

برعاية الشركة العامة للصرف الصحي بحمص

محاضرة

محطات المعالجة بالنباتات

Constructed Wetlands

إعداد

د.م عبد الرزاق محمد سعيد التركماني

دكتوراه في الهندسة البيئية

مستشار بيئي - المدينة الصناعية بحسياء

عضو لجنة الخبراء السوريين لقطاع المياه و الصرف الصحي IPN

مدير موقع الهندسة البيئية ( [www.4enveng.com](http://www.4enveng.com) )

## المحتويات:

أولاً: مدخل إلى محطات المعالجة بالنباتات

ثانياً: النباتات المائية المستخدمة ضمن محطات المعالجة بالنباتات

ثالثاً: أساسيات و مبادئ إزالة الملوثات بمحطات المعالجة بالنباتات

رابعاً: أحواض النباتات ذات الجريان الحر

خامساً: أحواض النباتات ذات الجريان تحت السطحي الأفقي

سادساً: أحواض النباتات ذات الجريان تحت السطحي الشاقولي

## أولاً - مدخل إلى محطات المعالجة بالنباتات:

### ١-١ تعريف الأراضي الرطبة المصطنعة / Constructed Wetlands :

يطلق على محطات المعالجة بالنباتات و التي تمر فيها المياه الملوثة المعالجة أولياً عبر أحواض مزروعة النباتات (القصب مثلاً) بالأراضي الرطبة المصطنعة. تكون أحواض المعالجة في هذه الأنظمة مملوءة بوسط حصوي أو رملي أو مزيج منهما معا. و هي تعرف على أنها مناطق مشبعة بالمياه يتم تصميمها هندسياً ( غير طبيعية ) بحيث تكون قادرة على إزالة الملوثات من مياه المجاري الخام و بالتالي تحسين مواصفات المياه المعالجة النهائية قبل تصريفها أو إعادة استخدامها. كما أنها تصنف كمرحلة معالجة ثانوية أو ثالثية حسب الاستخدام للأحواض المختلفة (ذات جريان تحت سطحي و سطحي) على اعتبار أن المياه الملوثة الداخلة إليها تكون قد عولجت بشكل أولي. إن استخدام الأراضي الرطبة الطبيعية لتنقية المياه يعود آلاف السنين إلى الوراء فقد استخدمها الصينيون و المصريون. و أما استخدام الأراضي الرطبة الاصطناعية "أحواض المعالجة بالنباتات" لمعالجة المياه الملوثة فيعود إلى ١٩٠٥ في استراليا و لكنها بقيت قليلة الاستخدام حتى اعتمد عليها الأوروبيون منذ عام ١٩٥٠ عبر الألمان و استخدمها الأمريكيون منذ عام ١٩٧٠. و اليوم تنتشر آلاف محطات المعالجة بالنباتات عبر الولايات المتحدة الأمريكية.

إن وجود النباتات ضمن أحواض الأراضي الرطبة تشكل عبر جذورها و سوقها و أوراقها مكاناً ملائماً لنمو الكائنات الدقيقة التي تقوم بتحطيم المواد العضوية الموجودة ضمن مياه المجاري. تجمع هذه الكائنات الدقيقة المتنوعة يطلق عليه اسم بيريفايوتون (Periphyton). إن دور البيريفايوتون و العمليات الفيزيائية و البيولوجية و الكيميائية الطبيعية يقود إلى التخلص من 90 % تقريباً من الملوثات بينما تقوم النباتات نفسها بإزالة بين 7-10 % من الملوثات كما أن النباتات تقوم بدور المصدر الكربوني للميكروبات عندما تحلل هذه النباتات بعد موتها. كما أن النباتات المائية تكون قادرة على استنفاد المعادن الثقيلة و إن كان ذلك بمعدلات مختلفة حسب نوع النبات.

خلال العشرين سنة الماضية فإن العديد من أنواع محطات المعالجة بالنباتات قد تم تطويرها و تحسين أدائها و لذلك فقد إقبالا جيداً عبر العالم و ذلك لحسناتها العديدة و منها :

#### أ- كلفة البناء المنخفضة

ب- سهولة الإنشاء و التشغيل و الصيانة .

ج- كلف التشغيل و الصيانة المنخفضة بسبب اعتمادها على المعالجة البيولوجية الطبيعية و عدم الحاجة للطاقة للتشغيل و الصيانة إلا في الاحتياجات الدنيا. و ليس هناك حاجة لاستخدام المواد الكيميائية أو التجهيزات الميكانيكية الاحتياطية، كما أنها لا تحتاج لكادر تشغيل خبير كما هو الحال بمحطات المعالجة التقليدية.

د- الإزالة الفعالة للملوثات و العوامل الممرضة و بيوض الديدان علماً أن بيوض الديدان الشائعة في منطقتنا لا تزال بطرق المعالجة الميكانيكية (حمأة منشطة، تهوية مطولة، الخ).

هـ- قدرتها الكبيرة على تحمل تذبذبات التدفقات بالإضافة إلى ثباتيتها العالية و الموثوقية في الأداء.

و- الحمأة الناتجة هي الحمأة الأولية فقط.

ز- إعادة استخدام المياه المعالجة في ري المحاصيل كما يعاد استخدام النباتات في موسم الحصاد بعد قطعها لتغذية الحيوانات.

## ١-٢ تصنيف محطات المعالجة بالنباتات ( الأراضي الرطبة )

يمكن تصنيف الأراضي الرطبة تبعاً للنباتات المائية المستخدمة ضمنها أو تبعاً لنوع جريان مياه المجاري عبرها:

### أ- تصنيف الأراضي الرطبة تبعاً للنباتات المستخدمة :

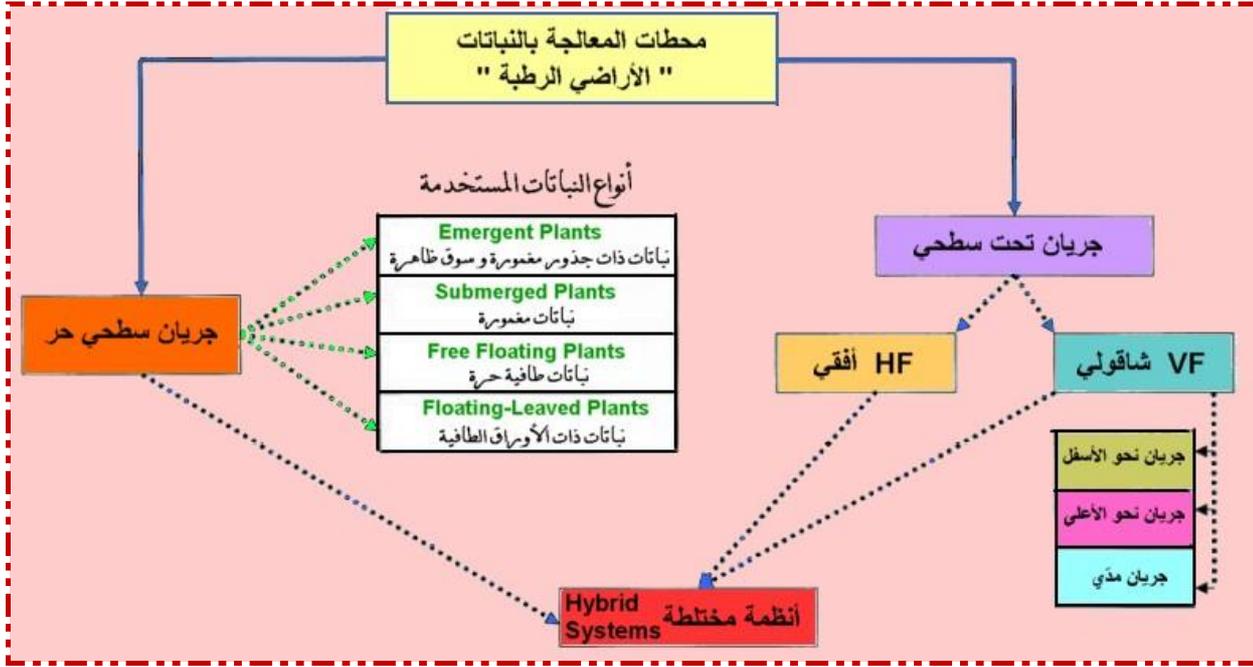
- محطة المعالجة ذات النباتات الطافية ( Floating plants )
- محطة المعالجة ذات النباتات المغمورة ( Submerged plants )
- محطة المعالجة بالنباتات ذات الجذور المغمورة و السوق الظاهرة (Rooted emergent plants)



الشكل ( ١ ) يبين إحدى محطات المعالجة بالنباتات الطافية بالولايات المتحدة الأمريكية

### ب- تصنيف الأراضي الرطبة تبعاً لاتجاه تدفق المياه عبر الميديا: (الشكل ٢)

- محطة المعالجة ذات الجريان السطحي الحر Free water surface و يرمز لها ( FWS ).
- محطة المعالجة ذات الجريان تحت سطحي الأفقي Subsurface horizontal flow و يرمز لها ( SHF or HF ).
- محطة المعالجة ذات الجريان تحت سطحي الشاقولي Subsurface vertical flow و عادة ما يرمز لها (SVF or VF).
- محطة المعالجة ذات الجريانات المتنوعة ( أفقي + شاقولي .. الخ ) Hybrid system

