Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 5, No. 3, PP. 5-21, Autumn 2020
DOI: 10.22112/jwwse.2020.214377.1180

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال پنجم، شماره ۳، صفحات ۵-۲۱، پاییز ۱۳۹۹

Review Paper

Constructed Wetland, Challenge-Approach-Design

Saeid Okhravi[1]* and Saeid Eslamian[2]
1- Ph.D., Department of Water Engineering, College of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran.
2- Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
* Corresponding author, Email: s.okhravi94@basu.ac.ir

Received: 06/01/2020
Revised: 05/06/2020
Accepted: 16/06/2020

Abstract

Wastewater/runoff reuse is one of the strategies for sustainable water resource management which, based on the consumption type, requires supplementary treatment and standardization due to a wide range of environmental contaminations. Wastewater recycling not only reduces the pressure on fresh water resources but also is so frugal in comparison to the huge costs and the environmental and socioeconomic impacts of water transfer projects, especially between the basins. Nowadays, the application of bio-methods such as constructed wetlands has increased significantly due to the high cost of conventional wastewater treatment approaches. Constructed wetland systems have different design methods depending on the desired outlook (wastewater or runoff treatment). With regards to the flow patern, the system classifies into free water surface flow, and horizontal and vertical subsurface flow. Design configurations of the constructed wetlands depend on the kinematic description of biological reaction as well as the designer's knowledge of the flow pattern. In this paper, the related literature is reviewed and the required supplementary treatment of secondary effluent of the treatment plant is presented. Then the performance of different types of constructed wetlands in removal of pollutants is investigated. Finally the principles of constructed wetlands design with the aim of harvesting and treating runoff and wastewater have been thoroughly described. The design criteria are presented based on the observed obstacles for such evolution in the field of water recycling. The feasibility of constructed wetlands is then investigated, especially in arid and semi-arid regions. By presenting the justified plan for the system application, the required measures for site selection of such constructed wetland systems are expressed.

Keywords: Constructed Wetland, Flow Pattern, Performance, Plants, Pollutant Removal, Treatment.

مقاله مروری

تالاب مصنوعی، چالش- راه‌کار- طراحی

سید سعید اخروی[1]* و سید سعید اسلامیان[2]
۱- دکترای مهندسی سازه‌های آبی، گروه آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان، ایران.
۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.
* نویسنده مسئول، ایمیل: s.okhravi94@basu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۱۶
تاریخ اصلاح: ۱۳۹۹/۰۳/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۷

چکیده

یکی از راه‌کارهای مدیریت پایدار منابع آب، استفاده مجدد از رواناب/پساب شهری و روستایی است که با توجه به طیف وسیع آلاینده‌های محیط‌زیستی موجود در آن، نیازمند تصفیه اضافی و استانداردسازی براساس نوع مصرف است. بازگردانی پساب‌ها علاوه‌بر کاهش فشار بر منابع آبی، از نظر اقتصادی نیز در مقایسه با هزینه‌های زیاد پروژه‌های انتقال آب به‌ویژه به‌صورت بین حوضه‌ای و تبعات محیط‌زیستی، اجتماعی و اقتصادی آن مقرون به‌صرفه است. امروزه با توجه به هزینه‌های بالای راه‌کارهای متداول تصفیه، استفاده از روش‌های زیستی چون تالاب‌های مصنوعی افزایش چشمگیری یافته است. تالاب‌های مصنوعی بسته به دورنمای مورد انتظار (تصفیه پساب یا رواناب)، دارای روش طراحی متفاوتی هستند. این سامانه براساس الگوی جریان به سه دسته جریان آزاد سطحی، زیرسطحی افقی و عمودی تقسیم‌بندی می‌شود. انتخاب نوع طراحی سامانه علاوه‌بر توجه به توصیف جنبشی واکنش‌های بیولوژیکی تصفیه، به آگاهی از کارکرد الگوی جریان نیز وابسته است. در این مقاله، با بیان مطالعات انجام شده و الزام به تصفیه اضافی پساب‌های تصفیه‌خانه، عملکرد انواع سامانه‌های تالاب مصنوعی در حذف آلاینده‌ها بررسی شده است. سپس، اصول طراحی سامانه تالاب مصنوعی با هدف جمع‌آوری و تصفیه رواناب و تصفیه پساب توضیح داده شده است. سرانجام با ارائه معیارهای طراحی و بررسی موانع موجود در مسیر ایجاد این تحول در عرصه بازیافت آب، امکان‌سنجی استفاده از این سامانه به‌ویژه در نواحی خشک و نیمه‌خشک مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت با بیان طرح توجیهی بهره‌گیری از این سامانه، اقدامات موردنیاز برای جانمایی آن‌ها بیان شده است.

واژه‌های کلیدی: الگوی جریان، تالاب مصنوعی، تصفیه، گیاهان، عملکرد، فرآیند حذف آلاینده‌ها.

۱- مقدمه

بر طبق برآوردها در سال ۲۰۱۰، ۹۰۰ میلیون نفر در جهان به آب آشامیدنی سالم دسترسی نداشته و ۲٫۶ میلیارد نفر از امکانات بهداشتی مناسب برخوردار نبودند (UNESCO, 2010). به همین دلیل، میلیون‌ها نفر که اکثر آن‌ها را کودکان زیر ۵ سال تشکیل می‌دهند در اثر بیماری‌های مرتبط با آب مانند حصبه و وبا جان خود را از دست داده‌اند. از طرفی رشد جمعیت از مهم‌ترین عوامل اثرگذار بر نوع مدیریت منابع آبی در یک منطقه است (Sivakumar, 2011)؛ زیرا افزایش جمعیت خود به تنهایی عاملی است که در همه بخش‌ها باعث افزایش تقاضا می‌شود (تقاضا در مصرف خانگی، صنعتی، کشاورزی، انرژی، تفریح و غیره).

آمار تخمینی اخیر سازمان ملل متحد نشان می‌دهد که جمعیت جهان از ۶٫۲ میلیارد نفر در سال ۲۰۰۷ به ۷٫۷ میلیارد نفر در سال ۲۰۲۰ و به ۹٫۲ میلیارد نفر در سال ۲۰۵۰ خواهد رسید (United Nations, 2007). این مناطق پرجمعیت عموما مناطقی هستند که در حال‌حاضر با مشکلات آب و بهداشت قابل‌ملاحظه‌ای روبه‌رو بوده و در حال مبارزه با شرایط بد هیدرولوژیک هستند که در آینده نیز امکان بدتر شدن اوضاع آن‌ها پیش‌بینی می‌شود. دو سوم از جمعیت جهان در حال زندگی در مناطقی هستند که کمبود آب را برای حداقل یک ماه از سال تجربه می‌کنند (U.N. Water, 2017). علاوه‌بر این، تغییرات آب و هوای جهان ناشی از گازهای گلخانه‌ای نیز تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر آینده منابع آبی نقاط مختلف جهان خواهد داشت (اسلامیان و اخروی، ۱۳۹۴). بر طبق آمارهای موجود، در حالی که در سال ۱۳۴۰ مقدار مصرف کل آب در ایران در حدود ۴٫۵ میلیارد مترمکعب بوده است، این میزان مصرف در سال ۱۳۷۶ به ۸۳ میلیارد مترمکعب رسیده است و پیش‌بینی حاکی از ۱۱۶ میلیارد مترمکعب در سال ۱۴۰۰ است (وزارت نیرو، ۱۳۹۲).

همگام با رشد جمعیت، نیاز آبی و هم‌چنین تولید فاضلاب نیز رو به افزایش است. براساس گزارش آب مورد نیاز شرب شهری و روستایی سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، مقدار کل استحصال آب شرب مطلوب به ۷۲۰۰ میلیون مترمکعب در سال ۱۴۰۰ خواهد رسید که از این مقدار حدود ۵۹۰۰ میلیون مترمکعب به‌عنوان آب برگشتی و پساب (فاضلاب تصفیه‌شده) پیش‌بینی می‌شود (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۳). تخلیه پساب شهری، صنعتی و کشاورزی به منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌تواند موجب آسیب رساندن به محیط‌زیست شود و در نهایت برای سلامت انسان و دیگر موجودات زنده خطراتی را به‌همراه داشته باشد. با توجه به این تفاسیر، یکی از راه‌کارهای حفاظت آب، استفاده مجدد از آب‌های نامتعارفی چون پساب‌های شهری و رواناب‌های ایجاد شده در سطوح شهری است. از این‌رو با تصفیه آب از یک‌سو می‌توان از آلودگی منابع آب‌های سطحی و زیرسطحی جلوگیری نمود و از طرفی منبع جدیدی را برای استفاده در عرصه‌های مختلف به‌وجود آورد.

حجم متوسط آب برداشتی و بازیافتی برخی از کشورهای منتخب در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول درصد بازیافت آب تولیدی براساس آمار ارائه شده قابل مشاهده است. لازم‌به ذکر است که میزان بازیافت آب تولیدی در کشورهای مختلف الزاما بیانگر میزان استفاده از این منبع نیست؛ زیرا راندمان تصفیه آب توسط تجهیزات حاضر و زیرساختارهای لازم برای استفاده از آب بازیافتی در کشورهای مختلف متفاوت است. تخمین‌های سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد در سال ۲۰۱۰ نشان داده است که ظرفیت جهانی برای بازیافت پساب تنها حدود ۴ درصد بوده و میزان رشد سالانه آن از ابتدای سال ۲۰۰۰ برابر ۰٫۲ درصد پیش‌بینی شده است (FAO, 2010). اگرچه میزان ظرفیت تصفیه فاضلاب در کشورهای مختلف به‌صورت مستقیم تابعی از میزان درآمد و وضعیت اقتصادی آن کشور است، بررسی منابع حاکی از آن است که میزان درصد تصفیه فاضلاب تولید شده در کشورهای توسعه‌یافته با درآمد بالا حدود ۷۰٪، کشورهای با درآمد متوسط رو به بالا حدود ۳۸٪، کشورهای با درآمد متوسطه رو به پایین ۲۸٪ و در کشورهای با درآمد پایین تنها حدود ۸ درصد است (Sato et al., 2013).

همچنین جدول ۲، ظرفیت استفاده مجدد از آب در برخی از کشورهای منتخب تا سال ۲۰۱۶ را پیش‌بینی نموده که در این میان دو کشور ایالات متحده آمریکا و چین به‌ترتیب دارای بیشترین ظرفیت برای استفاده از پساب تصفیه‌شده هستند. لذا لازم است کشورهایی نظیر ایران با اقلیم غالب نیمه‌خشک نیز در این راستا تصمیمات اساسی و اجرایی گرفته و گام بزرگی را در تأمین نیاز آبی به ویژه برای بخش کشاورزی از آب‌های نامتعارف تصفیه‌شده بردارند.

سرنوشت پساب براساس شرایط و نوع طرح مدیریتی انتخابی، یک یا ترکیبی از مواردی از قبیل تخلیه به آب‌های سطحی، تغذیه آب‌های زیرزمینی، مصارف کشاورزی، صنعتی و یا تفرجی خواهد بود. تصمیم‌گیری در مورد گزینه انتخابی به نیازهای جامعه، تکنولوژی و امکان‌پذیر بودن طرح باتوجه به محدودیت‌های محیط‌زیستی وابسته است. از بین منابع پساب‌ها و آب‌های برگشتی، فاضلاب‌های خانگی (آب سیاه) به‌خاطر حجم زیاد و

کیفیت مناسب‌تر بعد از طی مراحل تصفیه برای مصارف کشاورزی از اولویت بیش‌تری برخوردارهستند. مطالعات جهانی نیز گواه استفاده بیش از ۳۰ درصد از حجم پساب تصفیه‌شده در دنیا برای مصارف کشاورزی است (U.N. Water, 2017). لذا تمرکز بررسی در این پژوهش و ارائه راه‌کار نیز در این قالب است.

