

Wastewater Purification by Plants in Wetlands

1.5. مقدمة Introdution :

يعتبر صرف المياه العادمة والملوثة بالعديد من الملوثات في المجاري المائية - سواء أكان ذلك في البحيرات أو الأنهار، وتراكم المواد العضوية، وزيادة تركيزها بها لدرجة تصل إلى التشبع الغذائي Eutrophication التي سبق الإشارة إليها بالفصل الأول - مدمرًا للأحياء المائية، سواء النباتية أو الحيوانية. هذا الدمار للأحياء المائية نتيجة التراكم والتشبع بالمواد العضوية والمغذيات، وما يتبعه من زيادة نشاط ونمو النباتات المائية والطحالب والكائنات الحية الدقيقة؛ مما ينتج عنه نقص مستمر في الأكسجين الذائب في الماء، فتسود الظروف اللا هوائية Anaerobic على الظروف الهوائية Aerobic، وتتراكم معها نواتج التحلل والتمثيل الغذائي اللا هوائي من الميثان والإيثيلين وكبريتور الأيدروجين وحامض البيوتريك، وغيرها من المواد ذات الوزن الجزيئي المنخفض السامة جدًّا للكائنات الحية الهوائية.

والمجاري المائية تنمو بها الطحالب، وغيرها من النباتات الخضراء في الطبقة العليا الغنية بالأكسجين الذائب، وتقوم بالتمثيل الضوئي، يليها الطبقة الوسطى التي ما زال الضوء فيها كافيًا لعملية التمثيل الضوئي، وأخيرًا الطبقة العميقة غير الهوائية، والتي تنتشر بها بكتيريا الكبريت الأرجوانية Purple sulphur والبكتيريا الخضراء Green bacteria، والتي تتغذى على نواتج التمثيل الغذائي للكائنات غير الهوائية الموجودة في الرواسب في قاع الأنهار والبحيرات، مثل كبريتور الأيدروجين وحامض البيوتريك، أو غيرها من الأحماض الدهنية (حيث تعمل هذه المواد كمستقبل

للإلكترونات في عملية التمثيل الضوئي)، وبالتالي تتحلل هذه المركبات - والتي تعتبر سامة للنباتات الخضراء - الموجودة في الطبقة السطحية من البحيرات. ومعنى ذلك أن الطبقة الوسطى من بكتيريا التمثيل الضوئي تعمل كمرشح، وتحافظ على الطبقة العليا من الماء خالية من المواد السامة. ولكن إذا إختل هذا الاتزان بين الكائنات المختلفة، بزيادة نشاط ونمو الطحالب بدرجة كبيرة، وما يتبعه من ازدياد مقدار الطحالب الميتة، والتي تهبط إلى طبقة الرواسب في القاع، فإن الكائنات اللا هوائية التي تعيش بهذه الرواسب تجد مصدرًا كبيرًا من الغذاء، وتنتج كمية كبيرة من المواد السامة، فإذا كانت كمية هذه المواد السامة أكثر من قدرة بكتيريا التمثيل الضوئي في الطبقة الوسطى على استخدامها، فإن التأثير المرشح لهذه البكتيريا يتضاءل أو يتلاشى؛ مما يؤدي إلى ازدياد تركيز المواد السامة في الطبقة السطحية، والتأثير على نمو ونشاط النباتات الخضراء، فيقل الأكسجين الناتج من التمثيل الضوئي، وتتحول الطبقة السطحية من البحيرة تدريجيًّا إلى الظروف اللا هوائية، وتتأثر حياة الكائنات الهوائية، بما فيها الأسماك.

ومن العرض السابق، يتضح مدى التأثير البيئي السلبي للمخلفات التي يتم إلقاؤها أو تصريفها في المجاري المائية، والتي يتناسب أثرها الضار مع مقدار حمل التلوث (كمية المخلفات التي يتم إلقاؤها أو تصريفها في زمن محدد، وتركيز الملوثات بها)، فكلما زادت كمية المخلفات وزاد ما بها من ملوثات وتم إلقاؤها في وقت قصير، زاد أثرها الضار، وأصبح كبيرًا، في حين أنه إذا ما قلت كمية المخلفات وقل ما بها من ملوثات، وكان إلقاؤها على فترات بعيدة، فإن تأثيرها الضار يكون قليلًا، أو دون أي ضرر ملحوظ في أحيان كثيرة، وفي هذه الحالة فإن المخلفات غالبًا ما تكون من المواد العضوية غير الثابتة والقابلة للهدم الميكروبي. لكن في المقابل يجب ألا ننسى الأثر التراكمي الضار لبعض الملوثات المعدنية، مثل الفلزات الثقيلة والمبيدات الثابتة، والذي يحدث حتى وإن كان تركيزها منخفضًا أو كمياتها قليلة، حيث تتراكم في البيئة مع الزمن وتكرار الإضافة.

2.5. أنواع الملوثات Types of pollutants:

سبق التعرض لأنواع ملوثات المياه بالتفصيل في الفصل الأول، ونذكر هنا بأن هذه الملوثات من المخلفات العضوية Organic wastes الناتجة من الصرف الصحي، والمواد العضوية النباتية والحيوانية، وهي مواد قابلة للهدم تتركب من مواد كربوهيدراتية ودهون ومركبات نتروجينية وفوسفاتية، وبعض العناصر والمغذيات والمنشطات الحيوية Nutrients and bio-stimulants، التي تنتج من التحلل والهدم الميكروبي للمخلفات العضوية، والمواد العالقة Suspended solids، وهي مواد صلبة صغيرة الحجم، توجد معلقة في الماء، ومصدرها الرئيس تجوية التربة الزراعية، والطرق، وأعمال ومخلفات البناء، والملوحة Salinity الناشئة عن كمية الأملاح المعدنية الذائبة في الماء، والمواد السامة Toxicants هي ملوثات متنوعة من مصادر مختلفة، بعضها يتكون من مركبات ثابتة لا تتحلل وهي ذات ضرر كبير، وبعضها يحدث له هدم إلى مركبات غير سامة أو أقل خطورة من المصدر الناتجة عنه، والكائنات الممرضة Pathogens الموجودة بمخلفات الصرف الصحي ومخلفات صناعة اللحوم والجلود وغيرها. يضاف إلى هذا درجة حرارة المياه الملوثة Heat، الناشئة من عمليات التبريد بالمصانع؛ فالحرارة المرتفعة قاتلة للأسماك والأحياء المائية، في الوقت الذي تشجع فيه نمو عدد من الطحالب والنباتات غير المرغوبة، والحرارة الأقل نسبيًّا تؤدي إلى اختلال في نمو وتكاثر بعض الأحياء الحساسة للحرارة، وباختلال هذا التوازن البيئي الذي تحدثه الحرارة تنخفض مستويات الأكسجين الذائب؛ مما يهدد الحياة المائية. وتعدد وتنوع الملوثات الموجودة في المخلفات الصلبة أو في المياه العادمة التي يتم صرفها في المجاري المائية، يتطلب تعدد وسائل المعالجة لها؛ للتخلص منها أو تقليل آثارها الضارة إذا ما أُريد إعادة استخدام المياه في الاستخدامات الحياتية المختلفة.

ومن البدائل المهمة للطرق التقليدية في تنقية المياه الملوثة أو العادمة لإعادة استخدامها في الزراعة - والتي تستهلك قدرًا كبيرًا من الطاقة وكميات كبيرة من الكيماويات، وينتج عنها كميات كبيرة من الحمأة في صورة مخلفات، هذا فضلًا عن احتياجها إلى العمالة الكثيفة خلال دورة المعالجة - هو استخدام النباتات المائية

المتخصصة في التنقية Phytoremediation، وزراعتها في الأراضي الرطبة أو الغدقة أو المغمورة بالماء، والتي يطلق عليها "التنقية باستخدام الأراضي الرطبة أو Wetlands"، والتي تنقسم - من حيث التكوين - إلى نوعين:

3.5. الأراضي الرطبة الطبيعية Natural wetlands:

الأراضي الرطبة الطبيعية هي عبارة عن نظام بيئي يجمع بين التربة الرطبة أو الغدقة wetland، والنباتات المائية Aquatic plants، التي نمت بها وتأقلمت جذورها وسلوكها على الحياة فيها، والكائنات الحية الدقيقة Microorganisms التي تعيش بين جنباتها. وتتواجد الأراضي الرطبة الطبيعية في الأماكن المنخفضة، وعلى جانبي المجاري المائية والينابيع والبحيرات، كما تتواجد أيضًا في المناطق التي بها أراضٍ قليلة النفاذية، بحيث تصبح تربتها - في كل الأحوال - مشبعة أو مغمورة بالماء، وتمثل نحو 6٪ من مساحة الكرة الأرضية. والأراضي الرطبة الطبيعية (شكل 1-5) تتواجد في الطبيعة منذ آلاف السنين، وكان يسود اعتقاد لدى كثير من الناس أن هذه الأراضي الرَّطبة لا فائدة منها، وبموجب هذا الاعتقاد، تم ردم الكثير منها وتخريبها. وحديثًا - ومنذ عام 1970م - بدأ ظهور أصوات ودراسات تبرز أهمية الأراضي الرطبة بيئيًّا؛ حيث تساعد على ضبط الفيضانات باستيعاب كمياه كبيرة من مياهها، والاحتفاظ بكميات كبيرة منها لفترات طويلة، كما تُستخدم كمناطق لاستقبال المياه العادمة، والتي ثبت قدرتها على تنقية المياه التي تستقبلها من خلال نظامها البيئي الذي يُعتبر من أكثر النظم البيئية تنوعًا، وهي من خلال هذا التنوع تعمل على تنمية الحياة البرية، وتعويض ما يفقد من مياه الخزان الجوفي، وهي - فوق هذا - تعتبر من أماكن التنزه والترويح الطبيعية.

للمحافظة على ما تَبَقَّى من هذه الأراضي الرَّطبة ببعض المناطق كاحتياطي للأراضي الرّطبة، تم في عام 1975م العمل من خلال اتفاقية ومعاهدة رامسار Ramsar الدولية (والتي تحمل اسم مدينة رامسار في إيران)، والتي تنص على الحفاظ والاستخدام

المستدام لمناطق الأراضي الرطبة، ووقف التعدي عليها، وتعظيم مهامها البيئية، وتنمية دورها الاقتصادي، والثقافي، والعلمي، وقيمتها الترفيهية.

