

دستنامه فنی

استفاده از تالاب‌های مصنوعی برای تصفیه پساب‌ها

بهمن یارقلی و سالومه سپهری صادقیان



سال انتشار: ۱۴۰۲

بسم الله الرحمن الرحيم

مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

دستنامه فنی:

استفاده از تالاب‌های مصنوعی برای تصفیه
پساب‌ها

تهیه و تدوین:

بهمن یارقلی و سالومه سپهری صادقان
اعضای هیئت علمی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی
کشاورزی

سال انتشار:

۱۴۰۲



وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی



نوع نوشتار: دستنامه فنی
عنوان نوشتار: استفاده از تالاب‌های مصنوعی برای تصفیه پساب‌ها
نگارندگان: بهمن یارقلی و سالومه سپهری صادقیان
ویراستار ادبی: محمدرضا داهی
صفحه‌آرا: شبنم جباری
طراح جلد: سمیه وطن‌دوست
ناشر: مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی
شمارگان: محدود
نوبت چاپ: اول
سال انتشار: ۱۴۰۲



مسئولیت صحت مطالب با نگارندگان است.

شماره ثبت ۶۳۷۴۸ در مرکز فناوری اطلاعات و اطلاع‌رسانی کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی به تاریخ ۱۴۰۲/۰۴/۰۴

عنوان	صفحه
پیشگفتار	۱
۱- مقدمه‌ای بر تالاب‌های مصنوعی و کاربردهای آن	۲
۲- مزایای استفاده از تالاب‌های مصنوعی در تصفیهٔ پساب‌ها	۳
۳- مقایسهٔ تالاب‌های مصنوعی و تالاب‌های طبیعی	۶
۴- تقسیم‌بندی تالاب‌های مصنوعی	۸
۵- مکانیسم و فرآیندهای تصفیهٔ پساب‌ها در تالاب‌های مصنوعی	۱۱
۶- نقش گیاهان تالاب در تصفیهٔ پساب‌ها	۱۷
۷- انتخاب گیاهان تالاب	۲۲
۸- نمونه‌هایی از گیاهان تالاب	۲۵
۹- اصول طراحی تالاب‌های مصنوعی	۲۹
۱۰- اجرا و راه‌اندازی تالاب‌های مصنوعی	۶۱
۱۱- اصول بهره‌برداری و نگهداری از تالاب‌های مصنوعی	۶۳
۱۲- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری	۶۶
۱۳- مراجع	۶۷

پیشگفتار

به تازگی توسعه تالاب‌های مصنوعی برای تصفیه پساب‌ها در نقاط مختلف دنیا بسیار مورد توجه قرار گرفته است. بزرگترین و گسترده‌ترین نمونه، سامانه تالاب مصنوعی برای تصفیه پساب در پوتراجایا در مالزی است. این تالاب‌ها نه تنها به عنوان سامانه تصفیه پساب دوستدار محیط زیست مطرح هستند، بلکه چشم انداز شهرها و محیط‌های پیرامونی را نیز بهبود می‌بخشند. این تالاب‌ها با تبدیل شدن به مرکز عالی تفسیر طبیعت، سبب افزایش آگاهی عمومی در خصوص ارزش تالاب‌های طبیعی و مصنوعی می‌شوند. شرایط آب و هوایی و خاک غنی از مواد مغذی در ایران، شرایط ایده‌آلی برای رشد گیاهان تالابی فراهم می‌آورند و از این جهت، ایران پتانسیل قابل توجهی برای توسعه و استفاده از تالاب‌های مصنوعی به عنوان روش پایدار تصفیه پساب دارد. برای دستیابی به این هدف، نیاز به آموزش ظرفیت انسانی در طراحی، بهره‌برداری، نظارت و نگهداری تالاب‌های مصنوعی وجود دارد. این دستنامه معرفی ارزشمندی از تالاب‌های مصنوعی ارائه می‌کند و آگاهی از ارزش آنها را در بین متخصصان افزایش می‌دهد. مخاطبان اصلی این نوشتار کارشناسان، مروجان، دانشجویان، مراکز آموزشی-تحقیقاتی، مهندسين مشاور و پیمانکاران و بهره‌برداران پیشرو و علاقه‌مندان به مباحث کشاورزی و محیط‌زیستی هستند. در این دستنامه سعی شده است، مراحل سه گانه طراحی، اجرا و راه‌اندازی و بهره‌برداری و نگهداری تالاب‌های مصنوعی با توجه شرایط موجود کشور، اعم از منابع و مصالح، گونه‌های گیاهی، خصوصیات کیفی پساب‌ها و زهاب‌ها و ... بومی‌سازی شود و به‌طور مشخص و کاربردی ارائه گردد.

۱- مقدمه‌ای بر تالاب‌های مصنوعی و کاربردهای آن

تالاب‌ها، چه مصنوعی و چه طبیعی، فناوری جایگزین کم‌هزینه و در عین حال کارآمدی را برای تصفیهٔ پساب‌ها ارائه می‌دهند. سامانهٔ تالاب که به‌طور خاص با هدف اولیهٔ بهبود کیفیت پساب به طریقهٔ مهندسی ساخته شده است، "سامانه تصفیهٔ تالاب مصنوعی" (CWTS)^۱ نامیده می‌شود. در گذشته، بسیاری از این سامانه‌ها برای تصفیهٔ حجم کم پساب بارگیری شده با مواد آلی به راحتی قابل تجزیه برای جمعیت‌های جدا شده در مناطق شهری ساخته می‌شدند. با این حال، تقاضای گسترده برای بهبود کیفیت آب دریافتی، احیا و استفادهٔ مجدد آب، در حال حاضر نیروی محرکه برای اجرای CWTS در سراسر جهان است. نگرانی‌های اخیر در مورد از بین رفتن تالاب‌های طبیعی، لزوم ایجاد تالاب‌هایی را نمایان کرده است که هدف آن به نوعی تقلید از عملکردها و ارزش‌های تالاب‌های طبیعی تخریب شده است. ویژگی‌های طبیعی برای تالاب‌های مصنوعی با بهره‌گیری از توده‌های ماکروفیت حاصل می‌شود که قادرند فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی موجود در سامانهٔ تالاب‌های طبیعی را تکرار کنند. تعداد تالاب‌های مصنوعی مورد استفاده در دنیا در چند سال گذشته بسیار افزایش یافته است. استفاده از این تالاب‌های مصنوعی در ایالات متحده، نیوزلند و استرالیا به سرعت گسترش یافته است. برخی از این سامانه‌ها برای تصفیهٔ درجه ۳ فاضلاب‌های شهرک‌ها و شهرهای بزرگ استفاده می‌شوند. این تالاب‌های مصنوعی معمولاً از نظر اندازه بزرگ‌تر هستند و از سامانهٔ جریان سطحی برای حذف غلظت کم مواد مغذی (نیتروژن و فسفر) و جامدات معلق استفاده می‌کنند. با این حال، در کشورهای اروپایی، این تالاب‌های مصنوعی

¹ Constructed Wetland Treatment System

تصفیه پساب معمولاً برای تأمین تصفیه ثانویه فاضلاب خانگی برای جمعیت روستاها استفاده می‌شود. این تالاب‌های مصنوعی به عنوان روشی اقتصادی، جذاب و کارآمد برای ارائه استانداردهای بالای تصفیه فاضلاب در نظر گرفته می‌شوند.

به طور معمول، تالاب‌ها برای یک یا چند مورد از چهار هدف اصلی به شرح زیر ساخته می‌شوند:

- ایجاد زیستگاه برای جبران کمبود تالاب‌های طبیعی که برای کشاورزی و توسعه شهری تغییر کاربردی داده‌اند.
- بهبود کیفیت آب
- کنترل سیل
- تولید مواد غذایی و فیبر (تالاب‌های آبی‌پروری مصنوعی)

در این دستنامه، تالاب‌های مصنوعی با هدف بهبود کیفیت آب یا تصفیه فاضلاب و پساب به تفصیل بررسی شده‌اند.

۲- مزایای استفاده از تالاب‌های مصنوعی در تصفیه پساب‌ها

تالاب‌های مصنوعی تصفیه پساب فناوری جدید برای ایران به شمار می‌روند. این سامانه دوستدار محیط‌زیست و جایگزینی ارزان برای تصفیه فاضلاب با استفاده از منابع محلی است. از نظر زیبایی‌شناختی، در مقایسه با تصفیه‌خانه‌های فاضلاب معمولی، سایت تالاب چشم‌انداز زیباتری به منطقه می‌بخشد. این سامانه استفاده پایدار از منابع محلی را ترویج می‌کند و از آن رو که یک سامانه تصفیه

بیولوژیکی فاضلاب است، سازگار با محیط زیست است و یک تکنولوژی سبز به-شمار می‌رود.

تالاب‌های مصنوعی را می‌توان با هزینه‌های کمتر از دیگر گزینه‌های تصفیه و با روش‌های تکنولوژی در سطوح پایین‌تر ایجاد کرد، روش‌هایی که در آن‌ها به ابزارهای تکنولوژیکی جدید یا پیچیده نیاز نیست. این تالاب‌ها به منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و جنبشی و گیاهان تالابی و میکروارگانیسم‌ها، یعنی عوامل فعال در فرآیندهای تصفیه، متکی هستند.

این تالاب‌ها قادرند حجم کم تا زیاد آب و پساب و همچنین سطوح مختلف آلاینده‌ها را تحمل کنند. ورودی آنها می‌تواند شامل فاضلاب شهری و خانگی، رواناب شهری، فاضلاب کشاورزی، پساب‌های صنعتی و آب‌های سطحی آلوده در رودخانه‌ها و دریاچه‌ها باشد. این تالاب‌ها می‌توانند کیفیت هر نوع پساب ورودی با آلاینده‌های متفاوت را برای کاربری‌های بالقوه با استانداردهای مختلف ارتقا دهند. این کاربری‌های بالقوه می‌تواند شامل صنعت گردشگری، ادارات دولتی، کارآفرینان خصوصی، اقامتگاه‌های خصوصی، صنایع آبی‌پروری و صنایع کشاورزی باشد. استفاده از محصولات و نیروی کار محلی کمک شایانی به کاهش هزینه‌های احداث، بهره‌برداری و نگهداری از این تالاب‌های مصنوعی می‌کند. به این ترتیب با بهره‌گیری از پتانسیل‌های محلی، انرژی و مواد خام کمتری، در مقابل هزینه مستمر وقت و پول برای بهره‌برداری و نگهداری از این سامانه‌ها مورد نیاز خواهد بود. تالاب‌های مصنوعی برای کاهش استفاده از منابع طبیعی در تصفیه‌خانه‌های معمولی، به طور غیرمستقیم کمک زیادی می‌کنند و سبب کاهش تخلیه فاضلاب به آبراهه‌های طبیعی می‌شوند. تالاب‌های مصنوعی همچنین می‌توانند برای پاکسازی رودخانه‌های آلوده و سایر آب‌ها به کار گرفته

شوند. این تالاب‌ها به طور گسترده برای کاربری‌های مختلف استفاده می‌شوند. این کاربری‌ها شامل تصفیه فاضلاب اولیه و ثانویه، ضد عفونی کردن پساب مرحله سوم، مدیریت رواناب شهری و روستایی، مدیریت سموم، تصفیه شیرابه در زمین و معدن، مدیریت لجن، تصفیه پساب صنعتی، افزایش جذب مواد مغذی درون جریان، حذف مواد مغذی از طریق تولید و پخش زیست‌توده، و تغذیه آب زیرزمینی است.

هدف اولیه تالاب‌های مصنوعی، تصفیه انواع فاضلاب (شهری، صنعتی، کشاورزی و رواناب‌ها) است. با این حال، احداث این تالاب‌ها می‌تواند هدف‌های دیگری نیز داشته باشد. تالاب می‌تواند به عنوان پناهگاه حیات وحش در نظر گرفته شود و زیستگاهی برای جانوران تالاب فراهم کند. سامانه تالاب همچنین می‌تواند به عنوان عنصری برای ارتقای فاکتور زیبایی‌شناختی منطقه احداث شود به گونه‌ای که تبدیل به یک مقصد جذاب برای گردشگران و ساکنان شهری و محلی شود. همچنین می‌تواند به عنوان پناهگاه جاذبه عمومی برای بازدیدکنندگان برای کشف امکانات محیطی و آموزشی لحاظ شود. این موضوعی است جذاب برای طیف وسیعی از مخاطبان مختلف از مهندسان گرفته تا کسانی که در تأسیسات فاضلاب تخصص دارند و همچنین دوستداران محیط‌زیست و افرادی که به تفریحات آبی علاقه‌مند هستند. تالاب‌های مصنوعی همچنین زمینه تحقیق و آموزش را برای محققان و دانشجویان رشته‌های مختلف در این عرصه جدید تحقیقاتی و آموزشی فراهم می‌کنند.

۳- مقایسه تالاب‌های مصنوعی و تالاب‌های طبیعی

تالاب‌های مصنوعی، برخلاف تالاب‌های طبیعی، سامانه‌هایی دست‌ساز یا تالاب‌هایی مهندسی شده هستند که برای تقلید از عملکرد تالاب‌های طبیعی برای هدف‌ها و نیازهای انسان طراحی، ساخته و بهره برداری می‌شوند. تالاب‌های مصنوعی معمولاً در یک اکوسیستم غیر تالابی یا یک فضای خاکی و عمدتاً به منظور حذف آلاینده‌ها از پساب ورودی به تالاب احداث می‌شوند (Steiner et al., 2020). نمونه‌ای از تالاب‌های طبیعی و مصنوعی در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده‌اند.

تالاب‌های مصنوعی معمولاً باتلاق در نظر گرفته می‌شوند. زیرا مانند باتلاق‌ها مناطق آبی کم‌عمقی پوشیده از پوشش‌های گیاهی علفی از جمله بوته‌ها، راش‌ها و نی‌ها هستند. مجموعه این گیاهان علفی با نام تیفا^۱ شناخته می‌شوند که مجموعه‌ای از حدود ۳۰ گونه از گیاهان گلدار تک لپه‌ای از خانواده Typhaceae است. این گیاهان نام‌های رایج مختلفی دارند، در انگلیسی بریتانیایی به‌عنوان bulrush یا reedmace، در آمریکایی به‌عنوان cattail reed، یا punks، در استرالیا به‌عنوان cumbungi یا bulrush، در کانادا به‌عنوان cattail و در نیوزلند به‌عنوان raupo شناخته می‌شوند.