جدول ۱- درصد تصفیه پساب و استفاده مجدد از آن در برخی از کشورها (Sato et al., 2013)

کشور	کل پساب تولید شده		کل پساب تصفیه‌شده		درصد کل آب بازیافتی	کل استفاده از پساب تصفیه‌شده	
	سال	$m^3\times10^9$/year	سال	$m^3\times10^9$/year		سال	$m^3\times10^9$/year
کشورهای منتخب آسیایی							
ایران*	۲۰۱۰	۳٫۵۴۸	۲۰۱۰	۰٫۸۲۱	۲۳	۲۰۱۰	۰٫۳۲۸
بحرین	۲۰۱۰	۰٫۰۸۴	۲۰۰۵	۰٫۰۶۲	۷۴	۲۰۰۵	۰٫۰۱۶
فلسطین اشغالی	۲۰۰۷	۰٫۵	۲۰۰۷	۰٫۴۵	۹۰	۲۰۰۴	۰٫۲۶۲
فلسطین	۲۰۰۱	۰٫۰۷۱	۲۰۰۱	۰٫۰۳	۴۲	۱۹۹۸	۰٫۰۱
عراق	۲۰۱۲	۰٫۵۸	۲۰۱۲	۰٫۵۸	۱۰۰	-	-
کویت	۲۰۰۸	۰٫۲۵۴	۲۰۰۵	۰٫۲۵	۹۸	۲۰۰۲	۰٫۰۷۸
لبنان	۲۰۰۳	۰٫۳۱	۲۰۰۶	۰٫۰۰۴	۱	۲۰۰۵	۰٫۰۰۲
عمان	۲۰۰۰	۰٫۰۹	۲۰۰۶	۰٫۰۳۷	۴۱	۲۰۰۶	۰٫۰۳۷
قطر	۲۰۰۵	۰٫۰۵۵	۲۰۰۵	۰٫۰۴۳	۷۸	۲۰۰۵	۰٫۰۴۳
عربستان سعودی	۲۰۰۰	۰٫۷۳	۲۰۰۲	۰٫۵۴۸	۷۵	۲۰۰۶	۰٫۱۶۶
سوریه	۲۰۰۲	۱٫۳۶۴	۲۰۰۲	۰٫۵۵	۴۰	۲۰۰۳	۰٫۵۵
ترکیه	۲۰۱۰	۳٫۵۸۲	۲۰۱۰	۲٫۷۱۹	۷۶	۲۰۰۶	۱
امارات متحده عربی	۱۹۹۵	۰٫۵	۲۰۰۶	۰٫۲۸۹	۵۸	۲۰۰۵	۰٫۲۴۸
چین	۲۰۰۹	۵۸٫۹۲	۲۰۰۶	۱۷٫۸۹	۳۰	۲۰۰۵	۱۳٫۳۹
هند	۲۰۱۲	۱۳٫۹۹۹	۲۰۱۲	۴٫۳۰۲	۶۲	۲۰۰۰	۰٫۴۵
کشورهای منتخب توسعه‌یافته							
فرانسه	۲۰۰۴	۷٫۹۱	۲۰۰۴	۶٫۶۵۴	۸۴	۲۰۰۴	۰٫۴۱۱
آلمان	۲۰۰۷	۶٫۱۷۲	۲۰۰۷	۵٫۲۱۳	۸۵	۲۰۰۰	۰٫۰۴۲
ایتالیا	۲۰۰۷	۳٫۹۲۶	۲۰۰۷	۳٫۹۰۲	۹۹	۲۰۰۰	۰٫۲۳۳
اسپانیا	۲۰۰۷	۵٫۲۰۴	۲۰۰۷	۴٫۵۷	۸۸	۲۰۰۷	۰٫۴۸۷
انگلیس	۲۰۰۲	۴٫۰۱۹	۲۰۰۸	۳٫۸۰۶	۹۵	۲۰۰۸	۰٫۱۶۴
ایالات متحده آمریکا	۱۹۹۵	۷۹٫۵۷۳	۱۹۹۵	۵۶٫۶۴۲	۷۱	۲۰۰۲	۲٫۳۴۵
کانادا	۲۰۰۶	۵٫۳۹۵	۲۰۰۶	۴٫۴۷۷	۸۳	-	-
استرالیا	۲۰۰۸	۲٫۰۹۴	۲۰۰۸	۱٫۷۹۹	۸۵	۲۰۰۸	۰٫۳۴۸
کشورهای منتخب آمریکای لاتین							
برزیل	۱۹۹۶	۲٫۵۶۷	۱۹۹۶	۰٫۸۸۵	۳۴	۲۰۰۸	۰٫۰۰۹
آرژانتین	۱۹۹۷	۳٫۵۳	۲۰۰۰	۰٫۱۰۴	۳	۲۰۰۰	۰٫۰۹۱
مکزیک	۲۰۰۲	۱۳٫۳۴	۲۰۰۵	۳٫۱۱	۲۳	۲۰۰۰	۰٫۲۸
پرو	۲۰۱۲	۰٫۷۸۶	۲۰۱۲	۰٫۲۷۵	۳۵	۲۰۰۰	۰٫۰۱۹
کشورهای منتخب آفریقا							
تونس	۲۰۱۰	۰٫۲۴۶	۲۰۱۰	۰٫۲۲۶	۹۲	۲۰۰۱	۰٫۰۲۱
مصر	۲۰۱۱	۸٫۵	۲۰۱۱	۴٫۸	۵۶	۲۰۱۱	۰٫۷
سنگال	۲۰۱۰	۰٫۰۶۷	۲۰۱۰	۰٫۰۱۵	۲۲	۲۰۱۰	۰٫۰۰۲
آفریقای جنوبی	۲۰۰۰	۳٫۲	۲۰۰۰	۳٫۲	۱۰۰	۲۰۰۸	۰٫۰۳
غنا	۲۰۰۶	۰٫۲۸	۲۰۰۶	۰٫۰۲۲	۸	-	-
الجزایر	۲۰۱۰	۰٫۷۳	۲۰۱۰	۰٫۱۵	۲۰	-	-
لیبی	۱۹۹۹	۰٫۵۴۶	۱۹۹۹	۰٫۰۴	۷	۲۰۰۰	۰٫۰۴
مراکش	۲۰۱۰	۰٫۷	۲۰۱۰	۰٫۱۲۴	۱۸	۲۰۰۸	۰٫۰۷

* مقادیر اعداد ارائه شده تنها برای پساب‌های شهری و روستایی در ایران است.

جدول ۲- ظرفیت مصرف مجدد آب در برخی کشورهای منتخب (Lautze et al., 2014)

کشور	ظرفیت مصرف مجدد آتی (۲۰۰۹-۲۰۱۶)	
	میلیارد گالن در روز	میلیون مترمکعب در روز
ایالات متحده آمریکا	۲٫۸	۱۰٫۷
چین	۱٫۶	۵٫۹
عربستان سعودی	۰٫۹	۳٫۵
استرالیا	۰٫۷	۲٫۵
اسپانیا	۰٫۶	۲٫۱
مکزیک	۰٫۷	۲٫۱
امارات متحده عربی	۰٫۵	۱٫۹
عمان	۰٫۴	۱٫۶
هند	۰٫۳	۱٫۲
الجزایر	۰٫۳	۱٫۱

در حال‌حاضر در سطح کشور، به‌ویژه در حواشی شهرهای بزرگ و مراکز استان‌ها مناطق وسیعی با پساب‌ها، آب‌های برگشتی و رواناب‌های شهری آبیاری می‌شوند. خلاصه‌ای از تحقیقات علمی در استفاده مجدد از پساب‌ها در سطح کشور نمایانگر آن است که در بیشتر مواقع این استفاده غیراصولی بوده و برای کشت سبزیجات و صیفی‌جات به‌کار رفته و به آلودگی منابع آب و خاک و انتقال آن به محصولات تولیدی می‌انجامد (معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، ۱۳۸۹). بنابراین، استانداردها و دستورالعمل‌هایی به‌صورت مجزا برای شرایط و کیفیت پساب مورداستفاده در کشاورزی و آبیاری فضای سبز باید درنظر گرفته شود. لازم‌به ذکر است که معیارهای استفاده از پساب برای آبیاری درختان مثمر و غیرمثمر نیز متفاوت‌اند و در سال‌های اخیر برای مصارف زراعی، موارد بهداشتی از جمله کلیفرم از عوامل محدودیت‌زا در انتخاب الگوی کشت محسوب می‌شوند (جدول ۳). به‌عنوان نمونه، با توجه به عملکرد تصفیه‌خانه شرق اصفهان در سال ۱۳۹۲ و مقایسه آن با استاندارد ایران برای استفاده مجدد از پساب می‌توان نتیجه گرفت که هنوز نمی‌توان از پساب خروجی تصفیه‌خانه به‌صورت مستقیم در کشاورزی استفاده نمود. دلیل این امر در میزان بالای مواد میکروبی (شاخص کلیفرم) و عدم میزان مناسب BOD[۱]، COD[۲] و TSS[۳] برای تخلیه به آب‌های سطحی و استفاده برای کشاورزی و یا آبیاری فضای سبز است. بنابراین، با توجه به جدول ۳، لزوم توجه به تصفیه مجدد پساب خروجی تصفیه‌خانه (تصفیه پیشرفته) برای مصارف کشاورزی آشکار می‌شود. برای تصفیه بیشتر این‌گونه پساب‌ها، راه‌کارهایی با چالش‌های مختلف وجود دارند که یکی از آن‌ها استفاده از تالاب‌های مصنوعی[۴] است (اخروی، ۱۳۹۳).

جدول ۳- استاندارد استفاده مجدد از پساب و آب‌های برگشتی در کشاورزی و آبیاری فضای سبز.

پارامتر	واحد	فاضلاب ورودی	پساب خروجی	استاندارد تخلیه به آب سطحی	استاندارد مصارف کشاورزی	استاندارد برای آبیاری فضای سبز
BOD	میلی‌گرم در لیتر	۲۹۹	۸۶	۳۰	۱۰۰	۳۱
COD	میلی‌گرم در لیتر	۵۱۳	۱۷۱	۶۰	۲۰۰	-
TSS	میلی‌گرم در لیتر	۱۹۶	۶۰	۴۰	۱۰۰	۴۰
کل کلی‌فرم	تعداد در ۱۰۰ میلی‌لیتر	$۲٫۷\times۱۰^{۸}$	۸۹۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰ (۱)	۱۰۰۰ (۲)

(۱): لازم‌به ذکر است که در استانداردهای خارجی مانند EPA، شرایط سخت‌تری برای کشاورزی اعمال شده است و حذف کامل کلی‌فرم برای محصولات مورد استفاده مستقیم انسان و میزان ۲۰۰ کلی‌فرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر را برای محصولاتی که مورد مصرف انسان قرار نمی‌گیرند، پیشنهاد شده است (EPA, 2012).

(۲): در آبیاری فضای سبز عمومی میزان کلی‌فرم برابر یا کم‌تر از ۲۰۰ کلی‌فرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر توصیه شده است.

در این مقاله در ابتدا تعریف، تفسیر و بررسی کارایی سامانه‌های تالاب مصنوعی برای استفاده مجدد از پساب به‌ویژه در عرصه کشاورزی انجام می‌شود. سپس، در دو بخش مجزا، طراحی سامانه تالاب مصنوعی با هدف جمع‌آوری و تصفیه رواناب (کاربرگ ۱) و تصفیه تکمیلی پساب تصفیه‌خانه (کاربرگ ۲) ارائه و معیارهای اساسی طراحی سامانه با جزئیات تشریح می‌شود. در انتها نیز با

مطرح کردن چالش‌های روبرو در استفاده از پساب برای بخش کشاورزی، جمع‌بندی مطالب ارائه می‌شود. هم‌چنین براساس تجارب علمی و عملی محققین این پژوهش، طرح توجیهی تصفیه تکمیلی پساب و جمع‌آوری رواناب ناشی از بارندگی‌های غیرمتمرکز و تصفیه آن در محل، به‌عنوان رویکردی کارامد به‌ویژه در نواحی خشک و نیمه‌خشک با میانگین بارندگی کمتر از میانگین کشور ارائه می‌شود.