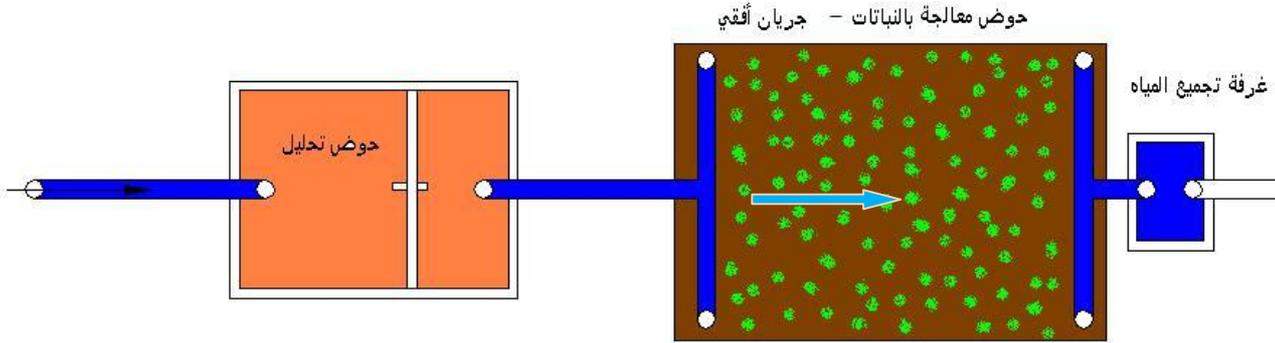


الشكل (٢) يبين أنواع محطات المعالجة بالنباتات حسب الجريان

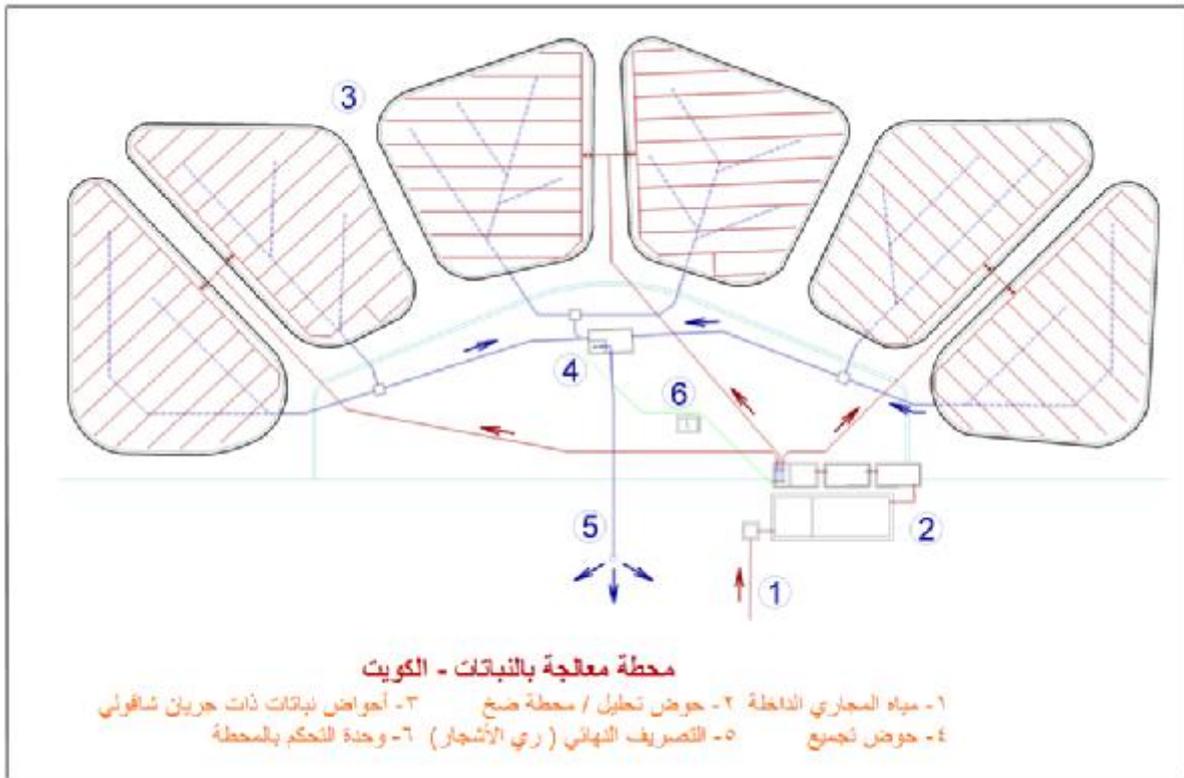
### ١-٣ المخطط العام لمحطة المعالجة بالنباتات :

المخطط الأكثر شيوعاً لمحطة المعالجة بالنباتات يتضمن في البداية معالجة أولية عبر استخدام أحواض التحليل أو أحواض أمهوف ( أو أحواض ترسيب أولية) بالإضافة إلى حوض إزالة الرمال و الدهون إن تطلب الأمر ذلك . ومن ثم تمر المياه الخارجة من المعالجة الأولية إلى وحدة المعالجة بالنباتات ذات الجريان تحت السطحي (أفقي أو شاقولي) للمعالجة الثانوية و بعدها تمر المياه إلى وحدة المعالجة بالنباتات ذات الجريان السطحي و التي تعتبر كمرحلة إنضاج أو تحسين المواصفات النهائية للمياه المعالجة .

هناك العديد من خيارات تسلسل أحواض المعالجة و أبسط هذه الخيارات هو وجود سلسلة واحدة للمعالجة (حوض تحليل أو حوض أمهوف، حوض معالجة بالنباتات ذو الجريان الأفقي تحت السطحي ) و تتطلب محطة المعالجة بالنباتات وجود حفر تفتيش لمراقبة نوعية المياه قبل حوض المعالجة بالنباتات و بعده. و هذا الخيار هو المناسب عندما يكون المطلوب فقط تخفيض المواد العضوية و المواد الصلبة المعلقة. و لكن عندما يكون من المطلوب تخفيض الأمونيا فإن وجود وحدة معالجة بالنباتات ذات الجريان تحت السطحي الشاقولي (VF) يكون ضرورياً، و لذلك يمكن هنا في هذه الحالة أن تكون أحواض (VF) قبل أحواض (HF) حيث تجري النتريجة في الأحواض ذات الجريان الشاقولي و إزالة النتريجة في الأحواض الأفقية. إن وصول المياه المراد معالجتها إلى وحدة الجريان تحت السطحي الشاقولي يتم عبر الضخ لتسريع دخول المياه عبر وسط الفلتر على عكس ما يحدث بالجريان السطحي الحر و من المنصوح به بالنسبة لوحدة VF أن يتم توزيع التدفق على أحواض متوازية بالتناوب مما يعطي فترة راحة أكبر للحوض بعد كل مرحلة تحميل بالمياه الملوثة . إن النظام الذي يستعمل مزيجاً من الأحواض المتتالية ذات الجريانات تحت السطحية الشاقولية و الأفقية تعتبر الأكثر فاعلية في تنقية المياه الملوثة. الشكل (٣) و الشكل (٤) يظهران المخطط العام للأحواض ذات الجريان الأفقي و الشاقولي.



الشكل (٣) مخطط عام مع مقطع شاقولي لمحطة معالجة بالنباتات ذات الجريان الأفقي



الشكل (٤) مخطط عام لمحطة معالجة بالنباتات ذات الجريان الشاقولي

## ثانياً: النباتات المائية المستخدمة ضمن محطات المعالجة بالنباتات:

تلعب النباتات المائية عدة أدوار ضمن أحواض المعالجة بالنباتات المائية و لكن الدور الرئيسي للنباتات المائية هو طبيعة عملها كمحفزات لعمليات التنقية. إن عملية التنقية تنتج عن مزيج من العمليات الميكروبية و الكيميائية و الفيزيائية. إن النباتات لا تلعب دورا هاما في الإزالة المباشرة لبعض المكونات مثل النتروجين و الفوسفور أو المواد العضوية ولكن يمكن الحديث عن المساهمة بالتخلص من ١٠ - ٢٠ % منها أثناء فترة نمو النباتات. و بنفس الوقت فان النباتات تعطي دعما فعالا للنمو البكتيري على الجذور النباتي ( بمنطقة الجذور ) كما أن الهواء يتم توجيهه إلى منطقة الجذور ضمن النبات بواسطة آليات متعددة. كما أن النباتات تلعب دورا في الحفاظ على الناقلية الهيدروليكية ضمن الأحواض و هذا يمنع الجريانات القصيرة من الحدوث .



