

# Modeling of the Effect of Inflow Distribution on Internal Hydraulic Behavior of Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland

S. Okhravi<sup>1</sup>, S. Eslamian<sup>2</sup>, N. Fathianpour<sup>3</sup>

1. MSc, Dept. of Water Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran; and PhD Student of Hydraulic Structure, College of Agricultures, Hamadan Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran  
(Corresponding Author) saeid.okhravi@gmail.com
2. Prof., Dept. of Water Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
3. Assoc. Prof., Dept. of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

(Received Dec. 8, 2016 Accepted May 6, 2017)

#### To cite this article :

Okhravi, S., Eslamian, S., Fathianpour, N., 2018, "Modeling of the effect of inflow distribution on internal hydraulic behavior of horizontal subsurface flow constructed wetland." *Journal of Water and Wastewater*, 29 (4), 145-156.  
Doi: 10.22093/wwj.2017.69843.2305 (In Persian)

#### Abstract

Treatment capability of a constructed wetland is heavily dependent on the uniformity of flow moving inside the wetland. This modeling study was performed to evaluate the effect of flow distribution on internal hydraulic behavior of horizontal subsurface flow constructed wetland. To accomplish this objective of the study, three different inlet flow configurations including (1) midpoint, (2) corner and (3) uniform while keeping a fixed midpoint outlet flow for all configurations. The model used in this study was based on COMSOL Multiphysics platform for subsurface flow differential equation in porous mediums (Darcy law). Hydraulic head zoning indicated uniform flow distribution in form of parallel streamlines from inlet to outlet in configuration 3 while substantial number of shortcuts and a noticeable difference between high and low pressure areas were observed in configuration 1 and 2. Results obtained from the simulated streamlines and pressure contours throughout the wetland confirmed the field observation results. Hydraulic head range at each configuration is 14.35, 15.25 and 13.05 cm, respectively. Results indicated an appropriate hydraulic performance of the uniform inflow configuration to use the whole capacity of constructed wetland for treatment process. Meanwhile, midpoint inlet configuration had a proper performance by considering some criteria to reduce dead volume and shortcuts.

**Keywords:** Inlet Flow Configuration, Constructed Wetland, Flow Modeling, Short-circuiting.



# مدل سازی نوع توزیع جریان ورودی بر رفتار هیدرولیکی داخلی سامانه تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی

سید سعید اخروی<sup>۱</sup>، سید سعید اسلامیان<sup>۲</sup>، نادر فتحیان پور<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشجوی دکتری مهندسی سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان (نویسنده مسئول) saeid.okhravi@gmail.com

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

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

(دریافت ۹۵/۹/۱۸ پذیرش ۹۶/۲/۱۶)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

اخروی، س. س.، اسلامیان، س. س.، فتحیان پور، ن.، ۱۳۹۷، "مدل سازی نوع توزیع جریان ورودی بر رفتار هیدرولیکی داخلی سامانه تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی" مجله آب و فاضلاب، ۲۹، (۴)، ۱۴۵-۱۵۶. Doi: 10.22093/wwj.2017.69843.2305

## چکیده

درک رفتار هیدرولیکی داخلی سامانه تالاب مصنوعی به منظور افزایش راندمان تصفیه سامانه از به روزترین مباحث در میان محققین مربوطه می‌باشد. در این پژوهش به مدل سازی نحوه توزیع جریان بر رفتار هیدرولیکی داخلی سامانه تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی در سه آرایش ورودی جریان پرداخته شد. این آرایش‌های تحت مطالعه عبارت بودند از: ورودی وسط (۱)، ورودی گوشه (۲) و ورودی یکنواخت (۳). در تمامی حالات، خروجی در وسط ثابت بوده است. مدل سازی بر پایه معادله دیفرانسیلی جریان زیرسطحی در محیط‌های متخلخل (دارسی) در نرم افزار کامسول انجام شد. پهنه بندی بار هیدرولیکی در سامانه حاکی از توزیع همگون جریان به صورت خطوط موازی از ورودی به سمت خروجی در آرایش ۳ می‌باشد؛ در حالی که میزان اختلاف مناطق پرفشار و کم فشار و مسیرهای میان بر در آرایش ۱ و به خصوص در آرایش ۲ بیشتر بوده است. مسیرهای جریان تریبیمی و خطوط هم فشار در طول سامانه نیز گواه این ادعاست. دامنه تغییرات بار هیدرولیکی در هر آرایش به ترتیب برابر با ۱۴/۳۵، ۱۵/۲۵ و ۱۳/۰۵ سانتی متر بود. تغییرات فشار در مقاطع طولی و عرضی سامانه به منظور تحلیل پخشیدگی جریان تریبیم شد و معادلاتی برای محاسبه بار هیدرولیکی در هر نقطه از سامانه مذکور و در آرایش‌های مختلف ورودی جریان برآش داده شد. نتایج مدل سازی حاکی از عملکرد هیدرولیکی مناسب آرایش ورودی یکنواخت به منظور استفاده از کل فضای محیط برای فرایند تصفیه می‌باشد. آرایش ورودی وسط نیز با رعایت نکاتی به منظور کاهش حجم مرده و میزان مسیرهای میان بر دارای عملکرد مناسبی است.