۲- تالاب مصنوعی

از سامانه‌های تصفیه طبیعی و سازگار با محیط‌زیست، تالاب‌های مصنوعی هستند که هزینه ساخت و بهره‌برداری پایین‌تری نسبت به دیگر سامانه‌های تصفیه دارا هستند. در تالاب‌های مصنوعی به‌دلیل الهام‌گیری از طبیعت، فرآیندهای بیولوژیکی تالاب‌های طبیعی برای حذف آلاینده‌ها صورت می‌گیرد. تالاب‌های مصنوعی سازه‌هایی کم‌عمق هستند که عموماً از ذرات شن و ریگ با دانه‌بندی مشخص پر می‌شوند. هم‌چنین، در این سامانه گیاهان مقاوم به شرایط اشباع کشت می‌شوند. پساب به این سامانه وارد شده و به‌صورت سطحی یا زیرسطحی درون آن جریان یافته و سرانجام توسط خروجی‌های مشخصی خارج می‌شود. سامانه‌های تالاب‌های مصنوعی دارای پنج بخش اصلی: ۱) استخر (محل حرکت جریان)؛ ۲) محیط متخلخل (نوع دانه‌بندی فیلتر)؛ ۳) گیاهان؛ ۴) پوشش استخر (عایق‌سازی جریان) و ۵) ورودی‌ها و خروجی‌ها هستند (اخروی و همکاران، ۱۳۹۴-الف).

سامانه‌های تصفیه طبیعی پساب به دو دسته تقسیم می‌شوند: تصفیه به کمک زمین و تصفیه به کمک گیاهان آبزی. تالاب‌های طبیعی و مصنوعی در دسته دوم قرار می‌گیرند. در ساخت تالاب‌های طبیعی بشر دخالتی نداشته و عملاً به‌عنوان منبع پذیرنده عمل می‌کنند و کنترل خاصی بر سامانه صورت نمی‌گیرد. در تالاب‌های مصنوعی انسان شرایطی را برای رشد گیاهان فراهم می‌آورد و کنترل بهتری بر شرایطی از قبیل زمان ماند، نوع گیاه و نوع بستر را ایجاد می‌کند. این سامانه به دو دسته کلی سطحی و زیرسطحی تقسیم می‌شود که در نوع سطحی، سطح جریان سیال به صورت آزاد بوده و در نوع زیرسطحی، سطح سیال زیر سطح بستر محیط متخلخل است.

کارایی سامانه‌های تالاب مصنوعی بیشتر برای تصفیه پیشرفته پساب تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری و روستایی بوده و کمتر برای پساب‌های صنعتی توصیه شده است (UN-HABITAT, 2008). در روش‌های معمول تصفیه بیولوژیکی هوازی فاضلاب/پساب مانند صافی چکنده، لاگون‌های هوادهی، تماس‌دهنده‌های بیولوژیکی دوار، هضم‌کننده‌های هوازی و لجن فعال نه تنها هزینه بالاتری برای ساخت، نصب تجهیزات، بهره‌برداری و نگهداری سامانه نیاز است؛ بلکه مصرف انرژی‌های غیرتجدیدپذیر در نحوه عملکرد تصفیه در سامانه‌های متداول اجتناب‌ناپذیر است. به‌عنوان نمونه، عمل اکسیژن‌دهی (هوادهی) عموماً در این سامانه‌ها از طریق سیستم‌های مکانیکی مانند تجهیزات هوادهی سطحی (پاشش آب) و عمقی (هم‌زن) و یا توسط کمپرسورهای تأمین‌کننده هوای فشرده انجام می‌شود. درحالی‌که تالاب مصنوعی با صرف انرژی بسیار کم یا بدون مصرف انرژی به تصفیه اضافی پساب می‌پردازد. هم‌چنین، هنگامی که سامانه‌های رایج تصفیه قادر به تصفیه غلظت مذکور نیستند کاربرد سامانه تالاب مصنوعی در تصفیه پساب‌های با غلظت آلاینده کم نیز کاربرد پیدا می‌کنند. به‌عنوان نمونه سامانه لجن فعال کارایی قابل‌قبولی در غلظت‌های BOD کمتر از ۵۰ تا ۸۰ میلی‌گرم بر لیتر ندارد (اخروی، ۱۳۹۳).

استفاده از سامانه تالاب مصنوعی با طراحی مناسب در مقایسه با سامانه‌های متداول مذکور با راندمان یکسان، مزایایی از قبیل: ۱) کاهش هزینه سرمایه‌گذاری اولیه جهت تأسیسات مکانیکی و ساختمانی؛ ۲) هزینه‌های عملیاتی، تعمیر و نگهداری پایین؛ ۳) توسعه محیط‌زیست گیاهی و جانوری؛ ۴) نیاز کمتر به نیروی انسانی آموزش‌دیده و ۵) عمر مفید بالای سامانه را دارا است (Eslamina et al., 2019). لازم‌به ذکر است که سامانه تالاب مصنوعی برای تصفیه اضافی پساب با چالش‌هایی نظیر نیاز به زمین با مساحت نسبتاً زیاد و برقراری جریان دائمی پساب درون سامانه روبرو است. علاوه‌بر این در صورت عدم طراحی مناسب مهندسی در ابعاد سامانه، میزان جریان، اندازه ذرات محیط متخلخل و نوع آرایش ورودی‌ها و خروجی‌ها، گرفتگی جریان در داخل سامانه و عدم کارکرد مناسب برای تصفیه پساب دور از انتظار نخواهد بود. هم‌چنین، برای استفاده از سامانه تالاب مصنوعی به‌صورت محلی و در مناطق با جمعیت نسبتاً کم توصیه بیشتری شده است؛ زیرا سامانه تالاب مصنوعی دارای سرعت پایین‌تری برای تصفیه اضافی پساب در راندمان تصفیه مشابه به نسبت دیگر سامانه‌های مذکور است (Eslamian et al., 2019).

بررسی منابع نشان داده است که اولین تحقیقات در مورد سامانه تالاب مصنوعی و ساخت اولین نمونه آن به هدف امکان‌سنجی تصفیه فاضلاب در کشور آلمان و در مؤسسه Max Planck صورت گرفت، که Seidel et al. (1976) توانایی انواع گیاهان آبزی را برای جذب آلاینده‌های شیمیایی مورد بررسی

قرار داد. Kadlec، مدیر سازمان مدیریت تالاب‌ها و محقق برتر در زمینه تالاب مصنوعی، در سال ۱۹۷۳ تحقیق جامع و کاملی پیرامون سامانه تالاب مصنوعی در مؤسسه تحقیقات آب دانشگاه میشیگان انجام داد. او توانست شرایط فعالیت‌های بیولوژیکی موجود در تالاب‌های طبیعی را به‌خوبی در تالاب مصنوعی پیاده‌سازی نماید (Okhravi et al., 2017). محققان متعددی بخش‌های مختلفی از سامانه تالاب مصنوعی را مورد بررسی و تحقیق قرار داده‌اند. برای تشخیص وضعیت هیدرودینامیکی تالاب‌های مصنوعی و مسیرهای جریان زیرسطحی از ردیاب استفاده می‌شود.

King et al. (1997) از لیتیم به‌عنوان ردیاب استفاده کرده و توزیع زمان ماند تالاب مصنوعی برای تصفیه فاضلاب را مدل‌سازی نمودند. هم‌چنین در این راستا، اخروی و همکاران (۱۳۹۴-ب) با مدل‌سازی هیدرولیک داخلی جریان تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی و بهره‌گیری از ردیاب اورانین، ارتباط بین توزیع زمان ماند هیدرولیکی و میزان غیریکنواختی جریان را به‌صورت کمی و کیفی ارائه نمودند. امینی‌راد و همکاران (۱۳۹۰) فرآیند تصفیه پساب کارخانه آنتی‌بیوتیک‌سازی و رساندن آن به مقدار مجاز با استفاده از نمونه کوچک تالاب مصنوعی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از پژوهش آن‌ها نشان داد که با افزایش زمان ماند هیدرولیکی از ۶ به ۹ روز، راندمان حذف BOD از ۷۲ درصد به ۹۲/۵ و راندمان حذف COD از ۲۸ درصد به ۶۴/۵ درصد افزایش یافته است. هم‌چنین، تحقیقات نشان داده است که افزایش زمان ماند هیدرولیکی منجر به افزایش قابل‌ملاحظه بازده حذف NH_4^+، NO_3^- و TKN[۵] (نیتروژن کلدال) می‌شود.

مطالعات نشان داده است که راندمان حذف آلاینده‌ها در سامانه تالاب مصنوعی با جریان افقی با افزایش زمان ماند هیدرولیکی و کاهش نرخ بار هیدرولیکی بهبود می‌یابد (اخروی و همکاران، ۱۳۹۷). تحقیقات وسیعی پیرامون قدرت سامانه تالاب مصنوعی برای حذف آلاینده‌های متفاوت و با انواع گیاهان تالابی صورت گرفته است. Fazlolahi and Eslamian (2014) در تحقیقی به بررسی راندمان حذف مواد مغذی توسط سه گیاه تالابی در تصفیه پساب به‌روش تالاب مصنوعی پرداختند. پس از گذشت ۶ ماه، درصد حذف مواد مغذی توسط گیاهان در هر سلول برای گیاه جگن، نی معمولی و لویی به‌ترتیب برای نیترات و فسفات به‌صورت ۵۸/۶٪N و ۳۵/۷۱٪P، ۵۶/۴۸٪N و ۳۰/۳۵٪P، ۳۲/۱۹٪N و ۱۴/۲۸٪P بود. نتایج نشان داده است که بررسی آهنگ حذف نیترات در سامانه تالاب مصنوعی متأثر از چندین عامل هیدرولیکی از جمله نرخ بار هیدرولیکی، زمان ماند هیدرولیکی و عمق آب است. این راه‌کار جامع که بخش عمده‌ای از تحقیقات مهندسین و محققین را به‌خود اختصاص داده است دارای ابعاد تحقیقاتی متفاوتی بوده و روز به روز این ابعاد به‌سمت بهینه‌تر شدن برای کاربرد در سامانه‌های تصفیه پساب پیش می‌رود.

۲-۱- انواع سامانه‌های تالاب مصنوعی

همان‌طور که بیان شد، تالاب مصنوعی دارای سه نوع مدل طراحی (جریان سطحی آزاد، زیرسطحی افقی و زیرسطحی عمودی) است که تمرکز سامانه‌های تالاب مصنوعی برای تصفیه پساب تصفیه‌خانه بر مدل جریان زیرسطحی (افقی یا عمودی و یا ترکیبی) و سامانه‌های جمع‌آوری و تصفیه رواناب بر مدل سطحی آزاد است.

۲-۱-۱- جریان سطحی

در این مدل، آب توسط نیروی ثقل در سطح زمینی رسی با نفوذپذیری کم گسترش می‌یابد. این تالاب‌ها حقیقتاً به تالاب‌های طبیعی شباهت زیادی داشته و عموماً برای تصفیه پساب‌های با آلایندگی نه چندان زیاد و یا برای جمع‌آوری و تصفیه رواناب استفاده می‌شوند. در این تالاب‌ها ۸۰ درصد مواد جامد معلق در دو روز اول حذف می‌شوند. زمان ماند در این واحدهای با جریان آب آزاد باید کمتر از ۳-۲ روز باشد تا از رشد جلبک‌ها جلوگیری شود (UN-HABITAT, 2008). نوع تجزیه مواد آلی وابسته به میزان تبادل اکسیژن و مقدار مواد آلی است. از جمله مزایای این مدل می‌توان نیاز به زمان ماند هیدرولیکی کمتر، هزینه اولیه کم، عملیات و نگهداری بسیار آسان، توانایی بیشتر در حذف فسفر، عدم نیاز به مصرف انرژی و امکان پرورش ماهی را نام برد. همچنین، معایب این نوع سامانه تالاب مصنوعی شامل توانایی کمتر در حذف BOD، COD، N، TSS و TDS[۶]، توانایی بسیار کم در حذف کلی‌فرم، افزایش موجودات موذی در منطقه، تبخیر زیاد، ایجاد لجن در سطح تالاب و در نتیجه افزایش بو در منطقه اشاره نمود.