الشكل (٥) النباتات المائية ضمن أحواض المعالجة بالنباتات

توجد أنواع مختلفة من النباتات المستخدمة في المعالجة تم تصنيفها ضمن مجموعات : النباتات العائمة ذات الجذور المثبتة في التربة، النباتات ذات الجذور المغمورة و السوق و الأوراق الظاهرة، النباتات المغمورة كلياً بالمياه، النباتات القصبية ذات البنية الخشبية ، النباتات القصبية ذات البنية العشبية، و النباتات الطافية ذات الجذور المعلقة ... الخ، و عادة يتم استخدام النباتات المتوفرة في منطقة إنشاء المحطة نظراً لتكيفها مع ظروف المنطقة.

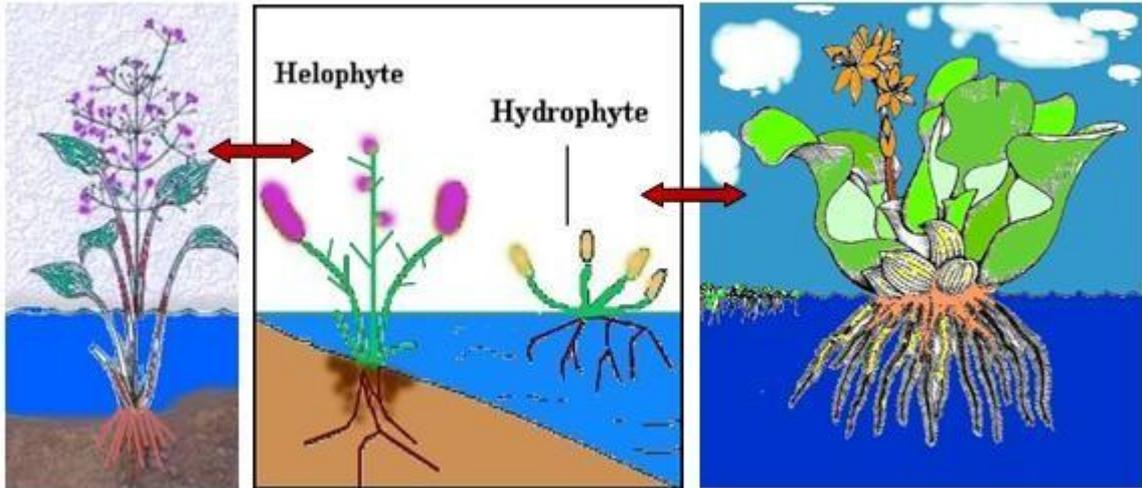
العديد من علماء البيئة و النباتات أطلقوا تعابير متنوعة على النباتات التي تنمو في الأراضي الرطبة. فبعضهم أطلق على النباتات التي تنمو ضمن الأراضي الرطبة و الماء ما يعرف بمصطلح "Hydrophytes". و يعود استخدام هذا المصطلح إلى عام 1822 حيث استخدمه العالم Schouw للتعبير عن النباتات المائية التي تنمو في الماء و قد أطلق نفس التعبير العالم Warming عام 1909 . كما استخدم هذا التعبير من قبل العالم Raunikaer عام 1934 للتعبير عن النباتات التي تنبوع تحت الماء. كما اطلق تعبير Helophytes على النباتات المائية التي تنبوع قرب القاع و ضمن التربة

المغمورة بالماء. و قد أشار العالم Raunikaer أن النباتات المائية من النوع Helophytes لا تتضمن كافة نباتات السبخات. و يعد العالم البيئي Warming أول من صنّف النباتات تبعاً لدرجة رطوبة التربة. فقد عرّف النباتات المائية بأنها تلك النباتات التي تقضي كل عمرها مغمورة بالماء أو النباتات المغمورة ذات الأوراق الطافية على سطح الماء و كذلك شمل التعريف النباتات المغمورة جزئياً و التي يتعرض الجزء الأكبر منها للهواء بما في ذلك نباتات المستنقعات أو السبخات. و بناءً على هذا فقد تم ظهور عدة تصنيفات للنباتات المائية و ذلك تبعاً للتربة. و قد ظهرت أول التصنيفات بالنسبة للتربة الرطبة جداً و هي:

- ( أ ) **Hydrophytes**: و هي تلك النباتات التي تتشكل ضمن الماء.

- (ب) **Helophytes** : و هي تلك النباتات التي تتشكل ضمن السبخات بحيث تمتد جذورها عبر التربة.

و يعد العالم البيئي Clements (1920) أول من وسّع تعريف Hydrophytes لتشمل ضمناً النباتات من النوع Helophytes .

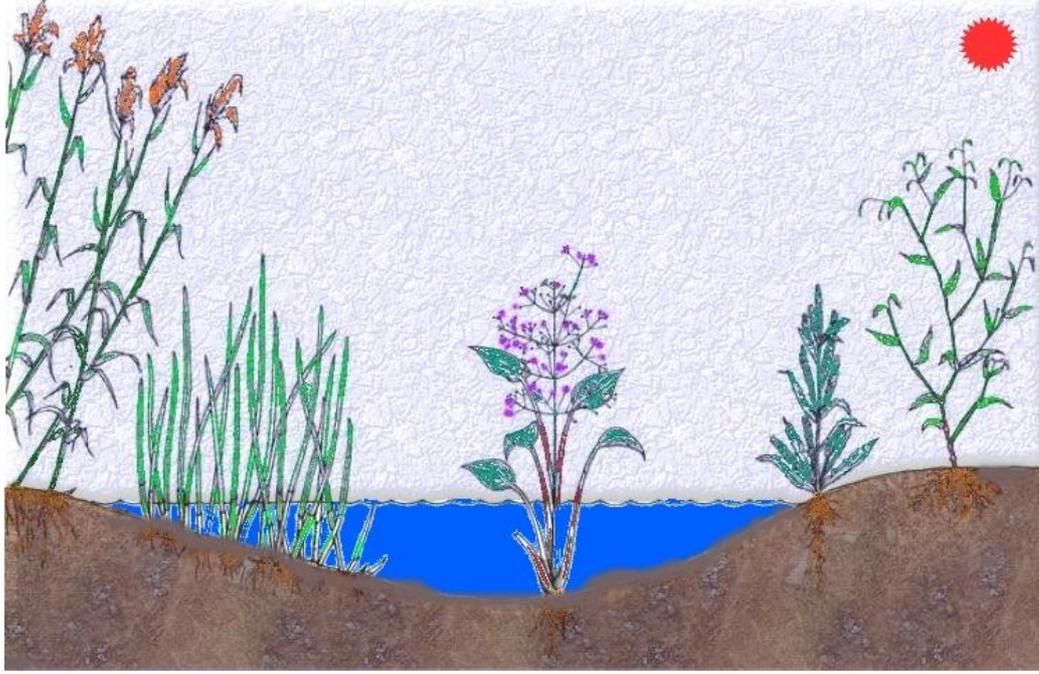


الشكل ( ٦ ) مجموعات النباتات المائية

في عام 1920 قام العالم البيئي Arber بتقسيم مجموعات النباتات المائية (وعائيات البذور) إلى النباتات ذات الجذور و عديمة الجذور، و ذلك تبعاً لنوع الأوراق و نوع الأزهار و تبعاً لكون الأزهار و الأوراق مغمورة بالماء أو طافية على سطح الماء أو ظاهرة بحيث تعلو سطح الماء. و بناءً على هذا فقد ظهرت لاحقاً تصنيفات سهلة و شائعة لأنواع النباتات المائية عبر أبحاث العلماء مثل العالم Clements (1929) و العالم Daubemire (1947) و العالم Sculthorpe (1967) و هذه الأنواع تتلخص فيما يلي:

- ( 1 ) **Emergent Macrophytes**:

و هي النباتات الكبيرة ذات الجذور المغمورة و السوق الطويلة و الأوراق الظاهرة (الشكل ٧). و تعتبر هذه النباتات شائعة الاستخدام ضمن الأراضي الرطبة و السبخات حيث تنمو ضمن منسوب مياه بعمق ٠.٥ متر أسفل التربة إلى مياه سطحية بعمق 1.5 متر أو أكبر.



الشكل ( ٧ ) مظهر عام للنباتات الكبيرة ذات الجذور المغمورة و السوق الطويلة و الأوراق الظاهرة

و من الأمثلة على هذه النباتات القصب (Phragmites) و نبات (Typha). إن الجذور و السوق الأرضية (Rhizomes) في هذه النباتات توجد بشكل دائم ضمن منطقة الترسبات و بحالة لاهوائية و هي بحاجة للحصول على الأكسجين من الهواء عبر أجزاء النبات الهوائية لاستمرار النمو. و بشكل مشابه فإن الأوراق التي تكون تحت سطح الماء عليها أن تكون قادرة على التنفس اللاهوائي لفترة قصيرة حتى تتأمن البيئة الجوية الهوائية (Aerial Habitat) لاسيما و أن محتوى الأكسجين ضمن الماء منخفض جدا" إذا ما قورن بالهواء الجوي. و عموما" فهذا الصنف من النباتات المائية تضم الأنواع التالية:

*Acorus calamus* (Sweet flag), *Baumea articulata* (Jointed twigrush), *Bolboschoenus* (*Scirpus*) *fluviatilis* (Marsh clubrush), *Carex* spp. (Sedges), *Cyperus papyrus* (Papyrus), *Eleocharis* spp. (Spikerushes), *Glyceria maxima* (Sweet mannagrass), *Juncus* spp. (Rushes), *Phalaris arundinacea* (Reed canarygrass) **Phragmites australis** (Common reed), *Panicum hemitomom* (Maidencane), *Pontederia cordata* (Pickerelweed), *Sagittaria* spp. (Arrowheads), *Scirpus* spp. (Bulrushes), *Sparganium* spp. (Bur-reeds), *Spartina* spp. (Cordgrasses), **Typha** spp. (Cattails), *Zizania aquatica* (Wild rice).



