



## مطالعه عددی و آزمایشی رفتار هیدرولیکی تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی در توزیع‌های متفاوت جریان

سید سعید اخروی<sup>۱\*</sup> - سید سعید اسلامیان<sup>۲</sup> - نادر فتحیان پور<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۱۱

### چکیده

بررسی رفتار هیدرولیکی داخلی سامانه تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی در جهت بهینه‌سازی طراحی امری ضروری است. بدین منظور، این پژوهش اثرات نحوه توزیع جریان ورودی را در سه آرایش متفاوت شامل: (A) حالت ورودی وسط، (B) ورودی گوشه و (C) ورودی یکنواخت به صورت آزمایشی و عددی بررسی نمود. در تمامی حالات، خروجی در وسط سامانه ثابت بوده است. شبیه‌سازی عددی بر پایه معادله جریان زیر سطحی در محیط‌های متخلخل (دارسی) با نرم‌افزار کامسول انجام و سپس توسط داده‌های آزمایشی واسنجی شد. تحلیل منحنی زمان ماند حاصل از مطالعه آزمایشی نشان داد که توزیع یکنواخت جریان با افزایش پخشیدگی جریان و کاهش مسیرهای میان‌بر سبب افزایش زمان ماند میانگین و در نتیجه راندمان هیدرولیکی سامانه می‌شود. شبیه‌سازی جریان داخلی این آرایش نیز حاکی از توزیع همگون فشار و خطوط جریان در طول سامانه می‌باشد. دامنه تغییرات فشار درون سامانه در سه آرایش به ترتیب ۱۴، ۱۲ و ۱۰ سانتی‌متر آب است. اختلاف زیاد فشار در نواحی پرفشار و کم‌فشار در آرایش ورودی گوشه ناشی از توزیع ناهمگون جریان ورودی بوده که با ایجاد مسیرهای میان‌بر متعدد سبب کاهش زمان ماند میانگین و حجم مؤثر در سامانه می‌شود. حجم مؤثر در این آرایش ۶۲/۱ درصد می‌باشد در حالی که در دو آرایش دیگر ۸۷/۵ درصد است. با توجه به تعریف جریان ایده‌آل در تالاب مصنوعی می‌توان نتیجه گرفت که ورودی یکنواخت به جهت پخشیدگی جریان بالاتر، حجم مرده و میزان مسیرهای میان‌بر کمتر به عنوان بهترین آرایش ورودی جریان شناخته می‌شود و سپس آرایش ورودی وسط دارای عملکرد مناسبی می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** آرایش ورودی جریان، تغییرات فشار، زمان ماند هیدرولیکی، شبیه‌سازی، مسیرهای میان‌بر

### مقدمه

بستر (محیط متخلخل)، گیاه، عایق آب‌بند و قسمت‌های ورودی و خروجی می‌باشد. فاضلاب ورودی به این سامانه به واسطه حضور عواملی مانند گیاه، میکروارگانیزم و ماده بستر تحت تأثیر فرایندهای مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک قرار گرفته و تصفیه می‌شود. این سامانه‌ها بر اساس الگوی جریان به سه دسته جریان آزاد سطحی، زیرسطحی افقی و عمودی تقسیم‌بندی می‌شود (۳). انتخاب نوع طراحی سامانه علاوه بر توجه به توصیف جنبشی واکنش‌های بیولوژیکی تصفیه، به آگاهی از کارکرد الگوی جریان در سامانه نیز وابسته است (۱۲).

تا به امروز، تمرکز تحقیق بر پارامترهای بیولوژیک سامانه‌های تالاب مصنوعی نظیر رابطه بین میکروارگانیزم‌ها، نوع گیاهان و اثربخشی خاص هر کدام در میزان راندمان تصفیه، انواع محیط‌های متخلخل با دانه‌بندی و هدایت هیدرولیکی متفاوت و تغییرات میزان تصفیه مرتبط با آن‌ها بوده است (۹، ۲۲ و ۲۳). در مقایسه، مطالعات بسیار محدودی پیرامون رفتار هیدرولیکی داخلی سامانه‌های تالاب مصنوعی و پارامترهای مؤثر بر آن صورت گرفته است. در حالی که

یکی از راهکارهای مدیریت پایدار منابع آب، استفاده مجدد از پساب می‌باشد که با توجه به طیف وسیع آلاینده‌های زیست‌محیطی موجود در آن، نیازمند تصفیه اضافی و استانداردهای بر اساس نوع مصرف است. امروزه با توجه به هزینه‌های بالای راهکارهای متداول تصفیه، استفاده از روش‌های زیستی چون تالاب‌های مصنوعی جهت کاهش آلاینده‌های اینگونه پساب‌ها، افزایش چشمگیری یافته است. تالاب مصنوعی<sup>۴</sup> به عنوان سامانه تصفیه طبیعی و سازگار با محیط‌زیست شامل حوضچه‌ای آب‌بندی شده با عناصری از قبیل ماده

۱- دانشجوی دکتری مهندسی سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان

\*- نویسنده مسئول: (Email: S.okhravi94@basu.ac.ir)

۲- استاد گروه آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- دانشیار گروه اکتشاف معدن، دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

DOI: 10.22067/jsw.v32i6.60864

4- Constructed Wetland

یکی از موارد اثرگذار بر رفتار هیدرولیکی داخلی سامانه، نحوه قرارگیری ورودی‌ها و خروجی‌های جریان می‌باشد (۲۱). به عنوان نمونه سو و همکاران (۱۹) در سال ۲۰۰۹ نشان دادند زمانی که نسبت طول به عرض در تالاب‌های مصنوعی با جریان سطحی بیشتر از ۵ باشد راندمان هیدرولیکی به ۹۰ درصد و حتی بیشتر خواهد رسید. همچنین در پژوهش این محققین، راندمان هیدرولیکی آرایش ورودی یکنواخت-خروجی وسط در تالاب مصنوعی سطحی با نسبت طول به عرض ۱/۸ برابر با ۸۸ درصد بدست آمد. درحالی که، این مقدار در آرایش ورودی گوشه-خروجی گوشه معادل با ۶۵ درصد برآورد شده است که بیانگر وجود مسیرهای میان‌بر متعدد در این آرایش ورودی و خروجی جریان است. در پژوهشی در سال ۲۰۱۲ اثرات پارامترهای طراحی مانند نسبت طول به عرض، اندازه متوسط ذرات در محیط متخلخل و نرخ بار هیدرولیکی بر جریان بدون آشفتگی و حجم مرده در تالاب‌های مصنوعی با جریان افقی زیرسطحی مورد بررسی قرار گرفت (۷). نتایج نشان داد که نسبت طول به عرض بالاترین تأثیر را بر رفتار هیدرولیکی سامانه دارد. افزایش این نسبت نشان داد که با نزدیک شدن زمان ماند واقعی به زمان ماند اسمی، جریان به حالت یکنواخت و با حجم مرده کم‌تر نزدیک می‌گردد. افزایش بار هیدرولیکی به دلیل افزایش آشفتگی جریان تأثیر منفی بر عملکرد سامانه داشته است. محققین این پژوهش سامانه‌ای با ترکیبی از نسبت طول به عرض و نرخ بار هیدرولیکی بالا و اندازه ذرات ریزتر به منظور دستیابی به بالاترین راندمان هیدرولیکی در این سامانه پیشنهاد نمودند.

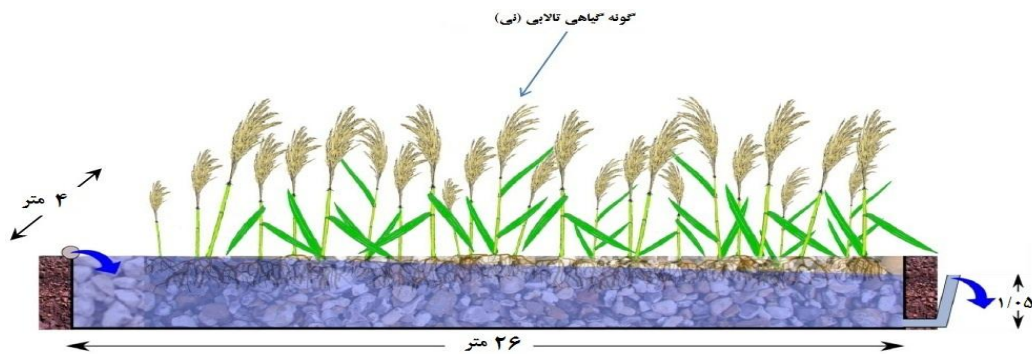
به دلیل اهمیت بالای رفتار هیدرولیکی داخلی سامانه تالاب مصنوعی بر عملکرد آن، ساختارهای متفاوتی از جریان ورودی و خروجی در این پژوهش به صورت آزمایشی بررسی و سپس مدل‌سازی شد تا اثرات آرایش ورودی و خروجی بر پخشیدگی جریان و عملکرد هیدرولیکی سامانه تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی مشخص شوند.