۲-۱-۲- جریان زیرسطحی افقی

شکل ۱ مقطع جریان زیرسطحی افقی در سامانه‌های تالاب مصنوعی (افقی و عمودی) را نمایش می‌دهد. در مدل جریان زیرسطحی افقی، پساب از طریق لوله ورودی به سامانه تغذیه شده و به آرامی از درون محیط متخلخل عبور کرده تا به محل خروجی برسد. در این گذار، پساب با شبکه‌هایی از محیط‌های هوازی و بی‌هوازی برخورد می‌کند. محیط هوازی در لایه سطحی تالاب،

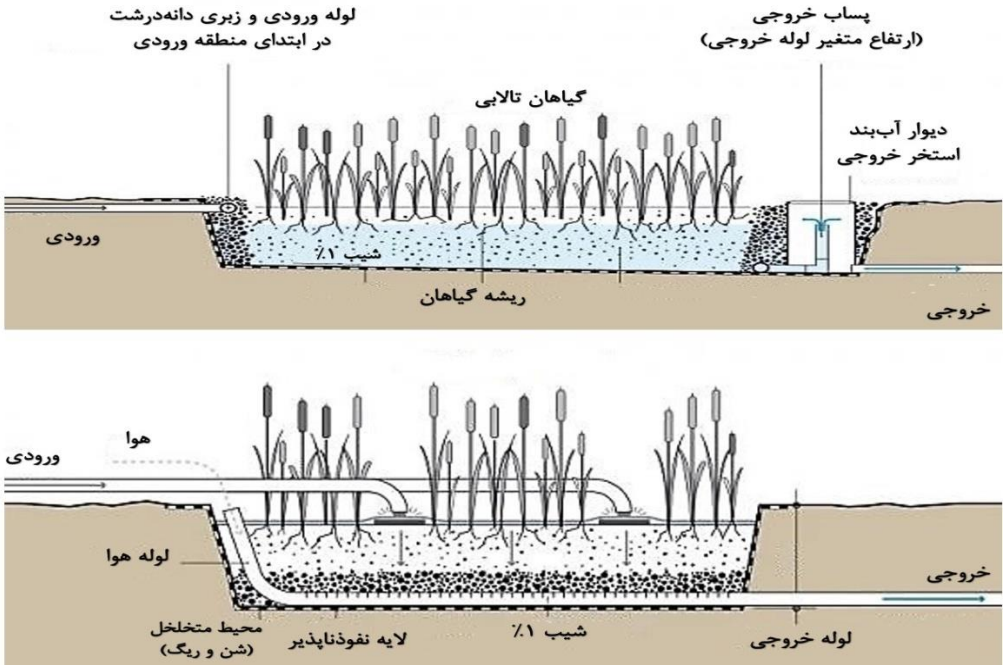
نزدیک اتمسفر، و در نزدیکی ریشه گیاهان به‌دلیل انتقال اکسیژن از ریزوم‌های گیاهان به محیط داخلی موجود است. به‌همین دلیل پساب هنگام عبور از منطقه هوازی، توسط فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی و تجزیه بیولوژیکی مورد تصفیه قرار می‌گیرد (اخروی و همکاران، ۱۳۹۴-الف). این نوع سامانه‌های تالابی دارای توانایی بسیار بالایی برای حذف مواد آلی هستند (BOD, COD, TSS). از جمله مزایای این نوع سامانه نیز می‌توان به تصفیه بالا (در صورت طراحی دقیق، ۹۰ درصد همانند تصفیه پیشرفته)، عدم تولید بو و پشه، مدیریت بهتر و اطمینان‌پذیری بیشتر در سیال خروجی، عدم تولید لجن، بدون انرژی به استثنای انرژی مورد نیاز برای شستشوی بستر، استفاده از نی برای مصارفی چون کاغذسازی، تولید فیبر و علوفه دام و تبخیر و نفوذ کم اشاره نمود. راندمان کم در حذف فسفر، گرفتگی بستر و فضای زیاد از جمله معایب این سامانه است.

۲-۱-۳- جریان زیرسطحی عمودی

در تالاب‌های با جریان زیرسطحی عمودی (شکل ۱)، پساب از سطح به‌صورت عمودی به درون سامانه و به آرامی تغذیه شده و سپس توسط شبکه زهکشی در کف تخلیه می‌شود. در این تالاب‌ها عموماً آب به‌صورت متناوب بر روی سطح پخش می‌شود تا بستر محیط متخلخل شرایط هوازی و بی‌هوازی را به‌صورت متناوب دریافت کند و عملیات نیتریفیکاسیون برای حذف نیتروژن بهتر صورت گیرد. پخشیدگی اکسیژن از هوا براساس ورودی متناوب سامانه برای فرآیند تجزیه بیولوژیکی نسبت به تأمین اکسیژن از طریق گیاه کارایی بیشتری دارد. (1998) Platzer نشان داد که ورودی متناوب پساب به سامانه سبب انتقال اکسیژن از ۲۳ gO_2/m^2d تا ۶۴ gO_2/m^2d است، در صورتی‌که برای سامانه کشت شده با گونه‌های نی معمول این میزان را تنها ۲ gO_2/m^2d در محیط ریشه برآورد نمود. معمولاً این مدل تالاب در جوامع کوچک به‌کارگرفته شده و دارای هزینه بالاتر و عملیات بیشتر نسبت به دو مدل قبل است. هم‌چنین، در این مدل گرفتگی بستر بیشتر بوده و در مقابل، قادر به حذف TSS با راندمانی بالاتر در حدود ۹۸ درصد است (UN-HABITAT, 2008).

۲-۱-۴- جریان ترکیبی

کارکرد سامانه‌های تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی در حذف BOD و TSS از پساب اثبات شده است؛ اما برای عمل نیتریفیکاسیون (از مراحل چرخه حذف نیتروژن) کارایی مناسب نداشته که دلیل آن نرخ انتقال اکسیژن پایین است. به‌همین دلیل از تالاب مصنوعی با جریان زیرسطحی عمودی استفاده می‌شود تا بتوان به‌میزان اکسیژن بالاتری دست یافت. با این وجود، این سامانه‌ها نیز دارای محدودیت‌هایی شبیه به عدم کارکرد مناسب برای حذف ذرات جامد و مشکل گرفتگی درصورت انتخاب نوع دانه‌بندی نامناسب ذرات محیط متخلخل هستند. بنابراین، ترکیبی از تالاب‌های با جریان زیرسطحی افقی و عمودی به‌طور فزاینده‌ای رو به گسترش است. در این سامانه معایب دو نوع قبلی توسط یکدیگر جبران می‌شوند. ترتیب قرارگیری مدل افقی و عمودی به هدف تصفیه وابسته است.



شکل ۱- تالاب مصنوعی با جریان زیرسطحی افقی (تصویر بالا) و عمودی (تصویر پایین) (Tilley et al., 2014)

۲-۲- عملکرد تصفیه در تالاب مصنوعی

سامانه تالاب مصنوعی ترکیب پارامترهای مختلفی مانند سیال (پساب)، ذرات محیط متخلخل، گیاهان و مجموعه‌ای از انواع میکروارگانیزم‌ها به‌خصوص باکتری‌ها است که بررسی فرآیند عملکرد آن را پیچیده می‌سازد. گیاهان نقش حیاتی در ایجاد محیط مناسب برای رشد میکروبی و درنتیجه عملیات تصفیه بازی می‌کنند. عملیات حذف آلاینده‌ها طی فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی صورت می‌گیرد. روش حذف آلاینده‌ها در جدول ۴ بیان شده است.

گیاهان از آشکارترین ویژگی‌های تالاب هستند و وجود آن‌ها در تالاب مصنوعی، سامانه را از فیلترهای شنی یا لاگون‌های بدون پوشش متمایز می‌سازد. گیاهان مورداستفاده برای تصفیه پساب در محیط تالاب مصنوعی باید توانایی رشد در شرایط اشباع دائمی را داشته باشند. توزیع گیاهان به عمق آب و طول مدت اشباع وابسته است. گیاهان باعث پایداری رسوبات و حذف آلاینده‌ها از طریق فیلتر کردن به‌وسیله برگ، ساقه و ریشه می‌شوند. با فراهم کردن زیست‌توده، کربن مورد نیاز میکروارگانیزم‌ها را تأمین می‌کنند. هم‌چنین، گیاهان توانایی انتقال مواد مغذی و عناصر و مواد آلی آب را از طریق روزنه‌ها و جذب سطحی دارند (مشینچی و همکاران، ۱۳۹۸). برخی از گونه‌های گیاهان تالابی مورداستفاده در انواع سامانه تالاب مصنوعی در جدول ۵ آمده است. به‌طور خلاصه نقش گیاهان در سامانه تالاب مصنوعی را می‌توان در قالب مواردی از جمله: ۱) تهیه اکسیژن برای میکروارگانیزم‌ها؛ ۲) جذب آب و مواد مغذی و معدنی؛ ۳) ایجاد محیط مناسب برای تشکیل بیوفیلم (اجتماع سلول‌های میکروبی متصل به سطح)؛ ۴) افزایش رسوب‌گذاری به‌وسیله کاهش میزان آشفتگی آب؛ ۵) افزایش سطحی برای جذب آلاینده‌ها؛ ۶) ایجاد سایه برای گیاهان به هدف کاهش رشد جلبک‌ها؛ ۷) لخته‌شدن و ته‌نشینی ذرات کلوییدی؛ ۸) افزایش زمان ماند با کاهش سرعت جریان و ۹) بهبود هدایت هیدرولیکی عنوان کرد (اخروی و همکاران، ۱۳۹۴-الف). علاوه‌بر این، گیاهان از بین‌برنده بوی بد محیط و سبب افزایش جنبه‌های زیبایی سامانه نیز می‌شوند. هم‌چنین، گیاهان سطحی را برای فعالیت‌های میکروبی فراهم می‌آورند و به‌عنوان شاخص بیولوژیکی تالاب شناخته می‌شوند.

جدول ۴- روش‌های حذف آلاینده‌ها در تالاب مصنوعی

ترکیبات فاضلاب	روش حذف
جامدات معلق	رسوب‌گذاری و فیلتراسیون
مواد آلی محلول	تجزیه میکروبی هوازی و غیرهوازی
فسفر	رسوب، جذب زنده، کمپلکس و جذب گیاهی
نیتروژن	تولید آمونیاک پس از نیتریفیکاسیون میکروبی، تجزیه نیترات یا دنیتریفیکاسیون، جذب زنده، جذب گیاهی، تبخیر آمونیاک (معمولاً در سامانه‌های سطحی)
فلزات	جذب و تبادل یونی، کمپلکس، رسوب، جذب گیاهی، اکسایش/ کاهش میکروبی
عوامل بیماری‌زا	رسوب‌گذاری و فیلتراسیون، مرگ طبیعی، تابش فرابنفش معمولاً در سامانه‌های سطحی، تغذیه برای دیگر ارگانیزم‌ها

جدول ۵- گونه‌هایی از گیاهان تالابی با عملکرد مناسب در تالاب‌های مصنوعی

نام فارسی	اسم علمی	کاربرد ویژه
زنبق مردابی، زنبق زرد	Iris Pseudacorus	مناسب تالاب‌هایی با عمق کم‌تر از ۲۰ سانتی‌متر
دانه قناری نی‌مانند	Typha Latifolia	تالاب‌های کم عمق
گرز، لویی، کرفو گرز، لویی، کرفو	Typha Latifolia Eleocharis Palustris	تالاب‌های کم عمق تالاب‌های کم عمق
نی اره	Cladium Mariscus	مطلوب برای آب‌های سخت
جگن	Carex Riparia & Bulrush	مطلوب برای تمامی شرایط
نی	Phragmites Australis	مطلوب برای تمامی شرایط
توروف	Sparganium Emersum	مطلوب برای بخش‌های انتهایی تالاب
دم اسب	Equisetum Fluviatile	مطلوب برای بخش‌های انتهایی تالاب
پنجه برگ	Potentilla Palustris	مطلوب برای بخش‌های انتهایی تالاب
آبچکان	Oenanthe L	مطلوب برای بخش‌های انتهایی تالاب
کرفس باتلاقی	Apium Nodiflorum	مطلوب برای بخش‌های انتهایی تالاب
سیزاب	Veronica Scutellata	مطلوب برای بخش‌های انتهایی تالاب
قاشقواش	Alisma Plantago Aquatica	مطلوب برای بخش‌های انتهایی تالاب

۳- اصول طراحی تالاب مصنوعی

فرآیند طراحی سامانه تالاب مصنوعی برای جمع‌آوری و تصفیه رواناب/پساب به‌طور کلی شامل مراحل زیر است (Eslamian et al., 2019):

۱) تعیین پارامترهای لازم برای طراحی

الف) تعیین میزان دبی جریان و میزان تخمینی نسبت سطح مورد نیاز به حجم؛

ب) تعیین ویژگی‌های شیمیایی پساب/رواناب و تعیین سطح مطلوب تصفیه (راندمان تصفیه)؛

ج) تعیین محل تخلیه پساب و گرفتن مجوزهای مورد نیاز.