وفي عام 1990م، وقّعت 52 دولة الاتفاقية، وتم تحديد 445 موقعًا باعتبارها أراضٍ رطبة مغمورة ذات أهمية عالمية. وللأسف فإنه لم يتم القيام إلا باليسير من العمل لإنقاذ هذه الأجزاء من المناطق الرَّطبة في العالم. وبمزيد من الأبحاث والدراسات، أمكن التعرف على كيفية عمل الأراضي الرطبة، ودورها في تنقية المياه، وكيف يمكن محاكاة هذا النظام الطبيعي بأنظمة مشيدة هندسيًّا كإحدى التقنيات البسيطة لتنقية وتحسين نوعية المياه العادمة، وإزالة الملوثات منها قبل استخدامها في أغراض الاستخدام الأخرى.

شكل (1-5): نموذج لوحدة من الأراضي الرطبة الطبيعية

4.5. كيف تعمل الأراضي الرطبة على تنقية المياه العادمة وإزالة الملوثات؟ How wetlands working on purification of wastewater and removal the contaminants?:

عند ضخ المياه العادمة والملوثة إلى هذا النظام، بمكوناته الأساسية من بيئة الأرض الرطبة أو الغدقة، والنباتات التي تنمو بها، والكائنات الحية التي تعيش فيها - فإن

العمليات الفيزيائية Physical والكيميائية Chemical والبيولوجية Biological تشترك في منظومة واحدة؛ للعمل على التخلص من الكائنات الممرضة Pathogenic organisms. فالعوامل الطبيعية تشمل الترشيح الميكانيكي Mechanical filtration ، والترسيب Sedimentation والتعرض للأشعة فوق البنفسجية Ultraviolet radiation، التي لها دور كبير في خفض أعداد بكتيريا القولون Coliform، والعوامل الكيميائية تشمل الأكسدة Oxidation والتعرض للمبيدات الحيوية Biocides، التي تفرزها بعض نباتات الأراضي الرطبة، والامتصاص Absorption بواسطة المادة العضوية، بينما العوامل البيولوجية تشمل التضاد الحيوي Antibioses، والافتراس Predation بواسطة النيماتودا والبروتوزوا، والمهاجمة بواسطة بكتيريا التحلل Lytic bacteria والفيروسات، بالإضافة إلى الموت الطبيعي للكائنات الممرضة.

ويعتبر فهم هذه العمليات أمرًا أساسيًّا، ليس فقط لتصميم نظم ووحدات الأراضي الرطبة، ولكن لفهم طبيعة ومصير المواد الكيميائية الموجودة في المياه الداخلة إلى الأراضي الرطبة بمجرد دخولها، حتى الحصول على المياه النقية منها.

5.5. إزالة الملوثات بصفة عامة General contaminants removal:

تعتمد ميكانيكية عمل النظام البيئي للأراضي الرطبة - سواء أكان طبيعيًّا أو مشيدًا - في تنقية المياه، على الدور الذي يلعبه كل مكون من مكوناتها، وعلى العمليات الفيزيائية والبيولوجية والكيميائية التي تأخذ دورها وتؤثر في مجراها على كفاءة بيئة الأراضي الرطبة في المعالجة وتنقية المياه الملوثة.

أ- وظيفة النباتات المائية في إزالة الملوثات Aquatic plants function in contaminants removal:

فمعالجة وتنقية مياه الصرف الصحي - أو غيرها من المياه العادمة والملوثة داخل الأراضي الرطبة المشيدة - تحدث من خلال مرورها عبر بيئة الأراضي الرطبة، وما بها من نباتات يعتبر ركيزة وقاعدة من الجذور والسيقان والأوراق، والتي تهيئ مكانًا مناسبًا لنمو وتكاثر الكائنات الحية الدقيقة. فمنطقة انتشار جذور النباتات Plant

rhizosphere، توفر فيلمًا رقيقًا من المناطق الهوائية Aerobic zone حول كل شعيرة جذرية؛ نتيجة خروج وتسرب الأكسجين من الريزومات hizomesR والجذور Roots، والشعيرات الجذرية Rootlets، وفي هذه المناطق الهوائية تنتشر وتتكاثر الكائنات الحية الدقيقة الهوائية الملتصقة Periphyton بالشعيرات الجذرية، وبعيدًا عنها تنتشر وتتكاثر الكائنات الحية الدقيقة اللا هوائية؛ حيث يقل أو ينعدم وجود الأكسجين في ظروف لا هوائية. كما تعمل النباتات على امتصاص العناصر الذائبة والعناصر الناتجة من تكسير وهدم المخلفات العضوية بواسطة الكائنات الحية الدقيقة. وترتفع تركيزات النيتروجين في أوراق وسيقان النباتات، مقارنة بتركيزاتها في الجذور والريزومات، بينما يكون عنصر الفوسفور متواجدًا بتركيزات عالية ومتراكمة في أنسجة الجذور والريزومات. وتختلف النباتات في قدرتها على امتصاص العناصر الثقيلة والتخلص منها، وهو ما يجب وضعه في الاعتبار عند اختيار نوعية النباتات المطلوب زراعتها في هذه الأراضي الرطبة لتتوافق مع نوعية العناصر وتركيزاتها في المياه العادمة والملوثة.

ب- وظيفة الكائنات الحية الدقيقة في إزالة الملوثات Microorganisms function in contaminants removal:

كما سبق تناوله بالتفصيل في الفصل السابق، تقوم الكائنات الحية الدقيقة الهوائية بعملية الترويق للمياه العادمة من العوالق، كما تقوم الكائنات الحية الدقيقة الهوائية وغير الهوائية بتكسير وتحلل وأكسدة المواد العضوية المترسبة أو العالقة. **فبكتيريا التأزت** nitrificationMicrobial تعمل على أكسدة ونزع النيتروجين من المواد العضوية، وتُحول هذا النيتروجين العضوي الموجود بها إلى أمونيا، تستخدمه النباتات في تغذيتها، كما تقوم بأكسدة جزء من الأمونيا إلى نترات، تستخدمه النباتات في تغذيتها، أو يُستخدم في بناء أجسامها، كما أن الكائنات الحية الدقيقة في الظروف اللا هوائية، **وتكاثر بكتيريا عكس التأزت** Denitrification، تختزل النترات إلى غازات النيتروجين التي تنطلق إلى **الغلاف الجوي** Atmosphere. ونتيجة لهذه العمليات

ينخفض تركيز النيتروجين في المياه العادمة، كما ينخفض الحمل العضوي للمياه، وينخفض الطلب الحيوي على الأكسجين.

ج- وظيفة بيئة نمو الأراضي الرطبة في إزالة الملوثات Wetland growth media function in contaminants removal:

على هذه البيئات (الحصى – الرمل – الزلط – الفيرميكيوليت وغيرها)، تحدث تفاعلات الترسيب والادمصاص للعناصر؛ مما يقيد من حركة العناصر، ويقل تركيزها الذائب في المياه العادمة، مثلما يحدث من ترسيب للفوسفور Co-precipitated مع الحديد والألومنيوم ومركبات الكالسيوم الموجود في بيئة انتشار الجذور. كما يتم التخلص طبيعيًا من المواد الصلبة العالقة Suspended solids، حيث تستقر في قاع عمود الماء في الأراضي الرطبة ذات التدفق السطحي، أو تترسب داخل بيئة النمو في الأراضي الرطبة ذات التدفق تحت السطحي. بالإضافة إلى ذلك، فإنه يتم التخلص أو تقليل البكتيريا والفيروسات الضارة عن طريق الترشيح والامتزاز، بواسطة **الأغشية الحيوية** Bio-films على بيئة الصخور أو الحصى في أنظمة التدفق تحت السطحي أفقيًا أو رأسيًا.

ويُعتبر نشاط الكائنات الحية الدقيقة، بالإضافة إلى العمليات الكيميائية الطبيعية Natural chemical processes، مسئولان عن تكسير وإزالة 90٪ من الملوثات، ومحصلة كل هذه العمليات التي تحدث في نظام الأراضي الرطبة ما بين ترسيب وتحلل وهدم للمركبات وادمصاص وتحول وانطلاق المغذيات، يؤدي إلى أن تصبح المياه الناتجة أكثر نقاءً من المياه التي دخلت إلى نظام الأراضي الرطبة.

6.5. إزالة بعض الملوثات الخاصة Some Specific contaminants removal:

أ- إزالة النيتروجين Nitrogen removal:

إن معرفة الأشكال والصور السائدة للنيتروجين في أنظمة الأراضي الرطبة ذات أهمية كبيرة عند معالجة مياه الصرف الصحي، وغيرها من المياه العادمة والمُلوثة.

وتشمل صور النيتروجين الكلي Total nitrogen كلًّا من: النيتروجين العضوي Organic nitrogen، والنيتروجين غير العضوي Inorganic forms، الذي يشمل الأمونيا Ammonia، الأمونيوم Ammonium، النترات Nitrate، والنتريت Nitrite، وغازات النيتروجين Nitrogen gases. وتعتبر صور النيتروجين غير العضوية من الصور الضرورية لنمو النباتات في نظم الأراضي الرطبة، وفي حالة تواجدها بكميات قليلة أو شحيحة فإنها تُحِد من كثافة وحجم الغطاء النباتي في وحدات الأراضي الرطبة. وإزالة النيتروجين من مياه الصرف الصحي وغيرها من المياه العادمة مهم جدًّا؛ حيث إن صورة الأمونيا تسبب سمية للأسماك، كما أن زيادة صورة النترات في مياه الشرب تسبب مرض ميثيموجلوبين Methemoglobinemia الدم عند الأطفال، والذي يقلل من قدرة الدم على نقل الأكسجين بالجسم.