¹ Typha



شکل ۱- یک نمونه تالاب طبیعی: تاسک برا^۱، یک سامانه باتلاق آب شیرین



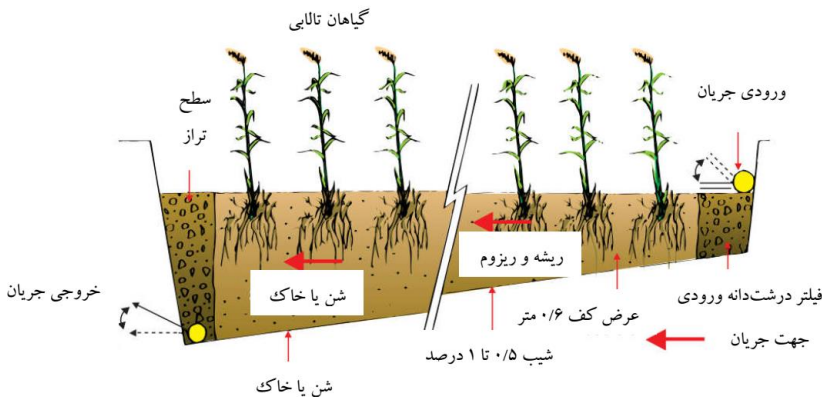
شکل ۲- یک نمونه تالاب مصنوعی: تالاب پوتراجایا^۲

¹ Tasek Bera

² Putrajaya

۴- تقسیم‌بندی تالاب‌های مصنوعی

تالاب‌های مصنوعی به دو نوع کلی طبقه‌بندی می‌شوند: سامانه جریان افقی (HFS^1) (شکل ۳) و سامانه جریان عمودی (VFS^2). سامانه جریان افقی دو نوع کلی دارد: سامانه‌های جریان سطحی (SF^3) و جریان زیرسطحی (SSF^4). این سامانه‌ها، سامانه جریان سطحی نامیده می‌شوند زیرا پس‌اب از ابتدای ورودی تالاب وارد می‌شود و در ادامه به صورت افقی از بستر به سمت خروجی جریان می‌یابد و در طول مسیر تغذیه مجدد نمی‌شود. در حالی که سامانه‌های جریان عمودی به صورت متناوب تغذیه می‌شوند و از طریق شبکه‌ای از لوله‌های زهکشی به صورت عمودی از طریق بستر تخلیه می‌شوند.

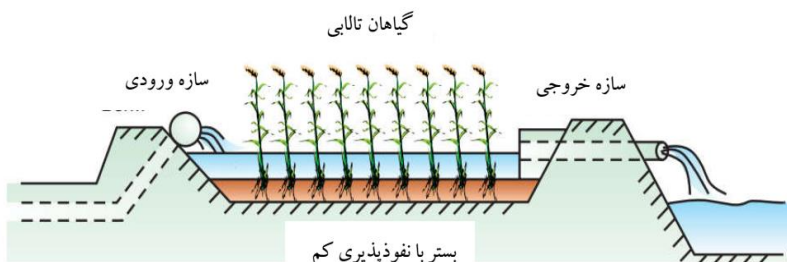


شکل ۳- طرح شماتیک یک سامانه تالاب با جریان افقی (HFS)

- 1 Horizontal Flow System
- 2 Vertical Flow System
- 3 Surface Flow
- 4 Sub-Surface Flow

۱-۴- سامانه جریان سطحی (SF)

استفاده از سامانه‌های جریان سطحی (SF) در آمریکای شمالی گسترده است. این سامانه‌ها عمدتاً برای تصفیه فاضلاب شهری با جریان‌های فاضلاب زیاد با هدف حذف مواد مغذی استفاده می‌شوند. سامانه‌های SF از نظر اندازه نسبتاً بزرگ‌تر از دیگر سامانه‌ها هستند. اکثر تالاب‌های مصنوعی از نوع سامانه‌های جریان سطحی (SF) یا به عبارت دیگر سامانه‌های سطح آب آزاد هستند. این تالاب‌ها معمولاً از سامانه آب‌های جاری استفاده می‌کنند که در یک حوضه یا کانالی جریان می‌یابد که انواع پوشش گیاهی را پشتیبانی می‌کند، و آب در عمق نسبتاً کم بالایی سطح مواد زیرلایه قابل مشاهده است. بسترها عموماً خاک‌های بومی و خاک رس یا مواد ژئوتکنیکی غیرقابل نفوذ هستند که از تراوش جلوگیری می‌کنند (Cooper, et al., 1996). معمولاً از تجهیزاتی در ورودی برای به حداکثر رساندن جریان ورقه‌ای پساب استفاده می‌شود تا پساب را از طریق تالاب به کانال خروجی هدایت کنند. عمق بستر در این گونه تالاب‌ها معمولاً حدود ۰/۴ متر است (شکل ۴).



شکل ۴- طرح شماتیک یک سامانه تالاب جریان سطحی (SF)

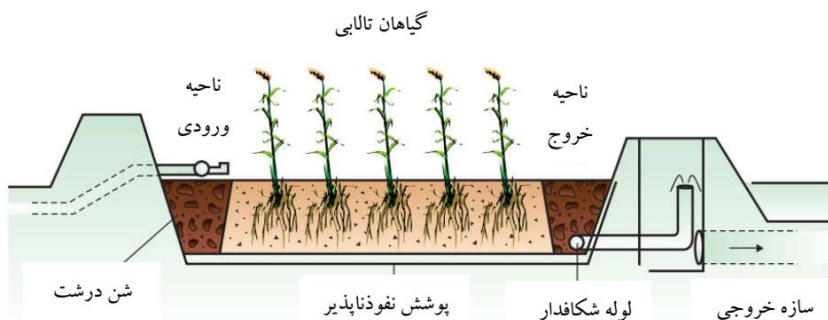
۲-۴- سامانه جریان زیرسطحي (SSF)

سامانه جریان زیرسطحي (SSF) شامل فناوری مبتنی بر خاک است که عمدتاً در اروپای شمالی استفاده می‌شود. این سامانه‌ها در بخش‌هایی از اروپا، استرالیا، آفریقای جنوبی و دیگر نقاط جهان یافت می‌شوند که گیاهان را روی بسترهای شنی کشت می‌کنند (Varma et al., 2021). در سامانه جریان زیرسطحي با پوشش گیاهی (SSF)، آب از یک سر به انتهای دیگر از طریق بسترهای نفوذپذیر که از مخلوط خاک و شن یا قلوه‌سنگ ساخته شده است، جریان می‌یابد. این بسترها به رشد پوشش گیاهی کمک می‌کند که ریشه‌هایشان نیاز به محافظت دارد. به این روش «روش منطقه-ریشه»^۱ یا «فیلتر-سنگ-نی»^۲ یا «سامانه بستر گیاهی نوظهور»^۳ نیز گفته می‌شود (Varma et al., 2021). بستر حدود ۰/۶ متر عمق دارد و قسمت پایین آن یک لایه رسی برای جلوگیری از تراوش وجود دارد. اندازه بستر برای بیشتر زیرلایه‌های شنی از ۵ تا ۲۳۰ میلی‌متر می‌تواند باشد که میزان متداول آن ۱۳ تا ۷۶ میلی‌متر است. کف بستر شیب‌دار است تا جریان آب رو سطحی به حداقل برسد. پساب به صورت ثقلی و از طریق نیروی جاذبه به صورت افقی از ناحیه ریشه پوشش گیاهی در حدود ۱۰۰-۱۵۰ میلی‌متر زیر سطح شن جریان می‌یابد. بسیاری از ماکرو و میکروارگانیسم‌ها در بسترها ساکن هستند. سطح آزاد آب قابل مشاهده نیست. منطقه ورودی دارای یک لوله سوراخ مدفون است تا حداکثر جریان را به صورت افقی در منطقه تصفیه توزیع کند. آب تصفیه شده در خروجی‌های کف محیط جمع‌آوری می‌شود، که معمولاً ۰/۳ تا ۰/۶ متر زیر سطح بستر قرار دارد (شکل ۵).

¹ Root-Zone Method

² Rock-Reed-Filter

³ Emergent Vegetation Bed System



شکل ۵- طرح شماتیک یک سامانه تالاب جریان زیرسطحی (SSF)

۵- مکانیسم و فرآیندهای تصفیه پساب‌ها در تالاب‌های مصنوعی

تالاب‌ها در تصفیه BOD^1 ، TSS^2 ، N^3 و P^4 و همچنین برای کاهش فلزات، آلاینده‌های آلی و عوامل بیماری‌زا مؤثر هستند. مکانیسم‌های اصلی حذف آلاینده‌ها در تالاب‌های مصنوعی شامل فرآیندهای بیولوژیکی است مانند فعالیت متابولیک میکروبی و جذب گیاه و نیز فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی مانند ته‌نشینی، جذب و رسوب‌گذاری در فصل مشترک آب-رسوب، ریشه-رسوب و گیاه-آب (غلامی و همکاران، ۱۴۰۰).

تخریب میکروبی نقش غالبی در حذف مواد آلی زیست‌تخریب‌پذیر محلول/کلوئیدی در پساب دارد. تجزیه زیستی زمانی اتفاق می‌افتد که مواد آلی محلول به زیست‌لایه‌هایی^۵ متصل شود که روی ساقه‌های و ریشه گیاهان تالابی و خاک قرار دارند. جامدات معلق با فیلتراسیون و

¹ Biochemical oxygen demand

² Total suspended solids

³ Nitrogen

⁴ Phosphorus

⁵ Biofilm

ته نشینی حذف می شوند. آلاینده ممکن است در نتیجه بیش از یک فرآیند حذف شود (اخوان و همکاران، ۱۳۹۶).

۱-۵- مکانیسم های حذف نیتروژن

برای نشان دادن نقش گیاهان تالاب در حذف نیتروژن مطالعات کافی وجود دارد، اما فرآیند نیتریفیکاسیون / نیتروژن زدایی در مقابل فرآیند جذب توسط گیاه از اهمیت بیشتری برخوردار است. نیتروژن (N) می تواند به شکل های مختلف وجود داشته باشد، یعنی نیتروژن آمونیاکی (NH_3 و NH_4^+)، نیتروژن آلی و نیتروژن اکسید شده (NO_2^- و NO_3^-). نیتروژن از طریق نیتریفیکاسیون / دنیتریفیکاسیون، تبخیر آمونیاک (NH_3) ذخیره سازی در ریزه ها و رسوبات، و جذب توسط گیاهان تالابی و ذخیره سازی در زیست توده گیاهی حذف می شود (یارقلی و همکاران، ۱۴۰۰). بخش عمده حذف نیتروژن از طریق جذب گیاه یا نیتروژن زدایی صورت می گیرد. جذب نیتروژن از طریق برداشت گیاهان و حذف زیست توده از سامانه بسیار مهم است. در فصل مشترک ریشه و خاک، اکسیژن اتمسفر از طریق برگ ها، ساقه ها، ریزوم ها^۱ و ریشه گیاهان تالابی به ریزوسفر^۲ پخش می شود و بنابراین یک لایه هوای شبیه به لایه های موجود در رابط بستر-آب یا بستر-هوا ایجاد می کند (Varma et al., 2021). دگرگونی نیتروژن در لایه های اکسید شده و احیا شده محیط، بخش ریشه و قسمت زیرزمینی گیاهان تالابی صورت می گیرد. آمونیفیکاسیون^۳ در جایی اتفاق می افتد که نیتروژن آلی به NH_4^+ -N در هر دو لایه اکسید و احیا شده، به نوع معدنی تبدیل می شود. لایه اکسید شده و بخش های غوطه ور گیاهان مکان های مهمی برای نیتریفیکاسیون^۴ هستند که در آن

¹ Rhizome

² Rhizosphere

³ Ammonification

⁴ Nitrification

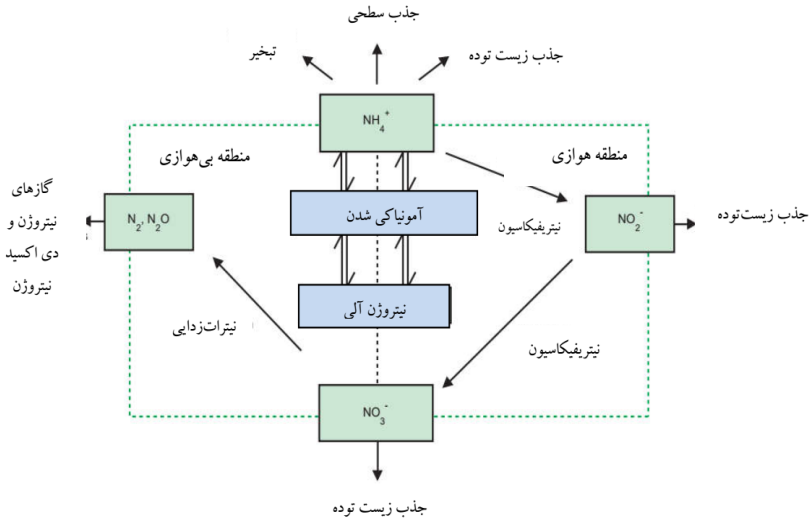
نیتروژن آمونیاکی (AN^1) توسط باکتری‌های نیتروزوموناس^۲ به نیتريت ($\text{NO}_2\text{-N}$) و در نهایت توسط باکتری نیتروباکتر^۳ به نیترات ($\text{NO}_3\text{-N}$) تبدیل می‌شود، یا توسط گیاهان جذب می‌شود یا در ناحیه احیاء شده منتشر می‌شود و در آنجا با فرآیند نیترات‌زدایی به N_2O و N_2 تبدیل می‌شود (شکل ۶) (Gholami et al., 2023).

نیترات‌زدایی حذف دائمی نیتروژن از سامانه تصفیه تالاب است، با این حال این فرآیند بر اثر عواملی مانند دما، pH، پتانسیل ردوکس، در دسترس بودن کربن و در دسترس بودن نیترات محدود می‌شود (کیانپور و همکاران، ۱۴۰۱). میزان نیتروژن‌زدایی سالانه تالاب با جریان سطحی را می‌توان با استفاده از رویکرد موازنه جرم نیتروژن تعیین کرد که با محاسبه مقادیر نیتروژن ورودی و خروجی و اندازه‌گیری جذب نیتروژن توسط گیاهان و مقدار ترسیب‌شده و تبخیر NH_3 تخمین زده می‌شود. میزان حذف نیتروژن به طراحی سامانه و شکل و مقدار نیتروژن موجود در پساب بستگی دارد. اگر مقدار نیتروژن کم باشد، گیاهان تالاب مستقیماً با باکتری‌ها برای NH_4^+ و NO_3^- رقابت می‌کنند، در حالی که غلظت زیاد نیتروژن، به‌ویژه به شکل آمونیاک، فعالیت نیتروفيکاسیون و نیترات‌زدایی را تحریک می‌کند (Tan et al., 2021).