۲) دستیابی به داده‌های هیدرولوژیک و اطلاعات محوطه ساخت سامانه

الف) داده‌های بارش روزانه، میزان دما و نرخ تبخیر منطقه؛

ب) تعیین نوع خاک، توپوگرافی منطقه و گونه گیاهان تالابی بومی منطقه؛

ج) تعیین شرایط تخلیه پساب/رواناب و محدودیت‌ها.

۳) طراحی سامانه پیش‌تصفیه با هدف دستیابی به‌حد مطلوب تصفیه پساب/رواناب درصورت پایین بودن کیفیت پساب ورودی

الف) حذف ذرات معلق (به‌عنوان مثال استفاده از تانک سپتیک)؛

ب) کاهش سموم و غلظت برخی از مواد مغذی از سامانه برای اهداف خاص؛

ج) به‌حد مطلوب رساندن میزان پساب و مواد مغذی میکروبی لازم در تصفیه میکروبی پساب.

۴) طراحی سامانه تالاب مصنوعی

الف) انتخاب طرح‌بندی سامانه و محاسبه ابعاد بر اساس میزان پساب/رواناب ورودی و سطح زمین در دسترس؛

ب) تعیین میزان نسبت طول به عرض و طراحی و جانمایی بخش پیش‌تصفیه؛

ج) تعیین نوع ذرات محیط متخلخل و تعیین میزان دانه‌بندی و محاسبه هدایت هیدرولیکی آن‌ها به‌همراه عمق جریان؛

د) محاسبه میزان زمان ماند لازم برای سطح تصفیه مطلوب با درنظرگیری فاکتور اطمینان در فصل‌های مختلف؛

ه) تخمین پارامترهای هیدرولیکی اعم از راندمان، میزان مسیرهای میان‌بر و نرخ جریان یکنواخت در سامانه با درنظرگیری زمان ماند محاسباتی مرحله پیشین و چگونگی تغییر این پارامترها با موارد دیگر دخیل در طراحی (فرآیند سعی و خطا)؛

و) طراحی و جانمایی آرایش ورودی(ها) و خروجی(ها) به هدف دستیابی به وضعیت هیدرولیکی مطلوب.

۳-۱- طراحی سامانه تالاب مصنوعی سطحی با هدف جمع‌آوری و تصفیه رواناب

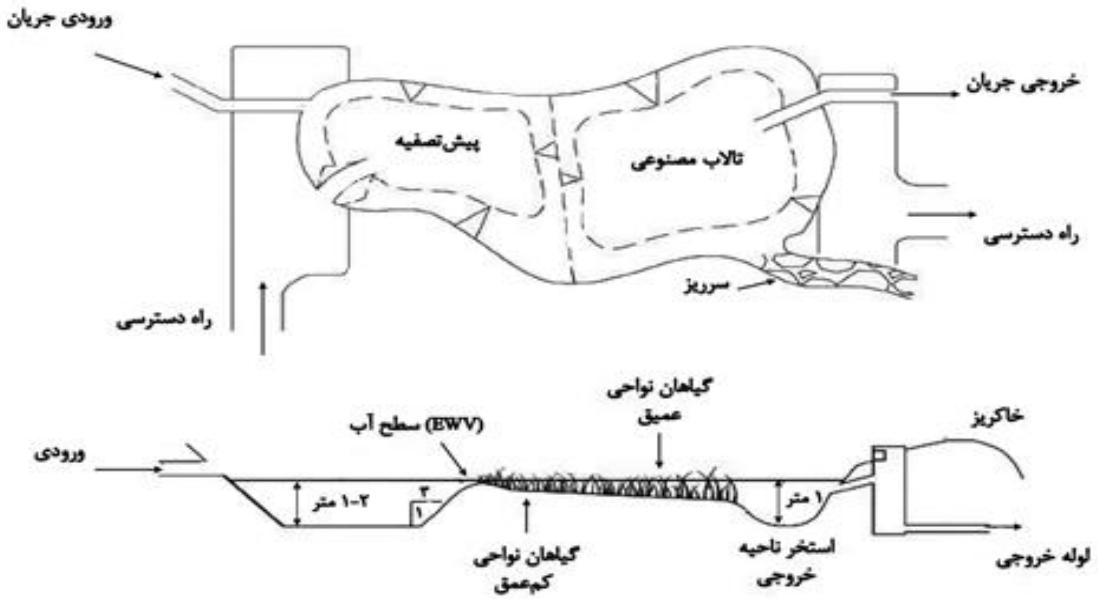
روزبه‌روز توجه به مدیریت آب باران و رواناب در سطوح غیرقابل نفوذ شهری به‌عنوان نواحی با پتانسیل بالای تولید رواناب و در مناطق مواجه با کمبود آب افزایش یافته است؛ زیرا در این نواحی ارزش یک بارندگی ۱۰ میلی‌متری در یک هکتار برابر با ۱۰۰ هزار لیتر آب است که می‌توان با استحصال این حجم رواناب و تصفیه آن، آب موردنیاز محلی با دسترسی کم به سایر منابع تأمین آب را فراهم ساخت (اسلامیان و اخروی، ۱۳۹۴). بنابراین، استفاده از تالاب مصنوعی به‌عنوان روشی سازگار با محیط‌زیست به‌منظور کنترل بهینه رواناب، نه تنها سبب کنترل و استفاده مجدد از آب باران می‌شود بلکه با ایجاد پوشش سبز سبب تعدیل دمای هوا شده و با توسعه زیستگاه‌های کوچک موجودات به اکوسیستم منطقه کمک می‌کند (Okhravi et al., 2019). در جدول ۶ مراحل طراحی سامانه تالاب مصنوعی سطحی با هدف جمع‌آوری و استفاده مجدد از رواناب به‌صورت قدم به قدم توضیح داده شده است.

پس از تعیین هدف اصلی طراحی تالاب مصنوعی سطحی و مکان احداث آن در **گام اول**، نیاز به آگاهی از میزان کل رواناب ورودی به سامانه و محاسبه نرخ حداکثر جریان برای تالاب مصنوعی در **گام دوم** است. اگرچه زمانی که هدف تصفیه پساب تصفیه‌خانه فاضلاب باشد، عموماً میزان دبی جریان از پیش مشخص است. بنابراین، این گام مختص سامانه تالاب مصنوعی با ورودی رواناب است. در این مرحله نیاز به داشتن میزان بارش باران (RRE) بوده و برای محاسبه حجم ورودی آب به تالاب مصنوعی (EWV) از معادله (۲) موجود در **گام دوم** در جدول ۶ (کاربرگ اول) استفاده می‌شود. عموماً میزان بارش محاسباتی بر اساس حداکثر رخداد بارندگی ۲ ساله محاسبه می‌شود و در این‌صورت میزان سطح تالاب و اندازه ورودی و خروجی به نسبت دچار تغییر خواهند شد. اگرچه توصیه بر آن است که رواناب حاصل از دبی ۱۰ و ۱۰۰ ساله نیز مدل و یا محاسبه شود تا ابعاد سامانه با ضریب اطمینان بالاتری طراحی شود. در **گام سوم**، بخش پیش‌تصفیه سامانه مورد طراحی قرار می‌گیرد (جدول‌های ۶ و ۷). در **گام چهارم**، پیکربندی سامانه تالاب مصنوعی با جریان سطحی آزاد طراحی و میزان حجم آب در اختیار سامانه مشخص می‌شود. تخصیص میزان حجم رواناب در اجزای سامانه تالاب

مصنوعی مطابق با شکل ۲ به‌صورت ۱۰-۲۰ درصد برای استخر منطقه خروجی، ۳۵-۴۰ درصد برای مناطق کم‌عمق و ۴۰-۴۵ درصد برای مناطق عمیق سامانه انجام می‌گیرد. طرح کف سامانه در این نوع بهتر است به‌صورت نامنظم و ناصاف (دارای پستی و بلندی) ساخته شود؛ زیرا این سطوح نه‌تنها سبب افزایش طول مسیرهای جریان و زمان ماند می‌شوند بلکه میکروزیستگاه‌هایی در سامانه تالاب ایجاد می‌کنند. هم‌چنین، در این قسمت نسبت طول به عرض سامانه و شیب کف نیز باید مورد بررسی قرار گیرد (جدول ۷). تجهیزات نگه‌داری و بازرسی سامانه نیز باید به‌درستی به‌خصوص در منطقه ورودی و خروجی و قسمت پیش‌تصفیه جایابی شوند. سپس، در **گام پنجم**، طراحی سازه ورودی و خروجی سامانه باید به‌گونه‌ای باشد که رواناب تخمینی در گام دوم طراحی را با امنیت کامل و بدون خسارت عبور دهد. به‌منظور عبور آزاد جریان در ورودی و خروجی باید سطح اطمینان آزاد آب، حداقل به اندازه ۲۰-۳۰ سانتی‌متر در طراحی درنظر گرفته شود و اقدامات لازم به‌منظور عدم فرسایش بستر در مناطق ورودی و خروجی و استهلاک انرژی جریان در نقاط ورودی و خروجی و سرریزها صورت گیرد. در **گام ششم**، با مقایسه حداکثر سرعت جریان و سطح آب محاسبه شده در طراحی سامانه برای کنترل رواناب با میزان سرعت جریان مجاز برای نوع خاک مورد استفاده در کف سامانه می‌توان به ارزیابی وضعیت فرسایش کف سامانه پرداخت تا اقدامات لازم قبل از اجرایی شدن سامانه صورت گیرد و سرانجام در گام آخر (**گام هفتم**)، کشت گیاه و مدیریت و طراحی محوطه بررسی می‌شود. برای کاشت گیاهان در تالاب مصنوعی فاکتورهایی نظیر بومی بودن گیاه، جنبه زیبایی گیاهان، ارتفاع گونه خاص، تحمل شرایط اشباع محیط، تحمل میزان آفتاب و قرارگیری گونه خاص گیاهان در نواحی کم‌عمق یا عمیق از اهمیت بالایی برخوردارند.

جدول ۶- کاربرگ (۱) طراحی سامانه تالاب مصنوعی سطحی با هدف جمع‌آوری و تصفیه رواناب

گام اول: تعیین کارکرد و هدف طراحی و ساخت تالاب مصنوعی		
گام دوم: تعیین میزان بارش باران (RRE)، میزان حداقل آن ۱۵ میلی‌متر است و تعیین میزان حجم رواناب برای ورود به سامانه (EWV)		
A	سطح ناحیه جمع‌آوری رواناب	m^2 .....
RRE	میزان بارش باران	m .....
I	پوشش غیرقابل نفوذ سطح ناحیه جمع‌آوری رواناب بر حسب درصد	..... ٪
R_v	معادله (۱)، $R_v=0.05+0.009I$	.....
EWV	معادله (۲)، $EWV=(A)(RRE)(R_v)$	m^3 .....
گام سوم: تعیین میزان حجم ذخیره سامانه تالاب مصنوعی (PWV)		
P_D	حجم بخش پیش‌تصفیه در سامانه تالاب مصنوعی	m^3 .....
A	سطح تالاب مصنوعی	m^2 .....
φ	تخلخل محیط بستر تالاب مصنوعی	..... ٪
M	عمق مواد بستر محیط متخلخل تالاب مصنوعی	m .....
H	عمق آب	m .....
PWV	معادله (۳)، $PWV=(A)[\varphi(M)+H]+(P_D)$	m^3 .....
گام چهارم: تعیین میزان حجم آبی که در کنترل و مدیریت سامانه تالاب مصنوعی قرار دارد (MWV)		
MWV	این پارامتر عموماً به‌عنوان درصدی از میزان حجم ذخیره سامانه تالاب مصنوعی (PWV) بیان می‌شود.	m^3 .....
	آیا حجم روانابی که به سامانه وارد شد (EWV) به‌طور کامل تحت مدیریت و عملیات تصفیه قرار گرفت؟ (به‌عنوان نمونه، آیا $MWV \geq EWV$ است؟) در صورتی‌که جواب بله است عملیات طراحی سامانه تمام است و درغیر این‌صورت باید میزان ابعاد سامانه به‌گونه‌ای طراحی شود تا حجم ذخیره آن (PWV) افزایش یابد. برای این منظور حجم بخشی که باید به حجم ذخیره سامانه اضافه شود (RWV) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:	بله یا خیر
RWV	معادله (۴)، $RWV=2(EWV-MWV)$	m^3 .....