- **إزالة النيتروجين العضوي Organic nitrogen removal**:

يتم إزالة النيتروجين العضوي من خلال عملية المعدنة Mineralization، أو عملية التحول البيولوجي Biological transformation للنيتروجين العضوي خلال وأثناء تحلل وتكسر المواد العضوية إلى النيتروجين الأمونيومي. ويتم هذا التحول من خلال عمليات هوائية ولا هوائية، وغالبًا ما يشار إليها بعملية النشدرة أو إنتاج الأمونيوم Ammonification. وعملية المعدنة للنيتروجين العضوي ينشأ عنها، أو ينطلق منها النيتروجين غير العضوي أو المعدني مثل النترات، والنتريت والأمونيا، والأمونيوم، والذي يصبح ميسرًا للنباتات النامية في الأراضي الرطبة، وقد تتأثر معدلات المعدنة بمستويات الأكسجين المتاح في الأراضي الرطبة.

- **إزالة الأمونيا والأمونيوم Ammonia (NH_3) and Ammonium (NH_4^+) removal:**

تتكون الأمونيا NH_3 من خلال عملية المعدنة Mineralization أو النشدرة Ammonification للمواد العضوية تحت ظروف هوائية أو لا هوائية. ويعتبر أيون

الأمونيـوم هـو الـصورة الأوليـة لمعدنـة النيتروجـين في الأراضي الرطبـة، والذي يتكـون مـن اتحاد الأمونيا مع الماء كما يلي:

$$NH_4^+ + OH^- \rightleftharpoons NH_3 + H_2O$$

وعندما يتكون أيون الأمونيوم، فإنه يسلك عدة مسارات متاحة:

(1) يمتص بواسطة النباتات والطحالب؛ ومن ثم يتحول مرة ثانية إلى مادة عضوية.

(2) يدمص مرتبطًا مع الشحنات االسالبة على أسطح حبيبات التربة في بيئة النمو، وفي هذه الحالة يتم حمايته من مواصلة عمليات الأكسدة، حيث الظروف اللا هوائية في الأراضي الرطبة. في ظل هذه الظروف يصبح أيون الأمونيوم مستقرًّا وثابتًا، وهذا هو النموذج أو الصورة التي يسود فيها النيتروجين في الرواسب اللا هوائية للأراضي الرطبة.

(3) معظم الأراضي الرطبة بها طبقة هوائية رقيقة عند السطح، وباعتبار أن أيون الأمونيوم من الرواسب اللا هوائية، فإنه إذا ما صعد إلى هذه الطبقة فإنه يتحول إلى نتريت أو إلى نترات. زيادة سمك هذه الطبقة الهوائية يؤدي إلى زيادة فاعلية عمليات النترتة Nitrification، أو التحول إلى نترات، وفيما بين الطبقة الهوائية وغير الهوائية يتدرج تركيز أيون الأمونيوم والنترات.

- **عملية النترتة Nitrification**: هي عملية تحويل بيولوجية للمركبات النيتروجينية العضوية وغير العضوية من الحالة المختزلة Reduced state إلى الحالة الأكثر أكسدة More oxidized state (انظر الفصل السابع)، وبالتالي فإن عملية النترتة هي عملية أكسدة دقيقة، يكون ناتجها النهائي أيون النترات (NO^-_3). ومؤكد أن عملية النترتة تقل أو تنخفض عندما تتجه حالة الوسط إلى الظروف اللا هوائية، ويقل بها الأكسجين الذائب إلى 0.3 جزء في المليون. وتتم عملية النترتة على

مـرحلتين؛ الأولى: يتأكـسد فيهـا الأمونيـوم (مـن الرواسـب) إلى نيتريـت NO^{-}_{2} بواسـطة بكتيريـا النيتروزومونـاسNitrosomonas، والثانيـة: يـتم فيهـا أكـسدة النيتريـت NO_2 إلى نترات NO_3، بواسطة بكتيريا النترو باكتر Nitrobacter، كما يلي:

$$2NH_4^+ + 3O_2 \rightleftharpoons 4H^+ + 2H_2O + 2NO_2^- \text{ ---------- (1)}$$

Ammonium ion **Nitrite**

$$2NO_2^- + O_2 \rightleftharpoons 2NO_3^- \text{ ---------- (2)}$$

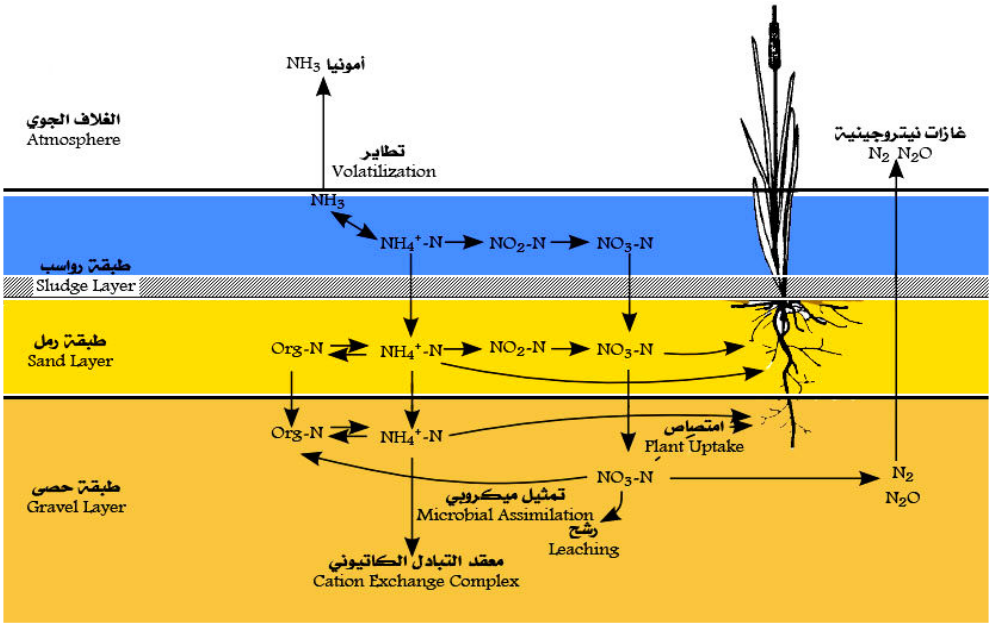
Nitrite **Nitrate**

- **عمليـــة عكـــس التـــأزت Denitrification**: هي عمليـــة اخـــتزال بيوكيميائيـــة لأنيونـــات النيتروجـــين المؤكـــسدة مـــن النـــترات NO_3^- والنيتريـــتNO_2^-، منتجـــة أكاسـيد النيتروجـين الغازيـة، مثـل أكـسيد النيتريـكNO) Nitric oxide)، وأكـسيد النيـتروز N_2O) Nitrous oxide)، وغاز النيتروجـين N_2) Nitrogen gas)، مـع مـا يصاحب ذلك من أكسدة المواد العضوية.

$$\underset{\text{Nitrate}}{NO_3^-} \rightarrow \underset{\text{Nitrite}}{NO_2^-} \rightarrow \underset{\text{Nitric oxide}}{NO} \rightarrow \underset{\text{Nitrous oxide}}{N_2O} \rightarrow \underset{\text{Nitrogen gas}}{N_2}$$

والنـــاتج النهـــائي لعمليـــات عكـــس التـــأزت هـــو أكـــسيد النيـــتروز N_2OK وغاز النيتروجـينN_2 ، وهي الغـازات الـتي تتطـاير وتـصل إلى الغـلاف الجـوي. وعمليـة عكـس التأزت تحدث بـشكل مكثـف في البيئـات الـلا هوائيـة، ومـع ذلـك فإنـه يمكـن أن تحـدث أيـضًا في الظـروف الهوائيـة. وتحـدث عمليـة عكـس التـأزت في حالـة نقـص الأكـسجين؛ حيث تتجه بعـض الكائنـات الحيـة الدقيقـة الناشـطة في تحلـل المـادة العـضوية إلى اسـتخدام أكسجين النترات، بدلًا مـن الأكـسجين الغائـب في الظـروف الـلا هوائيـة، وهـو مـا يقتـصر على منطقـة ضـيقة في منطقـة الرواسـب الـتي تـلي منـاطق التـداخل الهوائيـة والـلا هوائيـة.

وتعتبر عملية عكس التأزت من العمليات الميكروبية الدائمة، التي تساهم في تعديل التركيب الكيميائي للنيتروجين في أنظمة الأراضي الرطبة، وفي الوقت نفسه تعتبر من العمليات الأساسية الكبرى، التي بواسطتها يعود النيتروجين العنصري إلى الغلاف الجوي. وملخص دورة النيتروجين على هذا النحو تبدأ بتحول الأمونيا الموجودة في الماء عند رقم pH متعادل أو قريب من التعادل، إلى أيونات الأمونيوم، وبواسطة البكتيريا الهوائية من نوع النيتروزوموناس Nitrosomonas تتحول أيونات الأمونيوم إلى نيتريت، وهذا النيتريت يتحول مباشرة بواسطة بكتيريا النيتروباكتر Nitrobacter إلى نترات. وتحت الظروف اللا هوائية، يتم اختزال النترات إلى غازات نيتروجينية غير ضارة نسبيًّا، والتي تأخذ مسارها إلى الغلاف الجوي (شكل 2-5).



شكل (2-5): العمليات الطبيعية والحيوية في أنظمة الأراضي الرطبة

ب- إزالة الفوسفور Phosphorus removal:

يتواجد الفوسفور بشكل طبيعي في عدة صور عضوية وغير عضوية، وتعتبر صورة الأورثوفوسفات هي الصورة الميسرة بيولوجيًّا Biologically available، والتي تشير إلى الفوسفور الذائب (Soluble reactive phosphorus (SR-P)، كما يجب الإشارة إلى أن كلًّا من صور الفوسفور العضوي القابل للذوبان، والصور غير الذائبة من الفوسفور العضوي والمعدني غير قابلة للتيسر بيولوجيًّا، حتى تتحول إلى صورة غير عضوية ذائبة.