¹ Ammoniacal Nitrogen

² Nitrosomonas

³ Nitrobacter



شکل ۶- تبدیل نیتروژن در سامانه تصفیه تالاب مصنوعی (Cooper et al., 1996)

۲-۵- مکانیسم‌های حذف فسفر

فسفر در پساب‌ها به صورت ارتوفسفات^۱، ارتوفسفات دهیدراته (پلی فسفات) و فسفر آلی وجود دارد. تبدیل بیشتر فسفر به فرم‌های ارتوفسفات (H_2PO_4^- , PO_4^{2-} , PO_4^{3-}) بر اثر اکسیداسیون بیولوژیکی ایجاد می‌شود. بیشتر اجزای فسفر ممکن است در محیط خاک بچرخند. حذف فسفات با فرآیندهای فیزیکی- شیمیایی، با واکنش‌های جذب، کمپلکس و رسوب شامل کلسیم (Ca)، آهن (Fe) و آلومینیم (Al) شدنی خواهد بود. ظرفیت سامانه‌های تالابی برای جذب فسفر با غلظت رسوب آلومینیم آمورف و آهن قابل استخراج همبستگی مثبت دارد. اگرچه جذب گیاه ممکن است قابل توجه باشد، جذب فسفر (ارتوفسفات) توسط

¹ Orthophosphate

رسوبات کاهنده بی‌هوازی مهمترین فرآیند قابل توجه است. حذف فسفر از طریق جذب زیست‌توده در سامانه تالاب‌های مصنوعی بستگی زیادی به برداشت و حذف زیست‌توده دارد (یارقلی و همکاران، ۱۴۰۱b).

۳-۵- جذب توسط گیاه

نیتروژن در حالت معدنی توسط ماکروفیت‌ها جذب می‌شود و گیاهان تالابی آن را در زیست توده گیاهی می‌گنجانند. نیتروژن انباشته شده طی یک دوره بازگشت به سامانه تصفیه تالاب آزاد می‌شود. جذب گیاه، معیاری برای حذف خالص نیست، این مسئله به این دلیل است که زیست توده گیاهی مرده به ریزه‌ها و مواد بستری تجزیه می‌شود و مقداری از این نیتروژن شسته و در رسوب آزاد می‌شود (یارقلی و همکاران، ۱۴۰۱a).

۴-۵- فلزات

فلزاتی مانند روی و مس در شکل‌های محلول یا به صورت ذرات مرتبط وجود دارند و توزیع آنها در این فرم‌ها با فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی مانند جذب، ته‌نشینی، ایجاد کمپلکس، رسوب، فرسایش و انتشار تعیین می‌شود. فلزات از طریق جذب و کمپلکس شدن با مواد آلی در ماتریکس بستر تجمع می‌یابند. علاوه بر این، غلظت فلزات با جذب مستقیم توسط گیاهان تالابی کاهش می‌یابد. اما تجمع بیش از حد، ممکن است گیاهان را از بین ببرد (یارقلی و همکاران، ۱۴۰۱a).

۵-۵- پاتوژن‌ها

پاتوژن‌ها عمدتاً با ته‌نشین شدن، فیلتراسیون و جذب توسط زیست‌توده یا با مرگ طبیعی و شکار حذف می‌شوند. شکار شدن و مرگ طبیعی پاتوژن‌ها مانند *اشریشیا کلی*^۱ و *کریپتوسپوریديوم*^۲ با افزایش تنوع و دانسیته شکارچیان طبیعی (مانند پروتوزوئرها^۳ که نوعی میکروارگانسیم تک‌یاخته هستند) و افزایش تابش پرتوهای فرا بنفش خورشید افزایش می‌یابد.

۵-۶- سایر مکانیسم‌های حذف آلاینده‌ها

تبخیر و تعرق یکی از مکانیسم‌های حذف آلاینده‌هاست. تعرق روزانه رابطه‌ای مثبت با جذب مواد معدنی دارد و این پارامتر می‌تواند به عنوان شاخصی از قابلیت تصفیهٔ پساب توسط گیاهان استفاده شود. بارش و تبخیر و تعرق بر جریان آب از طریق سامانهٔ تالاب تأثیر می‌گذارد. تبخیر و تعرق جریان آب را کند می‌کند و زمان تماس را افزایش می‌دهد، در حالی‌که بارندگی اثر معکوس دارد و باعث رقیق شدن و افزایش جریان می‌شود (Yargholi et al., 2023).

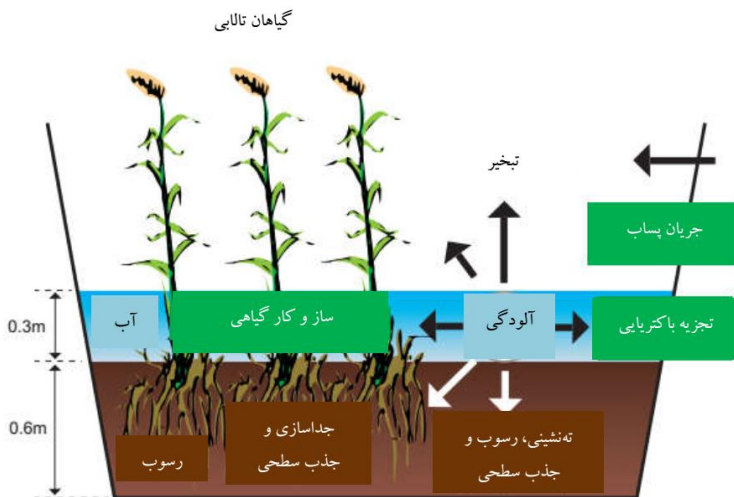
بارش و تبخیر احتمالاً کمترین تأثیر را بر تالاب‌های مصنوعی در بیشتر مناطق خواهند داشت. اگر تالاب کم عمق و عمدتاً دارای آب‌های باز باشد، یعنی بخش بیشتر سطح تالاب آب آزاد باشد و پوشش گیاهی کمتری داشته باشد، نسبت بارش/تبخیر به تعادل نزدیک است. با این حال، در توده‌های بزرگ و متراکم

¹ *Escherichia coli*

² *Cryptosporidium*

³ Protozoa

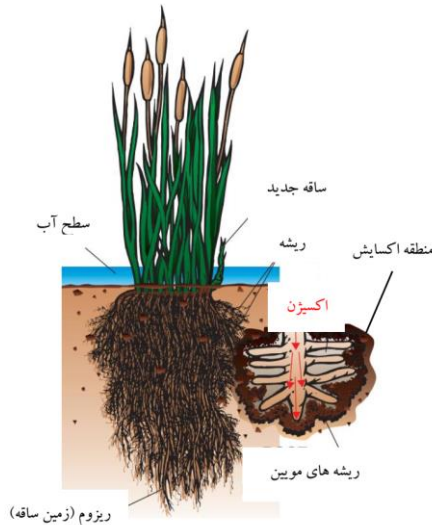
گیاهان بلند، تلفات تعرق از گیاهان فعال فتوسنتزکننده قابل توجه است (شکل ۷).



شکل ۷- فرآیندهای حذف آلاینده‌ها در سامانه تالاب مصنوعی

۶- نقش گیاهان تالاب در تصفیه پساب

مهم‌ترین عملکرد گیاهان تالابی در ارتباط با تصفیه پساب، اثرهای فیزیکی ناشی از حضور گیاهان است. گیاهان سطح وسیعی را برای رشد و کارایی میکروب‌ها فراهم می‌کنند. اجزای فیزیکی گیاهان سطح بسترها را تثبیت می‌کنند و جریان آب را کاهش می‌دهند و در نتیجه به روند ته‌نشینی و به دام انداختن رسوبات کمک می‌کنند و در نهایت شفافیت آب را افزایش می‌دهند (شکل ۸).



شکل ۸- ریشه گسترده گیاهان مردابی

گیاهان تالابی نقش حیاتی در حذف و حفظ مواد مغذی دارند و به جلوگیری از غنی‌سازی تالاب (اوتروفیکاسیون^۱) تالاب‌ها کمک می‌کنند. غنی شدن محیط‌های آبی از ترکیبات محلول که به رشد بیش از اندازه برخی جانداران زنده منجر می‌شود، مَغذی شدن، هوپَرورش یا اوتروفیکاسیون می‌گویند. طیف وسیعی از گیاهان تالابی توانایی خود را در کمک به بهبود کیفیت پساب‌ها نشان داده‌اند. دو گونه نی قلم^۲ و نی لوئی^۳ نمونه‌های خوبی از گونه‌های مردابی هستند که می‌توانند به طور مؤثر مواد مغذی را جذب کنند. این گیاهان هم در قسمت بالایی (برگ‌ها) و هم در بخش‌های زیرین (ساقه و ریشه‌های زیرزمینی) در سطوح

¹ Eutrophication

² *Phragmites karka*

³ *Typha latifolia*

زیرین بستر دارای زیست توده زیادی هستند. بافت‌های گیاهی زیرسطحی به صورت افقی و عمودی رشد می‌کنند و ماتریس گسترده‌ای به وجود می‌آورند که ذرات خاک را به هم متصل و سطح وسیعی را برای جذب مواد غذایی و یون‌ها ایجاد می‌کند. آوندهای توخالی در بافت‌های گیاه، اکسیژن را از برگ‌ها به ناحیه ریشه و به خاک اطراف منتقل می‌کنند (Tan et al., 2023). این فرآیند تجزیه فعال هوازی میکروبی و جذب آلاینده‌ها از محیط آبی را ممکن می‌سازد. نقش گیاهان مردابی در سامانه تالاب‌های مصنوعی را می‌توان به ۶ دسته تقسیم کرد:

۶-۱- فیزیکی

ماکروفیت‌ها سطح بستر گیاهان را تثبیت و شرایط خوبی را برای فیلتراسیون فیزیکی فراهم می‌کنند، آن‌ها همچنین سطح وسیعی را برای رشد میکروبی به وجود می‌آورند. رشد ماکروفیت‌ها سرعت جریان را کاهش می‌دهد و امکان رسوب‌گذاری و افزایش زمان تماس بین پساب و سطح گیاه را فراهم می‌کند، در نتیجه حذف نیتروژن را افزایش می‌دهد.

۶-۲- هدایت هیدرولیکی خاک

به علت وجود ریشه گیاهان تالابی در بستر، هدایت هیدرولیکی خاک بهبود پیدا می‌کند. رشد و پیشروی توده ریشه باعث ایجاد حفره‌های درشت در بستر خاکی تالاب مصنوعی می‌شود که امکان نفوذ بیشتر آب را فراهم می‌کند و در نتیجه برهم‌کنش‌های پساب/گیاه را افزایش می‌دهد.

۳-۶- رها سازی ترکیبات آلی

گیاهان طیف گسترده‌ای از ترکیبات آلی را از طریق ریشه خود آزاد می‌کنند که تا ۲۵ درصد از کل کربن تثبیت شده توسط فرآیندهای فتوسنتزی است. این آزاد شدن کربن می‌تواند به عنوان منبع غذا برای نیترات زدایی میکروب‌ها عمل کند (Varma *et al.*, 2021). تجزیه زیست توده گیاهی نیز یک منبع کربن با دوام و در دسترس برای جمعیت میکروبی فراهم می‌کند.

۴-۶- رشد میکروبی

ماکروفیت‌ها زیست توده زیادی در سطوح بالایی و زیرین دارند، از این رو سطح وسیعی را برای رشد زیست لایه^۱ میکروبی فراهم کنند. این بیوفلم‌ها مسئول اکثر فرآیندهای میکروبی در هر سامانه تالاب مصنوعی از جمله کاهش نیتروژن هستند (Varma *et al.*, 2021). گیاهان لایه بستر/هوموس را ایجاد و حفظ می‌کنند که ممکن است به یک بیوفلم نازک تشبیه شود. همان‌طور که گیاهان رشد می‌کنند و می‌میرند، برگ‌ها و ساقه‌ها که به سطح زیرلایه می‌افتند، لایه‌های متعددی از زباله‌های آلی (جزء بستر/هوموس) ایجاد می‌کنند. این تجمع زیست توده نیمه تجزیه شده، لایه‌های بستر بسیار متخلخلی را ایجاد می‌کند که سطح قابل توجهی برای رشد و فعالیت موجودات میکروبی فراهم می‌کند. کارایی تالاب‌های مصنوعی و طبیعی در بهبود کیفیت آب به رسانی بالایی این لایه بستر/هوموس و بزرگی سطوح رشد و فعالیت میکروبی وابسته است.

¹ Biofilm

۵-۶- ایجاد خاک‌های هوازی

ماکروفیت‌ها واسطه انتقال اکسیژن از طریق بافت توخالی گیاه و نشت از ریشه به ریزوسفر هستند که در آن تجزیه هوازی مواد آلی و نیتریفیکاسیون دنبال می‌شود. گیاهان تالابی لایه‌های زیرپوستی و چوبی شده زیادی در زیر پوست و قشر بیرونی دارند تا میزان نشت اکسیژن را به حداقل برسانند. حذف بالای نیتروژن توسط فراگمیت (گونه‌ای متداول از نی تالابی) به احتمال زیاد به ویژگی‌های رشد ریشه آن مربوط می‌شود. فراگمیت ۵۰ درصد از زیست توده گیاهی را به ریشه و ریزوم اختصاص می‌دهد. افزایش زیست توده ریشه امکان انتقال بیشتر اکسیژن را به داخل بستر فراهم می‌کند و محیط هوازی بیشتری به وجود می‌آورد که به نفع واکنش‌های نیتریفیکاسیون است. نیتریفیکاسیون به حداقل ۲ میلی گرم اکسیژن در لیتر نیاز دارد تا با حداکثر سرعت ادامه یابد. میزان نیتریفیکاسیون به احتمال زیاد عامل محدودکننده سرعت برای حذف کلی نیتروژن از سامانه تالاب مصنوعی است (Rampuria et al., 2020).

۶-۶- ارزش‌های زیبایی‌شناختی

ماکروفیت‌ها با ایجاد زیستگاه برای حیات وحش و ایجاد سامانه‌های تصفیه پساب از نظر زیبایی‌شناسی ارزش‌های خاصی به محیط پیرامونی می‌بخشند.

۷- انتخاب گیاهان تالاب

از گیاهان شناور و غوطه‌ور در تالاب‌های مصنوعی به عنوان سامانه تصفیه گیاهان آبزی استفاده می‌شود. طیف وسیعی از گیاهان آبزی توانایی خود را در کمک به تجزیه پساب‌ها و زهاب‌ها نشان داده‌اند (شکل‌های ۹-۱۱). سنبل آبی (*Eichhornia crassipes*) و خزه (*Lemna*)، گیاهان آبزی شناور متداولی هستند که توانایی خود را در کاهش غلظت BOD، TSS و فسفر کل و نیتروژن کل نشان داده‌اند. با این حال، حضور طولانی مدت این دو گیاه تالابی می‌تواند منجر به بدتر شدن کیفیت آب شود، مگر اینکه این گیاهان به صورت دستی به طور منظم حذف و جایگزین شوند. این گیاهان شناور یک روکش عظیم تولید می‌کنند که مانع از نفوذ نور به لایه پایینی ستون آب می‌شود که بر بقای موجودات زنده آب تأثیر منفی می‌گذارد. تالاب‌ها با حضور تنها یک یا چند گیاه از این نوع، سریعاً به مستعمره آنها تبدیل می‌شوند. برای جلوگیری از حمله این گونه‌های مزاحم، سامانه نیاز به نظارت دقیق دارد. از بین رفتن پوشش گیاهی اثربخشی تصفیه را مختل می‌کند. هزینه نگهداری گیاهان تالابی بالاست. زیست توده گیاهی باید مرتباً برداشت شود تا از حذف قابل توجه مواد مغذی اطمینان حاصل شود (شکل ۱۲). رشد گیاه نیز برای حفظ کارایی سامانه تصفیه باید با سرعت مطلوبی حفظ شود. گونه‌های نی مانند نی معمولی، نی لوئی و نی قلم نمونه‌های خوبی از گونه‌های نوظهور مورد استفاده در سامانه تالاب‌های مصنوعی تصفیه پساب هستند. انتخاب گیاه برای تالاب‌های مصنوعی در انواع SF و SSF کاملاً مشابه است. گیاهان تالابی در هر دو سامانه بهترین رشد را دارند. این گیاهان نوظهور نقش حیاتی در حذف و حفظ مواد مغذی در تالاب مصنوعی دارند. اگرچه ماکروفیت‌های نوظهور به دلیل سرعت رشد پایین‌تر (در مقایسه با گیاهان شناور و غوطه‌ور) در کاهش مقدار نیتروژن و فسفر از طریق جذب

مستقیم کارایی کمتری دارند، توانایی آنها در جذب نیتروژن و فسفر از منابع رسوبی از طریق ریزوم‌ها بیشتر از آب است.