الشكل ( ٨ ) يبين نبات / Typha / Cattail



الشكل ( ٩ ) نباتات القصب (*Phragmites australis*)



الشكل ( ١٠ ) يبين نبات *Carex spp. Sedges*

### - ( 2 ) Submerged Macrophytes :

و هي نباتات كبيرة مغمورة بالماء، و هي تنمو بمختلف الأعماق شرط وصول الضوء إليها. و تنتمي إلى مجموعة النباتات متغايرة الأطوار (Heterogenous Group). إن وجودها ضمن المياه بشكل دائم و ضعف الضوء ضمن المياه أدى إلى حدوث تغييرات في بنيتها بحيث أضحت تتكيف مع النمو و التكاثُر ضمن المياه و هي مغمورة.

### - ( 3 ) Floating Leaved Macrophytes :

و هي النباتات الطافية ذات الأوراق و تتضمن النباتات الطافية الحرة أو الطافية ذات الجذور.

#### √ النباتات الطافية الحرة:

هذا النوع من النباتات يعيش على سطح الماء و له أنواعا كثيرة حسب الظروف البيئية المناسبة. و غالبا ما تكون النبتة على سطح الماء و جذورها تمتد ضمن الماء و هذه الجذور إما أن تكون قصيرة او طويلة نوعا ما. و هناك نوع من هذه المجموعة يدعى *Eichhornia crassipes* و يتصف بأنه النبات الأسرع نموا في العالم.

*Eichhornia crassipes* (Water hyacinth) or *Pistia stratiotes* (Water lettuce), Lemnaceae (Duckweeds) *Lemna minor*, *L. gibba*, *L. trisulca*, *Salvinia natans*, *Wolffia* spp.



الشكل ( ١١ ) أحد أنواع النباتات الطافية الحرة

#### √ النباتات الطافية ذات الجذور الممتدة داخل التربة:

هذه النباتات الطافية قادرة على بلوغ القاع عبر سوقها الطويلة حيث تنمو جذورها ضمن قاع الحوض و يتراوح عمق الماء لمثل هذه النباتات بين 0.5 إلى 3 متر تقريبا. و هذه النباتات متكيفة مع حركة المياه و لذلك فهي تتمتع بالمرونة الكافية اتجاه الاجتهادات المختلفة الناشئة ضمن الوسط المائي. و

تتميز هذه النباتات بعمرها القصير ( 30-50 يوم) و يمكن أن تتجدد دورة حياتها حوالي أربعة مرات بالسنة، و من الأمثلة عليها نذكر:

*Nuphar or Nymphaea, Brasenia, Potamogeton natans*



الشكل (١٢) يبين بعض أنواع النباتات الطافية ذات الجذور الممتدة ضمن التربة

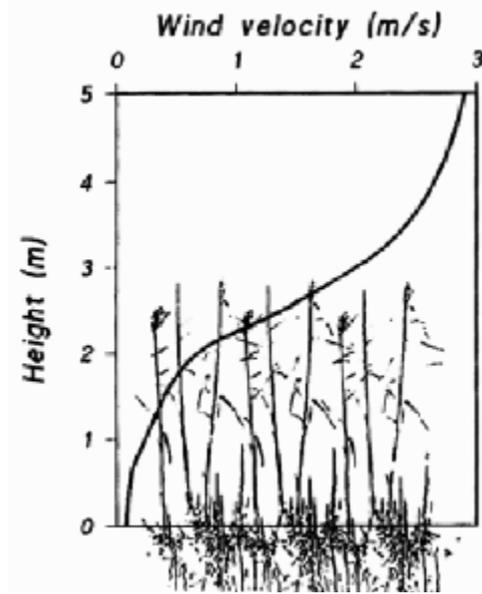
### ثالثاً: أساسيات و مبادئ إزالة الملوثات بمحطات المعالجة بالنباتات

\* دور النباتات المائية في محطات المعالجة بالنباتات:

يعتبر وجود النباتات الكبيرة (كالقصب مثلاً) أحد أهم السمات المميزة لمحطات المعالجة بالنباتات مقارنة مع الأنظمة الطبيعية الأخرى المستخدمة لمعالجة مياه المجاري مثل برك الأكسدة. تمتلك النباتات التي تنمو ضمن محطات المعالجة بالنباتات (الأراضي الرطبة) العديد من المزايا الخاصة بعملية المعالجة مما يجعلها عنصراً أساسياً في مثل هذه المحطات. الجدول التالي يلخص دور النباتات ضمن محطات الأراضي الرطبة (محطات المعالجة بالنباتات):

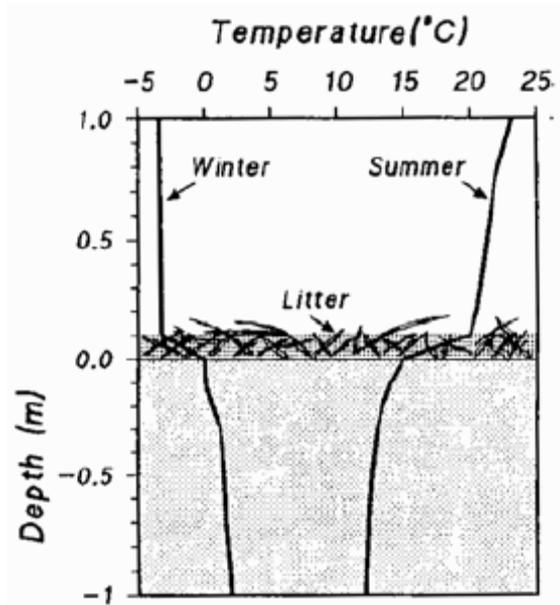
الأهمية في المعالجة	خصائص النبات
<ul style="list-style-type: none"> <li>• ضوء خفيف ← نمو منخفض للعوالق النباتية</li> <li>• تأثير التغير الطفيف بالمناخ ← العزل الحراري أثناء طقس الشتاء</li> <li>• سرعة الرياح المنخفضة ← تخفض من خطر قلع النباتات بقوة الرياح</li> <li>• منظر جمالي لمحطة المعالجة</li> <li>• تخزين المغذيات ضمنها</li> </ul>	<p>أنسجة النبات المحاطة بالهواء الجوي</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• تأثير الترشيح ← تطرد إلى الخارج المواد المترسبة الكبيرة</li> <li>• سرعة المياه المنخفضة ← زيادة معدل الترسيب</li> <li>• تؤمن مساحة سطحية لنمو الطبقة البيولوجية Biofilm</li> <li>• تطرح الأكسجين المنحل للوسط المائي مما يزيد التحلل الهوائي للملوثات</li> <li>• تستهلك المغذيات</li> </ul>	<p>أنسجة النبات المغمورة بالماء</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• تؤمن ثباتية سطح الفلتر (التربة)</li> <li>• تمنع الوسط من الانسداد في الأحواض ذات الجريان الشاقولي</li> <li>• تحرر الأكسجين مما يساعد على النتجة</li> <li>• تستهلك المغذيات</li> <li>• تحرر مضادات حيوية</li> </ul>	<p>الجذور و أشباه الجذور (الجذمور) ضمن وسط الفلتر أو التربة</p>

إن وجود النباتات ضمن حوض المعالجة يؤدي الى توزيع و تخفيض سرعة التيار المائي. و هذا ما يساعد على تأمين ظروف أفضل لعملية ترسيب المواد الصلبة المعلقة. كما أن الجزء العلوي من النبات فوق السطح يؤدي الى تخفيف سرعة الرياح قرب سطح التربة او الماء كما يظهر في الشكل (١٣). و هذا بدوره يؤمن شروط مناسبة لترسيب المواد الصلبة المعلقة و يحسن إزالة المواد الصلبة في أحواض النباتات ذات الجريان الحر.