شکل ۲- نمای سامانه تالاب مصنوعی با جریان آزاد سطحی با هدف جمع‌آوری و تصفیه رواناب

جدول ۷- ملاحظات طراحی سامانه تالاب مصنوعی سطحی

پارامتر	ملاحظات طراحی
ناحیه جمع‌آوری رواناب	این ناحیه باید حداقل ۱۰ هکتار باشد تا شرایط مرطوب سامانه تالاب در فصول خشک نیز برقرار باشد.
اندازه کلی	وسعت محدوده ساخت سامانه باید در حدود ۲-۵ درصد ناحیه جمع‌آوری رواناب باشد.
شیب جانبی	بیشتر از ۴:۱ (H:V) نباید باشد.
طول به عرض	حداقل طول به عرض باید ۲ باشد و بیشترین توصیه متون علمی بر عدد ۳ است (Okhravi et al., 2017).
دبی طرح	توانایی عبور دبی ۲، ۱۰ و ۱۰۰ ساله را باید داشته باشد.
پیش‌تصفیه	اندازه بخش پیش‌تصفیه باید به گونه‌ای باشد که ۱۰-۱۵ درصد کل رواناب را شامل شود. هم‌چنین، عمق این بخش ۱-۲ متر پیشنهاد شده است (Tilley et al., 2014).
حفاظت ناحیه خروجی	حفاظت منطقه خروجی جریان باید به‌گونه‌ای باشد تا از آبشستگی در بستر سامانه جلوگیری نماید.
خاک- بستر	خاک‌هایی با نفوذپذیری بسیار پایین باید در بستر جریان استفاده شوند.

۳-۲- طراحی سامانه تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی به هدف تصفیه پساب

فرآیند طراحی سامانه تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی به‌عنوان پرکاربردترین نوع تالاب مصنوعی ساخته شده در جهان (Eslamian et al., 2019) کمی متفاوت از مدل طراحی قبلی است. دلیل تفاوت مدل طراحی در هدف سامانه به‌منظور تصفیه پساب تصفیه‌خانه است؛ زیرا در این‌حالت میزان دبی ورودی به سامانه، غلظت آلاینده‌ها و غلظت مورد انتظار در خروجی که تحت عنوان راندمان تصفیه نیز مطرح می‌شود از پیش مشخص است (اخروی و همکاران، ۱۳۹۶). لذا با داشتن این اطلاعات با استفاده از معادله (۱) در جدول ۸ (کاربرگ ۲)، میزان سطح بستر تالاب مصنوعی محاسبه خواهد شد. سپس، از معادله (۲) در این کاربرگ، میزان سطح جانبی (مقطع افقی) محاسبه شده و همراه با مقدار پیش‌فرض عمق استخر تالاب و به‌روش سعی و خطا، طول و عرض و عمق سامانه با درنظرگیری ملاحظات طراحی در جدول ۹ تعیین می‌شوند. محققین در پژوهش‌های متعددی عنوان نمودند که حداقل مقدار طول به عرض برای دستیابی به راندمان تصفیه ۷۰ درصد، ۲ است (Su et al., 2009). در کاربرگ شماره ۲، طراحی ابعاد سامانه در قالب سه گام بیان شده و ملاحظات طراحی نیز در جدول ۹ آمده است.

۴- ملاحظات اساسی در امکان‌سنجی سامانه‌های سطحی و زیرسطحی

تالاب‌ها به‌طور ایده‌ال نیازمند مکانی با سطح نسبتاً بزرگ و منبع پیوسته پساب یا رواناب هستند و به‌همین دلیل فاکتورهای

گوناگونی باید به‌طور جداگانه و هم‌زمان ارزیابی شوند. این تحلیل‌ها در هنگام بررسی‌های امکان‌سنجی ساخت سامانه باید صورت گیرد. برای طراحی بهینه سامانه تالاب مصنوعی، سطحی و زیرسطحی، باید موارد زیر به دقت مورد بررسی قرار گیرند:

۱- مساحت زمین موجود، که با توجه به حجم جریان، غلظت آلاینده‌ها و اهداف تصفیه انتخاب می‌شود. تالاب مناسب برای عملیات تصفیه نیازمند مساحت قابل‌توجهی است. در تالاب‌های کوچک کنترل جریان‌های بزرگ حاصل از بارندگی بسیار مشکل است؛

جدول ۸- کاربرگ (۲) طراحی تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی با هدف تصفیه پساب تصفیه‌خانه فاضلاب

گام اول: تعیین کارکرد و هدف طراحی و ساخت تالاب مصنوعی		
گام دوم: تعیین میزان دبی روزانه ورودی به سامانه (Q_d)		
گام سوم: محاسبه ابعاد سامانه تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی		
Q_d	دبی روزانه ورودی به سامانه	m^3/day
C_i	غلظت BOD پساب ورودی	mg/L
C_e	غلظت موردانتظار BOD پساب خروجی	mg/L
H	عمق آب	m
φ	تخلخل محیط بستر تالاب مصنوعی	٪
T	دما	℃
K_{BOD}	ثابت واکنش، $K_{BOD}=(K_T)(H)(\varphi)$	m/day
K_T	$K_T = K_{20}\,(1.06)^{(T-20)}$ (K_{20}، در دمای ۲۰ درجه میزان K مشخص است)	m/day
A_s	مساحت سطح بستر سامانه تالاب مصنوعی، $A_s=\frac{Q_d(\ln C_i-\ln C_e)}{K_{BOD}}$	m^2
K	هدایت هیدرولیکی جریان در محیط اشباع	m/s
dH/ds	شیب خط انرژی یا شیب بستر	m/m
A_c	مساحت سطح مقطع جریان سامانه تالاب مصنوعی، $A_c=\frac{Q_d}{K(dH/ds)}$	m^2

جدول ۹- ملاحظات طراحی سامانه تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی

پارامتر	ملاحظات طراحی
K_{BOD}	میزان نرخ واکنش (K_{BOD}) به دما وابسته است و با افزایش هر درجه سانتی‌گراد، میزان آن ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. لازم‌به ذکر است که ثابت واکنش K_{20}، برابر با ۱/۱ است.
طول به عرض	حداقل میزان طول به عرض برای دریافت میزان راندمان تصفیه معادل ۷۰٪ برابر با ۲ است و با افزایش میزان این نسبت عملکرد هیدرولیکی و راندمان تصفیه سامانه افزایش می‌یابد.
اندازه ذرات محیط	با توجه به دردسترس بودن مصالح در محل، توصیه بر استفاده از ذرات با دامنه بین ۵-۲۰ میلی‌متر برای سامانه تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی شده است. برای جلوگیری از گرفتگی جریان در ورودی و خروجی سامانه توصیه شده است که از ذرات با اندازه ۴۰-۸۰ میلی‌متر استفاده شود.
شیب کف بستر	میزان شیب بستر جریان عموماً بین ۰/۵-۲ درصد است.
آب‌بندی	در صورتی‌که از خاک منطقه برای استخر (محل جریان) استفاده شود باید میزان هدایت هیدرولیکی آن خاک کمتر از 10^{-7} متر بر ثانیه باشد و در غیر این‌صورت لزوم استفاده از پوشش‌های غیرقابل نفوذ مصنوعی مانند ورق‌های پلیمری ژئوممبرین اجتناب‌ناپذیر است.
پیکربندی ورودی و خروجی	اندازه لوله‌های ورودی و خروجی با استفاده از میزان دبی ورودی و خروجی مشخص می‌شوند. جانمایی لوله‌های ورودی و خروجی باید به‌گونه‌ای باشد که آب در ورودی به‌صورت یکنواخت در کل عرض سامانه پخش شده و سپس توسط لوله خروجی نیز در عرض سامانه جمع‌آوری شود. این عمل به حرکت یکنواخت جریان در سامانه می‌انجامد و با کاهش میزان مسیرهای میان‌بر و میزان حجم مرده پساب در سامانه سبب افزایش راندمان هیدرولیکی و تصفیه پساب خواهد شد (اخروی و همکاران، ۱۳۹۶).
گیاهان	گیاهان تالابی عمده در جدول ۵ معرفی شدند. تنها نکته ملزوم، استفاده ترجیحی از گیاهان بومی منطقه با تراکم ساقه و ریشه بیشتر به منظور کارایی بالاتر سامانه است.
پیش‌تصفیه	عموماً تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی به‌منظور تصفیه اضافی پساب خروجی از تصفیه‌خانه فاضلاب یا هر مکان دیگر با آلاینده‌های غیردرشت استفاده می‌شود، لذا پیش‌تصفیه و استفاده از تانک سپتیک ضروری نیست. اگرچه وجود منبع ذخیره ورودی با زمان ماند یک تا دو روز سبب کاهش ورود ذرات معلق به سامانه خواهد شد.

۲- توپوگرافی محل باید نسبتاً یکنواخت باشد. هدف از این امر، ایجاد گرادیان هیدرولیکی مناسب است. در یک منطقه شیب‌دار براساس قانون دارسی، آب در تالاب یا دچار بالازدگی و یا پایین‌رفتگی در ابتدا می‌شود؛

۳- ذرات محیط متخلخل نه تنها بستر رشد و توسعه ریشه گیاهان هستند، بلکه سطح مناسبی برای رشد میکروارگانیزم‌ها نیز فراهم می‌آورند و با متعادل‌سازی جریان در داخل سامانه سبب رسوب آلاینده‌ها می‌شوند. در این راستا انتخاب اندازه و دانه‌بندی ذرات محیط متخلخل با تأثیر مستقیم بر هدایت هیدرولیکی جریان نقش بسیار مهمی در طراحی سامانه ایفا می‌کند. استفاده از ذرات کوچکتر از ۵ میلی‌متر در سامانه تالاب به دلیل هدایت هیدرولیکی پایین و ایجاد جریان سطحی منجر به ماندگاری بیش از حد آب در بستر تالاب و کند شدن بیش از حد حرکت پساب در آن می‌شود (اخروی و همکاران، ۱۳۹۷). این پدیده موجب مسدود شدن سامانه و انباشته شدن پساب در شبکه می‌ششود. اگرچه ذرات ریزتر با ایجاد سطح جذبی بالاتر سبب حذف بیشتر آلاینده‌ها و TSS می‌شوند. درحالی‌که، ذرات بزرگتر با هدایت هیدرولیکی بالا، سطح جذبی پایین‌تری نسبت به حجم محیط میکروبی دارا هستند و عمل تصفیه با نارسایی‌هایی همراه می‌شود. جلوگیری از مخلوط شدن قلوه سنگ‌های لایه‌های محافظتی در ابتدا و انتهای تالاب با ریگ و شن لایه تصفیه‌کننده در وسط بستر نیز از ملاحظات کلیدی است (اخروی، ۱۳۹۳)؛

۴- غلظت آلاینده‌ها، برای طراحی یک سامانه تصفیه پساب با استفاده از تالاب‌های مصنوعی، آگاهی دقیق از میزان بار آلاینده‌های موجود در پساب ضروری است (بار= غلظت آلاینده‌ها×حجم پساب). طراحی سامانه براساس حداکثر بار آلاینده‌ها صورت می‌گیرد. هم‌چنین آگاهی از میزان غلظت آلاینده‌ها در تعیین نیاز به تصفیه مقدماتی پساب قبل از ورود به سامانه ضروری است. پساب تصفیه‌شده در درون تالاب نیز باید به روش مناسب جمع‌آوری شده و در یک مکان مناسب برای استفاده‌های بعدی از قبیل تغذیه سفره‌های زیرزمینی، کشاورزی، آبیاری و یا افزودن به یک منبع سطحی آب نگه‌داری شود. نکته حائز اهمیت در تمامی سامانه‌های بیولوژیکی آن است که غلظت‌های بالای آلاینده‌های خاص به طور موقتی می‌تواند یک سامانه تصفیه‌کننده را در درازمدت دچار مشکل سازند؛