### مواد و روش‌ها

در این پروژه، از تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی با نسبت طول به عرض ۶/۵ و شیب یک درصد استفاده شده است (شکل ۱). در این سامانه، برای غیرقابل نفوذسازی بستر، از ورق ۱/۵ میلی‌متری ژئوممبران استفاده شده است. پساب مورد استفاده در این سامانه از تصفیه‌خانه شمال اصفهان به محل پروژه در جاده حیب‌آباد، ۷ کیلومتری جاده قدیم نائین انتقال یافته است. در حقیقت کارکرد سامانه تالاب مصنوعی، تصفیه پیشرفته پساب خروجی از تصفیه‌خانه فاضلاب و رسیدن به استانداردهای استفاده در عرصه کشاورزی و آبیاری و یا تغذیه به محیط‌زیست می‌باشد.

برای بهینه‌سازی طراحی و افزایش راندمان حذف آلاینده‌ها در سامانه تالاب‌های مصنوعی، توجه به اثرات پارامترهای مؤثر بر رفتار هیدرولیکی سامانه نظیر نرخ بار هیدرولیکی<sup>۱</sup>، نسبت طول به عرض، ساختار ورودی و خروجی جریان، عمق آب و اندازه متوسط ذرات امری ضروری به نظر می‌رسد. بدین منظور از ردیاب‌ها برای تحلیل هیدرودینامیکی تالاب‌های مصنوعی و ویژگی‌های مسیرهای جریان زیرسطحی با استفاده از ترسیم منحنی زمان ماند هیدرولیکی استفاده می‌گردد. بررسی اثرات رفتار هیدرولیکی جریان بر راندمان تصفیه ارتباط تنگاتنگی با زمان ماند هیدرولیکی دارد (۲۰). مطالعات نشان داده است که در سامانه تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی با افزایش زمان ماند هیدرولیکی از ۶ به ۹ روز، راندمان حذف BOD از ۷۲ درصد به ۹۲/۵ درصد و راندمان حذف COD از ۲۸ درصد به ۶۴/۵ درصد افزایش یافته است (۱۱).

محققین متعددی با توسعه مدل‌های عددی، رفتار هیدرولیکی، شیمیایی و بیولوژیکی در تالاب‌های مصنوعی سطحی و زیرسطحی را شبیه‌سازی نموده‌اند (۴، ۵، ۱۰). گالوا در سال ۲۰۱۰ با شبیه‌سازی جریان در تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی، در نظرگیری مشخصات هیدرولیکی بر شرایط جریان را از اهم موضوعات برای طراحی سامانه تالاب مصنوعی عنوان نمود (۴). سمسو و گارسیدار سال ۲۰۱۳ از نرم‌افزار کامسول به هدف مدل‌سازی انتقال مواد بیوشیمیایی و فرایند تجزیه مواد آلی، نیتروژن و سولفور در تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی استفاده نمودند. همچنین آن‌ها میزان زمان لازم برای ثابت شدن جوامع باکتری‌ها برای عملیات بهینه تصفیه و توزیع باکتری‌ها در سامانه تالاب مصنوعی را مشخص نمودند. نتایج مدل‌سازی نشان داد که جوامع باکتری‌ها پس از ۸۰ روز از بهره‌برداری تالاب مصنوعی در سامانه به پایداری رسیده‌اند (۱۷). همچنین سمسو با ارائه تئوری کارتریج در سال ۲۰۱۴ به بررسی توابع اثرگذار بر الگوهای حرکت باکتری‌ها و فرایند تجزیه در داخل سامانه تالاب مصنوعی پرداخت. تئوری حاصل شده از نتایج شبیه‌سازی به خوبی محدوده مناطق مستعد گرفتگی را نمایش و نحوه حرکت باکتری‌ها در تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی را با استفاده از مدول هیدرولیکی جریان در محیط متخلخل مشخص نمود (۱۸). چنگ و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی عددی تالاب‌های مصنوعی زیرسطحی افقی عمیق و کم‌عمق در حضور صفحات انحراف جریان به منظور افزایش راندمان هیدرولیکی سامانه پرداختند. نتایج مدل‌سازی آن‌ها نشان داد که برخلاف تصور پیشین، سامانه‌های عمیق به همراه صفحات مذکور به طرز قابل توجهی با ایجاد مسیرهای جریان مارپیچی و کاهش میزان مسیرهای میان‌بر سبب افزایش راندمان هیدرولیکی و یکنواختی جریان و سرانجام افزایش راندمان تصفیه آلاینده‌ها می‌شوند (۲).



شکل ۱- ابعاد سامانه تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی

Figure 1- Schematic of horizontal sub-surface flow constructed wetland (HSSF CWs)

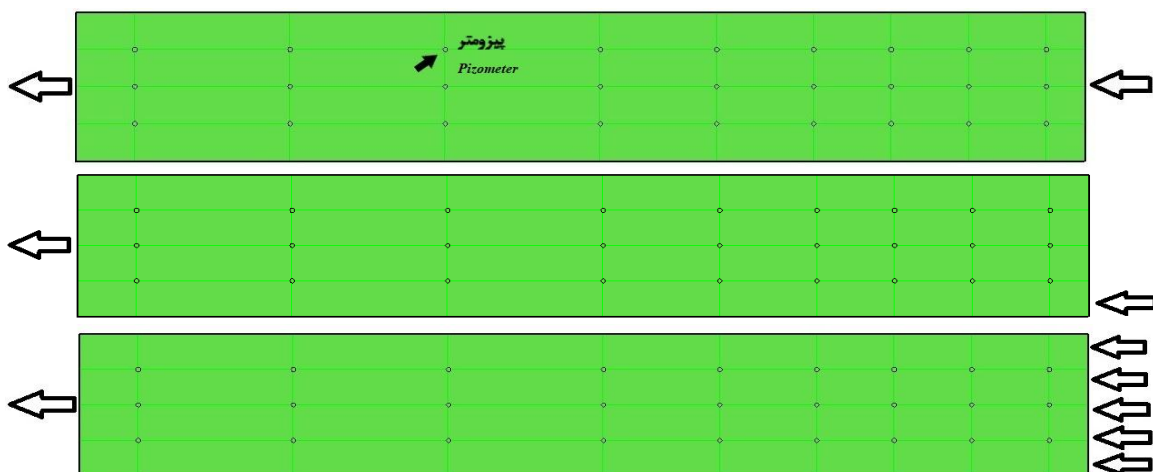
توزیع جریان به حداکثر خود برسد. این سامانه دارای لوله ورودی از جنس PVC در سطح و یک لوله PVC در قسمت انتهایی برای خروج پساب در نظر گرفته شده است. در پایان، لوله خروجی به لوله عمودی با مقطع باز به اتمسفر به هدف مشاهده سطح آب و نمونه برداری وصل شده است.

به عنوان هدف اصلی این پژوهش که شبیه سازی توزیع جریان در سامانه و محاسبه زمان ماند هیدرولیکی میانگین بوده است، سه حالت مختلف قرارگیری ورودی جریان در سامانه مورد آزمایش قرار گرفت که شامل (۱) ورودی وسط (A) (۲) ورودی در گوشه (B) و (۳) ورودی یکنواخت در تمام عرض (C) تنظیم شد. در تمام حالات ورودی، خروجی سامانه از وسط بود (شکل ۲). برای تعیین روند حرکت آب در محیط متخلخل تالاب مصنوعی نیز از ۲۷ عدد پیزومتر به صورت ۹ ردیف ۳ تایی مطابق با شکل ۲ استفاده شد. پیزومترها با هدف نمایش چگونگی حرکت آب در سامانه، واسنجی مدل و بازیابی ردياب در مسیر جریان مورد استفاده قرار گرفتند.

برای ایجاد محیط متخلخل نیز از ذرات شن استفاده شد که اندازه ذرات در یک متری ابتدا و انتهای سامانه یکسان و در دامنه ۱۲-۲۵ میلی متر است در حالی که اندازه این ذرات در قسمت میانی ۵-۱۲ میلی متر ( $d_{50}=7\text{mm}$ ) می باشد. همچنین، تخلخل محیط ( $\emptyset$ ) حدود ۳۳ درصد بود. در این سامانه از نوع نی (*Phragmites Australis*) محلی اصفهان با تراکم  $0.5 \times 0.5$  متر استفاده شده است که پس از رشد کامل طول آن ها به حتی ۴ متر نیز خواهد رسید. پس از عبور از محیط متخلخل مذکور در زمان مشخص و تصفیه بوسیله فیلترهای آن و گیاه پالایی توسط گیاهان در داخل حوضچه ای برای استفاده های بعدی اعم از کشاورزی و غیره ذخیره می شود.