الشكل ( ١٣ ) يبين تأثير ارتفاع النباتات فوق السطح في تخفيف سرعة الرياح عند سطح الحوض

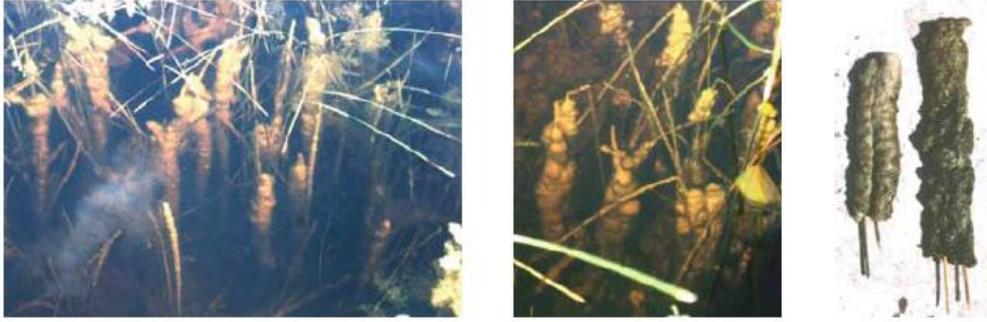
كما أن النباتات تحد من نفاذ الضوء إلى الماء مما يقلل من نمو الطحالب. كما أن النباتات تلعب دوراً هاماً في العزل الحراري للحوض و خصوصاً في فصل الشتاء عندما يكون الطقس بارداً كما يظهر في الشكل (١٤).



الشكل (١٤) يبين دور النباتات في العزل الحراري للوسط

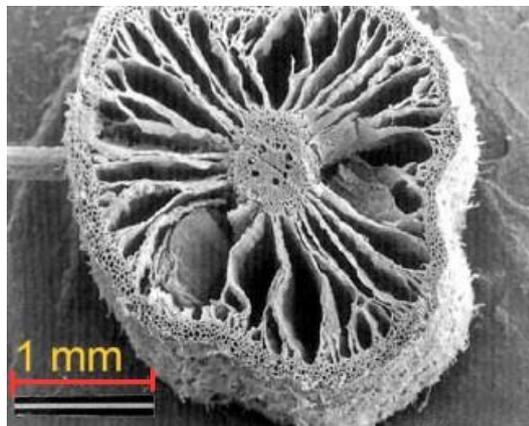
عندما تتغذى النباتات بالثلج فإنها تشكل عزلا حراريا تاما" و هذا ما يساعد في حماية التربة من الصقيع. و هذه الميزة مهمة جدا" في الأحواض ذات الجريان تحت السطحي. بينما نجد أن النباتات تمنع الانسدادات في الأحواض ذات الجريان الشاقولي حيث تتم تغذية الحوض من السطح العلوي، كما أن حركة الرياح تؤدي بالنباتات الى مساعدة المياه بالدخول الى ضمن الحوض عبر الفراغات التي يصنعها ساق النبات نتيجة الاهتزازات المتكررة.

تقوم الأوراق و سوق النباتات المغمورة بالماء بتأمين سطوح لنمو الكتلة البيولوجية عليها. كما أن أنسجة النباتات المغمورة بالماء تستعمر من قبل الطحالب والبكتريا (الشكل ١٥)، حيث تقوم الطحالب باستهلاك المغذيات و بتزويد المياه بالأكسجين المنحل نتيجة التركيب الضوئي و تقوم البكتريا بهضم المواد العضوية.



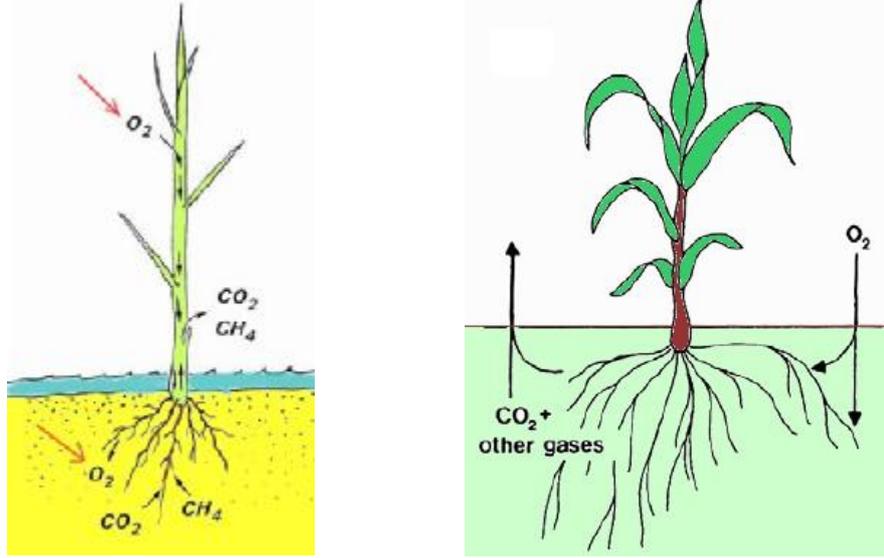
الشكل (١٥) يبين تشكل مستعمرات من الطحالب و البكتريا على سوق النباتات المغمورة بالمياه

تقوم الجذور و أشباه الجذور بتأمين سطوح التصاق تنمو عليها الكتلة البكتيرية لتشكل الطبقة البيولوجية حيث تطرح الأكسجين و تتم أكسدة الملوثات بالإضافة إلى النتريجة. و قد أوضحت الدراسات أن العدد الكلي للكائنات الدقيقة على محيط الجذر و لمسافة 1mm بدءاً من سطح الجذر تزيد عشرة مرات عن تلك الموجودة على مسافة 15-20 mm بدءاً من السطح. و قد أظهرت الدراسات المجهرية أن التجمعات البكتيرية تغطي ما يعادل من 5-10% من مساحة سطح الجذر. إن الأكسجين المنطلق من الجذور يلعب دوراً مهماً في ترسيب الحديد و المغنيزيوم و تحسين عملية النتريجة و أكسدة المركبات الضارة و ذوبان الكبريتات. يعد وجود فراغات هوائية و فجوات ضمن الجذور و أشباه الجذور و السوق و الأوراق من أهم ما يميز النباتات المائية من الناحية البنوية. إن وجود الأنسجة النباتية الممتلئة بالهواء يساعد هذه النباتات على النمو ضمن الترب اللاهوائية و الأنوكسية (شبه اللاهوائية).



الشكل (١٦) يبين الفجوات الهوائية الموجودة في أحد جذور النباتات

إن وجود الفجوات الكثيف مع الفواصل بينها يؤدي إلى الحفاظ على التكامل الهيكلي للنبات و يحصنها من أي أثر سلبي للماء عليها. فالماء يمكن أن يحتل حجماً حتى 60 % من الحجم الكلي للأنسجة الخلوية. إن هذه الفراغات تلعب دور مخازن للأكسجين الذي ينتقل بدوره ليتحرر للوسط عبر الجذور و عبر الجزء المغمورة من النبات.



الشكل ( ١٧ ) يبين نقل الأكسجين الجوي عبر النبات ليتحرر للوسط عبر الجذور

#### \* آليات إزالة الملوثات و فعالية أحواض المعالجة بالنباتات:

هناك عمليات معقدة بحيث تتنوع من عمليات بيولوجية إلى فيزيائية و كيميائية تجري ضمن أحواض المعالجة بالنباتات و ذلك من أجل تحسين مواصفات المياه الخارجة من الحوض. هذه الآليات تعتمد على التفاعلات المتبادلة بين مياه المجاري و الكائنات الدقيقة و النباتات و وسط الفلتر. يتم أكسدة المواد العضوية و تحليلها لمواد بسيطة و منتجات ثانوية و ذلك عبر الطبقة الرقيقة البيولوجية التي تتشكل على سطوح مادة الفلتر و على سوق و جذور النباتات و التي تحتاج لتتكون مدة تصل بين ثلاثة إلى ستة شهور. كما أن المواد الصلبة المعلقة فيتم حجزها عبر عمليات الترسيب و الفلتر و من ثم يتم تحلل الجزء العضوي منها بينما يبقى الجزء الغير عضوي محجوزاً ضمن الفلتر. بالنسبة للمغذيات فإن عمليات النترجة تكون منخفضة في الأحواض ذات الجريان الأفقي بسبب قلة الأكسجين اللازم لذلك بينما تحصل النترجة بشكل جيد ضمن أحواض المعالجة ذات الجريان الشاقولي بسبب توفر الأكسجين، و يتم استنفاد (استهلاك) قسم من النتروجين عبر النباتات و أما الفوسفور فيتم التخلص من جزء منه عبر الامتصاص الكيميائي له عبر وسط الفلتر و جزء أقل يمتص عبر النباتات. كما يتم التخلص من أغلبية العوامل الممرضة عبر حجزها ضمن مادة الفلتر عبر عمليات ترسيب و الفلتر و الامتصاص أو عبر افتراسها من قبل كائنات متنوعة أو بالموت الطبيعي، و تتراوح نسبة إزالتها بين ٩٠-٩٩.٩ %.