۵- زمان ماند سامانه، بحرانی‌ترین پارامتر برای طراحی سامانه‌های تصفیه طبیعی فاضلاب اعم از سامانه تالاب مصنوعی به‌شمار می‌رود. این زمان در حقیقت زمان لازم برای تصفیه آلاینده‌ها است. به‌طور خاص راندمان تصفیه در این نوع تالاب‌ها با زمان ماند هیدرولیکی ارتباط نزدیکی دارد. این ارتباط از جایی مشخص می‌شود که حذف آلاینده‌ها زمانی رخ داده که زمان تماس بین زیست‌توده‌های فعال و آب آلوده به اندازه کافی طولانی باشد تا فرآیندهای بیولوژیکی و واکنش‌های آب قادر به حذف آلاینده‌ها شوند. کاهش در مقدار این زمان سبب نقصان در عملیات تصفیه شده و افزایش آن نیز صرفه اقتصادی نداشته و سامانه دیگر مقرون به‌صرفه نخواهد بود. بنابراین تعیین این زمان نیازمند طراحی مهندسی است (Okhravi et al., 2017)؛

۶- محیط متخلخل، عایق‌سازی محیط شنی به‌منظور حفظ پساب در تالاب و ممانعت از نفوذ فاضلاب به آب‌های زیرزمینی ضروری است. در این مورد مشکلات کنترل نفوذ فاضلاب به آب‌های زیرزمینی مطرح می‌شود و سطح بالای آب زیرزمینی ممکن است تأسیسات را با مشکل مواجه سازد؛

۷- آب و هوا، به‌دلیل این که تالاب‌ها دارای جریان کم‌عمق و با سطحی باز نسبت به اتمسفر هستند به‌میزان زیادی تحت‌تأثیر اقلیم منطقه هستند. بارندگی، ذوب برف، رواناب‌های سطحی، دوره‌های خشکی و دما از عواملی هستند که بر روند تصفیه در تالاب‌ها اثرگذارند. جریان‌های زیاد در هنگام وقوع باران و ذوب برف‌ها باعث کاهش زمان نگهداشت جریان در تالاب می‌شوند. بنابراین ممکن است در فصل بارندگی به‌دلیل افزایش سرعت جریان و کاهش زمان تماس آن با سطح تالاب، از کارایی سامانه کاسته شود. به همین دلیل پیشنهاد می‌شود که برای اجتناب از جریان‌های اضافی درون سامانه، رواناب‌های با دبی بیشتر از دبی طرح از محل تالاب منحرف شوند. هم‌چنین، راندمان تصفیه در آب و هوای سرد عموماً پایین‌تر است و سامانه‌های ساخته شده در هوای سرد نیاز به مساحت بزرگتر یا عملکرد خاص برای دستیابی به اهداف تصفیه را دارند. در آب و هوای گرم سامانه نیازمند منابع اضافی آب برای جلوگیری از خشک شدن است (اخروی و همکاران، ۱۳۹۴-الف)؛

۸- شرایط بیولوژیکی و فاکتورهای بومی، استفاده از این راه‌کار در نزدیکی انسان‌ها با بوم‌های حیات وحش خاص با هدف جلوگیری از به‌خطر افتادن زندگی آن‌ها، نیازمند مطالعات ریخت‌شناسی در منطقه است.

۵- بحث و جمع‌بندی (چالش استفاده و راه‌کار)

از سال ۱۹۵۰ با طرح سامانه‌های تالاب مصنوعی برای تصفیه فاضلاب در ابعاد و طرح‌های مختلف، اکنون این سامانه به‌عنوان روش تصفیه تکمیلی پساب در اروپا و به‌خصوص در مناطق

روستایی ترویج یافته و تقریبا ۹۵ درصد سامانه‌های موجود در این قاره دارای جریان زیرسطحی هستند. تعداد آن‌ها تنها در اروپا بیش از ۱۰۰۰۰ واحد تا سال ۲۰۰۶ گزارش شده است (Morel and Diener, 2006). براساس توانایی زیاد سامانه تالاب مصنوعی در تصفیه پساب، تعداد بی‌شماری از کنفرانس‌های بین‌المللی برای به بحث گذاشتن اطلاعات علمی و تجربی به‌منظور طراحی و ساخت آن برگزار شده است. علاوه‌بر این، انجمن جهانی آب هر دو سال همایشی در این رابطه با عنوان سامانه‌های تالابی برای کنترل آلودگی از سال ۱۹۹۸ برگزار می‌نماید. برگزاری چنین همایشی سبب توجه بیش از پیش به قدرت سامانه تالاب مصنوعی برای تصفیه و کنترل آلودگی شده است. از نتایج این رویدادها می‌توان به تصویب یک قانون جدید (شماره ۱۵۲ سال ۱۹۹۹) و اجرای حکم ۹۱/۲۷۱ درباره تصفیه پساب‌ها به وسیله تالاب مصنوعی در کشور ایتالیا اشاره نمود. استفاده از تالاب‌های مصنوعی به ویژه برای مراکز شهرها با دامنه متوسط جمعیت ۱۰ تا ۲۰۰۰ نفر در واحد سطح به منظور تخلیه در آب‌های سطحی و دامنه ۱۰ تا ۱۰۰۰۰ نفر در واحد سطح به‌منظور تخلیه در آب دریا و تسهیلات گردشگری و دیگر منابع متمرکز با نوسان شدید مواد آلی توصیه و به‌عنوان گزینه‌ای برای استفاده مجدد از پساب به خصوص در کشورهای در حال توسعه مطرح شده است (Morel and Diener, 2006). با این تفاسیر نیاز است که کشور ایران نیز در این زمینه گامی بلند برداشته و با تهیه دستورالعمل طراحی سامانه تالاب مصنوعی و استفاده مجدد از پساب زمینه را برای کاهش فشار بر منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی ایجاد کند.

بدین منظور باید در ابتدا موانع موجود در مسیر ایجاد این تحول در عرصه بازیافت آب به‌صورت ریشه‌ای برطرف شود تا این راه‌کار به‌صورت مناسب در مناطق مختلف جانمایی شود. از جمله نکات مهم، توجه به قیمت‌گذاری کافی اما واقعی آب برای بازیابی هزینه‌ها و نیز ترغیب حفاظت منابع آب است. در موارد متعدد، آب شیرین برای آبیاری بدون توجه به قیمت تمام شده در اختیار کشاورزان قرار می‌گیرد. این امر نه‌تنها انگیزه حفاظت منابع آب را کاهش می‌دهد بلکه هرگونه تلاش برای برطرف کردن بخشی از نیاز آبیاری با پساب تصفیه شده به قیمت تمام شده را به‌خطر می‌اندازد. مانع بالقوهٔ دیگر برای الزام کشاورزان به استفاده از پساب تصفیه شده آن است که اغلب آن‌ها اکنون فاضلاب خام را برای آبیاری استفاده می‌کنند و بنابراین منافع زراعی و خطرات بهداشتی استفاده مجدد را به درستی نشناخته‌اند. در این موارد ممکن است کشاورزان در برابر تحمیل هزینه‌های آب که برای جبران بخشی از هزینه سامانه تصفیه است، مقاومت کنند. هم‌چنین، خارج از حوزه کشاورزی نیز پساب‌های نامتمرکز به‌صورت خام وارد محیط شده و کارفرمایان تنها با پرداخت جریمه از این مسئولیت مهم سرباز می‌نمایند. دلیل این امر هم‌چنان که پیش‌تر نیز گفته شد، جنبه اقتصادی است که کارفرما جریمه محیط‌زیست را کمتر از هزینه تصفیه آن می‌بیند. لذا اگر طرح‌هایی ارزان قیمت از قبیل تالاب مصنوعی توجیه و تبلیغ شود، می‌تواند جایگاه خود را پیدا نموده و این چالش بزرگ پیش‌رو را رفع نماید. بنابراین خط‌مشی‌های ملی (به شکل طرح‌های اصلی منابع آب، طرح‌های حوزه رودخانه و قانون‌گذاری) باید تخصیص آب شیرین برای استفاده انسان را به‌عنوان یک اولویت قرار دهند و دستورالعمل‌هایی را برای کیفیت پساب و آب‌های برگشتی ایجاد کنند، به‌طوری که استفاده مجدد آن برای مقاصد کشاورزی، خانگی یا صنعتی را ترغیب نماید.

با توجه به مزایای سامانه تالاب مصنوعی و اقلیم گرم و خشک بسیاری از شهرهای ایران و کمبود شدید آب، لزوم توجه بیشتر برای تصفیه اضافی پساب شهری به هدف امکان استفاده مجدد در مناطق مختلف انکارناپذیر است. به‌همین دلیل انواع سامانه‌های تالاب مصنوعی با توجه به منطقه، قابلیت جانمایی دارند. برای مطالعه و مکان‌یابی مناطق مستعد جانمایی سامانه‌های تالاب مصنوعی، ابتدا باید اقلیم و وضعیت زمینی یک منطقه به دقت بررسی و سپس امکان قرارگیری سامانه نسبت به محل تأمین پساب و همچنین محل مصرف پساب تصفیه شده مشخص شود. در نهایت، توجیه اقتصادی طرح انتقال پساب برای محل مصرف بررسی شود. با توجه به تجربیات محققین این پژوهش اقدامات مورد نیاز برای جانمایی سامانه‌های تالاب مصنوعی به‌عنوان گزینه مناسب تصفیه اضافی پساب شهری و امکان استفاده از این منبع پایدار در هر منطقه و مکان را می‌توان به‌صورت زیر تعریف نمود:

۱) توجه به مسائل مربوط به محل احداث پروژه از جمله قیمت زمین و مساحت در دسترس و طرح‌هایی که در آن مکان در آینده ساخته خواهد شد؛

۲) میزان فاصله از منبع تأمین پساب شهری به هدف انتقال پساب به محل طرح و همچنین راه‌های دسترسی؛

۳) بررسی اقلیم و آب و هوای منطقه؛

۴) بازرسی خاک محل برای تعیین بافت و نفوذپذیری خاک؛

۵) بررسی شیمی خاک و تأثیر سطح آب زیرزمینی و جریان‌های سطحی بر کیفیت آب مکان طرح؛

۶) ارزیابی پوشش گیاهی در محل برای اطمینان از قابلیت حیات و نحوه پاسخ به شرایط هیدرولوژیکی طرح؛

۷) تعیین مقادیر در دسترس مصالح مورد نیاز برای بستر، دانه و

ذخیره گیاهی موجود و وجود بستر مناسب برای احداث تالاب؛
۸) دریافت اطلاعات کامل در مورد منبع تأمین پساب موردنظر از جمله غلظت آلاینده و میزان املاح محلول و باکتری (انجام آزمایشات متعدد فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی بر پساب دریافتی به‌منظور طراحی دقیق سامانه الزامی است)؛
۹) محاسبه و طرح ابعاد سامانه تالاب مصنوعی مورد نظر براساس موارد مطرح شده؛
۱۰) بررسی فاکتورهای بومی، بیولوژیکی و محیط‌زیستی منطقه و درصورت نیاز طرح مجدد سامانه.