### آرایش ورودی و خروجی

از آنجا که مکان قرارگیری ورودی و خروجی ها تأثیر بسیار قابل ملاحظه ای بر رفتار هیدرولیکی سامانه دارد (۲۲)، در این مطالعه آن ها در مکان هایی قرار گرفته اند که میزان اثربخشی و بازیابی آن ها بر



شکل ۲- آرایش های ورودی و خروجی سامانه

Figure 2- Inlet and outlet configurations of the system

## اندازه‌گیری جریان و آزمایش ردیاب

پساب از طریق پمپاژ و لوله به مکان حوضچه ورودی انتقال یافته و پس از تنظیم دبی در این حوضچه به وسیله سرریزهای واسنجی شده وارد سامانه تالاب مصنوعی زیرسطحی می‌شود. در نتیجه میزان تغییرات دبی روزانه بسیار کم بوده و در حقیقت برای انجام آزمایش‌ها ثابت می‌باشد. به منظور مدل‌سازی جریان و تفسیر داده‌های ردیاب اعم از تعیین میزان بازیابی ردیاب، اندازه‌گیری میزان جریان ورودی و خروجی تالاب ضروری می‌باشد. میزان جریان ورودی در زمان آزمایش و در آرایش‌های ورودی وسط، ورودی گوشه و ورودی یکنواخت به ترتیب ۶/۵۸، ۶/۵۲ و ۶/۴ مترمکعب بر روز می‌باشد (جدول ۱).

در این پژوهش از ردیاب رنگی اورانین (فلئورسین سدیم، ACID YELLOW- CI 45350) با کمترین جذب در محیط‌های قلیایی و خنثی برای ترسیم منحنی توزیع زمان ماند استفاده شده است (۲۴). تزریق ردیاب به صورت لحظه‌ای یا ناگهانی با غلظت ۶g/L در هر سه حالت آرایش ورودی جریان در ساعات اولیه صبح انجام شده است و با نمونه‌برداری روزانه از محل خروجی سامانه تالاب مصنوعی، غلظت روزانه آن مورد محاسبه قرار گرفت. این عمل در آرایش ورودی یکنواخت و آرایش ورودی وسط در هشت روز متوالی و در آرایش ورودی گوشه در شش روز متوالی و با فاصله زمانی ۲۴ ساعت انجام شده است (به طور کلی، آزمایش ردیاب به هدف محاسبه زمان ماند هیدرولیکی تا زمانی ادامه می‌یابد که ۹۰ درصد میزان جرم ردیاب وارد شده بازیابی گردد).

## ظرفیت هیدرولیکی

ظرفیت هیدرولیکی تالاب مصنوعی به معنای توانایی سامانه برای پردازش حجم مشخصی از آب در زمان مشخص است. این توانایی تحت تأثیر رفتار هیدرودینامیکی سامانه تالاب مصنوعی قرار دارد. دو فاکتور هیدرولیکی اثرگذار بر عملکرد تصفیه سامانه تالاب مصنوعی با عنوان نرخ بار هیدرولیکی و زمان ماند هیدرولیکی<sup>۱</sup> مورد محاسبه قرار گرفت (۶). زمان ماند هیدرولیکی اسمی (تئوری) با پارامتر  $t_n$ ، از تقسیم حجم کل سامانه (حجم جریان) بر دبی جریان ورودی به دست می‌آید. در حالی که زمان ماند هیدرولیکی واقعی با پارامتر  $t_m$ ، به عنوان زمان ماند میانگین شناخته شده و از ترسیم منحنی توزیع زمان ماند هیدرولیکی و با استفاده از ردیاب برآورد می‌شود. حاصل تقسیم  $t_m$  بر  $t_n$  بیانگر میزان حجم مؤثر سامانه بوده و ارتباط مستقیم با عملکرد آن خواهد داشت (۱۴). همچنین منحنی توزیع زمان ماند دارای  $t_{peak}$  (زمان عبور حداکثر غلظت ردیاب از خروجی) کوچک‌تر

نشانگر پخشیدگی جریان کم‌تر در سامانه می‌باشد که نتیجه آن عدم استفاده از حجم کل سامانه برای عملیات تصفیه است (۱۴).

## شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی

هدف اصلی این پژوهش شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی داخلی سامانه تحت تأثیر تغییر ورودی جریان و مقایسه نتایج با منحنی توزیع زمان ماند هیدرولیکی است. بدین خاطر از نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیک<sup>۲</sup> بر پایه المان محدود برای شبیه‌سازی و تعیین خصوصیات هیدرولیکی جریان در تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی استفاده شده است.

برای مدل‌سازی با استفاده کامسول از مدول جریان زیرسطحی<sup>۳</sup> استفاده شده است. در هر مدول از این نرم‌افزار براساس قوانین و پارامترهای مرتبط با آن شبیه‌سازی صورت می‌گیرد. مدول جریان زیرسطحی از قانون داریسی استفاده می‌کند که معادله حل آن به صورت رابطه (۱) مشخص می‌شود. همچنین این مدول از روش حل پایدار برای جریان دائمی (مستقل از زمان) استفاده می‌کند. در رابطه (۱)  $u$ ، میزان سرعت جریان داریسی بوده که به هدایت هیدرولیکی ( $k$ ) و لزوجت دینامیکی سیال ( $\mu$ ) وابسته است. همچنین  $p$  و  $\rho$ ، فشار و جرم مخصوص سیال و  $Q_m$  (kg/m<sup>3</sup>.s) پارامتر جرمی منبع در معادله پیوستگی بوده که در حقیقت جرم اضافه شده به فاز پیوسته طرح از فازهای خارجی است که در این مسئله با حل پایدار صفر می‌باشد.

$$\nabla \cdot (\rho u) = Q_m \quad (1)$$

$$u = -\frac{k}{\mu} (\nabla p)$$

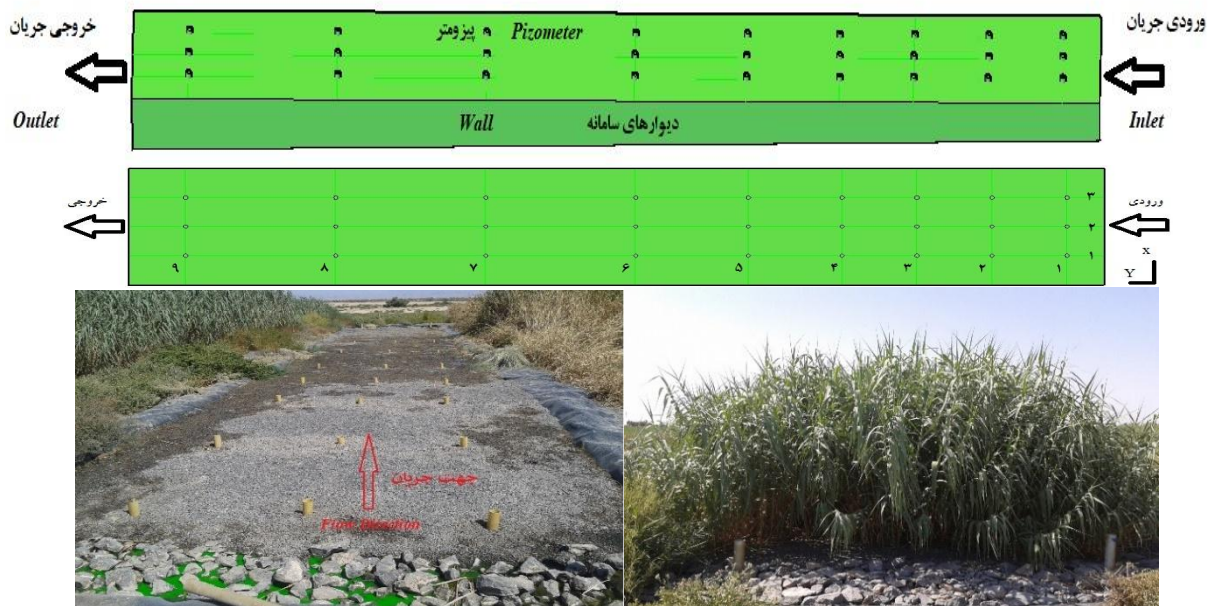
پس از تعریف فیزیک مورد نظر تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی آزمایشی (شکل ۳) در نرم‌افزار و ترسیم هندسه آن، شرایط مرزی دیوار برای محیط عایق شده سامانه و پیرومترها و شرایط مرزی ورودی و خروجی با مقادیر سرعت مشخص در سامانه تعیین شد. سپس محیط متخلخل داخلی سامانه به صورت همگن در محیط نرم‌افزار با وارد کردن مشخصات نظیر میزان نفوذپذیری (هدایت هیدرولیکی) و تخلخل و ویژگی‌های سیال مانند لزوجت دینامیکی و چگالی نیز مشخص شدند. به علت اثرات متقابل پیچیده گیاه و محیط متخلخل برای شبیه‌سازی محیط داخلی سامانه، تأثیر گیاه به صورت غیرمستقیم و با استفاده از اطلاعات بدست آمده از نمونه آزمایشی ساخته شده در قالب هدایت هیدرولیکی محیط و تخلخل به سامانه معرفی شد (۱۶). سطح آب فرضی در پیرومترها و میزان فشار اولیه درون میدان جریان به عنوان شرایط اولیه در نرم‌افزار تعریف شده است. نتایج محاسبات توسط مقادیر اندازه‌گیری شده پیرومترها

2- Comsol Multiphysics  
3- Subsurface Flow Module

1- Hydraulic Retention Time

نظر، مدل حل شد و نتایج حاصل اعم از میزان فشار و بار هیدرولیکی در هر نقطه از سامانه قابل محاسبه و همچنین خطوط جریان و هم‌فشار قابل ترسیم هستند که پهنه‌بندی فشار بر حسب پاسکال به هدف تعیین رفتار هیدرولیکی داخلی سامانه تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی انجام شده است.