شکل ۹- یک نمونه از گیاهان رایج تالابی، سنبل آبی
(The Water Hyacinth, *Eichhornia crassipes*)



شکل ۱۰- یک نمونه از گیاهان رایج تالابی، نی لوئی
(The Cattail, *Typha angustifolia*)



شکل ۱۱- یک نمونه از گیاهان رایج تالابی، فراگمیت
(The Common Reed, *Phragmites karka*)



شکل ۱۲- حذف دستی علفهای هرز مضر و نامطلوب از بستر تالاب مصنوعی

۸- نمونه‌هایی از گیاهان تالاب

انواع پوشش گیاهی تالابی (مردابی) وجود دارد که برای کاشت در تالاب‌های مصنوعی مناسب است (جدول ۱). این گونه‌های مردابی را می‌توان در دو دسته گونه‌های تالاب‌های عمیق و گونه‌های تالاب‌های کم عمق تقسیم‌بندی کرد.

جدول ۱- انواع گونه‌های متداول گیاهان تالابی

نام علمی	نام متداول	مناطق کاشت
<i>Phragmites karka</i>	Common Reed	تالاب‌های عمیق (۳-۱۰ متر)
<i>Eleocharis dulcis</i>	Spike Rush	
<i>Scirpus grossus</i>	Greater Club Rush	
<i>Scirpus mucronatus</i>	Bog Bulrush	
<i>Lepironia articulata</i>	Tube Sedge	
<i>Phylidrium lanuginosum</i>	Fan Grass	
<i>Typha angustifolia</i>	Cattail	تالاب‌های کم‌عمق (۳/۰-۰۰ متر)
<i>Rhynchospora corymbosa</i>	Golden Beak Sedge	
<i>Eleocharis variegata</i>	Spike Rush	
<i>Scleria sumatrana</i>	Sumatran Scleria	
<i>Fimbristylis globulosa</i>	Globular Fimbristylis	
<i>Polygonum barbatum</i>	Knot Grass	
<i>Erioucaulon longifolium</i>	Asiatic Pipewort	

✓ *Phragmites karka* - فراگمیت یک گیاه بلند و چند ساله آبی از خانواده Gramineae است. معمولاً علف نی معمولی شناخته می شود. فراگمیت ها معمولاً گروهی هستند. تا حدود ۴ متر امکان رشد طولی دارند و استولون های خزنده آنها می توانند تا ۲۰ متر طول داشته باشند. ساقه ها تا ۱/۵ سانتی متر عرضی رشد می کنند، توخالی هستند و تعداد زیادی گره دارند. برگ ها ۲۰ تا ۶۰ سانتی متر طول و ۸ تا ۳۰ میلی متر عرض دارند و متناوب هستند. گل آذین روی خوشه های آویزان ۲۰ تا ۷۰ سانتی متر طول دارد و متراکم با شاخه های ریز زیاد هستند. گل آذین زمانی که جوان است قهوه ای است اما پس از بلوغ نقره ای می شود. فراگمیت گیاه بسیار مهاجمی است. فراگمیت ها می توانند در طول سال با تولید شاخه های جدید از ریزوم های پخش شده به صورت جانبی پخش شوند. این گیاهان همچنین از طریق بذر و قلمه ساقه تکثیر می شوند. با این حال سرعت جوانه زنی بذر کم است. این گیاه در نواحی مرطوب و پر آب، هم آب شیرین و هم شور، در کنار رودخانه ها، خندق ها، سواحل دریاچه ها و حوضچه ها به وفور رشد می کند. در مناطق متروکه معدنی نیز احتمال رشد این گونه وجود دارد. فراگمیت ها به طور گسترده در سامانه تالاب های مصنوعی تصفیه پساب ها در کشورهای با اقلیم معتدل استفاده می شوند (Sharma & Malaviya, 2021).

✓ *Lepironia articulata* - لپیرونیا گیاهی نی مانند و چند ساله از خانواده Cyperaceae است. این گیاه می تواند تا ۲/۳ متر رشد طولی داشته باشد (شکل ۱۳). ساقه های آن لوله ای شکل، توخالی، و سبز مایل به آبی است و قطر آنها ۲ تا ۳ سانتی متر است و از ریزوم های خزنده و

زیرزمینی به صورت توده به وجود می‌آیند. گل آذین یا سنبلچه متراکم تخم‌مرغی به رنگ قهوه‌ای مایل به قرمز، بیضی شکل به طول ۲-۱ سانتی‌متر معمولاً در انتهای ساقه‌ای دیده می‌شود که یک شاخه لوله‌ای مخروطی شکل است و طول آن می‌تواند از ۷ سانتی‌متر تا حدود ۲ متر باشد. لپرونیا از طریق بذر یا ریزوم تکثیر می‌شود. بذر لپرونیا به خوبی جوانه می‌زند اگرچه سرعت جوانه‌زنی در ابتدا کند است. در مناطق مرطوب، از مناطق ساحلی گرفته تا آب‌های عمیق، در باتلاق‌ها، حوضچه‌های معادن، دریاچه‌ها و خندق‌ها و معمولاً در شرایط pH پایین (تا ۳) رشد می‌کند (Sharma & Malaviya, 2021).

✓ **Cattail, *Typha angustifolia*** - لوئی گیاهی است چند ساله، پرزدار، با ساقه و ریشه قوی به ارتفاع ۳-۱/۵ متر. ساقه‌های گرد کوتاهی دارد که در زیر زمین می‌خزند و از آن گیاهان پرزدار جدید رشد می‌کنند. برگ‌ها خطی با نوک تیز و تا ۳/۵ متر طول دارند که از قاعده ساقه‌ها برخاسته‌اند. ساقه گل‌دار معمولاً بلندتر است و سنبله‌های گل سیگار مانند به سمت انتها دارد. گل آذین ماده در زیر گل آذین نر قرار دارد و استوانه‌ای فشرده و ضخیم ۴-۲/۵ سانتی‌متر است. گل آذین‌ها به رنگ قهوه‌ای مایل به قرمز هستند و در زمان بلوغ با کرک‌های سفید پوشیده می‌شوند. اغلب در مناطق باز، حوضچه‌های معدن، دریاچه‌ها و در آب‌های شیرین و شور یافت می‌شود (Sharma & Malaviya, 2021).

✓ **Spike Rush, *Eleocharis dulcis*** - سنبله‌راش گیاهی چند ساله، پرزدار با ساقه‌های باریک و بدون برگ است. این گیاه دارای ساقه‌های

توخالی با پارتیشن‌های عرضی داخلی است. گل‌آذین یک سنبلچه منفرد در انتهای ساقه است به صورت عمودی با گلوم‌هایی که به صورت مارپیچی قرار گرفته‌اند (شکل ۱۴). رنگ آن قهوه‌ای و طول آن ۶-۱/۵ سانتی‌متر است. معمولاً در مکان‌های مرطوب باز، در باتلاق‌های آب شور و شیرین، مزارع برنج، برکه‌ها و دریاچه‌ها یافت می‌شود (Sharma & Malaviya, 2021).



شکل ۱۳- گیاه تالابی لیرونیا



شکل ۱۴- گیاه تالابی سنبله‌راش

۹- اصول طراحی تالاب‌های مصنوعی

استفاده از تالاب‌های مصنوعی می‌تواند جایگزینی مقرون به‌صرفه برای تصفیه پساب باشد. ساخت تالاب در جایی که قبلاً وجود نداشته است، از پیچیدگی‌های نظارتی مرتبط با تالاب‌های طبیعی جلوگیری می‌کند و امکان طراحی تالاب را برای تصفیه بهینه پساب و فاضلاب فراهم می‌کند. به طور معمول، تالاب مصنوعی باید بهتر از تالاب طبیعی با مساحت مساوی عمل کند، زیرا بستر آن طراحی شده است و رژیم هیدرولیکی در این سامانه کنترل می‌شود. تالاب‌های مصنوعی افزون بر تصفیه انواع پساب‌ها، برای کاربردهای گوناگون نیز استفاده می‌شوند از جمله: حفظ ذخایر ژنی گیاهی و جانوری، تأمین آب (کیفی و کمی)، آبی‌ری پروری، تولید محصولات کشاورزی (از طریق تأمین آب و عناصر غذایی)، تولید چوب، تأمین انرژی، تولید مواد لجنی و گیاهی، حمل و نقل و کاربردهای تفریحی و گردشگری (توریستی).

تالاب با سطح آزاد آب (FWS^1) به طور گسترده‌ای به عنوان روشی ارزان برای تصفیه زهاب معادن استفاده می‌شوند (Parde et al., 2021).

۱-۹- انواع تالاب‌های مصنوعی

پیش‌تر گفته شد تالاب‌های مصنوعی شامل دو نوع کلی هستند، یکی سامانه‌های جریان سطحی (FWS) و دیگری سامانه‌های جریان زیرسطحی (SFS^2). سامانه زیرسطحی که اخیراً توسعه یافته‌اند شامل جریان زیرسطحی از طریق یک محیط نفوذپذیر است. "روش منطقه-ریشه"^۳ و "روش سنگ-نی-فیلتر"^۴ نام‌های دیگری برای این سامانه‌ها هستند که در منابع مختلف استفاده شده‌اند. از آنجا که از پوشش گیاهی آبی در این سامانه‌ها استفاده می‌شود، کارایی آنها برای تصفیه به واکنش-های میکروبیولوژیکی اولیه بستگی دارد. نوع بستر (خاک یا سنگ) نیز بر هیدرولیک سامانه تأثیر می‌گذارد.

۱-۹-۱- سامانه جریان سطحی (FWS) با سطح آزاد آب و گیاهان تالابی (ریشه در خاک)

سامانه FWS معمولاً شامل حوضچه‌ها یا کانال‌هایی هستند دارای یک لایه زیرسطحی طبیعی یا ساخته شده از خاک رس یا مواد ژئوتکنیک نفوذ ناپذیر (و

¹ Free water surface

² Subsurface flow systems

³ Root-zone method

⁴ Rock-reed-filter

همچنین لایهٔ خاک غنی شده برای پرورش و رشد گیاهان تالابی). در این سامانه، آب در عمق نسبتاً کم روی سطح خاک جاری می‌شود. این عمق کم آب همراه با سرعت جریان کم و حضور ساقه‌های گیاه و بستر، جریان آب را به صورت پیوسته تنظیم می‌کند.

۲-۱-۹- سامانه‌های جریان زیرسطحی (SFS) تصفیهٔ پساب با

گیاهان تالابی

سامانهٔ SFS تالاب ساخته شده متشکل از یک ترانشه یا بستری است که در زیر آن لایه‌ای نفوذناپذیر از رس یا پوشش مصنوعی قرار دارد. مواد انتخاب‌شده برای بستر باید به گونه‌ای انتخاب شوند که از رشد پوشش گیاهی حمایت کند. این سامانه با شیب کمی (۱ تا ۳ درصد) بین ورودی و خروجی ساخته می‌شود. پساب اولیه به ابتدای سامانه وارد می‌شود، جایی که به یک کانال عرضی پر از سنگ‌های درشت دانه می‌ریزد. کانال ورودی می‌تواند سوراخ‌دار یا لوله‌ای باشد. پساب به صورت افقی از طریق ریزوسفر گیاهان تالاب جریان می‌یابد. پساب طی عبور از ریزوسفر، از طریق فرآیندهای فیلتراسیون، جذب و رسوب در خاک یا تخریب میکروبیولوژیکی تصفیه می‌شود. فرآیندهای فیزیکی-شیمیایی و بیوشیمیایی حاصل با فرآیندهای مکانیکی و بیولوژیکی در سامانه‌های تصفیه مکانیکی مرسوم از جمله نیترازدایی مطابقت دارد. پساب در کانال خروجی که اغلب با سنگریزه درشت پر شده است جمع‌آوری می‌شود و ممکن است مستقیماً به آب‌های پذیرنده تخلیه شود. در طبقه‌بندی سامانه‌های تالاب‌های مصنوعی، سامانه‌های SFS که به طور کامل در ایالات متحده مطالعه شده‌اند، سامانه‌هایی با بسترهای شنی یا

سنگی هستند. نمونه‌هایی از این سامانه‌ها در کالیفرنیا و مریلند با موفقیت به‌کار گرفته شده‌اند.

۹-۲- انتخاب سایت

۹-۲-۱- توپوگرافی

تالاب مصنوعی را از نظر فنی و اجرایی می‌توان تقریباً در هر مکانی ساخت. ساخت این سامانه‌ها متأثر از ویژگی‌های توپوگرافی و اکولوژیک مناطق نیست و این موارد فقط بر هزینه احداث تأثیرگذار هستند. گونه‌های مختلف گیاهی تالابی (ریشه در خاک) می‌توانند یخ زدگی زمستان را بسیار بهتر از سامانه‌های گیاهان آبزی تحمل کنند. در اونتاریو کانادا، تالاب‌های مصنوعی آزمایشی در خاک‌های رسی سنگین در خصوص تصفیهٔ پساب‌های معادن با موفقیت بهره‌برداری شده‌اند (Parde et al., 2021). از آنجایی که درجه‌بندی و حفاری عامل اصلی هزینه است، توپوگرافی عاملی مهم در انتخاب مکان مناسب از نظر هزینه اجرا است.

۹-۲-۲- نفوذپذیری خاک برای سامانه‌های سطح آزاد آب

در انتخاب مکان برای تالاب مصنوعی با سطح آزاد آب، نفوذپذیری خاک باید در نظر گرفته شود. مطلوب‌ترین نفوذپذیری خاک 10^{-6} تا 10^{-7} متر در ثانیه است (Nivala et al., 2020). بافت‌های شنی رسی و لومی رسی سیلتی می‌توانند در صورت فشرده‌سازی برای استفاده در بستر مناسب باشند. خاک‌های شنی برای حمایت از پوشش گیاهی تالاب بسیار نفوذپذیر هستند مگر اینکه لایه‌ای

محدودکننده در طبقات زیرین خاک وجود داشته باشد که منجر به بالا آمدن سطح آب زیرزمینی شود. خاک‌های با نفوذپذیری بالا را می‌توان با تشکیل ترانشه‌های باریک و پوشاندن دیواره‌ها و کف ترانشه با رس یا لاینر مصنوعی برای جریان‌های پساب کوچک استفاده کرد. در خاک‌های رسی سنگین، افزودن پیت ماس یا خاک رویی باعث بهبود نفوذپذیری خاک و تسریع رشد اولیه گیاه می‌شود (Parde et al., 2021).