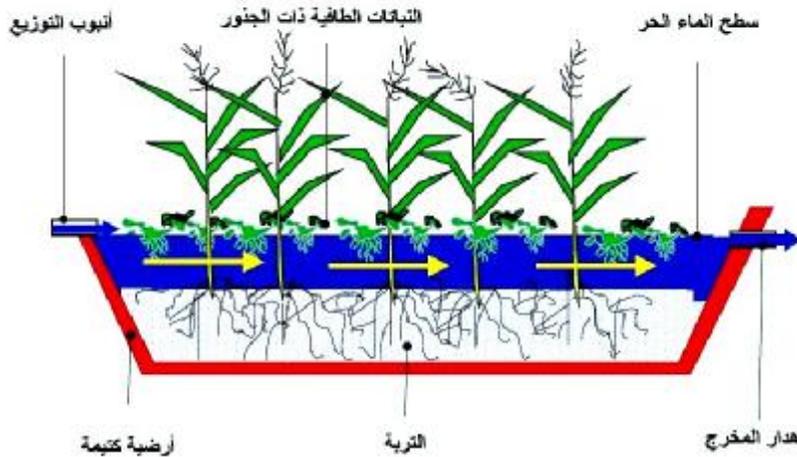
إن فاعلية الإزالة ضمن هذه الأحواض تعتمد بشكل أساسي على معدل التحميل السطحي الهيدروليكي و على نوع مادة وسط الفلتر. و كلما زادت درجة حرارة موقع المحطة كلما زادت فاعلية إزالة المواد العضوية عبر التحلل البيولوجي.

و على العموم فإن الأليتان الرئيسيتان في أغلب أنظمة المعالجة بالنباتات هي عمليات فصل المواد الصلبة من السوائل (Liquid/Solid Separations) و عمليات تحول الملوثات و المكونات ضمن مياه المجاري (Constituents Transformations). تتضمن عمليات الفصل كل من الترسيب بالنقالة و الفلترة و الامتصاص و الادمصاص و التبادل الشاردي و التعرية و الترشيح. أما عمليات التحول فربما تتضمن التفاعلات الكيميائية و تفاعلات الأكسدة و الإرجاع و تفاعلات الحموض و الأسس و عمليات التخثير و الترسيب بالإضافة إلى مختلف التفاعلات البيوكيميائية (هوائية - أنوكسية - لاهوائية). إن مجمل هذه التفاعلات و عمليات التحول تقود إلى إزالة جزء من الملوثات بالإضافة إلى حجز قسم منها ضمن وسط الأحواض. هذه المواد المحجوزة تتعرض لعمليات تحول في بنيتها و تركيبها و هذه التغييرات تؤدي غرض المعالجة بشكل فعال و على سبيل المثال فالتحول البيوكيميائي للمواد العضوية يؤدي إلى تحويلها كتلة خلوية جديدة بالإضافة إلى منتجات أخرى مثل الغازات كثاني أكسيد الكربون و غاز الميثان.

### رابعاً: أحواض النباتات ذات الجريان السطحي الحر: (Free Water Surface (FWS)

إن أحواض المعالجة بالنباتات ذات الجريان السطحي أو ما يعرف بالجريان الحر للماء قريبة جداً من أحواض المعالجة الطبيعية (المستنقعات) و بحيث يتراوح عمق المياه بين ٠.٠٥ إلى ٠.٨ متر. و قد تم استخدامها لمعالجة مياه المجاري المجمعة مسبقاً. إن تكنولوجيا الأحواض ذات الجريان السطحي ظهرت مع بداية منتصف القرن الماضي حيث استخدمت المبادئ و التصاميم الهندسية في تحديد أبعاد و شكل هذه الأحواض. و تتراوح أبعاد هذه الأحواض من مساحة صغيرة تخدم منصرفات حوض تحليل إلى آلاف الهكتارات، و تصمم عادة للتدفقات بين ٤-٧٥٠٠٠ م<sup>٣</sup>/يوم.

إن أحواض المعالجة بالنباتات ( الأرض الرطبة ) ذات الجريان الحر للمياه تصمم بحيث يتضمن مقطعها العرضي حيزاً "هاماً" لمرور المياه المعالجة أولاً بشكل حر، بينما توجد على أطرافها أوساط من الحصى أو الرمال أو التربة لتساعد على نمو النباتات. و بمعنى آخر تعتبر هذه الأحواض كمستنقعات كبيرة ذات عمق منخفض و تحوي على نباتات مائية متنوعة منها النباتات المغمورة كلياً بالماء أو النباتات الصغيرة الطافية على سطح الماء و ذات الجذور المائية و منها النباتات الطافية ذات الجذور المغمورة بالتربة بحيث أن الأجزاء المغمورة (سوق النباتات أو الأوراق) من النباتات و الأوراق الكبيرة الطافية على سطح الماء تنمو عليها الكتلة البيولوجية (Biofilm). و ضمن هذا النظام المتنوع تتم عمليات ترسيب الجزيئات و أكسدة الملوثات أو استنفاذها كما تتم إزالة نسبة مرتفعة من المعادن الثقيلة مما يحسن نوعية المياه الخارجة منها.



شكل ( ١٨ ) يبين محطة معالجة بالنباتات ذات الجريان السطحي الحر ( FWS )



الشكل ( ١٩ ) يبين حوض معالجة بالنباتات المنبتقة و ذات الجذور المثبتة بالقاع



الشكل ( ٢٠ ) يبين إحدى محطات المعالجة بالنباتات الطافية الصغيرة بالولايات المتحدة الأمريكية



الشكل ( ٢١ ) يبين أحواض المعالجة بالنباتات ذات الجريان السطحي الحر في هونغ كونغ

إن هذا النوع من الأحواض يستعمل كمرحلة معالجة ثالثة (Polishing)، فهي مناسبة جدا لإزالة العوامل المرضية بسبب تعرض المياه لأشعة الشمس كما أن المغذيات المتبقية في المياه الداخلة إليها تزال ضمنها إلى حد تمنع معه إمكانية حصول ظاهرة النمو الطحلي في مياه الأنهار أو البحيرات المستقبلية للمياه المعالجة. و لأجل كل هذه الأمور فإن الأحواض ذات الجريان الحر السطحي تستخدم كمرحلة أخيرة من مراحل المعالجة.

تتكون الأنظمة ذات الجريان السطحي و بشكل نموذجي من أحواض مزودة بحواجز طبيعية أو اصطناعية غير نفوذة لمنع الارتشاح. أما النباتات المزروعة (مثل القصب) فتكون سوقها مغمورة بالماء (من ٠,٢ - ٠,٥ متر) بينما تكون الجذور مثبتة ضمن طبقة رقيقة من التربة بسماكة 0.15m تقريبا، و تعمل النباتات في هذه الأنظمة (السوق، الأوراق المغمورة، بقايا الأوراق و الأغصان) كوسط داعم لنمو البكتريا على سطوحها و التصاقها لتشكل الطبقة البيولوجية. كما يفضل استخدام عدة أنواع من النباتات المائية.

الجدول (١) التالي يبين المؤشرات التصميمية الخاصة بهذه الأحواض للحصول على قيم  $BOD_5$  و SS أقل من ٢٠ ملغ/ل و نتروجين كلي أقل من ١٠ ملغ/ل و فوسفور كلي أقل من ٥ ملغ/ل .

الجدول (١) يبين المؤشرات التصميمية الخاصة بأحواض الجريان الحر

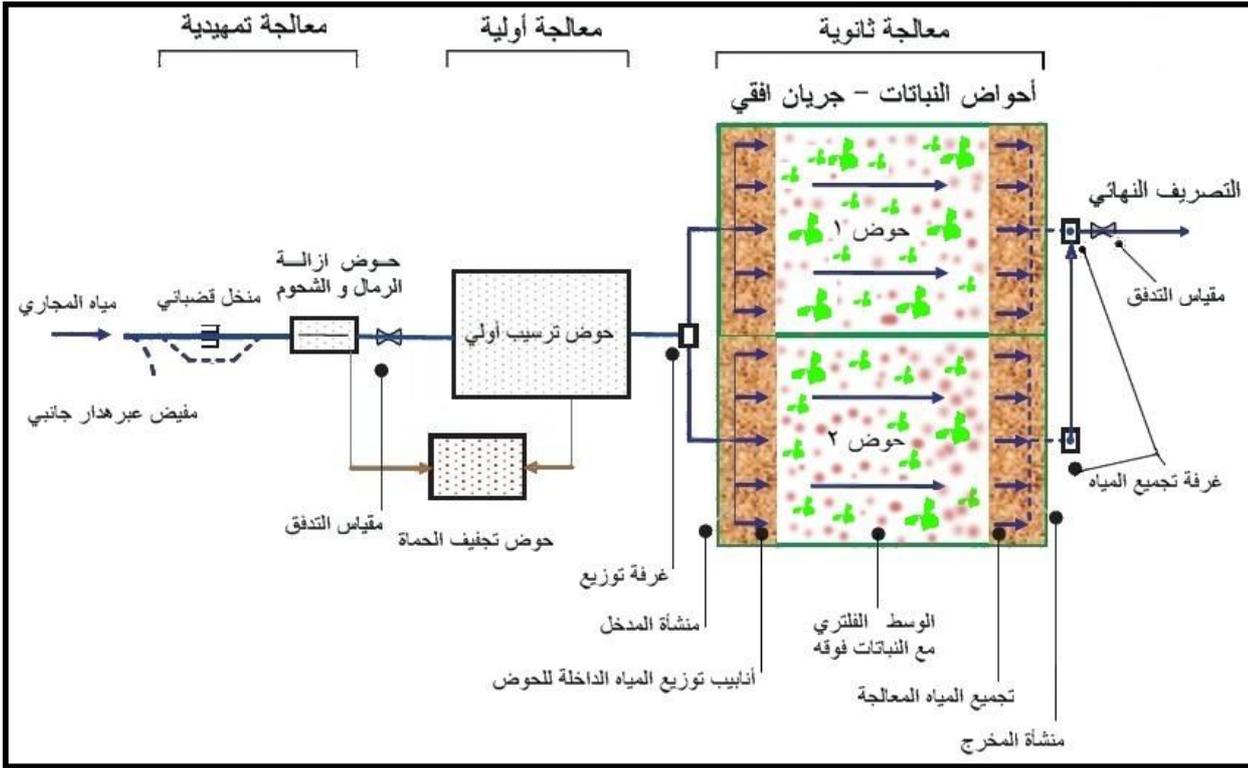
المؤشر	الواحدة	القيمة
زمن المكث لإزالة $BOD_5$	يوم	٥-٢
زمن المكث لإزالة النتروجين	يوم	١٤-٧
معدل التحميل العضوي	كغ $BOD_5$ /الهكتار باليوم	أقل من ١١٠
عمق المياه	متر	حتى ٠.٥ متر
الفاصل الزمني بين فترتي حصاد	سنة	٥-٣
النتناسب البعدي	نسبة الطول الى العرض	٢ - ١ حتى ٤ - ١
المساحة المطلوبة	م <sup>٢</sup> /٣/يوم	١٠-٥