واسنجی شد (مشخص بودن سطح آب در پیژومترها امکان واسنجی پارامترهای دارای عدم قطعیت در مدل را فراهم نمود). محدوده مدل موردنظر براساس دستورالعمل نرم‌افزار کامسول و نوع مش‌بندی پیشنهادی آن و همچنین تجربه محققین پیشین به صورت مش مثلثی با ابعاد نرمال همراه با مش‌بندی چهاروجهی برای کنترل نهایی محدوده استفاده شده است. پس از ساخت مش مورد



شکل ۳- نمایش شرایط مرزی در نرم‌افزار و محیط آزمایشی  
Figure 3- Depicting boundary conditions in software and field environment

بالایی در رسیدن به نقطه اوج است. وجود شیب زیاد در ابتدای این نمودار نتیجه سریع رسیدن غلظت بالایی از ردیاب به نقطه خروجی سامانه و وجود مسیرهای میان‌بر متعدد در آن است. مسیرهای میان‌بر سبب کاهش زمان ماند هیدرولیکی و کاهش عملکرد سامانه برای تصفیه می‌شوند.

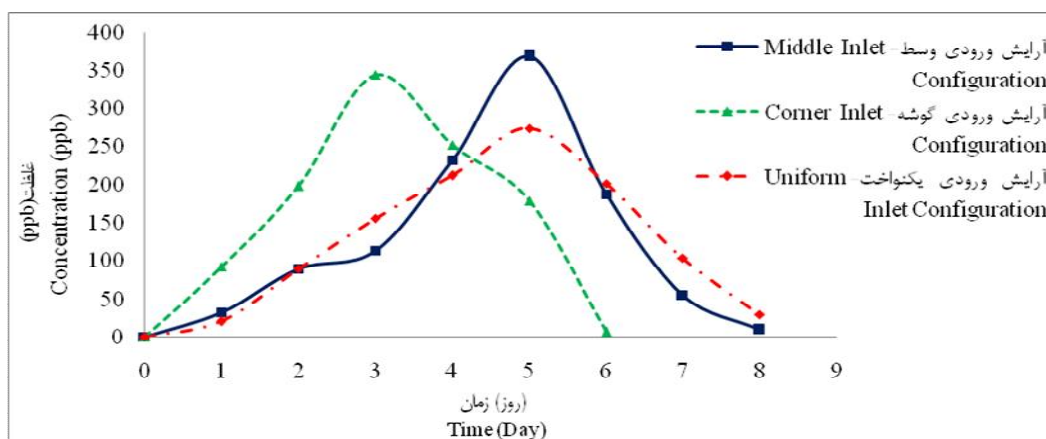
علاوه بر مقدار زمان ماند میانگین، زمان اوج منحنی زمان ماند هیدرولیکی ( $t_{peak}$ ) ارتباط مستقیم با میزان پخشیدگی جریان و کاهش مسیرهای میان‌بر در طول تالاب مصنوعی و عملکرد سامانه دارد (۱۴). این زمان در حالت ورودی وسط و یکنواخت روز پنجم و در حالت ورودی گوشه روز سوم اتفاق افتاده است. از آنجایی که تابع منحنی توزیع زمان ماند با  $t_{peak}$  کوچکتر، دارای کمترین پخشیدگی جریان در سامانه می‌باشد، می‌توان دریافت که میزان پخشیدگی جریان در دو آرایش ورودی یکنواخت و ورودی وسط تفاوت قابل ملاحظه‌ای با ورودی از گوشه دارد و وجود مسیرهای میان‌بر در حالت ورودی گوشه را به وضوح نشان می‌دهد. بدین حالت که جریان به طور مستقیم از گوشه سامانه تالاب مصنوعی زیرسطحی به سرعت به نقطه خروجی رسیده است.

## نتایج و بحث

### مدلسازی آزمایشی

همانطور که گفته شد در ابتدا منحنی توزیع زمان ماند برای محاسبه زمان ماند میانگین در هر آرایش جریان ترسیم می‌شود (شکل ۴). میزان بازیابی ردیاب در آرایش‌های ورودی وسط، گوشه و یکنواخت به ترتیب ۹۶، ۹۹ و ۹۹ درصد بوده است و زمان ماند میانگین آن‌ها نیز ۴/۵۳، ۳/۲۴ و ۴/۶۵ روز می‌باشد. با توجه به منحنی زمان ماند برای آرایش‌های مختلف مشخص می‌شود که آرایش ورودی جریان یکنواخت با زمان ماند بالاتر از بقیه بالاترین راندمان هیدرولیکی و عملکرد بهینه جریان را دارا می‌باشد.

این منحنی نمایانگر آن است که در ابتدا غلظت با شتاب زیادی به نقطه اوج خود می‌رسد و سپس به تدریج به علت رقیق شدن ردیاب، میزان آن کاهش می‌یابد. در این پژوهش، همانطور که در شکل (۴) مشخص است، منحنی زمان ماند در آرایش ورودی یکنواخت با شیب ملایمی رو به افزایش است و این روند در حالت ورودی وسط دارای شیب کمتر و حالت ورودی گوشه دارای شیب



شکل ۴- منحنی‌های توزیع زمان ماند در سه آرایش ورودی مختلف  
Figure 4- Retention time distribution (RTD) curves for three different inlet configurations

همواره کمتر بوده است که نتیجه آن ایجاد مسیر میان‌بر در تالاب مصنوعی زیرسطحی است. زمانی که جریان در کل سامانه پخش شود، زمان ماند میانگین به زمان ماند اسمی نزدیک‌تر می‌گردد که به معنای کاهش حجم مرده خواهد بود. حجم مؤثر در آرایش ورودی وسط و ورودی یکنواخت ۸۷/۵ درصد است که حاکی از ۱۲/۵ درصد حجم مرده در سامانه می‌باشد. در حالی که این مقدار در آرایش ورودی گوشه افزایش یافته و حجم مرده آن تقریباً برابر با ۳۸ درصد است. پرسن نیز در سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۰ به بررسی عملکرد هیدرولیکی برکه و تالاب مصنوعی در آرایش‌های متفاوت جریان ورودی پرداخت. نتایج تحلیل‌های حاصل از منحنی زمان ماند نشان داد که توزیع یکنواخت جریان در عرض سامانه دارای بالاترین میزان راندمان هیدرولیکی به دلیل پخشیدگی جریان بالاتر و میزان حجم مؤثر بالای آن است. همچنین منحنی زمان ماند در حالت توزیع جریان ورودی از گوشه سامانه دارای دنباله‌ای طولانی بوده که حاکی از وجود مقادیر باقیمانده بیشتری از ردیاب در داخل سامانه و عملکرد هیدرولیکی نامناسب آن در بازبایی ردیاب می‌باشد؛ در حالی که مقادیر زیادی از ردیاب نیز در زمان‌های ابتدایی به دلیل وجود مسیرهای میان‌بر متعدد از محیط خارج می‌شوند. موردی که در تحقیق حاضر نیز مشاهده شد و میزان بازبایی ردیاب در آرایش B کمتر از آرایش‌های A و C بود (۱۳ و ۱۵).

زمانی که جریان در طول سامانه پخش شود، میزان حجم مورد استفاده از سامانه در فرایند تصفیه افزایش یافته و عملکرد سامانه افزایش چشمگیری خواهد داشت. اگرچه می‌توان پیشبینی نمود که افزایش تعداد ورودی و خروجی سبب کاهش میزان مسیرهای میان‌بر و افزایش زمان ماند میانگین می‌شود ولی بررسی مجزا منحنی‌های زمان ماند هر آرایش با یکدیگر به تحلیل شرایط هیدرولیک داخلی سامانه می‌انجامد (۱۵). لذا با توجه به شکل ۴ می‌توان استنتاج نمود که نقطه اوج منحنی زمان ماند ( $C_{peak}$ ) در حالت ورودی یکنواخت به دلیل پخشیدگی بالاتر در کل محیط متخلخل و سرعت جریان داخلی کمتر، بسیار پایین‌تر از دو حالت دیگر است که نشان از یکنواختی جریان در طول سامانه و کاهش حجم مرده خواهد بود؛ در حالی که در ورودی از گوشه، اورانین به علت وجود مسیرهای میان‌بر متعدد سریعاً به خروجی رسیده است و غلظت بالاتری را از خود نشان داده است.