وفي المياه العذبة Freshwater، فإن الفوسفور يعتبر من العناصر الغذائية الأساسية المحددة للنمو في النظم الإيكولوجية المائية Aquatic ecosystems؛ نظرًا لندرته. وعندما تستقبل النظم الإيكولوجية المائية مياه صرف غنية في محتواها من الفوسفور، يحدث نمو هائل للطحالب والنباتات المائية. وعلى عكس النيتروجين، فإن الفوسفور ليس من عناصر الغلاف الجوي؛ لذا فإن دورة الفوسفور في بيئة الأراضي الرطبة هي دورة مغلقة، حيث يحدث إزالة أو التخلص من الفوسفور في مياه الصرف الصحي والمياه الملوثة داخل الأراضي الرطبة المشيدة نفسها؛ حيث:

(1) يرتبط الفوسفور بالمواد العضوية؛ نتيجة لإدراجها في الكتلة الحيوية الحية الموجودة في الأراضي الرطبة.

(2) ترسيب الفوسفات غير القابل للذوبان مع الحديد والكالسيوم والألومنيوم الموجودة في الأراضي الرطبة.

تعتبر النباتات في نظم الأراضي الرطبة أماكن لتخزين العناصر الغذائية الممتصة خلال موسم النمو، والتي يمكنها التحرر ثانية عند تحلل بعض الأجزاء النباتية لهذه النباتات. وبصفة عامة، فإن النباتات في وحدات الأراضي الرطبة الغنية بالمغذيات يزداد فيها تراكم المواد المغذية، بما فيها الفوسفور، مقارنة بالوحدات الفقيرة، كما أن 40٪ - في المتوسط - من الفوسفور الموجود في مياه الصرف العادمة التي يتم صرفها في نظام الأراضي الرطبة، تمتصها نباتات الكتلة الحيوية Biomass plants

incorporation، وأن الـــ 59٪ - في المتوسط والمتقبية - يتم ترسيبها في قوام بيئة النمو من الحصى، وغيره من البيئات.

ج- إزالة المعادن والفلزات الثقيلة Metals removal:

تستخدم الاراضي الرطبة المشيدة هندسيًّا على نطاق واسع لإزالة المعادن والفلزات الذائبة في المياه العادمة الملوثة بهذه المعادن والفلزات، وخاصة مياه الصرف الصحي والصناعي.

7.5. أنواع النباتات المائية المستخدمة في أنظمة الأراضي الرطبة Types of wetland plants:

توجد العديد من النباتات التي تنمو في الأراضي الرطبة الطبيعية، والتي يمكن استخدامها في الأراضي الرطبة المشيدة لتنقية المياه العادمة من الملوثات، وهي كلها حشائش ونباتات مائية، يمكن تقسيمها إلى ثلاث مجموعات على حسب طبيعة نموها في المياه، وهي: الحشائش والنباتات الطافية Floating plants and weeds - الحشائش والنباتات المغمورة Submerged plants and weeds - الحشائش والنباتات شبه المغمورة Emergent plants and weeds (شكل 3-5).

وتعطي أنواع النباتات شبه المغمورة Emergent species كتلة حيوية أكبر من أنواع النباتات والحشائش العائمة Free floating والمغمورة Submerged، وبالتالي فهي قادرة على امتصاص وتخزين كميات أكبر من العناصر من وحدة المساحة من الأراضي الرطبة، كما أن حصاد النموات النباتية لأنواع النباتات شبه المغمورة يزيد محتوى النموات الجديدة من العناصر الممتصة. وفي كل الأحوال، فإن تنوع الأنواع النباتية ما بين النباتات والحشائش الطافية والمغمورة وشبه المغمورة، يزيد من كفاءة وحدات الأراضي الرطبة في التنقية.

شكل (3-5): أنواع النباتات والحشائش المائية المستخدمة في الأراضي الرطبة

أولا: الحشائش والنباتات الطافية Floating plants and weeds:

تشمل الحشائش التي يكون مجموعها الجذرى وجزء من سيقانها تحت سطح الماء، بينما يكون مجموعها الخضري طافيًا فوق سطح الماء، وقد تصل جذورها إلى القاع أو لا تصل، وتكون حرة الحركة، وتتكاثر هذه الأنواع من الحشائش المائية أساسًا خضريًّا، وأحيانًا بالبذور. وأكثر الحشائش المائية الطافية شيوعًا في مصر هي ورد النيل، وعدس الماء، والبشنين.

- **ورد النيل (*Eichorina Crassipes*) Water hyacinth:**

ورد النيل نبات مائي معمر، يمضي حياته كلها طافيًا فوق سطح الماء وجذوره مدلاه داخلها. ويتكون النبات من مجموع خضري، يتمثل في ساق قصيرة مغمورة تحت سطح الماء، ويخرج من قمتها مجموعة من الأوراق، مرتبة بترتيب شبه وردي؛ أما من قاعدة تلك الساق فيخرج المجموع الجذري، والذى يبقى مغمورًا في الماء. وتحمل الأزهار على شمراخ زهري يخرج من إبط إحدى الأوراق. والأزهار ذات لون بنفسجي، بها دوائر صفراء في وسط البتلات.

ورد النيل	الإسم الإنجليزي Water hyacinth	الإسم العلمي *Eichorina crassipes*

- عـدس المـاء (***Lemna gibba***) **Duckweed**:

عدس الماء نبـات طـافٍ حـر الحركـة، هـش دقيـق متنـاهي الـصغر، وريقتـه صـغيرة (2-5 ملليمـتر)، سـطحها العلـوي مـسطح، أمـا الـسفلي فنـصف كـروي، وله جـذر وحيـد غـير متصل بالقاع، وهو شائع جدًّا في جميع المجاري المائية في مصر.

عدس الماء	الإسم الإنجليزي Duckweed	الإسم العلمي *Lemna gibba*

- البشنين (*Nymphaea coerulea Sav*) Water lily:

البشنين نبات طافٍ، جذوره متصلة بالقاع، وأوراقه رقيقة، سطحها العلوي ذو لون أخضر فاتح، أما سطحها السفلي فلونه أزرق أرجواني يحتوي على شبكة من العروق ذات اللون البني الفاتح، وبتلات زهرته بيضاء.

البشنين	الإسم الإنجليزي Water lily	الإسم العلمي *Nymphaea coerulea sav.*

ثانيًا: الحشائش والنباتات المغمورة Submerged plat and weeds:

وتشمل الحشائش التي تنمو بجميع أجزائها داخل الماء، وبعضها يكون متصلًا بالقاع بواسطة جذور رقيقة، والبعض الآخر حر الحركة بدون جذور. وهي تنمو في المياه قليلة العمق، كمجاري الري والصرف والأجزاء الضحلة من البحيرات، وهي تتكاثر خضريًا. وأكثر الحشائش المغمورة شيوعًا في مصر هي الهللس وذيل الفرس وأبو ظلف ونخشوش الحوت والحريش وحامول البحر.

- الهللس (*Potamogeton Crispus*) Curly leaf pondweed:

الهللس عشب مائي مغمور، وجذوره متصلة بالقاع، والساق مسطحة لا عنقية، حافتها مشرشرة طويلة بالنسبة لعرضها، ويصل طولها إلى 8 سنتيمترات. ومثله مثل جميع أنواع الـ Potamogeton، فهو يتكاثر خضريًا بواسطة البراعم الشتوية.

الإسم العلمي	الإسم الإنجليزي	الهلس
Potamogeton crispus	Curly leaf pondweed	

- ديل الفـرس (***Potamogeton Pectinatus***) **Sago Pondweed**:

ديل الفرس نبات مائي مغمور بالكامل، غزير الفروع، وأوراقـه طويلـة نحيلـة إلى خيطيـة، قمتها مدببة، وحوافها غير مسننة، شبيهة بالمروحة فوق السيقان الرفيعة الشبيهة بالأسلاك.

الإسم العلمي	الإسم الإنجليزي	ديــل الفرس
Potamogeton pectinatus	Sago pondweed	

- أبو ظلف (*Potamogeton nodosus*) Broad - leaved Pondweed:

أبـو ظلـف نبـات مـائي مغمـور، يـصيب المجـاري المائيـة بطيئـة الجريـان، والأجـزاء الـضحلة مـن الـبرك والبحـيرات. ريزوماتـه مدفونـة تحـت طـين القـاع إلى أعمـاق بعيـدة، وسـيقانه كثـيرة التفـرع، ومعظـم أوراقـه طافيـة عريـضة وبيـضاوية الـشكل. أمـا الأوراق السفلى فهي رفيعة ومغمورة.

الإسم العلمي *Potamogeton nodosus*	الإسم الإنجليزي Broad-leaved pondweed	أبو ظلف

- الحريـــش (*Najas armat Lindb*) Marine Naiad, Holly-leaved Water nymph:

الحـريش نبـات مـائي مغمـور، جـذوره مثبتـة في القـاع، ويعـيش في الميـاه العميقـة والـضحلة العذبـة والملحيـة. ويمكـن تميـيزه بأوراقـه المـسننة، والـساق مـسننة شـوكية، تمتد على هيئة حصيرة فوق القاع في المياه الضحلة.

الإسم العلمي	الإسم الإنجليزي	الحريش
Najas armat lindb	Holly-leaved water nymph	

- الزانكيلا أو حامول البحر (*ZannichelliaPalustris*) Horned Pondweed:

حامول البحر نبات مائي مغمور، ينمو على هيئة كتل كثيفة، له ساق أفقية (ريزوم) نحيل ينشب في القاع بجذور غير عميقة، وتنبت منه سيقان فرعية متناثرة، وأوراقه شريطية، ويشبه في الشكل ديل الفرس، غير أن أوراقه منسقة على الساق في شكل تقابلي، بينما تلك التي في ذيل الفرس في شكل متناوب.

الإسم العلمي	الإسم الإنجليزي	الزانكيلا أو حامول البحر
Zannichellia palustris	Water hyacinth	

- نخشوش الحوت (*Ceratophyllum demersum*) Common coontail:

نخشوش الحوت عشب مغمور، جذوره معلقة في الماء، لونه أخضر داكن وأوراقه لا عنقية، تنبت على شكل حلقات حول الساق عند العقد، والمسافات بين هذه العقد تأخذ في التناقص كلما اتجهنا إلى قمة النبات. والورقة المفردة منقسمة إلى فرعين أو أربعة أفرع يابسة وسهلة الانكسار، ويتكاثر النبات خضريًّا وبالبذور.