تحقیقات نویسندگان نشان داده است که مکانی برای طرح تالاب مصنوعی مناسب است که حتی‌الامکان در نزدیکی منبع پساب قرارداشته و دارای فضای کافی، شیب مناسب و خاک قابل تراکم باشد (برای جلوگیری از نشت و ورود آب‌های زیرزمینی)، در دشت‌های سیلابی واقع نشده و بالای سطح آب زیرزمینی باشد. هم‌چنین، دارای گونه‌های تهدیدکننده و خطرناک نبوده و در مناطق باستانی و تاریخی قرار نداشته باشد. البته تصفیه پساب با استفاده از این سامانه نیز دارای محدودیت‌هایی از قبیل وسعت زمین، عدم قطعیت تصفیه مؤثر در تمامی شرایط محیطی و اقلیمی، حساسیت به سطح بالای آمونیاک و گاهاً تجمع حشرات است که با طراحی بهینه سامانه به حداقل خواهند رسید. به‌عنوان نمونه، این راه‌کار نیازمند زمین نسبتاً وسیعی بوده و بالتبع در مکان‌هایی با هزینه زمین کمتر، اقتصادی‌تر است. براساس نتایج پژوهش انجام شده در تالاب مصنوعی ساخته شده در اصفهان به‌وسیله سازمان آب منطقه‌ای اصفهان، یک سامانه تالابی به‌عنوان گزینه تصفیه پیشرفته در مقایسه با سامانه‌های تصفیه پیشرفته متعارف، هزینه‌ای در حدود یک-سوم آن را داشته و این در حالی است که سامانه تالاب علاوه‌بر مزیت اقتصادی و عدم دشواری در بهره‌برداری نسبت به سامانه‌های صنعتی، از مزایایی چون افزایش فضای سبز و بوم حیات‌وحش در منطقه، کاهش مصرف انرژی (در مقایسه با سامانه‌های دیگر)، عملیات و بهره‌برداری کمتر، راندمان تصفیه بالا و توانایی در حذف آلاینده‌های خطرناکی چون ترکیبات هورمونی برخوردار است. هم‌چنین منافع حاصل از کاهش هزینه تصفیه و دفع فاضلاب و نیز رشد بهره‌وری کشاورزی به‌خوبی سرمایه‌گذاری برای استفاده مجدد از پساب در عرصه کشاورزی را توجیه می‌کنند. به‌عنوان نمونه تجربیات سایر کشورها نشان داده است که استفاده از پساب تصفیه‌شده در آبیاری گزینه‌ای بسیار جذاب برای کشاورز بوده حتی اگر خود کشاورز متحمل پرداخت هزینه تصفیه شود. به‌خصوص این امر در مناطقی که آب سهل‌الوصول دیگری ندارد و زمین‌های زراعی پهناوری در مجاورت منبع پساب هستند، سبب اشتیاق سرمایه‌گذاری کشاورزان در استفاده مجدد از پساب می‌شود. این مورد درحقیقت مزیت منطقه‌ای بودن سامانه تالاب مصنوعی برای تصفیه پساب‌های نامتمرکز از قبیل پساب یک واحد صنعتی کوچک یا متوسط و یا برطرف‌سازی نیاز کشاورز را نشان می‌دهد. بنابراین لازمه اجرای موفقیت‌آمیز هرگونه پروژه بهره‌برداری از پساب آن است که پس از تدوین دستورالعمل‌ها، قوانین و مقررات تدوین شوند و با ایجاد زیرساخت‌های لازم پیش از عملیاتی نمودن آن و حتی به موازات اجرای آن، برنامه‌های مفصل و ویژه‌ای با هدف آموزش عمومی جامعه و اطلاع‌رسانی گسترده برای شفاف ساختن واقعیت‌ها تدوین و اجرا شوند.

۶- خلاصه و نتیجه‌گیری

تأمین آب از مسائل حیاتی کشور در تمامی سازمان‌های مرتبط اعم از استانداری، سازمان آب منطقه‌ای، سازمان آب و فاضلاب و همچنین شهرداری است. طرح این‌گونه روش‌ها به‌صورت کاربردی سبب مشارکت در تأمین آب مطابق با اصول توسعه پایدار خواهد بود. علاوه‌بر این ایجاد تالاب‌های مصنوعی به‌صورت منطقه‌ای قادر به تأمین آب با کیفیت مناسب برای کشاورزان با هدف کشت و کار و بازیابی اراضی بیابانی است. هم‌چنین، برای کارخانجات و تولیدی‌ها در مناطقی که دسترسی به منابع آبی برای آن‌ها مقدور نیست و یا گران تمام می‌شود، گزینه مناسبی است. با توجه به مزیت‌های ارائه شده برای این سامانه، استفاده از سامانه تالاب مصنوعی راه‌کاری مناسب برای تصفیه پساب است که مخصوصاً در کشور ایران به آن کم‌تر توجه شده است. امروزه این راه‌کار جایگاه ویژه‌ای در کشورهای پیشرفته به‌خود اختصاص داده است تا آن‌جایی که کشورهایی توسعه‌یافته قوانین و آیین‌نامه‌هایی را برای اجرای اینگونه سامانه‌ها تدوین و اعمال نموده‌اند. با توجه به قوانین تصویب شده توسط مجامع عمومی وآژانس‌های نظارتی، امید است تحقیقات و پژوهش‌های کاربردی ایجاد شده در این زمینه با ارائه معیارهای طراحی در دفتر استانداردها و طرح‌های آب و آبفا تصویب شده و برای استفاده شرکت‌های مشاور و پیاده‌سازی به‌عنوان یک گزینه تصفیه پیشرفته در سطح کشور مورد استفاده قرار گیرند.

۷- پی‌نوشت‌ها

1- Biochemical Oxygen Demand (BOD)
2- Chemical Oxygen Demand (COD)

3- Total Suspended Solids (TSS)
4- Constructed Wetland
5- Total Kjeldahl Nitrogen (TKN)
6- Total Dissolved Solids (TDS)
7- Required Rian Event (RRE)
8- Entered Water Volume (EWV)
9- Provided Water Volume (PWV)
10- Managed Water Volume (MWV)
11- Remaining Water Volume (RWV)

۸- مراجع

اخروی، س.س.، (۱۳۹۳)، "بررسی توزیع جریان بر رفتار هیدرولیکی و راندمان تصفیه تالاب مصنوعی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

اخروی، س.س.، اسلامیان، س.س.، و فتحیان‌پور، ن.، (۱۳۹۶)، "مدل‌سازی نوع توزیع جریان ورودی بر رفتار هیدرولیکی داخلی سامانه تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی"، *دو ماهنامه علمی-پژوهشی آب و فاضلاب*، ۲۹(۴)، ۱۴۵-۱۵۶.

اخروی، س.س.، اسلامیان، س.س.، و فتحیان‌پور، ن.، (۱۳۹۷)، "مطالعه عددی و آزمایشگاهی رفتار هیدرولیکی تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی در توزیع‌های متفاوت جریان"، *نشریه علمی-پژوهشی آب و خاک*، ۳۲(۶)، ۱۰۴۱-۱۰۵۴.

اخروی، س.س.، اسلامیان، س.س.، و محمدزاده میاب، ن.، (۱۳۹۴-الف)، "بررسی و مقایسه کارکرد انواع سیستم‌های تالاب مصنوعی در جهت تصفیه پساب"، *اولین کنفرانس مهندسی آب با محوریت تجاری‌سازی، کنفرانس و نمایشگاه مهندسی آب*، ۲۶-۲۵ مهر ماه، مرکز همایش‌های صدرا تهران.

اخروی، س.س.، اسلامیان، س.س.، فتحیان‌پور، ن.، و حیدرپور، م.، (۱۳۹۴-ب)، "بررسی توزیع جریان بر زمان ماند و رفتار هیدرولیکی تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی (مطالعه موردی: اصفهان)"، *مجله علوم آب و خاک*، ۱۹(۷۴)، ۱۰۰-۸۹.

اسلامیان، س.س.، و اخروی، س.س.، (۱۳۹۴)، "نگاه کمی به پدیده تغییر اقلیم و راهکارهای سازش با آن"، *مجله علمی ترویجی سامانه‌های سطوح آبگیر باران*، ۸(۳)، ۱۵-۲۶.

امینی‌راد، ح.، عظیمی، ع.ا.، ناصری، ن.، و گلبابایی، ف.، (۱۳۹۰)، "تصفیه تکمیلی فاضلاب صنایع داروسازی با استفاده از تالاب مصنوعی، مطالعه موردی کارخانه داروسازی ایران"، *کنفرانس بین‌المللی آب و فاضلاب*، ۶-۸ اردیبهشت ماه، شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور، تهران.

سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، (۱۳۸۳)، *طرح مطالعات برنامه سازگاری با اقلیم خشک و نیمه‌خشک*، گزارش آب مورد نیاز شهری و روستایی، شرکت مهندسین مشاور جاماب.

مشینچی، پ.، اقدسی‌نیا، ح.، پیغمبردوست، س.ج.، زارعی، م.، رهبری آسیابی، ح.، و محمدیان سودمند، ا.، (۱۳۹۸)، "مروری بر فرآیند جذب سطحی در حذف آلاینده‌های دارویی از محلول‌های آبی و پساب‌ها"، *نشریه علمی علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۴(۴)، ۳۴-۵۰.

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، (۱۳۸۹)، *ضوابط زیست‌محیطی استفاده مجدد از آب‌های برگشتی و پساب‌ها*، دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا، نشریه شماره ۵۳۵.

وزارت نیرو، (۱۳۹۲)، *گزارش طرح کلان ملی دانش و فناوری بازیافت پساب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی، شناسایی استانداردها و قوانین جهانی و کشور در زمینه تصفیه و بازیافت پساب‌ها*، دانشگاه تهران، ایران.

EPA, (2012), *Guidelines for water reuse*, EPA Office of Research and Development: Washington, DC, USA.

Eslamian, S., Okhravi, S., and Eslamian, F., (2019), *Constructed wetland: Hydraulic design*, Taylor and Francis Group, CRC Press, 88 pages.

Fazlolahi, H., and Eslamian, S., (2014), "Using wetland plants in nutrient removal from municipal wastewater", *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 4(1), 68-80.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), (2010), *Aquastat database*, http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm

King, A.C., Mitchell, C.A., and Howes, T., (1997), "Hydraulic tracer study in a pilot scale subsurface flow constructed wetland", *Water Science and Technology*, 35(5), 189-196.

Lautze, J., Stander, E., Drechsel, P., da Silva, A.K., and Keraita, B., (2014), *Global experiences in water* reuse, *Colombo, Sri Lanka*, International Water Management Institute (IWMI), CGIAR Research Program on Water, Land and Ecosystems (WLE), 31p., Resource Recovery and Reuse Series, 4.

Morel, A., and Diener, S., (2006), *Grey water management in low and middle-income countries*, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Dubendorf, Switzerland.

Okhravi, S., Eslamian, S., and Dalezios, N.R., (2019), "Reducing water shortage crisis through rainwater reuse: lessons learned from ancient toward integrated technology", *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 9(6), 587-602.

Okhravi, S., Eslamian, S., and Fathianpour, N., (2017), "Assessing the effects of flow distribution on the internal hydraulic behavior of a constructed horizontal subsurface flow wetland using a numerical model and a tracer study", *Ecohydroloy & Hydrobiology*, 17(4), 264-273.

Platzer, C., (1998), "Design recommendation for subsurface flow constructed wetlands for nitrification and denitrification", *Proceedings of the 6th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control*, Sao Paulo State, Brazil.

Sato, T., Qadir, M., Yamamoto, S., Endo, T., and Zahoor, A., (2013), "Global, regional, and country level need for data on wastewater generation, treatment, and use", *Agricultural Water Management*, 130(2013), 1-

13.
Seidel, K., Happel, H., and Graue, G., (1976), *Contribution to revitalization of waters*, Limnologische Arbeitsgruppe in der Max Planck Gesellschaft, Krefeld Hulserberg, Germany.
Sivakumar, B., (2011), "Water crisis: from conflict to cooperation-an overview", *Hydrological Sciences Journal*, 56(4), 531-552.
Su, T.M., Yang, S.C., Shih, S.S., and Lee, H.Y., (2009), "Optimal design for hydraulic efficiency of free-water-surface constructed wetlands", *Ecological Engineering*, 35(8), 1200-1207.
Tilley, E., Ulrich, L., Luethi, C., Reymond, P., and Zurbruegg, C., (2014), *Compendium of sanitation systems and technologies*, 2nd Revised Edition, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag), Duebendorf, Switzerland.
U.N. Water, (2017), *Waste water: The untapped resources, facts and figure*, The United Nations World Water Development Report.
UNESCO (United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization), (2010), *Atlas of* transboundary *aquifers: Global maps, regional cooperation, and local inventories*, International Hydrological Programme, Paris.
UN-HABITAT, (2008), *Constructed wetlands manual*, UN-HABITAT Water for Asian Cities Programme, Nepal, Kathmandu.
United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division, (2007), *World population prospects: The 2006 revision, highlights*, Working Paper No. ESA/P/WP.2