ارتباط میان زمان ماند میانگین و زمان ماند اسمی به عنوان حجم مؤثر مطرح می‌شود (جدول ۱). با نزدیک شدن زمان ماند میانگین به زمان ماند اسمی میزان حجم مؤثر سامانه و یکنواختی جریان افزایش می‌یابد و از تمام حجم سامانه برای عملیات تصفیه استفاده شده که نهایتاً سبب افزایش راندمان تصفیه خواهد شد (۱). طبق نتایج جدول ۱، در تمامی آرایش‌ها، زمان ماند میانگین از میزان زمان ماند اسمی

جدول ۱- خلاصه نتایج پارامترهای هیدرولیکی

Table 1- Summary of hydraulic parameters results

حالت Layout	Q (m <sup>3</sup> /d)	HLR (cm/d)	t <sub>n</sub> (d)	t <sub>m</sub> (d)	e <sub>v</sub>
A	6.58	6.33	5.176	4.532	0.875
B	6.52	6.27	5.224	3.242	0.621
C	6.4	6.15	5.322	4.657	0.875

## شبیه‌سازی عددی

پس از اتمام حل معادلات توسط نرم‌افزار کامسول، پهنه‌بندی فشار بر حسب پاسکال مشخص شده است. از داده‌های اندازه‌گیری شده توسط پیزومترها که نشانگر بار فشار در داخل مدل آزمایشی است برای واسنجی نرم‌افزار استفاده شده است. همانطور که در شکل ۳ مشخص شده است، پیزومترها در ۹ ردیف سه تایی با تمرکز بیشتر در ورودی جریان به سمت خروجی جریان قرار گرفتند. به منظور واسنجی نرم‌افزار بار فشاری شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار با مقادیر واقعی آن در پیزومترها مقایسه و پارامترهای دارای عدم قطعیت در نرم‌افزار مانند هدایت هیدرولیکی، دما و تخلخل با سعی و خطا به گونه‌ای تنظیم شد که بار فشاری شبیه‌سازی شده و پیزومترها تقریباً مطابق شوند. نتایج واسنجی مدل عددی در نرم‌افزار کامسول به صورت جدول ۲ ارائه شده است. همچنین مدل عددی به منظور صحت‌سنجی توسط مدل تالاب مصنوعی آزمایشی مذکور در شرایط جریانی متفاوت نیز مورد آزمایش قرار گرفت که نتایج قابل قبولی داشت. سپس با توجه به میزان فشار شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار، امکان برآورد بار فشار در هر سطحی از سامانه موجود می‌باشد.

پهنه‌بندی فشار در مدل عددی واسنجی شده در آرایش A (شکل ۵-الف) نمایانگر آن است که در ابتدای سامانه به دلیل قرارگیری ورودی جریان میزان فشار به مراتب بیشتر است و به سمت خروجی از میزان فشار جریان و سطح آب کاسته می‌شود. گرادیان هیدرولیکی جریان ناشی از اختلاف ارتفاع ورودی و خروجی نیز عامل دیگر کاهش فشار به سمت خروجی است. تفاوت فشار در ورودی و خروجی جریان تقریباً برابر ۱۲۰۰ تا ۱۴۰۰ پاسکال یا معادل ۱۲ تا ۱۴ سانتی‌متر آب است. محدوده پرفشار در ابتدای جریان با رنگ قرمز مشخص شده است. اختلاف نمایش ۱۲ تا ۱۴ سانتی‌متری آب در ورودی و خروجی با شرایط واقعی جریان نیز مطابق است. دلیل این امر گرادیان هیدرولیکی جریان است. با توجه به شکل ۵-ب (آرایش B) در نقطه ورودی جریان در گوشه سامانه انتقال جریان بسیار زیاد بوده و میزان فشار را به شدت در آن قسمت بالا برده است. پهنه‌بندی فشار در نقاط مختلف این آرایش به خصوص نقاط ورودی جریان به صورت ناهمگون می‌باشد به نحوی که فشار در سمت نقطه ورودی جریان از سمت دیگر سامانه بالاتر بوده و ناحیه کم‌فشاری را در سمت مخالف ایجاد نموده است. این ناحیه کم‌فشار در حقیقت حجم مرده وسیعی در سامانه تالاب مصنوعی ایجاد کرده و بدین خاطر سبب باقی‌ماندن بخشی از ردیاب در محیط شده و بازیابی آن نسبت به دو حالت دیگر کمتر ارائه شده است. تفاوت فشار در ورودی و خروجی جریان تقریباً برابر ۱۴۰۰ تا ۱۵۰۰ پاسکال یا معادل ۱۴ تا ۱۵ سانتی‌متر آب است. در بعضی از نقاط سامانه این مقدار از گرادیان هیدرولیکی جریان نیز بیشتر است. یک از مهمترین نتایج این مقاله

نمایش اختلاف زیاد زمان ماند میانگین و تئوری در این آرایش ورودی جریان بود که در نتایج شبیه‌سازی نیز به وضوح مشخص است. وجود حجم مرده و مسیرهای میان‌بر بیشتر در این حالت گواه این ادعاست. همچنین شکل ۵-ج (آرایش C) نمایانگر توزیع یکنواخت جریان است. نقاط ورودی جریان دارای فشار بالاتری نسبت به نقاط دیگر هستند. توازن فشار از ورودی به سمت خروجی جریان به طور کامل مشاهده می‌شود. در این حالت پخشیدگی جریان به حداکثر خود رسیده است. نواحی ماندابی در گوشه‌های سامانه و در نتیجه مسیرهای میان‌بر نیز به حداقل خود رسیده است. تفاوت فشار در ورودی و خروجی جریان تقریباً برابر ۱۰۰۰ تا ۱۳۰۰ پاسکال یا معادل ۱۰ تا ۱۳ سانتی‌متر است که نسبت به دو حالت قبلی کاهش محسوسی دارد.

نتایج پژوهش سو و همکاران (۱۹) در بررسی اثرات سه آرایش‌های ورودی و خروجی جریان در تالاب مصنوعی با جریان آزاد سطحی شامل یکنواخت-وسط، وسط-وسط و گوشه-گوشه حاکی از عملکرد مناسب آرایش ورودی یکنواخت با راندمان هیدرولیکی ۸۸ و حجم مؤثر ۸۹ درصد بود؛ در حالی که راندمان هیدرولیکی و حجم مؤثر در آرایش ورودی گوشه به ترتیب ۶۵ و ۶۶ درصد برآورد شد. خطوط جریان ترسیمی حاصل از مدل عددی توسط این محققین به خوبی نمایانگر ناحیه‌ای گردابی و مرده در گوشه مخالف ورودی جریان بود و منحنی زمان ماند ترسیمی آن‌ها نیز در این آرایش به دلیل وجود چنین ناحیه‌ای دارای دنباله‌ای طولانی می‌باشد که نشانگر طولانی بودن حضور ردیاب در محیط تالاب است. اگرچه به دلیل مسیرهای میان‌بر متعدد بخش اعظمی از ردیاب به سرعت از محیط خارج می‌شود.

ردیگز و همکاران (۷) دلیل افزایش پخشیدگی جریان در ورودی به صورت یکنواخت را کاهش سطح مقطع عبوری جریان عنوان نمودند که به افزایش سرعت خطی جریان در محل ورودی منجر می‌شود. با این تفسیر افزایش سطح مقطع عبوری اریب جریان در آرایش ورودی به صورت گوشه سبب کاهش سرعت‌های خطی سیال در محل ورودی می‌شوند که نتیجتاً به کاهش پخشیدگی می‌انجامد. نکته قابل توجه کاهش سرعت جریان داخلی سامانه در آرایش ورودی یکنواخت جریان است که منجر به کاهش قدرت انتقال جریان در طول سامانه و افزایش زمان ماند میانگین می‌شود. کاهش نقطه اوج منحنی زمان ماند در آرایش C را نیز می‌توان در این مورد یافت. توازن فشار و کاهش نقاط پر سرعت سبب یکنواختی غلظت ردیاب دریافتی در نقاط خروجی جریان می‌شود و به همین خاطر شدت غلظت حداکثر ردیاب خروجی در این حالت ورودی جریان کمتر از حالات دیگر است.