نخشوش الحوت	الإسم الإنجليزي Common coontail	الإسم العلمي *Ceratophyllum demersum*

ثالثًا: الحشائش المائية شبه المغمورة Emergent plants and weeds:

وتشمل الحشائش المائية التي تكون جذورها متصلة بقوة بطين القاع أما أوراقها فتكون فوق سطح الماء، وتتواجد على شواطئ الترع والمصارف وفي المستنقعات مثل البردى والغاب والسمار، وهي تنمو على الجوانب فقط في المجارى المائية العميقة. أما في المجارى المائية الضحلة فقد تغزو ريزومات هذه النباتات قاع المجرى.

- البردي (*Typha domingensis*) Leaf Cattail:

البردي نبات معمر شبه مغمور، له ريزومات زاحفة قوية مدفونة في الطين، ينتشر كل واحد منها مفردًا على مساحة واسعة. وسيقان البردي طويلة تعلو عن قامة الإنسان، وأوراقه شريطية تماثل الساق في الطول، ولا يزيد عرضها عن سنتيمتر واحد.

البردي	الإسم الإنجليزي Leaf cattail	الإسم العلمي *Typha domingensis*

- غاب الحجنة (*Phragmites australis*) Common reed:

غاب الحجنة نبات معمر شبه مغمور، يمتاز بجذوره العميقة، ونموه القوي، وسرعة انتشاره، والنبات ريزوماته زاحفة، وسيقانه مجوفة، ويختلف في الطول اختلافًا كبيرًا؛ فقد يكون نصف متر فقط على الميول الرملية، بينما قد يصل إلى ارتفاع أربعة أمتار فوق سطح الماء في المستنقعات الهادئة. والأوراق طويلة مسطحة أو قصيرة ملفوفة، ذات قمة مدببة، قد يصل طولها إلى 40 سنتيمترًا، والعنقود الزهري عادة يتفرع بكثافة إلى فروع تميل إلى ناحية واحدة.

غاب الحجنة أو البوص	الإسم الإنجليزي Common reed	الإسم العلمي *Phragmites australis*

- السمار (*Cyperus alopecuroides*) Mat Sedge:

السمار نبات شبه مغمور شائع، ويتم استخدام سيقانه في صناعة الحصر، وهو نبات مستديم، يعلو عن متر في الطول، وريزوماته قوية سمكية وزاحفة، وأوراقه بمثل طول الساق، وعرضها حوالي 2 سنتيمتر، والسمار لا يتأثر سريعًا من نقص المياه أو الغمر، ولكنه لا يصمد للغمر بالمياه لفترة طويلة مثل البردي.

السمار	الإسم الإنجليزي Mat sedge	الإسم العلمي *Cyperus alopecuroides*

- النسيلة (*Eichinochloa Stagninum*) Barnyard grass:

النسيلة نبات شبه مغمور، يمتد من الشواطئ إلى داخل القطاع المائي، سريع النمو، ويصل طوله إلى متر، وأوراقه شريطية، قمتها مدببة، لونها أخضر داكن، ويعرف أيضًا باسم الأمشوط.

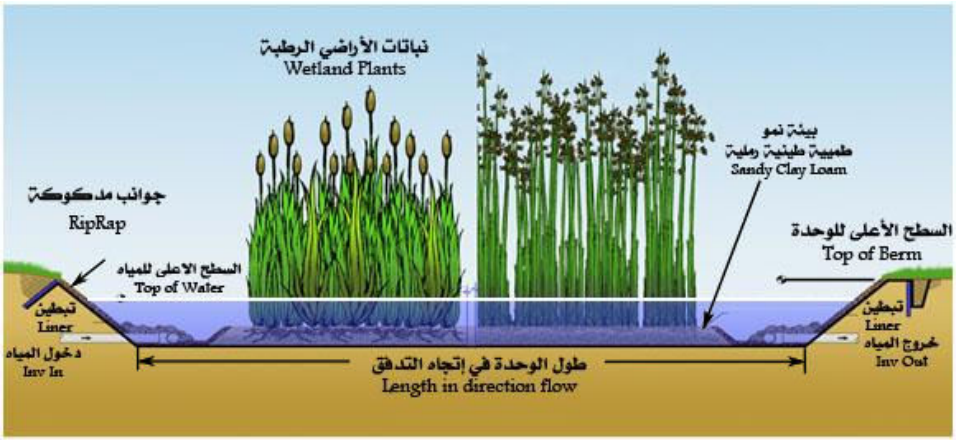
النسيلة	الإسم الإنجليزي Barnyard grass	الإسم العلمي *Eichinochloa stagninum*

8.5. الأراضي الرطبة المشيدة Constructed wetlands:

بعد الدراسات المستفيضة على أهمية وكفاءة الأراضي الرطبة الطبيعية في تنقية المياه الملوثة التي تُصب وتُصرف فيها، بدأ العمل في بناء وتشييد وحدات الأراضي الرطبة Constructed wetland units؛ للاستفادة منها في تنقية المياه العادمة والملوثة. ووحدات الأراضي الرطبة المشيدة هندسيًّا تعتبر نظامًا بيئيًّا متكاملًا؛ حيث تتفاعل مكوناته (المياه - النباتات - الحيوانات - الكائنات الحية الدقيقة) وبيئته (الأرض - الشمس - الهواء)، في تنقية وتحسين جودة المياه الملوثة. وإذا كانت وحدات الأراضي الرطبة الطبيعية هي نتاج العوامل الطبيعة لعلوم الجيولوجيا والهيدروجي والبيولوجي، فإن الأراضي الرطبة المشيدة هندسيًّا هي نتاج المهارات الإنسانية والتصميمات الهندسية لبناء وحدات تتميز بقلة تكلفة الإنشاء والتشغيل، وكفاءة عمليات المعالجة والتنقية تحت نظم متغيرة من الأحمال الملوثة للمياه. وهذه الوحدات من الأراضي الرطبة المشيدة هندسيًّا، لا تحتاج إلى عمالة ماهرة للتشغيل، ويمكن استخدامها في تنقية المياه العادمة الناتجة من الأنشطة الزراعية المختلفة، مثل: مياه مزارع تسمين الماشية، إنتاج الألبان، تسمين الدواجن ومياه الصرف الزراعي، وكذلك المياه العادمة الناتجة من الأنشطة الصناعية، مثل: صناعة الورق، الصناعات الكيماوية، الصناعات الغذائية، وغيرها من الصناعات، وكذلك مياه الصرف الصحي في المدن والمنتجعات والقرى السياحية، بعد معالجتها معالجة أولية أو ابتدائية بالترسيب والترشيح؛ للتخلص من جزء من المواد المعلقة.

ويتم تشييد الأراضي الرطبة هندسيًّا في أي منطقة، طالما وجدت كمية كافية من المياه تسمح بنمو وحياة النباتات المائية. ويتم إنشاؤها بحفر الأرض في منطقة ضحلة؛ لعمل أحواض ذات عمق قليل، وتركيب أنظمة للتحكم في دخول وخروج المياه وزراعة النباتات المائية. ويجب عزل مواقع الأراضي الرطبة المشيدة عن المناطق المحيطة بها؛ لمنع تسرب المياه، ويتم ذلك بحواجز غير منفذة، سواء من الطين، أو أي تربة ذات نفاذية ضعيفة، أو حواجز من مواد تبطين صناعية (شكل 4-5)، كما يوضح

شكل (5-5) نماذج من هذه الأراضي الرطبة المشيدة هندسيًّا في بعض المناطق من العالم.



شكل (4-5): رسم تخطيطي لنموذج من وحدات الأراضي الرطبة المشيدة هندسيًّا

شكل (5-5): نماذج من وحدات الأراضي الرطبة التي يتم تشييدها هندسيًّا على الأرض

والأراضي الرطبة المشيدة هندسيًّا يمكن تصميمها وتنفيذها تبعًا لطريقة انسياب الماء خلالها، والتي تكون أحد ثلاثة أنواع رئيسة، هي:

- الأراضي الرطبة المشيدة ذات الانسياب السطحي Surface flow (SF) wetlands.
- الأراضي الرطبة المشيدة ذات الانسياب تحت السطحي Sub Surface Flow (SSF) wetlands.
- الأراضي الرطبة المشيدة ذات الانسياب الرأسي Vertical Flow (VF) wetlands .

1.8.5. الأراضي الرطبة المشيدة ذات الانسياب السطحي Surface flow wetlands (SFW):

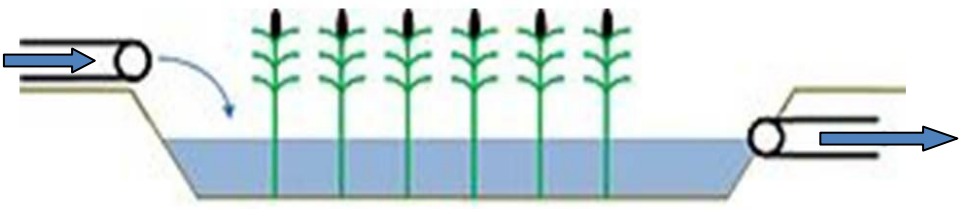
الأراضي الرطبة المشيدة ذات الانسياب السطحي، تتكون من أحواض، توضع بها بيئات للنمو، تتدفق خلالها مياه الصرف الصحي أفقيًّا عبر جذور النباتات شبه المغمورة، مثل نباتات البردي Cattail والديس Bulrushes (شكل 6-5)، كما يمكن تنمية بعض أنواع النباتات الطافية - وأكثرها شيوعًا هي نباتات عدس الماء Duckweed ، ورد النيل Water hyacinths - مع النباتات شبه المغمورة. كما يمكن تصميم هذا النظام بطريقة تسمح بالتحكم في عمق الماء وفترة بقائه في النظام، وكذلك يمكن تصميمه على هيئة أحواض متوازية أو متسلسلة؛ لزيادة كفاءة التنقية، وتلعب البكتيريا دورًا كبيرًا في عملية التنقية أكثر من النباتات.

مميزات النظام:

1. يتميز هذا النظام بقلة تكاليف الإنشاء، وسهولة الإدارة والمتابعة.
2. سهولة استخدام النباتات الطافية وشبه المغمورة في نظام واحد.
3. له القدرة على استقبال مياه عادمة، ذات مدى واسع من حمل الملوثات.