۳-۲-۹- عوامل هیدرولوژیکی

عملکرد هر سامانه تالاب مصنوعی به هیدرولوژی و نیز به عوامل دیگر بستگی دارد. بارش، نفوذ، تبخیر و تعرق (ET)، سرعت بارگیری هیدرولیکی و عمق آب همگی می‌توانند بر حذف مواد آلی، مواد مغذی و عناصر کمیاب، نه تنها با تغییر زمان نگهداری بلکه با تغلیظ یا رقیق کردن پساب، تأثیر بگذارند. برای طراحی صحیح سامانه تصفیه تالاب مصنوعی باید چرخه هیدرولوژیکی تهیه شود. تغییرات در زمان نگهداری یا حجم آب می‌تواند به طور قابل توجهی بر عملکرد تصفیه تأثیر بگذارد.

برای تالاب ساخته شده، تعادل آب را می‌توان به صورت معادله (۱) بیان کرد (Stephenson & Sheridan, 2021):

$$Q_i - Q_0 + P - ET = \left[\frac{dV}{dt} \right] \quad (1)$$

که در آن:

Q_i = دبی جریان خروجی (مترمکعب بر ساعت)،

Q_0 = دبی جریان ورودی (مترمکعب بر ساعت)،

P = بارش (مترمکعب/ساعت)،

ET = تبخیر و تعرق (مترمکعب بر ساعت)،

V = حجم پساب (مترمکعب)، و

t = زمان (ساعت) است.

از سوابق داده‌های اقلیمی می‌توان برای تخمین بارش و تبخیر و تعرق استفاده کرد. برای تخمین تبخیر و تعرق می‌توان از روش‌های تجربی مانند معادله پنمن مانتیث یا تورنت وایت^۱ استفاده کرد. اگر تالاب‌ها دارای درصد قابل توجهی سطوح آزاد آب باشند، اندازه گیری تبخیر با استفاده از تشت تبخیر نیز می‌تواند مفید باشد.

در صورت نیاز، برآورد تلفات آب ناشی از نفوذ را می‌توان با آزمایش‌های نفوذ به-دست آورد و پس از آن اگر سامانه در عمق نسبتاً ثابت آب $\left[\frac{dV}{dt}\right] = 0$ کار کند، با استفاده از معادله (۱) می‌توان سرعت جریان خروجی را تخمین زد.

۴-۲-۹- جنس بستر

بسترها ممکن است مواد تشکیل دهنده پساب را با تبادل یونی/جذب غیر اختصاصی، جذب خاص/رسوب و کمپلکس حذف کنند. بستر بر حسب

¹ Thornthwaite

نفوذپذیری هیدرولیکی و ظرفیت جذب مواد مغذی و آلاینده‌ها انتخاب می‌شود. بستر باید محیط مناسبی برای رشد موفق گیاه فراهم کند و اجازه نفوذ و حرکت یکنواخت پساب را بدهد. هدایت هیدرولیکی ضعیف منجر به جریان سطحی و هدایت پساب می‌شود و کارایی سامانه را به شدت کاهش می‌دهد.

حرکت یکنواخت پساب نیاز دارد به هدایت هیدرولیکی تقریباً 10^{-3} تا 10^{-4} متر در ثانیه (Stephenson & Sheridan, 2023). ترکیب شیمیایی زیر لایه نیز بر راندمان سامانه تأثیر می‌گذارد. خاک‌هایی با مقدار کم مواد مغذی سبب تشویق گیاهان به جذب مستقیم مواد مغذی از پساب می‌شوند. زیرلایه‌هایی که مقدار آلومینیم یا آهن بالا دارند در کاهش غلظت فسفات در پساب مؤثرتر خواهند بود. بهتر است شن‌ها برای کاهش گرفتگی (افزایش فضا‌های خالی) و تصفیه فیزیکی بهتر در ابتدا شسته شوند. گونه‌های نی روی شن به میزان نیتریفیکاسیون بهتری می‌رسند، در حالی که نیترات‌زدایی در سامانه نی مبتنی بر خاک بیشتر است (یارقلی و همکاران، ۱۴۰۱). مخلوطی از خاک‌های رسی ارگانیک، ماسه، شن و قلوه‌سنگ‌ها می‌توانند برای حمایت از رشد گیاهان استفاده شوند. این بسترها سطوح واکنش‌پذیر ایده‌آلی برای کمپلکس یونی و اتصال میکروبی هستند و رسانایی هیدرولیکی خوبی نیز در سامانه فراهم می‌کنند.

۵-۲-۹- ماهیت، ورود و توزیع پساب

بازده طولانی‌مدت سامانه بستر گیاهان تالابی معلق در صورتی بهبود می‌یابد که پساب قبل از تخلیه‌شدن به بستر، مراحل پیش تصفیه را گذرانده باشد. ذرات معلق در حین نگهداری در مخزن ته‌نشینی یا حوضچه، در مدت ۲۴ ساعت

ته نشین می‌شوند. BOD_5 پساب اولیه ممکن است تا ۴۰ درصد کاهش یابد. حذف نیتروژن و فسفر برای پساب ثانویه می‌تواند بیشتر باشد. جریان پساب از طریق بستر گیاهان تالابی کند است و زمان ماندگاری طولانی دارد، بنابراین جریان باید طوری تنظیم شود که زمان ماند به اندازه کافی طولانی باشد تا حذف آلاینده مؤثر باشد.

اگر زمان نگهداری آب بیش از ۵ روز باشد، راندمان احیای بیشتری برای تعادل جرمی N و P توسط گیاهان تالابی حاصل می‌شود. زمان‌های نگهداری کوتاه‌تر فرصت کافی برای تخریب آلاینده‌ها فراهم نمی‌کند. زمان ماند طولانی‌تر می‌تواند منجر به شرایط راکد و بی‌هوازی شود. بنابراین، تعیین زمان ماند بهینه بسیار مهم است. تبخیر و تعرق می‌تواند به طور قابل توجهی زمان ماند را افزایش دهد.

۶-۲-۹- ملاحظات حقابه

ساخت سامانه تالاب مصنوعی ممکن است بر حقابه‌های سایر مصرف‌کنندگان آب اثرگذار باشد. این اثرها می‌تواند شامل اثر بر سامانه‌های زهکشی (کیفیت و کمیت)، تغییر محل تخلیه آب سطحی و کاهش مقدار تخلیه آب سطحی باشد. اگر دبی سطحی موجود تحت تأثیر قرار گیرد، جایگزینی حقابه‌های پایین‌دست ممکن است ضروری باشد.

۳-۹- انتظارات عملکرد

سامانه‌های تالاب مصنوعی می‌توانند به طور قابل توجهی نیاز اکسیژن بیولوژیکی (BOD_5)، مواد جامد معلق (SS^2) و نیتروژن، و نیز فلزات، مواد آلی و پاتوژن‌ها را کاهش دهند. مکانیسم‌های تصفیه اولیه در جدول (۲) فهرست شده‌اند و شامل ته‌نشینی، رسوب شیمیایی، جذب، و برهمکنش‌های میکروبی با BOD_5 ، SS ، و نیتروژن و همچنین مقداری جذب توسط پوشش گیاهی است. در ادامه، مکانیسم‌های ارائه شده در جدول ۲ تشریح شده‌اند:

۱- مکانیسم‌های فیزیکی:

- ✓ ته‌نشینی^۳: ته‌نشینی گرانشی جامدات (و آلاینده‌های تشکیل‌دهنده) در محیط‌های برکه/مرداب.
- ✓ فیلتراسیون^۴: ذرات با عبور آب از بستر و توده‌های ریشه به صورت مکانیکی فیلتر می‌شوند.
- ✓ جذب سطحی^۵: نیروهای جاذبه بین ذرات (نیروی واندروالس).

۲- مکانیسم‌های شیمیایی:

- ✓ رسوب^۶: تشکیل یا رسوب همزمان با ترکیبات انحلال‌ناپذیر.
- ✓ جذب شیمیایی^۷: جذب روی بستر و سطوح گیاهی

1 Biological Oxygen Demand

2 Suspended Solids

3 Sedimentation

4 Filtration

5 Adsorption

6 Precipitation

7 Absorption

✓ تجزیه^۱: تجزیه یا تغییر ترکیبات کمتر پایدار بر اثر پدیده هایی مانند تابش UV، اکسیداسیون و کاهش.

۳- مکانیسم های بیولوژیکی:

- ✓ متابولیسم باکتریایی^۲: حذف جامدات کلوئیدی و مواد آلی محلول توسط باکتری های معلق، اعماق دریا و گیاهی. نیتрат زدایی/نیتريت زدایی باکتری.
- ✓ متابولیسم گیاهی^۳: جذب و متابولیسم مواد آلی توسط گیاهان.
- ✓ جذب گیاهی^۴: در شرایط مناسب، مقادیر قابل توجهی از این آلاینده ها توسط گیاهان جذب می شود.
- ✓ تحلیل رفتن طبیعی^۵: پوسیدگی طبیعی موجودات در محیط نامساعد.

¹ Decomposition

² Bacterial Metabolism

³ Plant Metabolism

⁴ Plant Adsorption

⁵ Natural Die-Off

جدول ۲- مکانیسم‌های حذف در تالاب‌ها برای آلاینده‌های موجود در پساب (Sharma & Malaviya, 2021)

مکانیسم	آلاینده ^a	جامدات قابل ته‌نشینی	جامدات کلوئیدی	BOD ₅	نیتروژن	فسفر	فلزات سنگین	مواد آلی مقاوم	باکتری و ویروس
فیزیکی	ته‌نشینی	P	S	I	I	I	I	I	I
	فیلتراسیون	S	S						
	جذب سطحی		S						
شیمیایی	رسوب				P	P			
	جذب شیمیایی				P	P	S		
	تجزیه						P		P
بیولوژیکی	متابولیسم باکتریایی ^b		P	P	P			P	
	متابولیسم گیاهی ^b							S	S
	جذب گیاهی				S	S	S	S	
	تحلیل‌رفتن طبیعی								P

^a P = اثر اولیه، S = اثر ثانویه، I = اثر افزایشی (اثری که اتفاقی و در راستای حذف یک آلاینده دیگر رخ می دهد).

^b اصطلاح متابولیسم شامل بیوسنتزها و واکنش های کاتابولیک می‌شود.

تالاب‌های مصنوعی جامدات معلق^۱ و سطوح کلیفرم را کاهش می‌دهند و مقادیر pH را به مقادیر تقریباً خنثی می‌رسانند. توانایی تالاب‌های مصنوعی برای تصفیه پساب و خروج جریان ثابت با سرمایه‌گذاری کم، حداقل نیروی کار مورد نیاز و انرژی کم، یک مزیت کلیدی است که قابل توجه است (Yargholi *et al.*, 2023).

فرآیندهای تصفیه‌ای که در تالاب مصنوعی اتفاق می‌افتد مشابه آنهایی است که در دیگر سامانه‌های تصفیه رخ می‌دهد. حذف مواد آلی قابل ته‌نشینی در درجه اول در نتیجه رسوب‌گذاری اتفاق می‌افتد. مواد آلی کلوئیدی و محلول نیز عمدتاً با اکسیداسیون میکروبی هوازی حذف می‌شوند.

۱-۳-۹- حذف BOD₅ در تالاب‌های با سامانه FWS

در تالاب‌های FWS، حذف BOD₅ محلول به دلیل رشد میکروبی است که به ریشه‌ها، ساقه‌ها و بستر برگ‌های گیاهی افتاده در آب چسبیده است. از آنجا که جلبک‌ها معمولاً در صورت کامل بودن پوشش گیاهی وجود ندارند، منابع اصلی اکسیژن برای این واکنش‌ها هوادهی مجدد در سطح آب و انتقال اکسیژن گیاه از برگ‌ها به ریزوسفر است (Sharma & Malaviya, 2021).

معیارهای خاص ارائه شده در زیر برای بارهای آلی کم تا متوسط مناسب هستند. بارگذاری آلی باید در بخش قابل توجهی از منطقه توزیع شود و در یک نقطه اعمال نشود. عمق آب طراحی شده باید ۶۰۰ میلی متر (۲۴ اینچ) یا کمتر باشد تا از توزیع کافی اکسیژن اطمینان حاصل شود، و گردش مجدد پساب جزئی ممکن

¹ Suspended Solids

است در ماه‌های تابستان برای غلبه بر تلفات ET و حفظ میزان جریان طراحی و سطوح اکسیژن در نظر گرفته شود.

حذف BOD_5 در تالاب توسط مدل مرتبه اول به شرح زیر توصیف شده است:

$$\frac{C_e}{C_0} = e^{-K_T t} \quad (2)$$

که در آن:

$BOD_5 = C_e$ نهایی (میلی گرم در لیتر)،

$BOD_5 = C_0$ اولیه (میلی گرم در لیتر)،

K_T = ثابت سرعت واکنش مرتبه اول وابسته به دما (روز⁻¹)، و

t = زمان ماند هیدرولیکی (روز) است.

زمان ماند هیدرولیکی با معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$t = \frac{LWD}{Q} \quad (3)$$

که در آن:

L = طول،

W = عرض،

d = عمق، و

Q = زمان ماند هیدرولیکی (روز) است.

این معادله نشان‌دهندهٔ زمان ماند هیدرولیکی برای سامانهٔ جریان نامحدود است.

در تالاب FWS، بخشی از حجم موجود توسط پوشش گیاهی اشغال خواهد شد، بنابراین، زمان نگهداری واقعی تابعی از تخلخل (n) خواهد بود که می‌تواند به عنوان سطح مقطع باقیمانده برای جریان تعریف شود.

$$n = \frac{V_V}{V} \quad (4)$$

که در آن V_V و V به ترتیب حجم حفره‌ها و حجم کل هستند.

خروجی (n) در واقع "عمق معادل" جریان در سامانه است. نسبت زمان ماند از آزمایش رنگ به زمان ماند نظری محاسبه شده از ابعاد فیزیکی سامانه، باید برابر با نسبت $\frac{n \times d}{d}$ باشد.

ترکیب روابط موجود در معادله‌های ۳ و ۴ با مدل کلی (معادلهٔ ۲) به معادلهٔ ۵ منجر می‌شود:

$$\frac{C_e}{C_0} = A \times e^{\left[\frac{-0.7 K_T (A_V)^{1.75} L W d n}{Q} \right]} \quad (5)$$

که در آن:

A = کسری از BOD_5 به عنوان مواد جامد قابل ته‌نشینی که در نزدیکی قسمت-های اصلی سامانه حذف نشده است (به عنوان کسری اعشاری)،

A_V = سطح ویژه برای فعالیت میکروبی ($\frac{m^2}{m^3}$).