جدول ۲- نتایج مدل عددی واسنجی شده

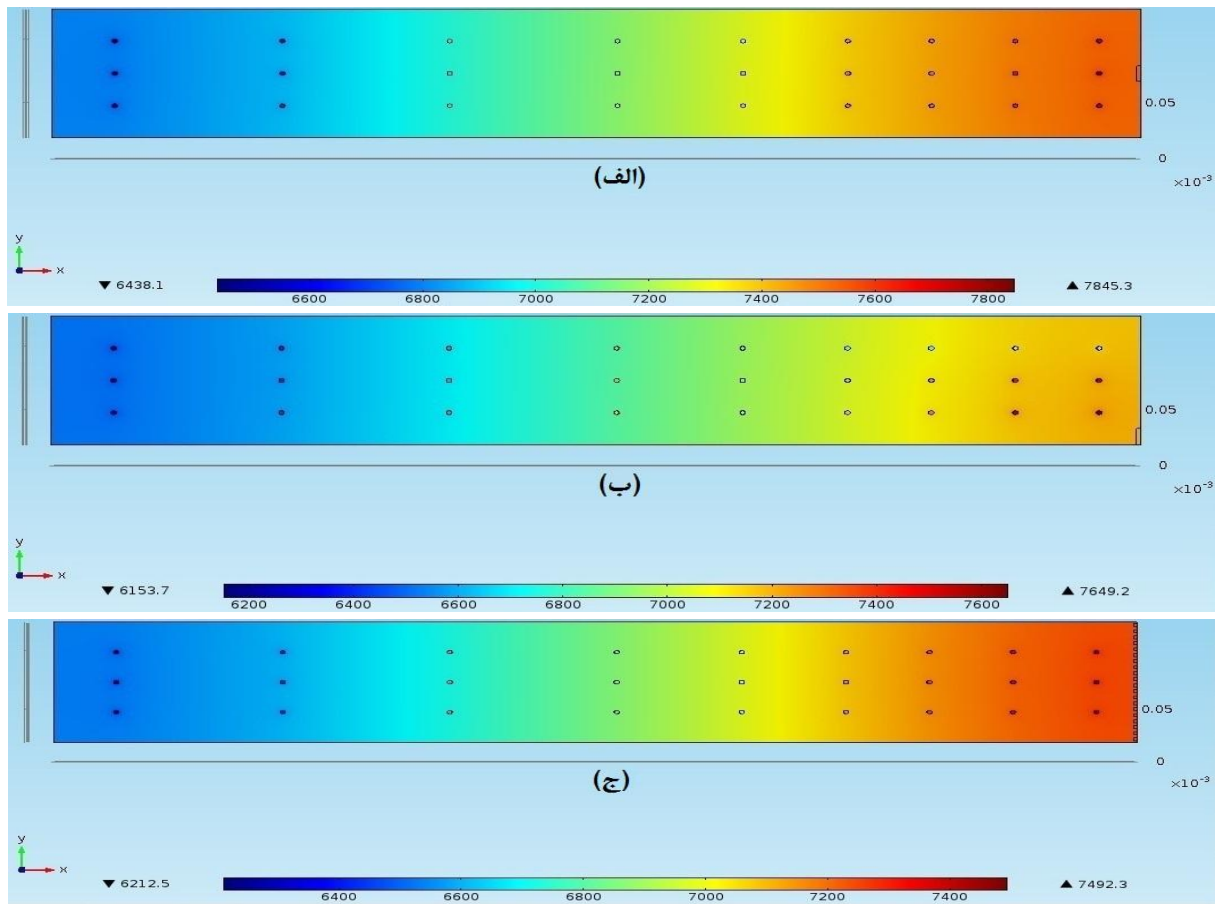
Table 2- Results of verified numerical model

$V_{real}=V/\emptyset$ (m/d)	$V= Ki$ (m/d)	$K$ (m/d)	$Q$ (m <sup>3</sup> /d)	Case					
5.5	1.83	316.81	6.58	<b>A</b>					
Pressure head (m) in 9 triple rows throughout the wetland-بار فشاری در ۹ ردیف سه تایی در طول تالاب									
9	8	7	6	5	4	3	2	1	
0.656	0.678	0.712	0.725	0.742	0.76	0.763	0.777	0.79	1
0.657	0.677	0.708	0.728	0.752	0.764	0.765	0.78	0.8	2
0.659	0.682	0.711	0.733	0.751	0.765	0.765	0.778	0.79	3
$V_{real}=V/\emptyset$ (m/d)	$V= Ki$ (m/d)	$K$ (m/d)	$Q$ (m <sup>3</sup> /d)	Case					
5.44	1.81	313.88	6.52	<b>B</b>					
Pressure head (m) in 9 triple rows throughout the wetland-بار فشاری در ۹ ردیف سه تایی در طول تالاب									
9	8	7	6	5	4	3	2	1	
0.627	0.653	0.674	0.694	0.708	0.71	0.71	0.722	0.713	1
0.632	0.654	0.676	0.697	0.716	0.726	0.735	0.758	0.768	2
0.632	0.657	0.677	0.702	0.717	0.73	0.741	0.771	0.78	3
$V_{real}=V/\emptyset$ (m/d)	$V= Ki$ (m/d)	$K$ (m/d)	$Q$ (m <sup>3</sup> /d)	Case					
5.35	1.78	308.15	6.4	<b>C</b>					
Pressure head (m) in 9 triple rows throughout the wetland-بار فشاری در ۹ ردیف سه تایی در طول تالاب									
9	8	7	6	5	4	3	2	1	
0.634	0.654	0.676	0.697	0.713	0.727	0.739	0.751	0.763	1
0.633	0.656	0.677	0.698	0.714	0.729	0.74	0.752	0.764	2
0.634	0.655	0.677	0.697	0.713	0.727	0.738	0.751	0.763	3

نمایش خطوط جریان در آرایش ورودی وسط در شکل ۶-الف آمده است. مسیرهای رسم شده در نرم افزار مسیره های غالبی هستند که جریان تمایل به حرکت در آنها را دارد و توازن آنها به سمت خروجی بیشتر می شود. به وضوح می توان دریافت که خطوط جریان پس از تغذیه از ناحیه وسط تالاب مصنوعی با تراکم بیشتری به پایین دست سامانه منتقل می شوند. شکل ۶-ب نمایانگر خطوط جریان در آرایش ورودی گوشه است. عدم توازن خطوط جریان به سمت خروجی و ایجاد مسیرهای میان بر در سامانه از نقطه ورودی جریان سبب تشکیل ناحیه ای کم سرعت در گوشه مخالف ورودی جریان شده و منطقه ای مرده و غیر قابل استفاده در فرایند تصفیه را به وجود می آورد. سرانجام در شکل ۶-ج خطوط جریان کاملاً موازی را از همان ابتدا می توان مشاهده نمود. مسیرهای میان بر در این حالت به حداقل رسیده و از تمامی حجم سامانه به منظور عملیات تصفیه استفاده می شود. خطوط جریان نمایانگر کاهش نواحی کم سرعت جریان و افزایش میزان پخشیدگی جریان در طول سامانه و کاهش حجم مرده در آن می باشد.

جدول (۳) دامنه تغییرات نواحی پرفشار و کم فشار را در سامانه تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی در آرایش های مختلف جریان نشان می دهد. بررسی فشار شبیه سازی شده در محیط متخلخل تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی حاکی از آن است که اختلاف زیاد فشار ورودی و خروجی جریان در آرایش ورودی گوشه حاکی از توزیع ناهمگون جریان در محیط متخلخل است جایی که نقطه ورودی فشار تقریباً ۷۶۴۹ پاسکال را داشته و فشار نقطه خروجی ۶۱۵۳ پاسکال است. در قالب دیگر، دامنه تغییرات نواحی پرفشار و کم فشار در این آرایش ورودی از ۷۶۰۰ به ۶۲۰۰ تغییر یافته است (۱۴۰۰ پاسکال). این در حالی است که دامنه تغییرات فشار در آرایش ورودی وسط ۱۲۰۰ و در آرایش ورودی یکنواخت ۱۰۰۰ پاسکال است. توزیع فشار مناسب و همگون در آرایش یکنواخت به صورتی است که فشار ورودی آن برابر با ۷۴۹۲ پاسکال بوده و با شیب یکسان و ملایم به فشار ۶۲۱۲ پاسکال در خروجی رسیده است. توزیع فشار همگون در آرایش ورودی یکنواخت در نتیجه کاهش سرعت جریان داخلی و کاهش قدرت انتقال جریان در طول سامانه می باشد که به افزایش راندمان هیدرولیکی، کاهش مسیرهای میان بر جریان، افزایش زمان ماند میانگین و افزایش راندمان تصفیه پساب منجر خواهد شد.