العيوب:

1. تحتاج لمساحات أكبر من الأراضي لتنقية المياه؛ حيث يحتاج الفرد الواحد لمساحة 20 متر مربع لتنقية المياه العادمة التي تنشأ من استخداماته.
2. ظهور واضح للروائح المنبعثة.
3. انتشار وتكاثر للبعوض.
4. تقل كفاءة التنقية بها شتاء.



شكل (6-5): رسم تخطيطي لوحدة الأراضي الرطبة المشيدة ذات الانسياب السطحي

8.5. 2. الأراضي الرطبة المشيدة ذات الانسياب تحت السطحي Sub-Surface Flow wetlands (SSFW:

الأراضي الرطبة المشيدة ذات الانسياب تحت السطحي يتم فيها تدفق مياه الصرف الصحي بين جذور النباتات التي تنمو في مهد مسامي من الحصى، ومبطن بحواجز غير منفذة؛ لمنع رشح الماء. ويمر الماء العادم المراد تنقيته خلال الوسط المسامي إلى القاع؛ حيث يتم صرفه (شكل 7-5). والنباتات التي يتم تنميتها هي في الغالب نباتات الغاب *Phragmites australis*، أو تنمى نفس النباتات المستخدمة في الأراضي الرطبة ذات الانسياب السطحى للمياه. ويوفر السطح النوعي الكبير لجذور النباتات ولوسط النمو موقعًا كافيًا لنشاط الميكروبات، والعمليات التي تتم عبارة عن خليط من التحولات الميكروبية (هوائية ولا هوائية) وعمليات فيزيائية وكيميائية. وعند تصميمها بطريقة جيدة، فإن هذه المزارع ذات المهد المكون من الحصى لها معدل كبير في الهدم

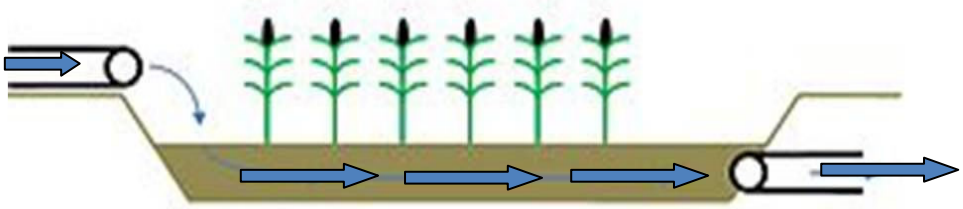
الميكـروبي للمـواد العـضوية، والتخلـص مـن النـترات. والأراضي الرطبـة المـشيدة ذات الانسياب تحـت الـسطحي، يمكـن أن يكـون وسـط النمـو مـشبعًا بالمـاء طـوال الوقـت، أو يكون ما بين التشبع والجفاف في دورات للإضافة.

مميزات النظام:

1. أكثر كفاءة في التنقية؛ حيث يحتاج الفرد الواحد لمساحة 5-10 متر مربع لتنقية الميـاه العادمة التي تنشأ من استخداماته.
2. الروائح المنبعثة منها أقل Less odorous.
3. أقل حساسية less sensitive لظروف برودة الشتاء.

العيوب:

1. أهم عيوب هذه الأنظمة هو قابلية مهد النمو للانسداد Clogging.
2. تكلفة الإنشاء عالية، قد تصل إلى خمسة أضعاف نظم الانسياب السطحي.



شكل (7-5): رسم تخطيطي لوحدة الأراضي الرطبة المشيدة ذات الانسياب تحت السطحي

8.5. 3. الأراضي الرطبة المشيدة ذات الانسياب الرأسي Vertical Flow wetlands(VFW):

الأراضي الرطبـة المـشيدة ذات الانـسياب الـرأسي هي مـشابهة لأنظمـة تـدفق ميـاه الصرف الصحي ذات الانـسياب تحـت الـسطحي، وبالتـالي فـإن مزاياهـا مماثلـة لهـا مـع زيـادة في الكفـاءة. كمـا يـتم التغلـب في هـذا النظـام على مـشكلة الانـسداد في نظـام الانـسياب تحـت الـسطحي، بـدفع ميـاه الـصرف الـصحي خـلال مواسـير سـطحية مثقبـة؛ للوصـول بهـا

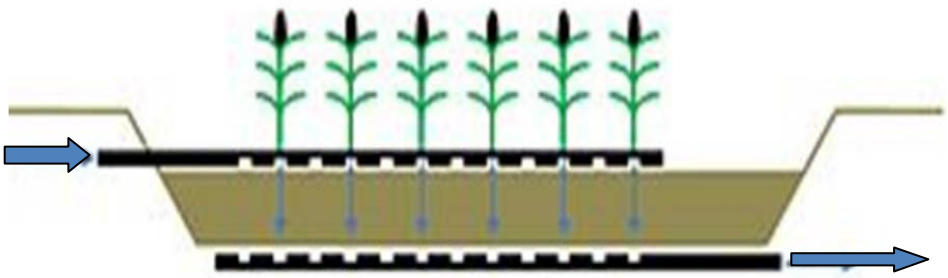
عبر بيئة النمو إلى المناطق السفلى للوحدة (شكل 8-5). وهذا النظام يستخدم بشكل حصري الرمال الناعمة في بيئة النمو، والتي تساعد في زيادة كفاءة التخلص من البكتيريا.

مميزات النظام:

1. أكثر كفاءة في التنقية؛ حيث يحتاج الفرد الواحد لمساحة 3 متر مربع لتنقية المياه العادمة التي تنشأ من استخداماته.
2. لا توجد روائح منبعثة.
3. لا تتأثر كفاءتها في الجو البارد لفصل الشتاء.

العيوب:

تكلفة الإنشاء أعلى من تكلفة إنشاء نظم الانسياب تحت السطحي.



شكل (8-5): رسم تخطيطي لوحدة الأراضي الرطبة المشيدة ذات الانسياب الرأسي

9.5. معايير التصميم العام لبناء الأراضي الرطبة General design criteria for constructed wetlands:

لتصميم وحدة من وحدات الأراضي الرطبة، يجب الأخذ في الاعتبار بعض معايير التصميم Design criteria التي يبنى على أساسها تحديد مساحة الوحدة Area unit،

معدل التدفق Flow rate، فترة مكوث المياه في الوحدة التي تكفي للتنقية Retention time، معدل الحمل الهيدروليكي Hydraulic loading rate.

- **معدل الحمل الهيدروليكي Hydraulic loading rate:**

ويعتبر معدل الحمل الهيدروليكي أحد أهم المتغيرات في وحدات الأراضي الرطبة(Mitsch & Jørgensen 2004)، وتحسب من المعادلة التالية:

$$q = (Q/A)/100$$

حيث إن:

- q: hydraulic loading rate معدل الحمل الهيدروليكي بالسنتيمتر في اليوم (cm/day)).
- Q: flow rate (m3/day معدل التدفق بالمتر المكعب في اليوم)
- A: wetland area (m2 مساحة وحدة الأراضي الرطبة بالمتر المربع)

ويعتبر معدل الحمل الهيدروليكي المثالي في الأراضي الرطبة ذات التدفق السطحي حوالي 5.4 ± 1.7 سنتيمتر في اليوم.

- **وقت احتجاز المياه Detention or Retention time:**

وهو الوقت اللازم نظريًّا لبقاء المياه أو احتجازها في وحدة الأراضي الرطبة حتى يتم تنقيتها، وتسمى أيضًا بفترة مُكوث المياه في وحدة التنقية Residence time، والتي يتم حسابها بالمعادلة التالية:

$$t = (V.\ p)/Q$$

حيث إن:

- t: residence time وقت المكوث أو الاحتجاز
- V: volume of the wetland (m^3 حجم وحدة الأراضي الرطبة بالمتر المكعب)
- p: porosity of the wetland نفاذية الوحدة
- Q: flow rate (m3/day معدل التدفق بالمتر المكعب في اليوم)

وتعتبر نفاذية وحدات الأراضي الرطبة في أنظمة التدفق السطحي surface flow حوالي 1 صحيح.

كما يمكن حساب معدل التدفق من خلال معرفة معدل تدفق المياه الداخل للوحدة inflow، ومعدل تدفق المياه الخارج من الوحدة outflow بالمعادلة التالية:

$$Q = (Q\ inflow + Q\ outflow)/2$$

وحتى الآن لا توجد أية اقتراحات خاصة بفترة الإقامة المثلى للمياه في وحدات الأراضي الرطبة، فقد اقترح (Mitsch & Jørgensen 2004) فترة من 5-14 يومًا لمعالجة مياه الصرف الصحي البلدية، واقترح باحثون آخرون وقتًا أطول للإقامة والاحتفاظ من ذلك. حيث يمكن أن يختلف وقت الإقامة المحسوب مع وقت الإقامة الحقيقي؛ نتيجة لوجود مسارات تفضيلية للمياه في الأراضي الرطبة. فالماء يمكن أن يمر على شكل دوائر قصيرة short-circuit، وهذا يعني أن هذا الجزء من المياه لا تمكث إقامته إلا وقتًا قصيرًا جدًّا في الأراضي الرطبة، وباقي المياه التي لا يزال مسارها مستمرًّا تأخذ وقتًا أطول. وهذا يجب أن يؤخذ في الاعتبار عند تصميم وحدات الأراضي الرطبة.

- **المساحة المطلوبة لوحدات الأراضي الرطبة Needed Area for wetlands units :**

وتتحدد مساحة الأراضي الرطبة من خلال نسب متوازنة بين الطول والعرض، بحيث لا تقل هذه النسبة عن 10:1، وأقل نسبة يمكن استخدامها هي من 2:1 إلى 3:1 في وحدات الأراضي الرطبة ذات التدفق السطحي (Steiner & Freeman 1989).