L = طول سامانه (موازی مسیر جریان، m)،

W = عرض سامانه (m)،

d = عمق طراحی سامانه (m)،

n = تخلخل سامانه (به عنوان کسر اعشاری)، و

Q = میانگین بار هیدرولیکی روی سامانه، $(\frac{m^3}{d})$ است.

ثابت سرعت واکنش مرتبه اول وابسته به دما از ثابت سرعت برای 20° درجه سانتی‌گراد و ضریب تصحیح $1/1$ محاسبه می‌شود. بنابراین، ثابت سرعت K_T (در d^{-1}) در دمای آب T ($^\circ C$) را می‌توان با معادله ۶ تعریف کرد.

$$K_T = K_{20}(1.1)^{(T-20)} \quad (6)$$

که در آن، K_{20} ثابت سرعت واکنش مرتبه اول در $20^\circ C$ است.

۲-۳-۹- حذف BOD_5 در تالاب‌های سامانه SFS

منبع اصلی اکسیژن برای اجزای زیرسطحی (خاک، شن، سنگ، و سایر محیط‌ها، در بسترها) اکسیژنی است که پوشش گیاهی به ناحیه ریشه منتقل می‌کند. در بیشتر موارد، سامانه جریان زیرسطحی برای حفظ جریان در زیر سطح بستر طراحی شده است، بنابراین هوادهی مستقیم جوی بسیار کمی وجود دارد و انتخاب گونه‌های گیاهی عاملی مهم به‌شمار می‌آید.

نتایج بررسی‌ها در تالاب‌های آزمایشی در منطقه سنتی^۱، کالیفرنیا، نشان داد که بیشتر توده ریشه در حال رشد افقی فراگمیت‌ها به ۳۰۰ میلی متر (۱۲ اینچ) بالایی پروفیل بستر محدود می شود. ناحیه ریشه نی‌ها به بیش از ۶۰۰ میلی متر (۲۴ اینچ) و بوته‌ها تا ۷۶۰ میلی متر (۳۰ اینچ) گسترش یافته است (Stephenson & Sheridan, 2021).

حذف BOD₅ در سامانه‌های جریان زیرسطحی را می‌توان با سینتیک جریان پلاگ مرتبه اول توصیف کرد، همان‌طور که در معادله ۲ برای سامانه‌های سطح آزاد آب توضیح داده شده است. معادله ۲ را می‌توان بازآرایی کرد و برای تخمین سطح مورد نیاز برای سامانه جریان زیرسطحی استفاده کرد. هر دو شکل معادله برای راحتی در زیر نشان داده شده است.

$$\frac{C_e}{C_0} = e^{-K_T t} \quad (2)$$

$$A_s = \frac{Q (\ln C_0 - \ln C_e)}{K_T d n} \quad (3)$$

که در آن:

$BOD_5 = C_e$ نهایی (میلی گرم در لیتر)،

$BOD_5 = C_0$ اولیه (میلی گرم در لیتر)،

K_T = ثابت سرعت واکنش مرتبه اول وابسته به دما (روز^{-۱})،

t = زمان ماند هیدرولیکی (روز)،

¹ Santee

d = عمق استغراق (متر)،

n = تخلخل بستر، و

A_s = مساحت بستر (متر مربع) است.

سطح مقطع جریان برای سامانه جریان زیرسطحی طبق معادله زیر محاسبه می شود:

$$A_c = \frac{Q}{k_s S} \quad (8)$$

که در آن:

A_c = سطح مقطع بستر تالاب، عمود بر جهت جریان (m^2)،

d = عمق بستر (m)،

R = عرض بستر (m)،

S = هدایت هیدرولیکی محیط ($\frac{m^3}{m^2}$)، و

S = شیب بستر، یا گرادیان هیدرولیک (به صورت کسری یا اعشاری) است.

عرض بستر از معادله زیر محاسبه می شود:

$$W = \frac{A_c}{d} \quad (9)$$

سطح مقطع و عرض بستر با قانون دارسی تعیین می شود:

$$Q = k_s A_s S \quad (10)$$

سطح مقطع بستر و عرض بستر مستقل از دما (اقلیم) و بارگذاری آلی هستند، زیرا با ویژگی‌های هیدرولیکی محیط کنترل می‌شوند.

مقدار K_T را می‌توان با استفاده از معادله (۶) و K_{20} شناخته شده برای سامانه تالاب‌های جریان زیرسطحی محاسبه کرد. تخلخل‌های مورد انتظار (n)، هدایت هیدرولیکی و K_{20} در جدول ۳ فهرست شده‌اند.

جدول ۳- ویژگی‌های بستر برای سامانه‌های جریان زیرسطحی

نوع بستر	حداکثر اندازه ۱۰٪ ذرات (mm)	تخلخل (n)	هدایت هیدرولیکی $\left(\frac{m^3}{m^2 d}\right)$	K_{20}
ماسه متوسط	۱	۰/۴۲	۴۲۰	۱/۸۴
ماسه درشت	۲	۰/۳۹	۴۸۰	۱/۳۵
شن (گراول)	۸	۰/۳۵	۵۰۰	۰/۸۶

۳-۳-۹- حذف جامدات معلق

حذف جامدات معلق در هر دو نوع تالاب مصنوعی بسیار مؤثر است، به دلیل شرایط سکون و عمق کم مایع در سامانه، بیشتر حذف در چند متر اول پس از ورودی رخ می‌دهد. کنترل سرعت جریان ورودی با طراحی لوله دیفیوزر مناسب می‌تواند با اطمینان از سرعت کم برای حذف جامدات و حتی بارگذاری تالاب کمک کند تا از شرایط بدون اکسیژن در انتهای بالادست کانال‌ها جلوگیری شود.

اگر آب در تالاب‌ها توسط پوشش گیاهی در برابر نور خورشید محافظت نشود، جلبک‌ها می‌توانند مشکل‌ساز شوند (Yargholi *et al.*, 2023). جلبک‌ها روی SS پساب اثر می‌گذارند و باعث نوسان‌های روزانه زیادی در سطح اکسیژن در ستون آب می‌شوند.

۴-۳-۹- حذف نیتروژن

نیتریفیکاسیون/دنیتریفیکاسیون مسیر اصلی حذف نیتروژن است. نشان داده شده است که تالاب‌های مصنوعی را می‌توان به گونه‌ای مدیریت کرد که با استفاده از منابع کربن حاصل از زیست توده تولید شده در خود تالاب، فرآیند نیترات‌زدایی را تأمین کند (Steiner *et al.*, 2020). تحقیقات مختلف در مورد حذف نیتروژن (TKN) نشان می‌دهد زمان نگهداری ۵ تا ۷ روز عموماً پسابی با TKN کمتر از ۱۰ میلی گرم در لیتر تولید می‌کند (یارقلی و همکاران، ۱۴۰۱a).

۵-۳-۹- حذف فسفر

حذف فسفر در بسیاری از سامانه‌های تالاب به دلیل فرصت‌های محدود تماس بین پساب و خاک، چندان مؤثر نیست. در این میان، طرح‌های بستر مستغرق زمانی که خاک‌های مناسب به عنوان بستر برای سامانه انتخاب شوند، مستثنی هستند. مقدار خاک رس قابل توجه و وجود آهن و آلومینیم، پتانسیل حذف فسفر را افزایش می‌دهد (Tan *et al.*, 2021). با این حال، استفاده از چنین خاک-هایی ظرفیت هیدرولیکی را کاهش می‌دهد و به منطقه بسیار بیشتری برای تصفیه نیاز دارد.

۶-۳-۹- حذف فلزات

مکانیسم‌های حذف فلزات مشابه با مکانیسم‌هایی است که در بالا برای حذف فسفر توضیح داده شد و از این رو فرصت بیشتری برای تماس و جذب فلزات مورد نیاز است. در سامانه‌های SFS معمولاً، فرصت تماس بیشتری در دسترس است و از این رو حذف فلزات در این سامانه‌ها می‌تواند بسیار مؤثر باشد (Tan et al., 2023). مکانیسم‌های حذف عمده در تالاب‌های مصنوعی به پدیده‌های رسوب-جذب مربوط هستند. رسوب توسط متابولیسم تالاب افزایش می‌یابد که pH آب‌های اسیدی ورودی را به خنثی نزدیک می‌کند. در نتایج تحقیقات مختلف، حذف حدود ۱۰۰ درصد جیوه، سرب، کروم، آرسنیک و کادمیم برای زمان ماند کمتر از دو روز در تالاب ناصری در جنوب ایران گزارش شده است (Yargholi et al., 2023؛ یارقلی و همکاران، ۱۴۰۱).

۴-۹- متغیرهای فرآیند

سامانه‌های تالاب مصنوعی را می‌توان راکتورهای بیولوژیکی رشد متصل در نظر گرفت و عملکرد آنها را با سینتیک جریان پلاگ مرتبه اول توصیف کرد. راهنمای طراحی برای بارگذاری BOD_5 در این بخش برای هر دو نوع FWS و SFS ارائه شده است.

۱-۴-۹- هدف‌های طراحی

محدودیت‌هایی برای فناوری استفاده از تالاب‌های مصنوعی برای تصفیهٔ پساب با BOD_5 بالا وجود دارد. تالاب‌های مصنوعی فراوانی برای تصفیهٔ پساب ثانویه

ساخته شده‌اند. کاربردهای تالاب‌های مصنوعی نیز عبارت‌اند از: الف) تصفیه زهاب معادن، ب) تصفیه پساب کشاورزی و ج) تقویت تالاب‌های موجود.

تالاب FWS به طور گسترده‌ای به عنوان یک روش ارزان برای تصفیه زهاب کشاورزی و معادن استفاده می‌شود. بیش از ۲۰ سامانه از این نوع در ابتدای قرن بیستم در ایالت‌های مختلف آمریکا از جمله پنسیلوانیا، ویرجینیای غربی، اوهایو و مریلند ساخته شده‌اند. اکسیژن برای اکسیداسیون آلاینده‌های پساب‌های کشاورزی و معادن از ناحیه ریشه پوشش گیاهی تالابی و از جلبک‌های شناور تأمین می‌شود. جلبک‌های شناور دی‌اکسیدکربن را از ستون آب حذف می‌کنند و در نتیجه pH را افزایش می‌دهند. اثر خالص افزایش pH و برهمکنش فلزات حاصل از پساب‌ها، رسوب فیزیکی-شیمیایی فلزات در خاک و گل و لای تالاب است.

تقویت تالاب‌های طبیعی موجود دستاورد قابل توجهی از توسعه سامانه‌های تالاب‌های مصنوعی است. افزودن منبع آب قابل پیش‌بینی به سامانه تالاب طبیعی باعث می‌شود تا جمعیت پایدارتری از پرندگان تالاب و حیات وحش بیابانی در مجاورت تالاب ایجاد شود. از سامانه تالاب‌های مصنوعی همچنین می‌توان برای افزایش آب خلیج‌ها استفاده کرد. یکی دیگر از کاربردهای رایج تالاب‌های مصنوعی این است که از پساب برای ایجاد مرداب استفاده مجدد می‌کنند و از بی‌مهرگان استخرهای اکسیداسیون به عنوان غذای ماهی در پروژه‌های آبی‌پروری (ماهی قزل‌آلا) استفاده می‌شوند. علاوه بر این، تبدیل تالاب‌های مصنوعی به دریاچه‌های تفریحی و تأمین مواد مغذی برای غنی‌سازی زمین‌های اطراف نیز از دیگر کاربردهای این تالاب‌هاست.

۲-۴-۹- میزان بارگذاری BOD_5

دو هدف برای کنترل بار آلی در هر سامانه تالاب مصنوعی وجود دارد. اولین هدف تهیه منبع کربن برای نیترات زدایی باکتری‌ها و دومین آن کنترل بارگذاری آلی برای جلوگیری از بارگذاری بیش از حد در انتقال اکسیژن گیاهان تالابی در سامانه تالاب است. اگر منبع کربن برای نیتروژن زدایی در دسترس نباشد، حذف کلی نیتروژن کاهش می‌یابد. با این حال، بارگذاری آلی سنگین، به خصوص اگر به طور مساوی توزیع نشود، باعث از بین رفتن گیاه و ایجاد بوی نامطبوع می‌شود.

بارگذاری آلی در تالاب FWS را می‌توان با توزیع گام به گام تغذیه و بازچرخانی خروجی تالاب کنترل کرد. میزان بارگذاری جرمی حدود $112 \frac{kg BOD_5}{ha \times d}$ ، بارگذاری نسبتاً مناسبی است.

توجیه ریاضی برای این ظرفیت بارگیری معمولی تالاب مصنوعی WS با تخمین ظرفیت انتقال اکسیژن پوشش گیاهی تالاب ایجاد می‌شود. تخمین بارگذاری با این روش فرآیندی دو مرحله ای است: (۱) محاسبه اکسیژن مورد نیاز و (۲) محاسبه اکسیژن موجود برای مساحت فرضی. می‌توان از دو معادله زیر به این منظور استفاده کرد:

$$1.5 BOD_5 = \text{اکسیژن مورد نیاز} \quad (11)$$

$$\text{اکسیژن موجود} = \frac{(T_r O_2)(A_s)}{1000} \quad (12)$$

که در آن:

$$O_2 = \text{اکسیژن مورد نیاز،}$$

BOD_5 = بارگذاری آلی (کیلوگرم در روز)،

$T_r O_2$ = سرعت انتقال اکسیژن برای پوشش گیاهی (۲۰ گرم در متر مربع در روز)، و

A_s = مساحت (m^2) است.

به عنوان یک عامل ایمنی، اکسیژن موجود باید حداقل دو برابر بیشتر از اکسیژن مورد نیاز باشد. گیاهان تالابی (ریشه در خاک) که معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرند می‌توانند ۵ تا ۴۵ گرم اکسیژن در روز در هر متر مربع از سطح تالاب را منتقل کنند. در میزان انتقال اکسیژن معمولی، ۲۰ گرم در متر مربع در روز، میزان بارگذاری آلی برای هر تالاب باید $\frac{kg BOD_5}{ha \times d}$ ۱۳۳ باشد.

۳-۴-۹- میزان بارگذاری هیدرولیکی

میزان بارگذاری هیدرولیکی برای سامانه‌های FWS متأثر از عوامل هیدرولوژیکی هر تالاب است و این عوامل مختص سایت احداث تالاب هستند. میزان بارگذاری آلی نیز با میزان بارگیری هیدرولیکی ارتباط نزدیک دارد.

به طور کلی، شرایط آب و هوایی منطقه، شرایط خاک (به ویژه نفوذپذیری) و نوع پوشش گیاهی باید در تعیین میزان بارگذاری هیدرولیکی در نظر گرفته شود. تحقیقات نشان داده است که میزان بارگذاری هیدرولیکی ۲۰۰ مترمکعب در هکتار در روز (۲۱۰۰۰ گرم در روز در لیتر) حداکثر بازده تصفیه را فراهم می‌کند.