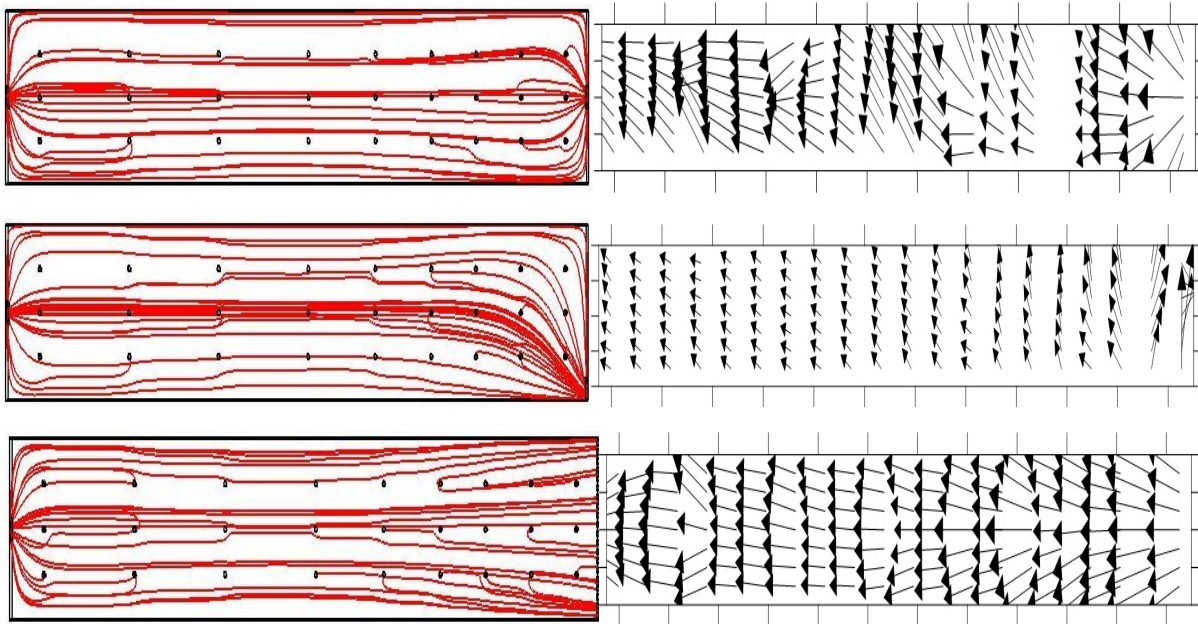
شکل ۵- نمایش توزیع فشار در طول سامانه تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی  
Figure 5- View of pressure distribution along the HSSF CWs

و تغییر جهت دیده می‌شود در حالی که تغییرات جهت خطوط جریان در آرایش ورودی وسط و به خصوص ورودی گوشه در طول سامانه متوازن نبوده و تحت تأثیر شرایط ورودی و خروجی جریان تغییر کرده است.

جهت خطوط جریان ترسیمی توسط داده‌های برداشتی از پیزومترها نیز به عنوان نمایه جهت بردار سرعت با تفسیر خطوط جریان ترسیمی مدل کامسول همگام است به نحوی که جهت خطوط جریان در آرایش ورودی یکنواخت کاملاً متوازن و با کمترین آشفتگی

جدول ۳- دامنه توزیع فشار در آرایش‌های مختلف ورودی جریان  
Table 3- Pressure distribution range for different inlet flow configurations

دامنه تغییرات فشار Pressure alterations range (pa)			آرایش configuration
کم فشار Low Pressure	فشار متوسط Medium Pressure	پرفشار High Pressure	
6600-7200	7200-7400	7400-7800	ورودی وسط - خروجی وسط Midpoint inlet-Midpoint outlet
6200-7000	7000-7200	7200-7600	ورودی گوشه - خروجی وسط Corner inlet-Midpoint outlet
6400-7000	7000-7200	7200-7400	ورودی یکنواخت - خروجی وسط Uniform inlet-Midpoint outlet



شکل ۶- نمایش خطوط و جهت جریان در سه آرایش مختلف جریان ورودی (الف- ب- ج به ترتیب از بالا به پایین)  
 Figure 6- Depicting streamlines and its direction for three different inlet flow configuration  
 (Midpoint-Corner-Uniform inlet flow configurations from up to down)

مصنوعی اعم از زمان ماند میانگین، خطوط جریان، پهنه‌بندی بار هیدرولیکی و مسیرهای میان‌بر استفاده شده است. نتایج حاصل از منحنی زمان ماند هیدرولیکی نشان داد که آرایش ورودی یکنواخت به دلیل توزیع یکنواخت جریان و کاهش سرعت داخلی جریان دارای بیشترین زمان ماند میانگین می‌باشد که به افزایش راندمان هیدرولیکی در سامانه می‌انجامد. افزایش پخشیدگی جریان در این حالت سبب استفاده از کل حجم سامانه به منظور عملیات تصفیه، کاهش میزان مسیرهای میان‌بر و حجم مرده جریان می‌شود. در حالی که آرایش ورودی گوشه با ایجاد مسیرهای میان‌بر متعدد سبب خروج سریع ردیاب از محیط تالاب و کاهش قابل‌ملاحظه زمان ماند میانگین شده است. اگرچه به دلیل حجم ماندابی زیاد در این آرایش، میزان بازیابی ذرات ردیاب کمتر می‌باشد. نتایج کمی حاکی از وجود ۳۸ درصد حجم مرده در آرایش B و ۱۲/۵ درصد در آرایش C است. نتایج شبیه‌سازی عددی محیط داخلی سامانه نیز نمایشگر عدم توزیع مناسب جریان در آرایش ورودی گوشه می‌باشد. بررسی فشار شبیه‌سازی شده نشان داد که دامنه تغییرات فشار از ورودی به خروجی در آرایش‌های A، B و C به ترتیب ۱۴-۱۲، ۱۵-۱۴ و ۱۳-۱۰ سانتی‌متر آب می‌باشد. اختلاف زیاد فشار ورودی و خروجی جریان در آرایش ورودی گوشه حاکی از توزیع فشار ناهمگون در محیط متخلخل بوده که منجر به افزایش اختلاف زمان ماند میانگین و تئوری و افزایش میزان مسیرهای میان‌بر در سامانه می‌شود. همچنین

کادلک و نایت در سال ۲۰۰۶، جریان ایده‌آل<sup>۱</sup> عبوری از داخل سامانه تالاب مصنوعی زیرسطحی به جهت بهینه‌سازی تصفیه را با شرایط ترکیبی (۱) پخشیدگی کمتر (۲) حجم مرده کمتر و (۳) مسیرهای میان‌بر کمتر عنوان نمودند (۸). با این تفسیر، اگرچه توزیع ورودی یکنواخت دارای پخشیدگی بالاتری نسبت به دو حالت دیگر است ولی به دلیل نزدیک بودن زمان ماند میانگین و تئوری دارای حجم مرده کمتر و به علت یکنواختی جریان در ورودی میزان مسیرهای میان‌بر به مراتب کمتری دارد. لذا توزیع یکنواخت ورودی جریان به صورت کلی نزدیک‌ترین حالت به جریان ایده‌آل محسوب می‌شود. در حالی که آرایش ورودی گوشه دارای کمترین میزان پخشیدگی بوده اما میزان حجم مرده و تعدد مسیرهای میان‌بر در آن نسبت به دو حالت دیگر بیشتر است که نتیجتاً جریان ایده‌آل در سامانه در این حالت برقرار نمی‌شود.

## نتیجه‌گیری

تشریح شرایط داخلی سامانه‌های تالاب مصنوعی اعم از زیرسطحی افقی و عمودی و یا هیبریدی از به روزترین مباحث موجود در بین متخصصین این امر می‌باشد. بدین منظور ترکیب روش میدانی ردیابی با مدل‌سازی برای آگاهی و نمایش رفتار داخلی سامانه تالاب

کمتر به جریان ایده‌آل در طراحی بهینه سامانه نسبت به دو آرایش دیگر نزدیک‌تر می‌باشد. قابل ذکر است که با افزایش میزان دبی جریان تغییرات ذکر شده و تفاوت‌های حاصل بین تمامی آرایش‌های ورودی جریان بیشتر خواهد شد و عملکرد آرایش ورودی یکنواخت چشمگیرتر خواهد بود. همان‌طور که در سامانه‌های دیگر تصفیه مانند برکه تثبیت این تفاوت‌ها قابل ملاحظه هستند.

تفسیر خطوط جریان نیز گواه توزیع همگون و یکنواخت جریان در آرایش C و پراکندگی خطوط جریان در آرایش B است. به طور کلی با توجه به تعریف جریان ایده‌آل در تالاب مصنوعی و نتایج حاصل از منحنی زمان ماند و شبیه‌سازی جریان داخلی تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی در سه آرایش ورودی و خروجی مذکور می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد هیدرولیکی سامانه در آرایش ورودی یکنواخت به دلیل پخشیدگی بالاتر، حجم مرده و مسیرهای میان‌بر