إن الإبقاء على العناصر الغذائية والمركبات العضوية لوقت محدد في الأراضي الرطبة هو المهمة الرئيسة التي شيدت هذه الأراضي من أجلها. ولكن لسوء الحظ، فإنه من الصعب حساب المساحة المطلوبة بالضبط من قبل التنفيذ؛ ولذلك يتم استخدام بعض الأساليب التجريبية لذلك. وقد

اقترح (Kadlec & Knight 1996) استخدام نموذج k-C* model، والتي يمكن أن تعبر عن المساحة الأولية أو التقريبية لوحدات الأراضي الرطبة، من خلال المعادلة التالية:

$$\ln((Co - C^*)/(Ci - C^*)) = kA / q$$

حيث إن:

- Co: outflow concentration تركيز المياه الخارجة
- Ci: inflow concentration تركيز المياه الداخلة
- q: hydraulic loading rate معدل الحمل الهيدروليكي
- تركيز المواد الكيميائية المتبقية، والذي هو الحد المفترض الوصول إليه بعد عملية التنقية في الأراضي الرطبة C* is the residual chemical concentration
- kA, is an empirical constant ثابت تجريبي

هذه هي المعادلة التي على أساسها يتم تحديد المساحة الخاصة بالوحدة المراد تشييدها، وهذا يعني أن زيادة مساحة الوحدة - وليس الحجم - سوف يزيد من كفاءة تنقية المياه؛ حيث إن زيادة المساحة يزداد معها زيادة الغطاء النباتي، ومعه زيادة مساحة الأسطح النباتية التي تحمل معظم العمليات البكتيرية اللازمة للتنقية. ولقد أعطى (Kadlec & Knight 1996) بعض الأرقام للعوامل التجريبية (C*, kA) لمختلف المواد الغذائية والملوثات.

10.5. طريقة إعداد وتجهيز وحدات الأراضي الرطبة المشيدة هندسيًّا

Method of preparing the constructed wetlands units:

عند بناء وتشييد وحدات الأراضي الرطبة، يجب الأخذ في الاعتبار كل العوامل والأسس المحددة لكفاءة هذه الوحدات في المعالجة وتنقية المياه

العادمة، بعدها يتم البدء في التنفيذ. وهناك طريقتان لإنشاء الأراضي الرطبة.

الطريقة الأولى: بناء الأحواض وتبطينها بغشاء أو فيلم من البلاستيك.

1. يتم تحديد الموقع والمكان المناسبين لإنشاء الوحدة؛ بحيث يكون من السهل توصيل المياه العادمة إليها، وسهولة سحب المياه المعالجة واستخدامها في الزراعة، أو ضخها في المجاري المائية.
2. يتم تحديد المساحة والعمق المطلوب الوصول إليه في الوحدة، بعدها يتم الحفر.
3. بعد الحفر يتم تسوية ودك أرضية الأحواض؛ حتى يسهل الفرد والتبطين بالبلاستيك.
4. يتم التبطين بالبلاستيك دون وجود فواصل، على أن يكون هناك زوائد من شرائح البلاسيك تغطي جزءًا من سطح الأرض المحيطة بالأحواض (شكل 9-5).

شكل (9-5): تبطين حوض الزراعة بالبلاستيك بعد حفرها ودكها

5. يوضع جزء من التربة على زوائد البلاستيك للتثبيت.

6. يملأ حوض الزراعة ببيئة النمو من الحصى Gravel، والزلط Flint، أو البازلت Basalt، أو الحجر الجيري Limestone، والرمل Sand، أو أحجار الحمم البركانية Lavastone ، أو خليط من هذه الأنواع، وذلك بأقطار متدرجة من 10-40 مم (Butler وآخرون سنة 1988، Loveridge and Butler سنة 1992) شكل (10-5).

شكل (5-10): ملء حوض الزراعة بعد التبطين بالبلاستيك ببيئة النمو من الحصى

7. بعد ملء حوض الزراعة ببيئة النمو، يتم تقسيمها إلى أحواض أصغر وترطيبها بالمياه.
8. يتم الزراعة بشتلات النباتات المناسبة (شكل 11-5).

شكل (5-11): زراعة الأحواض بشتلات النباتات في نظام الانسياب تحت السطحي

9. يتم الري بمياه الري لمدة ثلاثة أسابيع؛ للوصول بالشتلات إلى التأقلم، وبداية النشاط في بيئة النمو وظروف الجو الذي به الوحدة.
10. بعد ثلاثة أسابيع يتم توصيل الوحدات بمصدر المياه العادمة، وعليها تنمو النباتات، وتقوم بدورها في التنقية (شكل 12-5).
11. تتم المتابعة الدورية، مع الاحتفاظ بالمياه العادمة بالوحدات حتى تنقيتها.
12. يتم سحب المياه المعالجة واستخدامها في الزراعة، أو ضخها في المجاري المائية.

شكل (12-5): أنواع مختلفة من نباتات الأراضي الرطبة بعد عام من الزراعة

الطريقة الثانية: بناء الأحواض دون تبطين، وفيها:

1. يتم اتباع الخطوات السابقة نفسها دون تبطين أحواض الزراعة (شكل 13-5).
2. زراعة شتلات النباتات في أحواض الأراضي الرطبة التي تم تجهيزها (شكل 14-5).

شكل (13-5): خطوات إعداد أحواض الزراعة في الأراضي الرطبة بدون تبطين

شكل (14-5): خطوات زراعة نباتات الأراضي الرطبة في الموقع الذي تم تجهيزه

11.5. محددات عمل الأراضي الرطبة Wetlands limitations:

بالرغم من أهمية وفاعلية الأراضي الرطبة في تنقية المياه العادمة، إلاّ أنها تتعرض لبعض المحددات والقيود، التي قد تؤثر سلبًا على كفاءتها في عمليات المعالجة والتنقية، من هذه المحددات:

1. قد تتأثر فعالية Effectiveness وكفاءة بعض الأراضي الرطبة المشيدة مع مرور الوقت، فبالرغم من فعاليتها وإسهامها في إزالة بعض الملوثات، وخفض تركيز البعض الآخر في المياه المعالجة، إلا أنه لا يمكن الجزم بأنها يمكن أن تستمر على هذه الحالة من الفاعلية في المعالجة والتنقية مع تقدمها في العمر؛ الأمر الذي يقلل من قدرتها وكفاءتها على خفض وإزالة الملوثات لفترات طويلة من الزمن دون إعادة تنشيط.
2. تتحدد قدرة الأراضي الرطبة المشيدة على قدرة الكائنات الحية بها على تحمل التعرض للظروف البيئية المحيطة بها، مثلها مثل أي أساليب بيولوجية أخرى، وبالتالي يجب الأخذ في الاعتبار محاكاة النظم الطبيعية السائدة في المنطقة؛ لضمان نجاح الوحدات في التنقية.
3. قد يحدث تغير في النظام الإيكولوجي Ecosystem للأراضي الرطبة بعد ضخ المياه العادمة والملوثة إليها، وهو ما يؤثر بشدة على الحياة النباتية والحيوانية بها.
4. وجود تركيزات عالية من الملوثات يتطلب الاحتفاظ بالمياه الملوثة لوقت أطول في وحدة الأراضي الرطبة، أو زيادة مساحتها.
5. تؤثر الحياة البرية Wildlife تأثيرًا سلبيًّا Adversely affected في الأراضي الرطبة في الحالات التي تكون فيها الفلزات الثقيلة هي الملوثات الرئيسة في المياه العادمة، والنظام البيئي لا يقيدها ويحد من حراكها وامتصاصها، فيزداد تركيز الفلزات الثقيلة وتراكمها في النباتات.

12.5. استخدام تقنية الأراضي الرطبة في معالجة مياه الصرف الصحي والزراعي using of wetland technology in sewage and agricultural water treatment:

إن الأراضي التي تعتمد في زراعتها على مياه الري تشغل نحو 17٪ فقط من الأراضي الصالحة للزراعة في العالم، وهذا - في الغالب - يرجع إلى عدم توفر النوعية الجيدة من المياه الصالحة للري، ولكن هذه النسبة من الأراضي تُساهم بحوالي 34٪ من مجموع الإنتاج الزراعي. وكمثال أكثر وضوحًا على ذلك، فإنه في المناطق الجافة من العالم - مثل إقليم الشرق الأدنى - لا تكفي المياه الجيدة الصالحة إلا لري 30٪ من المساحة المزروعة في هذه المناطق، لكنها تنتج نحو 75٪ من مجموع الإنتاج الزراعي. ونتيجة لنقص المياه الصالحة للري للمساحات المتاحة من الأراضي في بعض المناطق الجافة، فإنه يتم استيراد أكثر من 50٪ من احتياجات هذه المناطق من المواد الغذائية، أي أن معدل الزيادة في الطلب على الغذاء يتجاوز معدل الزيادة في الإنتاج الزراعي.

وحينما تكون النوعية الجيدة من المياه شحيحة، فإنه لابد من النظر في المياه ذات النوعية الهامشية؛ لاستخدامها في الزراعة. وعلى الرغم من عدم وجود تعريف شامل للنوعية الهامشية من المياه لجميع الأغراض العملية، إلا أنه يمكن تعريفها بأنها: "المياه التي تمتلك خصائص معينة تسبب مشاكل عندما يتم استخدامها لغرض مقصود". على سبيل المثال، المياه المالحة هي نوعية هامشية بالنسبة للاستخدام الزراعي؛ لما لها من محتوى عالٍ من الأملاح الذائبة، ومياه الصرف الصحي أو مياه المجاري هي نوعية من المياه الهامشية بالنسبة للاستخدام الزراعي والآدمي؛ بسبب المخاطر الصحية المرتبطة بها.