**خامسا:** أحواض النباتات ذات الجريان تحت السطحي الأفقي:

### Subsurface Horizontal Flow Wetlands

تتكون هذه الأحواض ( الشكل ٢٢) عادة من:

- ١- حوض كتيم
- ٢- مادة الوسط (Media) للفلتر ( غالبا من الحصى)
- ٣- النباتات المائية
- ٤- منشآت المدخل و المخرج



الشكل (٢٢) مكونات محطة المعالجة بالنباتات ذات الجريان تحت السطحي الأفقي

هذا النوع من أحواض المعالجة بالنباتات يحوي وسط ( ميديا ) من الرمل الخشن أو الحصى و تنمو على سطح الوسط نباتات مائية مثل القصب و تعمل الكائنات الدقيقة على أكسدة الملوثات. حيث تتم في هذا الحوض بمياه المجاري المعالجة بشكل أولي . ان أنظمة الجريان الأفقي ( أحواض القصب ) هي الأكثر ملائمة لمعالجة مياه المجاري الناتجة عن المعالجة الأولية ( حوض تحليل ، حوض أمهوف ..... ) لأنه لا يوجد تداخل بين الماء و الهواء المحيط و هذه الحقيقة تعني أن هذه الأحواض آمنة بيئياً من وجهة نظر الحفاظ على الصحة العامة . فالمياه يجب أن تبقى دائماً أخفض من سطح الوسط الحصى أو الرمي . و لذلك فان هذه الأنظمة مناسبة جداً للمعالجة بالمكان .

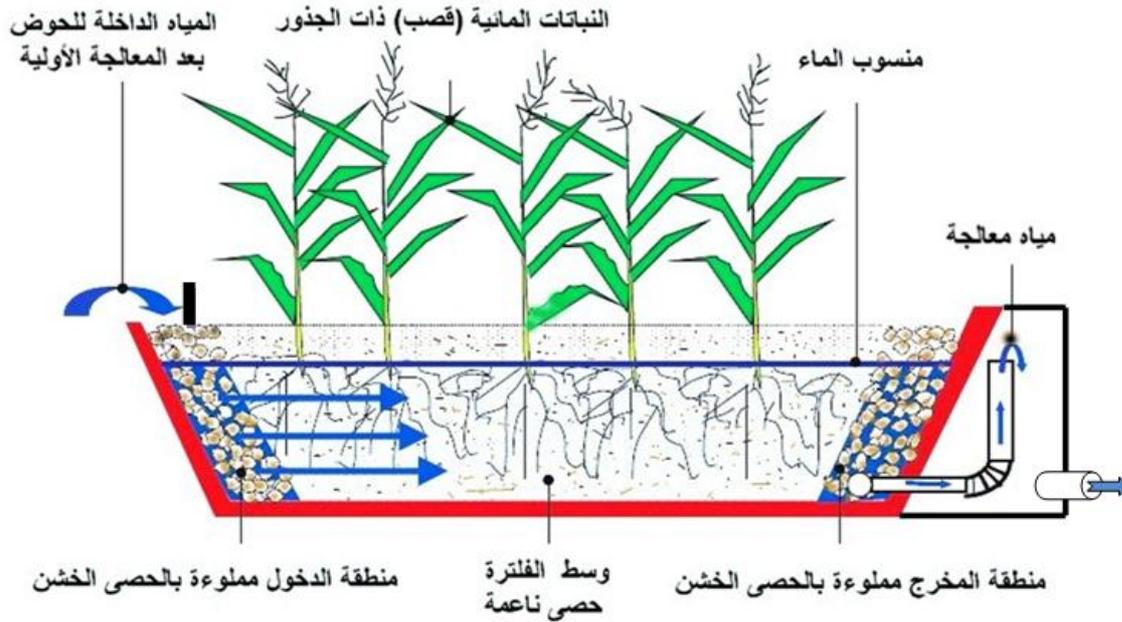
أول استخدام لهذه التكنولوجيا ظهر في ألمانيا في عام ١٩٦٠ بينما اعتمدت هذه الأحواض لمعالجة الأماكن و القرى المنعزلة منذ سنة ١٩٨٠ تقريباً .

تكون هذه الأحواض قليلة العمق و مملوءة بالأوساط الحصى أو بالرمل الخشن. يجب أن تختار أحجام الوسط الحصى أو الرمي بعناية من أجل ضمان الحصول على هيدروليكية مناسبة و لذلك ضمن الشائع استخدام الحصى الخشن و الناعم أو الرمل الخشن مما يعطي مساحات واسعة تنمو عليها الطبقة البيولوجية المؤكسدة للملوثات ( Biofilm ) .

يجب أن تكون أرضية الحوض كثيفة لذلك فهي تفرش عادة بألواح من البولي إيثيلين عالي الكثافة الكتيمة للماء أو بألواح من ( PVC ) . و يتم الجريان الأفقي للمياه بحيث تكون أرضية الحوض مائلة بحدود ١ % تقريباً يتم تأمين الميلان عبر وضع طبقة من الرمل أسفل الأغشية العازلة لإعطاء الميل المناسب للأرضية .

ان الجريان أسفل سطح الوسط الحصى أو الرمي يمنع انتشار الروائح و يمنع انتشار الحشرات . ان هذه الأنظمة تسمح بسهولة بوجود ممرات فوقها من أجل أعمال الصيانة و التشغيل . و هذا النوع من الأنظمة ذات الجريان الأفقي فعالة بشكل خاص في إزالة المواد الصلبة العالقة ( SS ) و المواد العضوية ( BOD5 ) و العوامل الممرضة بالإضافة إلى حدوث عمليات إزالة النتريجة ( anoxic ) بينما

عملية النترجة تكون محدودة جدا . إن عمق هذه الأحواض يتوقف على نوع النباتات المستعملة ضمنه ولكن من الشائع أن يكون الارتفاع بين ٠.٦-٠.٧ متر . بينما النسبة المثلى للعرض إلى الطول :  $1 < \frac{W}{L}$  و بحيث يتراوح الطول بين ٣ إلى ٣٠ متر . المدخل و المخرج يملآن بمواد حصوية كبيرة الحجم كالحجارة للتأكد من عدم انسدادها .  
إن المياه النهائية الخارجة من هذه الأحواض تتميز بغناها بالمغذيات لذلك فقد جرت العادة على استخدامها في الري .



الشكل (٢٣) حوض معالجة بالنباتات بجريان أفقي

إن مكونات الفلتر (حصى مثلا) تعمل على حجز المواد الصلبة الموجودة ضمن المياه الملوثة حيث يتحلل الجزء العضوي منها. كما أن مادة الفلتر تعمل على تأمين سطح التصاق و نمو للكائنات الدقيقة و التي تلعب دورا حاسما في تحليل و تحطيم الملوثات العضوية و حدوث عمليات تحول للمركبات النتروجينية. و بالإضافة الى ذلك فإن مادة الفلتر تمتد عبر جذور النباتات المائية. إن مستوى المياه ضمن هذه الحوض يحافظ عليه دائما" ليكون أخفض من سطح الحوض (مادة الفلتر) ببضعة سنتيمترات و ذلك عبر ضبط منسوب فوهة أنبوب المخرج (الجزء الشاقولي من انبوب المخرج) بحيث تكون أخفض من السطح الوسط الحسوي ببضعة سنتيمترات (حوالي ١٠ سنتيمترات).