## منابع

1. Bruun J., Pugliese L., Hoffmann C.Ch., Kjaergaard Ch. 2016. Solute transport and nitrate removal in full-scale subsurface flow constructed wetlands of various designs treating agricultural drainage water. *Ecological Engineering*, 97: 88-97.
2. Chang T.C., Chang Y.H., Lee W.T., and Shih S.S. 2016. Flow uniformity and hydraulic efficiency improvement of deep-water constructed wetlands, *Ecological Engineering*, 92: 28-36.
3. Eslamian S.S., Davari S., Okhravi S.S., and Tarkesh Isfahani S. 2012. Phytoremediation through the mechanism of trace metals absorption in artificial wetland. p. 53-57. 1<sup>th</sup> Iranian National Conference on Phytoremediation, 16 Feb. 2012. Kerman, Iran. (in Persian with English abstract)
4. Galvão A.F., Matos J.S., Ferreira F.S., and Correia F.N. 2010. Simulating flows in horizontal subsurface flow constructed wetlands operating in Portugal. *Ecological Engineering*, 36: 596-600.
5. Giraldi D., Vitturi M.D.M., and Iannelli R. 2010. FITOVERT: A dynamic numerical model of subsurface vertical flow constructed wetlands. *Environmental Modelling Software*, 25:633-640.
6. Guo C.Q., Dong B., Liu J.J., and Liu F.P. 2015. The best indicator of hydraulic short-circuiting and mixing of constructed wetlands. *Water Practice and Technology*, 10(3): 505-516.
7. Jafet Rodríguez D., Giacomán Vallejos G., and Champagne P. 2012. Assessment of the plug flow and dead volume ratios in a sub-surface horizontal-flow packed-bed reactor as a representative model of a sub-surface horizontal constructed wetland. *Ecological Engineering*, 40: 18-26.
8. Kadlec R.H., and Knight, R.L. 2006. *Treatment wetlands*, 1st ed. Lewis Publishers, FL.
9. Kadlec R.H., Pries J., and Lee K. 2012. The Brighton treatment wetlands. *Ecological Engineering*, 47: 56-70.
10. Liolios K.A., Moutsopoulos K.N., and Tsihrintzis V.A. 2012. Modeling of flow and BOD fate in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Chemical Engineering Journal*, 202: 681-693.
11. Mæhlum T., and Jenssen P.D. 2003. *Design and performance of integrated subsurface flow wetlands in a cold climate*, WIT Press, Southampton, UK.
12. Okhravi S.S., Eslamian S.S., and Mohammadzade Miyab N. 2015. Investigation and comparison between applications of different type of constructed wetland for wastewater treatment. *Water Engineering Conference and Exhibition*, 18 Oct. Tehran, Iran. (in Persian with English abstract)
13. Person J. 2000. The hydraulic performance of ponds of various layouts. *Urban Water Journal*, 2(2000): 243-250.
14. Persson J., and Wittgren H.B. 2004. How hydrological and hydraulic conditions affect performance of ponds. *Ecological Engineering*, 21: 259-269.
15. Persson J., Somes N.L.G., and Wong T.H.F. 1999. Hydraulic efficiency of constructed wetlands and ponds. *Water Science and Technology*, 40(3): 291-299.
16. Rengers E.E., Da Silva J.B., Paulo P.L., and Janzen J.G. 2016. Hydraulic performance of a modified constructed wetland system through a CFD-based approach. *Journal of Hydro-environment Research*, 12: 91-104.
17. SamsóR., and García J. 2013. Bacteria distribution and dynamics in constructed wetlands based on modelling results. *Science of the Total Environment*, pp: 430-440.
18. SamsóR., and García J. 2014. The Cartridge Theory: A description of the functioning of horizontal subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment, based on modelling results. *Science of the Total Environment*, 473: 653-658.
19. Su T.M., Yang Sh., Shih S., and Lee H. 2009. Optimal design for hydraulic efficiency performance of free-water-surface constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 35: 1200-1207.
20. Suliman F., French H., Haugen L.E., Klove B., and Jenssen P. 2005. The effect of the scale of horizontal subsurface flow constructed wetlands on flow and transport parameters. *Water Science and Technology*, 51(9): 259-266.

21. Suliman F., French H.K., Haugen L.E., and Søvik A.K. 2006. Change in flow and transport patterns in horizontal subsurface flow constructed wetlands as a result of biological growth. *Ecological Engineering*, 27: 124-133.
22. VorkasC., and Lloyd B. 2000. The application of a diagnostic methodology for the identification of hydraulic design deficiencies affecting pathogen removal. *Water Science and Technology*, 42(10): 99-109.
23. Vymazal j. 2009. The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. *Ecological Engineering*, 35: 1-17.
24. Weidner C., Naurath L., Rude T., and Banning A. 2011. A new approach to quantify Na-Fluorescein (Uranine) in acid mine waters. *Mine Water Environment*, 30: 231-236.



## Numerical and Experimental Study of Internal Hydraulic Behavior of Horizontal Sub-Surface Flow Constructed Wetland in Different Flow Distributions

S.S. Okhravi<sup>1\*</sup> - S.S. Eslamian<sup>2</sup> - N.Fathianpour<sup>3</sup>

Received: 08-01-2017

Accepted: 02-09-2018

**Introduction:** Horizontal subsurface flow constructed wetlands have long been applied to improve water or wastewater quality. Previous studies on wetland systems have focused on trying to comprehend the processes leading to the removal of pollutants. Comparatively, there have been fewer studies dedicated to the assessment of flow distribution on hydraulic behavior through the wetland. Researchers declared the aspect ratio (length to width ratio), inlet-outlet configuration, the size of the porous media and the loading rate of constructed wetland could influence hydraulic retention time (HRT). Su et al. (2009) have stated that in free water surface constructed wetlands, when the aspect ratio is greater than 5, the hydraulic efficiency will reach 0.9, or even higher. If the project site or field area cannot meet the theoretical standard, the recommended aspect ratio is higher than 1.88 to ensure some hydraulic efficiency greater than 0.7. The present study was an attempt to analyse, with the aid of 3D numerical simulation and tracer study, how flow distribution affected hydraulic behavior by using 3 different input flow layouts.

**Materials and Methods:** The treatment system consisted of a horizontal subsurface flow in a constructed wetland having an aspect ratio of 6.5 and the bed slope of one percent. In this system, with the geometry of 4 m wide × 26 m long × 1 m deep, *Phragmites australis* was planted. Inlet configurations were selected as a variable parameter. Three different inlet flow configurations including midpoint-midpoint (A), corner- midpoint (B) and uniform-midpoint (C), with the same fixed outlet configurations, were studied. The average flow discharge in each configuration was 6.58, 6.52 and 6.4 m<sup>3</sup>/day, respectively. Dye tracer was used to draw retention time distribution curves in each configuration for assessing the internal dispersion, short-circuiting and hydraulic parameters such as effective volume rate which is derived by division of mean retention time per nominal retention time. The 3D model presented, which was built on the Comsol Multiphysics platform, was implemented for fluid flow to show internal hydraulic patterns in the system. Hence, the hydraulic model used the Darcy equation to simulate a stationary water flow through the bed. The simulations were verified by using real data obtained from the existing constructed wetland. It was mostly used to show pressure throughout the system for each configuration of the inlet and the outlet.

**Results and Discussion:** The mean retention time for each configuration was found to be 4.53, 3.24 and 4.65 days, respectively. A marked reduction of the mean hydraulic retention time signified leaving tracer concentration from the outlet rapidly, high short-circuiting and dead volume and finally defective treatment process influenced by changing the inlet to the corner. According to tracer breakthrough curve, the effective volumes for configurations A and C were 87.5%, as compared to 62.1% for the configuration B. The two-day difference of t<sub>peak</sub> between configurations 2 and 1, and 3 was probably due to the establishment of preferential streamlines resulting in short-circuiting and areas of dead volume in the system. The value of t<sub>peak</sub> is related to dispersion, in the sense that a retention time distribution curve with a small peak time generally contains low dispersion. Simulation results showed the pressure difference from the inlet to the outlet ranged from 12-14, 14-15 and 10-13 cm H<sub>2</sub>O for A, B and C layouts, respectively. It was shown that the maximum pressure gradient occurred at the outset of the influent wastewater at the inlet, and it was gradually reduced to the lowest values at the outlet ports. Consequence of surface pressure demonstrated uniform pressure from inlet toward outlet at configuration C. Simulated streamlines approved this result, while range of high and low pressure area at configuration B was the most. There was a strong association between tracer experiments and simulation works. One of the major findings of this study was the significant shorter hydraulic mean retention time of the corner inlet setup. There are many reasons that may cause these effects, although short-circuiting may be the primary one. A large low-pressure zone appeared at the opposite corner that was neither inlet nor outlet in this configuration.

**Conclusions:** This paper investigated the hydraulic performance and short-circuiting effects on water flow due to three different inlet patterns (i.e. midpoint, corner, and uniform) in horizontal subsurface flow wetlands based on dye tracer measurements and numerical modeling. The results showed that the uniform inlet could provide the highest

1- PhD candidate of Water Structure Engineering, College of Agriculture, Bu-Ali Sina University

(\*-Corresponding Author Email: S.okhravi94@basu.a.cir)

2- Professor, Water Engineering Department, Isfahan University of Technology

3- Associate Professor, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology

hydraulic efficiency (i.e. longest hydraulic retention time, HRT), in comparison to other two setups. The performance of the three different layouts was also investigated in terms of hydraulic parameters. Short-circuiting was influenced by lower hydraulic retention time, leading to inadequate treatment. Uniform-midpoint and midpoint-midpoint yielded the best effective volume as compared to the corner-midpoint. It was demonstrated that these two cases increased dispersion and used the whole capacity of the constructed wetland for the treatment process. The most important result of this paper was the evaluation of internal hydraulic pattern thorough the wetland, something not investigated in previous research works. Based on the simulation results, the spatial pressure distribution in wetland cells was depicted. Finally, it can be concluded that the best configuration of inlet-outlet layout based on both numerical simulations and physical experiments is uniform-midpoint. Meanwhile, midpoint-midpoint is preferable to corner-corner by all performance criteria.

**Keywords:** Hydraulic retention time, Inlet flow configurations, Pressure alteration, Short-circuiting, Simulations