تلفات آب ناشی از تبخیر و تعرق می‌تواند بر امکان‌سنجی طرح‌های مختلف تالاب در اقلیم‌های خشک و عملکرد آنها در ماه‌های گرم تابستان در همه مکان‌ها تأثیر بگذارد. تلفات آب ناشی از تبخیر در ماه‌های تابستان باعث کاهش

حجم آب در سامانه می‌شود و بنابراین غلظت آلاینده‌های باقیمانده ممکن است افزایش یابد، حتی اگر سامانه تصفیه تالاب برای راندمان بالا طراحی شده باشد. در موارد خاص مثل تالابی که با دبی صفر طراحی و ساخته شده است، بارگذاری هیدرولیکی می‌تواند به یک نگرانی اصلی تبدیل شود، در این تالاب، آب از طریق مکانیسم‌های تبخیر، تفرق و تغذیه آب زیرزمینی دفع می‌شود.

۴-۹- عمق آب در سامانه‌های FWS

سطح آب در سامانه می‌تواند از عوامل مهم برای انتخاب و نگهداری پوشش گیاهی تالاب باشد. نی‌ها در خاک‌های زیر آب به خوبی رشد می‌کنند و ممکن است در جایی که عمق آب بیش از ۱۵۰ میلی‌متر است غالب شوند. این گیاهان در امتداد خطوط ساحلی نیز به چشم می‌خورند، اما در عمق بیشتر از ۱/۵ متر نیز رشد می‌کنند. آب را کد بهترین شرایط برای رشد است، اما به نظر می‌رسد عمق آب اثر مستقیمی بر پارامترهای رشدی نی‌ها ندارد. نی معمولی^۱ رقیب ضعیفی است و ممکن است در آب‌های کم‌عمق غنی از مواد مغذی جای خود را به گونه‌های دیگر بدهد. نی بوریا (جگن)^۲ می‌تواند دوره‌های طولانی غوطه‌ور شدن را تحمل کند، این گیاه در عمق آب ۲۵۰-۷/۵ میلی‌متر رشد می‌کند. در آب‌های عمیق‌تر، نی بوریا ممکن است جای خود را به نی لوئی بدهد.

۵-۴-۹- زمان ماند

عملکرد تصفیه در تالاب‌های مصنوعی تابعی از زمان ماند و دیگر عوامل است. شیب زمین، عمق آب، پوشش گیاهی، وسعت منطقه و شکل هندسی

¹ Common Reed

² Bulrushes

سرعت جریان و در نتیجه زمان ماند را از طریق سامانه تصفیه تالاب کنترل می‌کند.

بر مبنای تحقیقات، زمان ماند ۶ تا ۷ روز می‌تواند زمان ماند بهینه برای تصفیه پساب اولیه و ثانویه باشد. زمان‌های ماند کوتاه‌تر، فرصت کافی برای تخریب آلاینده‌ها فراهم نمی‌کند. زمان ماند طولانی‌تر نیز می‌تواند منجر به شرایط راکدشدن و بی‌هوای شود (Gholami et al., 2023).

دو عامل آب و هوایی می‌توانند به طور قابل توجهی بر زمان ماند در یک بارگذاری هیدرولیکی ثابت تأثیر بگذارند. در تابستان، تبخیر و تعرق می‌تواند به طور قابل توجهی زمان ماند را افزایش دهد، در حالی که تشکیل یخ در فصل زمستان می‌تواند به طور قابل توجهی زمان ماند را کاهش دهد. عمق توصیه شده آب در تالاب‌های مصنوعی احداث‌شده در اقلیم معتدل، برای تابستان، تقریباً ۱۰۰ میلی‌متر است و اگر انتظار تشکیل یخ وجود دارد، باید در زمستان به حدود ۳۰۰ میلی‌متر افزایش یابد تا تأثیر آب و هوا بر زمان ماند به حداقل برسد. تخمین زمان ماند در سامانه‌های تالاب به دلایل مختلف می‌تواند دشوار باشد. فضاهاى مرده بزرگ ممکن است در تالاب‌ها به دلیل تفاوت در توپوگرافی، رشد گیاه، رسوب جامدات، و اتصالات موجود در تالاب وجود داشته باشد. تنها کسری از سطح، در تالاب‌ها، ممکن است برای جریان پساب در دسترس باشد.

۹-۵- پیش تصفیه

برای کاهش سرمایه‌گذاری و هزینه‌های عملیاتی، حداقل پیش تصفیه پساب، قبل از تخلیه به تالاب می‌تواند مفید باشد. با این حال، سطح پیش تصفیه نیز بر کیفیت

پساب نهایی تالاب تأثیر می‌گذارد و بنابراین اهداف کیفیت پساب باید در نظر گرفته شود. پیش‌تصفیه تالاب با احداث تصفیه‌خانه اولیه مرسوم، معمولاً اتلاف سرمایه و غیرعملی است، مگر اینکه چنین تأسیساتی در حال حاضر وجود داشته باشد. پیش‌تصفیه با تالاب معمولی نیز اشغال بی‌مورد زمین است و می‌تواند در زمستان سولفید هیدروژن و در هوای گرم‌تر مشکلات جلبکی ایجاد کند. در فرآیند پیش‌تصفیه، مقداری کاهش SS و BOD_5 برای کاهش تقاضای اکسیژن و جلوگیری از تجمع لجن در قسمت بالایی تالاب می‌تواند مفید باشد. کاهش سفر با افزودن ترکیبات شیمیایی در مرحله پیش‌تصفیه، زمانی که به سفر نیاز است توصیه می‌شود.

۶-۹- پوشش گیاهی

در انتخاب گیاه تالابی مناسب، باید به این نکته توجه شود که گیاهانی در اولویت‌اند که رشدشان سریع است و نسبتاً ثابت هستند. در سامانه گرمسیری، گیاهان تالابی سرعت رشد بیشتری دارند. با تکثیر با استفاده از ریشه‌های رونده و قلمه‌های که از بدنه جدا می‌شوند، این گیاهان تالابی به راحتی در تالاب‌ها تکثیر می‌شوند. این امر به افزایش ظرفیت جذب آلاینده‌ها توسط گیاهان کمک می‌کند. گیاهان همچنین باید شرایط غرقابی-کمبود اکسیژن و هایپر اوتروفیک (اشباع مواد مغذی) را تحمل کنند. گونه‌های گیاهی باید گونه‌های محلی و پراکنده در کشور باشد. از گیاهان ناآشنا نباید در سامانه‌های تالاب مصنوعی استفاده شود زیرا ممکن است گونه‌هایی بسیار تهاجمی باشند و کنترل آنها دشوار شود. گیاه منتخب باید چند ساله با چرخه زندگی بیش از یک سال یا دو فصل رشد باشد تا از پایداری سامانه تالاب مصنوعی اطمینان حاصل شود. گیاهان تالاب با جذابیت

زیبایی‌شناسی نیز قادرند محیطی دلپذیر فراهم کنند. مهم‌ترین مزیت گیاهان تالابی، انتقال اکسیژن به ناحیه ریشه است. حضور فیزیکی آن‌ها در سامانه (ساقه‌ها، ریشه‌ها و ریزوم‌ها) نیز مزایای بسیاری دارد از جمله اینکه ریشه این گیاهان در خاک یا بستر نفوذ کرده و اکسیژن را عمیق‌تر از آنچه به‌طور طبیعی از طریق فرآیند انتشار قابل انتقال است، منتقل می‌کنند. شاید مهم‌ترین بخش در تالاب‌های FWS بخش‌های غوطه‌ور شده برگ‌ها، ساقه‌ها و بستر باشد که به عنوان بستری برای رشد میکروبی عمل می‌کند. این بخش از مهم‌ترین و کارآترین مکانیسم‌های حذف آلاینده‌هاست. گیاهان تالابی (ریشه در خاک) که اغلب در تالاب‌های مصنوعی تصفیه پساب استفاده می‌شوند عبارت‌اند از: اکالیفا یا دم‌گربه^۱، نی^۲، نی بوریا^۳، نی لوئی^۴ و زنبق زرد^۵. برخی از الزام‌های زیست محیطی اصلی هر یک از این گیاهان در جدول (۴) ارائه شده است.

¹ Cattail

² Reed

³ Rush

⁴ Bulrush

⁵ Sedge

جدول ۴- گیاهان تالابی (ریشه در خاک) رایج برای تصفیهٔ پساب

نام رایج	نام علمی	توزیع	بازه دمای مطلوب برای رشد (درجه سانتی‌گراد)	ماکزیمم شوری قابل تحمل (ppt ^۱)	بازه pH مطلوب
دم گربه	<i>Typha</i> spp.	سراسر جهان	۳۰-۱۰	۳۰	۱۰-۴
نی	<i>Phragmites communis</i>	سراسر جهان	۲۳-۱۲	۴۵	۸-۲
نی بوریا	<i>Juncus</i> spp.	سراسر جهان	۲۶-۱۶	۲۰	۷-۵/۵
نی لوئی	<i>Scirpus</i> spp.	سراسر جهان	۲۷-۱۸	۴۵	۹-۴
زنبق زرد	<i>Carex</i> spp.	سراسر جهان	۳۲-۱۴	۲۰	۷-۵/۵

۱-۶-۹- دم گربه

دم گربه یا Cattails (*Typha* spp.) در سراسر جهان پراکنش جغرافیایی دارد، مقاوم است، می‌تواند در شرایط محیطی مختلف رشد کند، و تکثیر آن آسان و در نتیجه نشان دهندهٔ گونهٔ گیاهی ایده‌آل برای تالاب‌های مصنوعی است. دم گربه همچنین قادر به تولید زیست‌توده بزرگ سالانه است و پتانسیل کمی برای حذف

¹ Parts per thousand

نیترژن و فسفر در هنگام برداشت دارد. ریزوم‌های دم‌گربه که در فواصل تقریباً ۱ متری کاشته می‌شوند می‌توانند در عرض سه ماه توده‌ای متراکم ایجاد کنند.

۲-۶-۹- نی لوئی

نی‌های لوئی اعضای از جنس *Juncus* و گیاهانی چند ساله و علف مانند هستند که به صورت توده رشد می‌کنند. نی‌ها (*Scirpus spp.*) در سراسر جهان پراکنده هستند و در طیف متنوعی از آب‌های ساحلی، باتلاق‌های شور و تالاب‌ها رشد می‌کنند. نی‌ها می‌توانند در آبی با عمق ۵ سانتی متر تا ۳ متر به خوبی رشد کنند.

۳-۶-۹- نی

نی‌ها (راش) (*Phragmites communis*) علف‌های بلند یک‌ساله با ریزوم چند ساله گسترده و رایج‌ترین گیاه مورد استفاده در تالاب‌های مصنوعی هستند. سامانه‌هایی که از نی استفاده می‌کنند ممکن است در انتقال اکسیژن مؤثرتر باشند زیرا ریزوم‌ها به صورت عمودی و عمیق‌تر از دیگر گیاهان تالابی (ریشه در خاک) نفوذ می‌کنند.

۷-۹- عوامل طراحی فیزیکی

۱-۷-۹- تنظیمات سامانه

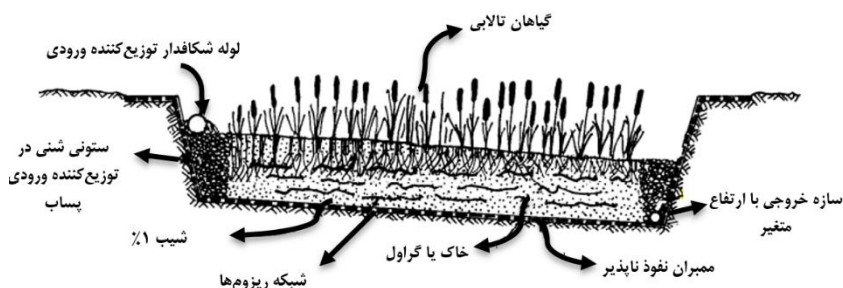
در مطالعات، اهمیت نسبت بالای طول به عرض تالاب برای حصول اطمینان از هیدرولیک جریان پلاگ نشان داده شده است. در مدل هیدرولیکی، جریان پلاگ به عنوان شکل اصلی انتقال در نظر گرفته شده است (معادله ۵). بنابراین توزیع جریان داخلی باید با استفاده از نسبت‌های بالای طول به عرض یا با استفاده از خاکریزی یا موانع داخلی حاصل شود.

۲-۷-۹- سامانه توزیع

سامانه توزیع برای یک سری کانال که هر یک با نسبت بالای طول به عرض ساخته شده است می‌توانند به سادگی با استفاده از یک لوله مانیفولد و شیرهای مرتبط در سر هر کانال ساخته شوند. برای هر سامانه، جریان ورودی باید دارای کنترل‌هایی باشد تا امکان توزیع به کانال‌ها و بخش‌های مختلف تالاب و همچنین خروجی سرریز برای پراکندگی جریان‌های اضافی و انحراف‌های اضطراری را فراهم کند. توزیع جریان ورودی در نقاط مختلف تالاب نیاز کلیدی برای بهره‌برداری کنترل‌شده و کارآمد تالاب است. برای سامانه‌های دارای بازیافت، یک ایستگاه پمپ با خط لوله برگشت به سامانه توزیع باید ساخته شود. از طرف دیگر، کانال‌های جریان پلاگ را می‌توان به سمت ورودی جمع کرد تا هزینه‌های بازیافت را به حداقل برساند. پایش جریان یکی از اجزای مهم سامانه توزیع جریان است.

۳-۷-۹- سازه‌های خروجی

پیکربندی ساختار خروجی برای تالاب مصنوعی به ویژگی پساب ورودی و تعداد زیر واحدها در تالاب مصنوعی بستگی دارد. سازه خروجی تالاب مصنوعی شامل یک ترانشه و لوله خروجی با سطح قابل تنظیم برای کنترل سطح آب در تالاب است. کنترل‌های ساختار خروجی باید بتوانند عمق آب را در تالاب‌ها تنظیم کنند، به‌ویژه در یخبندان‌های زمستانی که شرایط تالاب عمیق‌تر برای حفظ سطوح تصفیه مورد نیاز است. برای جلوگیری از آسیب یخ و بسته شدن نقاط کنترل در هوای یخبندان، سازه‌های خروجی باید ساخته شوند.



شکل ۱۵- نمونه‌ای از مقطع سامانه تالاب مصنوعی از نوع SFS

۴-۷-۹- کنترل آفات و حشرات در تالاب‌های سطح آزاد آب

تالاب‌های مصنوعی FWS محیطی ایده‌آل برای پرورش بسیاری از گونه‌های آفات و حشرات، به ویژه پشه‌ها فراهم می‌کنند. در این تالاب‌ها، تراکم جمعیت حشرات و آفات با حضور بارهای آلی بالا رابطه مستقیم و با پوشش سطح تالاب

با گیاهان تالابی رابطه معکوس دارد. پشه‌ها در تالاب‌های جریان زیرسطحی مشکلی ایجاد نمی‌کنند (این یکی از دلایل اصلی استفاده از طرح نوع زیرسطحی است).