يتم استخدام الرمل الخشن او الحصى بأنواعه كمادة للفلتر ضمن الحوض. إن اختيار نوع و حجم مكونات الفلتر يعتمد على الناقلية الهيدروليكية المختارة و على مسامية الوسط و العوامل الفيزيائية المرافقة لمرور مياه المجاري المعالجة أوليا" عبر الحوض. إن اختيار مادة الفلتر يعتبر "أمرا" بالغ الأهمية لنجاح عمل حوض المعالجة بالنباتات.

لقد أظهرت بعض التجارب الدولية ان الانسداد بمادة الفلتر يحصل بالقسم الأول للحوض بعد منطقة التوزيع مباشرة و ان الفترة التقريبية لبداية ظهور الانسدادات تحتاج الى عامين حيث تبدأ المياه بالجريان على سطح الحوض و لذلك ينصح باستبدال منطقة الانسداد أو اخذ ذلك بعين الاعتبار أثناء التصميم بحيث يتم اختيار ارتفاع قليل للمياه ضمن الحوض و بجعل امتداد منطقة الدخول الحاوية على

الحجارة أو الحصى الكبيرة حتى أربعة امتار بحيث تتم إطالة المدة المتوقعة لظهور الانسدادات. و كلما كانت المعالجة الأولية فعالة كلما كانت فترة ظهور الانسدادات ضمن الحوض طويلة الأمد. إن المعايير التي تحكم تصميم حوض المعالجة بالنباتات تتلخص بالحمل الهيدروليكي السطحي و بمعدل حمولات المواد العضوية و المواد الصلبة المعلقة بالإضافة الى نوع مادة الفلتر المستخدمة و التي ستحدد السعة الهيدروليكية للحوض.

و رغم أن فاعلية هذه الأحواض في ازالة المعذيات منخفضة (بين ٢٠-٣٠ %) الا ان المياه النهائية الغنية بالمغذيات تكون مفيدة لري المحاصيل و الجدول (٢) التالي يبين آليات ازالة الملوثات و فاعلية الازالة ضمن احواض النباتات ذات الجريان تحت السطحي الافقي.

الجدول ( ٢ ) يبين آليات الازالة الرئيسية للملوثات ضمن أحواض النباتات ذات الجريان الأفقي تحت السطحي و معدل الازالة الممكنة

المكونات	آلية الازالة الرئيسية	فاعلية الازالة
المواد العضوية	التحلل البيولوجي	٩٠-٨٠ %
المواد الصلبة المعلقة	الترسيب الفيزيائي، الفلترية الفيزيائية و التحلل البيولوجي	٩٠-٨٠ %
النتروجين	النترجة و ازالة النترجة البيولوجية	٤٠-٢٠ %
الفوسفور	عمليات الامتصاص الفيزيائية و الكيميائية ضمن وسط الفلتر	٢٠ %
العوامل الممرضة	الافتراس البيولوجي و الموت الطبيعي و عمليات الترسيب و الفلترية الفيزيائية	▼ T. coliforms : 90-99.9 % ▼ Helminth eggs: up to 99.9 %

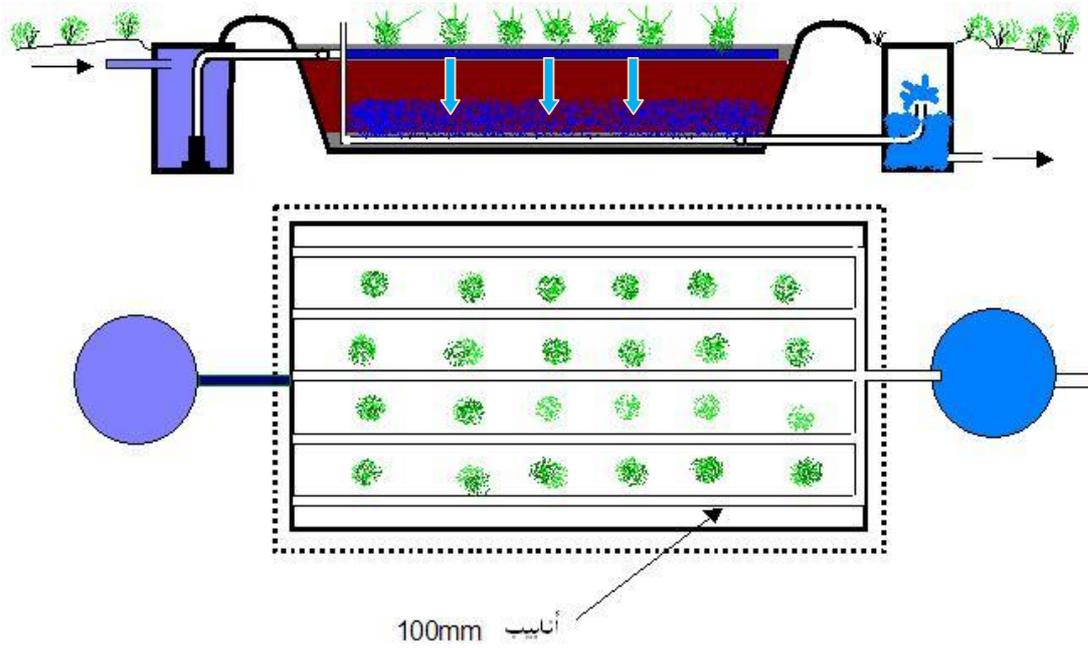
## سادسا: أحواض النباتات ذات الجريان تحت السطحي الشاقولي:

### Subsurface Vertical Flow Wetlands

لقد جاءت هذه الأحواض كبديل متطور عن الأحواض ذات الجريان تحت السطحي الأفقي و خاصة بعد تشدد المعايير الأوربية في القيمة المسموح بصرفها مع المياه المعالجة من نتروجين الأمونيا (NH<sub>4</sub>). إن هذه الأحواض تتميز بإتمامها لعملية النترجة ضمنها عبر التشغيل المتقطع و عبر ارتفاع الأحواض المنخفض. كما أن هذه الأحواض تستخدم بمرحلة منفصلة لتجفيف و تثبيت الحمأة الأولية الناتجة عن مرحلة المعالجة الأولية لمياه المجاري.

إن أحواض القصب ذات الجريان الشاقولي تصمم بحيث تمر المياه ( المعالجة بشكل أولي ) المراد معالجتها من أعلى السطح عبر شبكة أنابيب متقبة و مضغوطة إلى أسفل الحوض عبر الوسط الحصوي أو الرملي أو الوسط الخليط . يتم جمع المياه المعالجة عبر شبكة أنابيب سفلية للتصريف أو عبر طرق أخرى . و تتم تغذية الحوض بشكل متقطع بحيث أن الفراغات بين الوسط الرملي أو الحصوي في فترة الراحة تعود و تمتلئ بالهواء. و لذلك فان الأكسجين اللازم لعملية النترجة يكون

متوفرا أو تحصل عملية النتزجة بشكل كامل ضمن هذه الأحواض و مع ذلك فان جزءا بسيطا من النتزات يتم تحويله إلى غاز النتروجين ضمن الظروف الأنوكسية ( anoxic ) النادرة .



الشكل (٢٤) يبين حوض المعالجة بالنباتات بجريان تحت سطحي شاقولي

و إذا كان المطلوب إزالة النتزجة فان هذا يمكن تأمينه عبر تدوير المياه الخارجة من هذا الحوض ( جزئيا ) و إرجاعها إلى حوض التحليل .



الشكل (٢٥) منظر عام لحوض شاقولي

يجب أن تكون أرضية الحوض كثيفة ضد الترسبات و ذلك عبر فرش الأرضية برفائق من البولي الايثيلين عالي الكثافة ( HDPE ) أو عبر استخدام رفائق PVC أو حتى الغضار الكتيم . و يمكن الحفاظ على منسوب المياه بحيث يبلغ ارتفاعه من ٥-١٠ سم اعتباراً من أرضية الحوض و هذا يعني أن الحوض سيكون بمعظمه خالياً من المياه بعد فترة التراجع .

يجب أن تكون سماكة الرمل على الأقل بين ٣٠-٤٠ سم و تعلوها طبقة حصي كما أن شبكة تجميع لمياه المعالجة تكون محاطة بالحصي لمنع انسدادها بالرمل . إن تهوية الطبقة السفلية يحسن أداء المعالجة و لذلك يتم وصل أنابيب الدريناج الأفقية بأنابيب قصيرة شاقولية مفتوحة على الهواء الخارجي .

إن العمق الوسطي للأحواض ذات الجريان الشاقولي يتراوح بين ٠.٩-١ متر .  
إن هذا النوع من الأحواض يكون فعالاً و بشكل خاص من أجل عملية النتزجة بالإضافة إلى إزالة المواد العضوية ( BOD<sub>5</sub> ) و المواد الصلبة المعقدة ( SS ) بينما لا تحصل إزالة النتزجة .

تم بعون الله وفضله