ومن وجهة نظر الري، فإن استخدام نوعية مياه هامشية في الزراعة يتطلب إدارة أكثر تعقيدًا وإجراءات مراقبة أكثر صرامة، بالمقارنة باستخدام نوعية مياه جيدة. إن استخدام مصادر المياه الهامشية من مياه الصرف الصحي في الزراعة يمكن أن يكون من الاعتبارات المهمة عند التخطيط للتخلص منها في المناطق الجافة وشبه الجافة. إن

التخطيط السليم لاستخدام مياه الصرف الصحي البلدية لا يخفف فقط من مشاكل تلوث المياه السطحية، ولا يحافظ على مورد من موارد المياه، ولكنه يأخذ أيضًا في الاعتبار الاستفادة من العناصر الغذائية التي تحملها هذه المياه، والصالحة لتغذية المحاصيل. وكمثال على أهمية استخدام مياه الصرف بعد معالجتها في مجال الزراعة، فإن المدينة التي يبلغ عدد سكانها 500.000، واستهلاك المياه فيها 20 لتر / للشخص الواحد في اليوم، سوف تنتج ما يقرب من 85000 متر مكعب / يوم من مياه الصرف الصحي، على افتراض تدفق 85٪ لنظام الصرف الصحي العام. فإذا تم استخدام هذه المياه بعد معالجتها في الري بعناية - بمعدل تطبيق 5000 متر مكعب / هكتار / سنة - فإن مساحة قدرها 6000 هكتار يمكن ريها. وبالإضافة إلى الفائدة الاقتصادية للمياه في الري، فإن قيمة المخلفات التي تحتويها كسماد لها أهمية كبيرة أيضًا. وقد وجد أن متوسط التركيزات النموذجية من المغذيات في مياه الصرف الصحي المعالجة الناتجة من عمليات معالجة مياه الصرف الصحي التقليدية على النحو التالي: النيتروجين 50 ملليجرام / لتر، الفوسفور 10 ملليجرام / لتر، والبوتاسيوم 30 ملليجرام / لتر. وبافتراض معدل تطبيق 5000 متر مكعب / هكتار / سنة، فإن مساهمة هذه المخلفات من الأسمدة هي: النيتروجين 250 كجم / هكتار / عام، الفوسفور 50 كجم / هكتار / عام، والبوتاسيوم 150 كجم / هكتار / عام.

إن معالجة المخلفات المائية - بحيث تعود مرة أخرى صالحة للاستخدام - هو هدف له علاقة بالحصول على بيئة نظيفة، والحفاظ على الصحة العامة، كما أنه هدف اقتصادي مهم، وهذا ما جعل الدول المتحضرة تنفق مليارات الدولارات على معالجة المخلفات البيئة، وقوانين البيئة في هذه الدول صارمة جدًّا، ولا يوجد تهاون على الإطلاق في تلويث البيئة.

وتعتبر مياه الصرف الزراعي بمفردها، أو المختلطة مع مياه الصرف الصحي في المصارف، من مصادر المياه التي يجب الاهتمام بها، ومعالجتها؛ لإعادة استخدامها في الزراعة. وبالرغم من ضخامة كمية مياه الصرف الزراعي، وعدم توافر مساحات خالية من الأراضي لإنشاء الأراضي الرطبة لمعالجة هذه المياه، والتكلفة العالية جدًّا للتشييد،

فإنه يمكن استخدام هذه التقنية لمعالجة المياه في نفس موقع صرفها بالمصارف الزراعية، وذلك على عدة مراحل، يتم في كل مرحلة منها استخدام أنواع معينة من النباتات والحشائش المائية؛ للتخلص من الملوثات، ويمكن إيجاز هذه المراحل فيما يلي:

المرحلة الأولى: يتم خفض معدل سريان الماء في المصرف؛ ليسمح بترسيب محسوس للمواد الصلبة، بحيث تصبح المياه أقل عكارة، وتسمح بتخلل الضوء للنباتات النامية في المراحل التالية، ويتم ذلك بتدريج قاع المصرف للوصول إلى العمق المطلوب، كذلك يمكن عمل عدة أحواض ترسيب متتالية على طول مجرى المصرف على مسافات متباعدة، ويجب تنظيف وتطهير هذه الأحواض على فترات.

المرحلة الثانية: يتم تنمية بعض أنواع النباتات شبه المغمورة مثل البردي Cattail، الديس Bulrushes، الغاب Reed؛ حيث إن الساق المغمور وأوراق النباتات تقلل أكثر من سرعة سريان الماء، وتحجز المواد الصلبة والمعلقة، كما أن هذه النباتات تزيل جزءًا من العناصر الذائبة بكفاءة؛ حيث تمتصها وتحتجزها داخل ريزوماتها، ولذلك فإن حصد الأجزاء العلوية من هذه النباتات لا يفيد كثيرًا في إزالة العناصر التي تم امتصاصها، ويجب التحكم باستمرار في كثافة النباتات؛ للتوصل إلى الحد المثالي بحيث لا يزيد عددها؛ مما يسبب إعاقة لجريان الماء.

المرحلة الثالثة: يتم تنمية بعض أنواع النباتات الغاطسة الجذرية (Potamogeton spp)، مثل الهللس، الحريش، حيث تمتص الفلزات الثقيلة من الماء، كما أنها تقلل بكفاءة من سرعة جريان الماء قرب قاع المجرى؛ مما يسمح بترسيب أكثر للمواد الصلبة المعلقة، وبعض هذه النباتات تقوم بإفراز مواد كيماوية خاصة، لها فعل مطهر يفيد في تنقية المياه من الكائنات المرضة.

المرحلة الرابعة: ينمى ورد النيل Water hyacinth، وهو فعال جدًّا في تقليل COD, BOD إلى مستويات منخفضة، كما أنه فعال أيضًا في إزالة المغذيات والفلزات الثقيلة، والعديد من الكيماويات المتنوعة، وتشمل الهيدروكاربونات والفينولات والمواد الإليفائية العضوية. ويمتلك ورد النيل معدلًا عاليًا من التمثيل

الضوئي؛ مما يزيد من تركيز الأكسجين الذائب في الماء وبالتالي يحسن من ظروف حياة ونمو الأسماك، وتعتبر هذه المرحلة مرحلة حاسمة لتحسين نوعية المياه قبل صرفها إلى المسطحات المائية مثل البحيرات أو البحار.

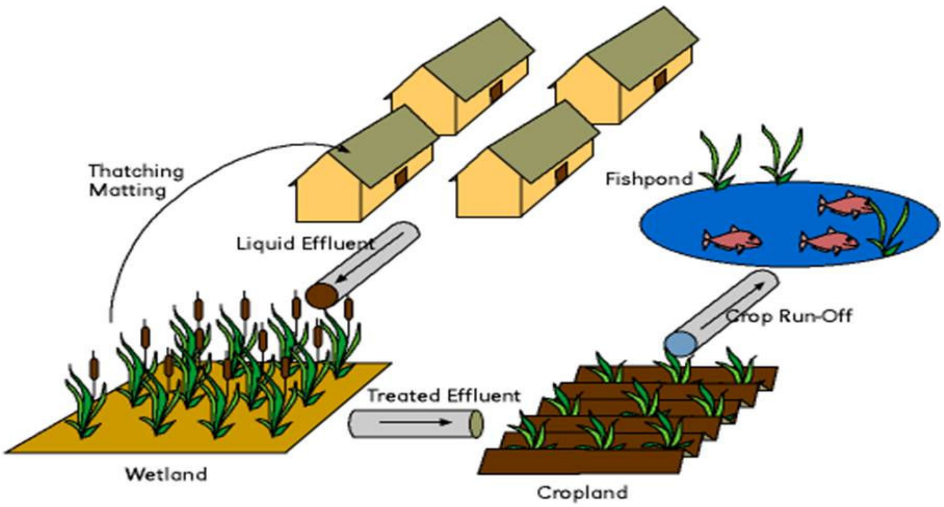
المرحلة الخامسة: وهي مرحلة أخيرة يمكن أن ينمى فيها زريعة من الأسماك؛ لإنتاج ما يسمى بالإصبعيات، وهي الأسماك صغيرة الحجم، التي تستخدم في تنمية مصادر الأسماك في البحيرات.

13.5. تصور للنظام البيئي المتكامل لمنظومة الأراضي الرطبة Perception of the integrated ecosystem in wetlandlands:

إن نظام الأراضي الرطبة، نظام متوافق بيئيًّا على الصعيدين الداخلي والخارجي، هذا التوافق الداخلي بين مكوناته هو الذي جعله فعالًا في تنقية المياه العادمة، والتخلص مما بها من ملوثات، وهو ما أهّله إلى أن يُصبح متوافقًا خارجيًّا مع احتياجات الإنسان الذي يستخدم هذا النظام. فلو تصورنا مجتمعًا بشريًّا يعيش في قرية بدوية أو قرية سياحية، ينشأ عن نشاطاته الإنسانية مياهًا عادمة ملوَّثة وملوِّثة للبيئة في صورة صرف صحي، والتي تحتاج للتخلص منها ومعالجتها دون وجود شبكة للصرف الصحي .. فماذا نفعل؟ لا مفر من استخدام أحد أنظمة الأراضي الرطبة ذات الانسياب تحت السطحي أو الرأسي لتنقية هذه المياه العادمة. ويتم ذلك من خلال هذه الدورة المتكاملة:

1. يتم تجميع مياه الصرف الصحي في ترنشات كتنك للترسيب Septic tank، تترسب به المواد العضوية الصلبة، والتي تُخلص مياه الصرف الصحي من حوالي 44-96 ٪ من العناصر السامة والمعادن الثقيلة Toxic Elements or Heavy Metals (Gray سنة 1989)، لكن يتبقى بها الكائنات الدقيقة الممرضة Pathogens، وبعض المعادن السامة والأملاح المحددة للاستخدام Salts Restrict، وبعض العوالق الأخرى Suspended Solid، وذلك فيما يسمى بسائل مياه المجاري Sewage Effluent أو Liquid effluent .

2. . يسحب الماء الراشح أو سائل مياه المجاري وما به عوالق Liquid effluent من تنك الترسيب إلى وحدة الأراضي الرطبة؛ ليأخذ دورته في التنقية (شكل 15-5).
3. بعد دورة التنقية لمياه الصرف الصحي، تصبح المياه معالجة Treated effluent ، ومفيدة دون ضرر لري بعض المحاصيل.
4. تُضخ مياه الصرف الناتج من ري المحاصيل الزراعية Crop run-off إلى بركة أو حوض لتربية الأسماك Fish pond.
5. النباتات النامية في أحواض الأراضي الرطبة يمكن استخدامها حسب طبيعتها، فالبوص أو الغاب يستخدم في التظليل للبرجولات في القرى السياحية، أو التسقيف Thatching matting للمنازل والحظائر في القرى البدوية أو الريفية، ونباتات البردي يستخدم في صناعة أوراق البردي، ونباتات السمار تستخدم في صناعة الحصير ... وهكذا في دورة لإعادة تدوير نباتات الأراضي الرطبة.



شكل (15-5): تصور للنظام البيئي المتكامل من خلال منظومة الأراضي الرطبة