۵-۷-۹- برداشت پوشش گیاهی

برداشت پوشش گیاهی تالاب، به ویژه برای سامانه‌های جریان زیرسطحی، به‌طور کلی ضروری نیست. برای سامانه‌های سطح آزاد آب، گاهی علف‌های خشک سالانه سوزانده می‌شوند تا به حفظ مشخصات هیدرولیکی تالاب کمک کنند.

برداشت زیست توده گیاهی معمولاً به عنوان روشی عملی برای حذف مواد مغذی در نظر گرفته نمی‌شود. برداشت زودتر، قبل از جابه‌جایی مواد مغذی توسط گیاهان تالابی، یا برداشت‌های متعدد در هر فصل برای اهداف حذف مواد مغذی مؤثرتر خواهد بود. برداشت ممکن است برای کاهش تجمع بیش از حد بستر، که می‌تواند طول عمر تالاب FWS را کوتاه کند، مطلوب خواهد بود.

۱۰- اجرا و راه‌اندازی تالاب‌های مصنوعی

ایجاد سامانه تالاب مصنوعی را می‌توان به دو مرحله تقسیم می‌شود: ساخت تالاب و استقرار پوشش گیاهی. ساخت و ساز تالاب شامل فعالیت‌های پیش از ساخت مانند پاکسازی زمین و آماده‌سازی محل و به دنبال آن ساخت شکل زمین تالاب و نصب سازه‌های کنترل آب است. در مرحله پاکسازی و خاک‌برداری سایت، محل پاکسازی شده و پوشش گیاهی موجود حذف می‌شود تا امکان

ساخت سلول‌های تالاب فراهم شود. تمام کنده‌های ریشه درخت و قلوه‌سنگ‌های زیر زمین باید حذف شوند. برخی از گونه‌های بومی با ارزش‌های حفاظتی باید برای حفاظت به خارج از سایت منتقل شوند یا به طور دست‌نخورده در سایت محافظت شوند. برای شکل‌گیری زمین، حذف لایه سطحی خاک و ذخیره این خاک برای استفاده مجدد، از تراکتورها می‌شود. خطوط کلی تالاب درجه‌بندی و به دنبال آن با متراکم کردن خاک و نصب آسترها، سلول‌های تالاب ساخته می‌شوند. در پایان، درجه‌بندی سایت شامل تراز کردن کف سلول تالاب برای بهینه‌سازی پخش و ایجاد جریان ورقه‌ای پساب در تالاب است. سلول‌های تالاب به منظور فراهم کردن رطوبت کافی برای کاشت، غرقاب می‌شوند. گونه‌های گیاهان تالابی مناسب به محل منتقل و به صورت دستی کاشته می‌شوند. پس از استقرار گیاهان، سطح آب به تدریج به سطح آب عادی افزایش می‌یابد و تالاب‌ها به طور کامل ایجاد می‌شوند (یارقلی و همکاران، ۱۴۰۱).



شکل ۱۶- پاکسازی پوشش گیاهی موجود برای ایجاد بستر تالاب مصنوعی



شکل ۱۷- یک سلول تالاب ساخته شده کامل



شکل ۱۸- نشاکاری گیاهان تالابی در سلول های تالاب

۱۱- اصول بهره‌برداری و نگهداری از تالاب‌های مصنوعی

نظارت بر مناطق تالاب و نگهداری از آن‌ها موضوعی کلیدی در حفظ عملکرد تالاب است. پایش تالاب برای به دست آوردن داده‌های کافی برای تعیین عملکرد تالاب در تحقق هدف‌ها ضروری است. نگهداری تالاب برای مدیریت ماکروفیت‌ها و گونه‌های مطلوب، حذف علف‌های هرز مهاجم، حذف رسوبات کف تالاب‌ها و همچنین حذف زباله از تالاب‌ها لازم است (Parde et al., 2021).

عملکرد مؤثر تالاب بستگی دارد به پیش‌تصفیه کافی، میزان بارگذاری هیدرولیکی، راهکارهای حفاظتی، جمع‌آوری اطلاعات از طریق پایش مستمر برای ارزیابی عملکرد سامانه و آگاهی از استراتژی‌های عملیات موفق. طراحی و ساخت سامانه تالاب مصنوعی می‌تواند نسبتاً آسان باشد، با این حال نیاز به نظارت و نگهداری دقیق دارد.

حفظ توده‌ای متراکم از پوشش گیاهی مطلوب در داخل تالاب، برای حصول اطمینان از کارایی تصفیه، بسیار مهم است. گونه‌های تهاجمی در رقابت با گونه‌های کمتر رقابتی پیروز می‌شوند و باعث تغییرات تدریجی در پوشش گیاهی تالاب می‌شوند. برخی گونه‌های گیاهی نامطلوب یا علف‌های هرز ممکن است از حوضه آبریز به تالاب وارد شوند. جانشینی گیاهان تالابی معمولاً به صورت طبیعی پیش می‌رود. با این حال، برخی از علف‌های هرز آبی می‌تواند به حذف دستی نیاز داشته باشند. تهاجم علف‌های هرز می‌تواند به طور چشمگیری توانایی تالاب‌ها را برای دستیابی به هدف‌های طراحی کاهش دهد. برای مثال، بارهنگ آبی^۱، علف اردک^۲، سرخس آبی^۳ و سنبل آبی^۴ می‌توانند لایه‌های متراکم روی سطح آب تشکیل دهند و مانع عبور نور شوند، در نتیجه اکسیژن محلول در آب را کاهش و حرکت مواد مغذی را از طریق سامانه تالاب افزایش می‌دهند. بنابراین، مدیریت سطح آب برای کنترل رشد علف‌های هرز بسیار مهم است.

سیل باعث می‌شود تا گیاهان از تالاب پاک یا مستغرق شوند. اگر سطح وسیعی از گیاهان از بین برود، نیاز به استقرار مجدد آن‌ها خواهد بود. مناطق کوچک

¹ *Azolla*

² *Lemna*

³ *Salvinia molesta*

⁴ *Eichhornia crassipes*

معمولاً به طور طبیعی احیا می‌شوند اما مناطق بزرگ‌تر از ۵ متر مربع ممکن است نیاز به کاشت مجدد داشته باشند. زنده ماندن گیاهان برای بهبود کیفیت آب در تالاب‌ها حیاتی است. نشانه‌های قابل مشاهده بیماری‌های گیاهی یا حمله آفات باید به سرعت بررسی شود. برخی از حشرات و آفات رایج عبارت‌اند از حشرات ساقه خوار لپیدوپتروس^۱، شته‌ها که خصوصاً در انواع رایج نی‌ها مشاهده می‌شوند و پیچنده برگ^۲. آلودگی شدید می‌تواند منجر به جلوگیری از رشد و سرانجام مرگ گیاهان شود. اگر جمعیت آفت از مقدار آستانه معینی فراتر رود، می‌توان از آفت‌کش‌های زیستی یا حشره‌کش‌های خاص استفاده کرد. آفات دیگر عبارت‌اند از حلزون پوماسه سیب طلایی^۳ که به طور فعال از گیاهان تالابی تغذیه می‌کند. سطح آب در تالاب‌ها بر هیدرولوژی تالاب، هیدرولیک جریان و شاخص‌های زیستی تالاب اثرگذار است. سطح آب باید با استفاده از سازه‌های کنترل سطح آب برای کسب اطمینان از رشد موفق گیاه کنترل شود. سامانه گردش مجدد باید وجود داشته باشد تا آب از نقاط خروجی به تالاب‌ها برگشت داده شود و جریان آب در دوره های خشک تکمیل شود. جامدات معلق موجود در پساب‌ها و جامداتی که از پوشش گیاهی در آب می‌ریزند باید به مرور زمان جمع شوند. برای جلوگیری از ایجاد بیماری‌ها باید بر جمعیت پشه‌ها نظارت شود، زیرا این بیماری‌ها می‌توانند منجر به مشکل بهداشتی محلی شوند.

داده‌های کیفیت آب نشانه خوبی از عملکرد تالاب است. کیفیت آب باید با ارزیابی پارامترهای کیفی آب ورودی و خروجی پایش شود. برخی از پارامترهای مهم کیفیت آب که باید پایش شوند عبارت‌اند از: اکسیژن محلول، پتانسیل

¹ Lepidopterous Stem Borers

² Leaf Roller

³ Golden Apple Snail, Pomacea sp.

ردوکس، دمای آب، مقدار pH و کدورت که پارامترهای درجا هستند. پارامترهایی که نیاز به تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی دارند نیز باید پایش شوند از جمله: جامدات معلق کل (TSS)، هدایت الکتریکی (EC)، نیتروژن آمونیایی (AN)، نیترات-نیتروژن، فسفر، پتاسیم، منیزیم، آهن محلول، جیوه، سرب، روی، آهن، سیانید، آرسنیک، فنل‌ها، نیاز شیمیایی اکسیژن (COD)، نیاز بیولوژیکی اکسیژن (BOD)، کلیفرم‌های مدفوع، روغن و گریس.



شکل ۱۹- سامانه مخزن آزمایشی با نی بومی منطقه در دانشگاه مالزی

۱۲- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

استفاده از تالاب‌های مصنوعی برای تصفیه فاضلاب در ایران نسبتاً جدید است. با این حال، نتایج چشمگیر به دست آمده انتظارات زیادی را در مورد فناوری و آنچه

می‌تواند به دست آورد ایجاد است. تالاب‌ها را می‌توان به شیوه‌ای پایدار با هدف بهبود کیفیت پساب‌ها، همراه با نظارت دقیق برای ارزیابی عملکرد آنها مورد استفاده قرار داد.

تالاب‌های مصنوعی را می‌توان یک سرمایه‌گذاری پیشگام در سامانه تصفیه پساب‌ها و زهاب‌ها در نظر گرفت. این سامانه‌ها نمونه‌ای موفق از سامانه فیلتراسیون بیولوژیکی برای مدیریت منابع آب با تکیه بر مباحث زیست‌محیطی هستند. این تالاب‌ها همچنین محیط زیبایی‌شناختی را برای اهداف تفریحی و اکوتوریسم ایجاد می‌کنند و از دیدگاه ایجاد زیستگاه برای گیاهان و جانوران بومی نیز مفید و مؤثر هستند. علاوه بر این، فرصت‌های آموزشی و پژوهشی ارزشمندی برای متخصصان، دانشجویان، مروجان، بهره‌برداران پیشرو و علاقه‌مندان به مباحث زیست‌محیطی نیز ایجاد می‌کنند.

۱۳- منابع

اخوان، ک.، شاه نظری، ع.، یارقلی، ب. ۱۳۹۶. ارزیابی قابلیت فیلترهای زیستی برای تصفیه زهاب کشاورزی مطالعه موردی: شبکه آبیاری و زهکشی مغان. تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی. ۶۹: ۱۴۴-۱۳۵.

غلامی، ف.، یارقلی، ب.، شرافتی، ا. ۱۴۰۰. بررسی کارایی نيزار طبیعی در حذف ترکیبات از ته زهاب مزارع نیشکر خوزستان. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۵ (۱۵): ۱۰۰۵-۹۹۳.

کیانپور، ع.، یارقلی، ب.، ظرافتی، ا.، اخوان گیگلو، ک. ۱۴۰۱. ارزیابی کارایی فیلترهای زیستی مختلف در تصفیه زهاب کشاورزی. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۲۱ (۵): doi: 10.30495/WSRCJ.2022.68807.11318

یارقلی، ب.، سپهری، س.، کنعانی، ا. ۱۴۰۱ a. ارزیابی کارایی نیزار طبیعی در تصفیه و بهبود کیفی زهاب برای مصارف مختلف (تحقیق موردی زهاب کشت و صنعت امیرکبیر و میرزا کوچک خان). گزارش نهایی پروژه تحقیقاتی. مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی. شماره گزارش: ۶۲۴۶۱. ۱۵۰ ص.

یارقلی، ب.، کنعانی، ا.، سپهری، س. ۱۴۰۱ b. بررسی کارایی نیزار طبیعی در حذف مواد آلی و ترکیبات فسفره زهاب مزارع نیشکر خوزستان. تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی. ۲۳ (۸۶): ۱۸-۱.

Cooper, P.F., Job, G.D., Green, M.B. & Shutes, R.B.E. 1996. Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment. WRc Swindon. 184 pp.

Gholami, F., Yargholi, B., Sharafati, A. 2023. Natural wetlands efficiency assessment in removing sugarcane fields' drainage contaminants: a case study in Khuzestan, Southwest Province of Iran. Environmental Science and Pollution Research. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25858-0>.

Nivala, J., Murphy, C., Freeman, A. 2020. Recent Advances in the Application, Design, and Operations & Maintenance of Aerated Treatment Wetlands. Water. 12, 1188; doi: 10.3390/w12041188.

Parde, D., Patwa, A., Shukla, A., Vijay, R., Killedar, D. J., Kumar, R. 2021. A review of constructed wetland on type, treatment and technology of wastewater. Environmental Technology & Innovation. 21. 101261.

- Rampuria, A., Gupta, A. B., & Brighu, U. 2020. Nitrogen transformation processes and mass balance in deep constructed wetlands treating sewage, exploring the anammox contribution. *Bioresource Technology*, 314, 123737.
- Sharma, R., & Malaviya, P. 2021. Constructed wetlands for wastewater remediation: A review on concept, pollutant removal mechanisms, and integrated technologies for efficiency enhancement. *Chemosphere*, 133358.
- Steiner, G. R., Watson, J. T., & Choate, K. D. 2020. General design, construction, and operation guidelines for small constructed wetlands wastewater treatment systems. In *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement* (pp. 499-507). CRC Press.
- Stephenson, R., & Sheridan, C. 2021. Review of experimental procedures and modelling techniques for flow behaviour and their relation to residence time in constructed wetlands. *Journal of Water Process Engineering*, 41, 102044.
- Tan, X., Yang, Y. L., Li, X., Gao, Y. X., & Fan, X. Y. 2021. Multi-metabolism regulation insights into nutrients removal performance with adding heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacteria in tidal flow constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 796, 149023.
- Tan, H. W., Pang, Y. L., Lim, S., & Chong, W. C. 2023. A state-of-the-art of phytoremediation approach for sustainable management of heavy metals recovery. *Environmental Technology & Innovation*, 103043.
- Varma, M., Gupta, A. K., Ghosal, P. S., & Majumder, A. 2021. A review on performance of constructed wetlands in tropical and cold climate: Insights of mechanism, role of influencing factors, and system modification in low temperature. *Science of the Total Environment*, 755, 142540.

Yargholi, B., Sepehri, S., & Kanani, E. 2023. Removal of heavy metals from agricultural runoff using constructed wetland; traces pollutants in reed bed sediments and plant biomass. *Wetlands Ecology and Management*, 1-20.