**واژه‌های کلیدی:** آرایش ورودی جریان، تالاب مصنوعی، مدل سازی جریان، مسیرهای میان بر

## ۱- مقدمه

متداول تصفیه فاضلاب، شامل حوضچه‌ای آب بندی شده با عناصری از قبیل ماده بستر (ذرات با دانه بندی مشخص)، گیاه، عایق آب بند و قسمت‌های ورودی و خروجی است. فاضلاب ورودی به این سامانه به واسطه حضور عواملی مانند گیاه، میکروارگانیسم و ماده بستر تحت تأثیر فرایندهای مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک قرار گرفته و تصفیه می‌شود. تالاب‌های مصنوعی بر اساس پارامتر رژیم جریان به دو دسته کلی سطحی و زیرسطحی

یکی از سامانه‌های تصفیه طبیعی و سازگار با محیط زیست به منظور استفاده مجدد از پساب، تالاب‌های مصنوعی<sup>۱</sup> هستند که هزینه ساخت و بهره‌برداری پایین تری نسبت به دیگر روش‌های تصفیه دارند. در تالاب‌های مصنوعی به دلیل الهام گیری از طبیعت، فرایندهای بیولوژیک تالاب‌های طبیعی برای حذف آلاینده‌ها صورت می‌گیرد. تالاب مصنوعی به عنوان یکی از سامانه‌های

<sup>1</sup> Constructed Wetland



افزایش می‌یابد. 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 (Mæhlum and Jenssen, 2003). همچنین راندمان حذف آلاینده‌ها در تالاب مصنوعی با افزایش زمان ماند هیدرولیکی و کاهش نرخ بار هیدرولیکی بهبود می‌یابد (Deblina and Gopal, 2010). کارگر بیده و همکاران در سال ۲۰۱۳ نیز به بررسی عملکرد تالاب مصنوعی جریان زیرسطحی افقی در حذف ترکیبات نیتروژن از فاضلاب در اقلیم سرد و خشک شهر بیرجند پرداختند. نتایج آنها نشان داد که کاهش نرخ بار هیدرولیکی سبب افزایش بازده حذف نیتروژن و کاهش بازده حذف آمونیم و نترات شده است. به این منظور برای افزایش بازده حذف نترات سامانه‌های هیبریدی پیشنهاد شده است (Kargar Bideh et al., 2013).

در پژوهشی در سال ۲۰۱۲ اثرات پارامترهای طراحی مانند نسبت طول به عرض، اندازه متوسط ذرات در محیط متخلخل و نرخ بار هیدرولیکی بر میزان حجم مرده در تالاب‌های مصنوعی با جریان افقی زیرسطحی مورد بررسی قرار گرفت (Jafet Rodríguez et al., 2012). نتایج نشان داد که نسبت طول به عرض بالاترین تأثیر را بر رفتار هیدرولیکی سامانه دارد. افزایش بار هیدرولیکی به دلیل افزایش آشفتگی جریان تأثیر منفی بر عملکرد سامانه داشته است. همچنین کاهش در قطر اسمی ذرات باعث افزایش پخشیدگی و کاهش میزان حجم مرده شده است. سو و همکاران در سال ۲۰۰۹ نشان دادند زمانی که نسبت طول به عرض در تالاب‌های مصنوعی با جریان سطحی بیشتر از ۵ باشد، راندمان هیدرولیکی به ۰/۹ و حتی بیشتر خواهد رسید. همچنین در این پژوهش، راندمان هیدرولیکی آرایش ورودی یکنواخت-خروجی وسط در تالاب مصنوعی سطحی با نسبت طول به عرض ۱/۸ برابر با ۸۸ درصد به دست آمد؛ در حالی که، این مقدار در آرایش ورودی گوشه-خروجی گوشه معادل با ۶۵ درصد برآورد شده است. (Su et al., 2009). هیدرودینامیک تالاب‌های مصنوعی و ویژگی‌های مسیرهای جریان زیرسطحی در آن توسط مدل‌های عددی بررسی می‌شود. استفاده از این مدل‌ها با کاهش زمان و

تقسیم می‌شوند که در نوع سطحی، سطح جریان سیال روی بستر خاک است و در نوع زیرسطحی، سطح سیال زیر بستر شن است که در آنها جریان به صورت افقی و یا عمودی حرکت می‌کند. همچنین، نوع دیگری از تالاب‌های مصنوعی با جریان زیرسطحی به نام تالاب‌های مصنوعی هیبریدی شناخته می‌شوند که جریان در آنها به صورت ترکیبی از جریان افقی و عمودی است (Okhravi et al., 2015). از پارامترهای مؤثر در طراحی و بهره‌برداری انواع سامانه‌های تالاب مصنوعی برای حذف آلاینده‌ها می‌توان به مساحت زمین موجود و توپوگرافی آن، محیط متخلخل، زمان ماند سامانه، آب‌های زیرزمینی، آب و هوا، غلظت آلاینده‌ها، شرایط بیولوژیکی و فاکتورهای بومی اشاره نمود.

پژوهش‌هایی که تاکنون انجام شده بر پارامترهای بیولوژیک سامانه تالاب مصنوعی نظیر رابطه بین میکروارگانیسم‌ها، نوع گیاهان و اثربخشی خاص هر کدام در میزان راندمان تصفیه و کاهش آلودگی، انواع محیط‌های متخلخل گوناگون با دانه‌بندی و هدایت هیدرولیکی متفاوت و تغییرات میزان تصفیه مرتبط با آنها متمرکز بوده است. همچنین پژوهش‌هایی پیرامون نرخ حذف پارامترهای شیمیایی نظیر BOD، COD، TSS، TDS،  $\text{NH}_4^+$ ،  $\text{NO}_3^-$ ،  $\text{PO}_4^{3-}$  و میزان مواد مغذی متفاوت در سامانه مانند کربن، نیتروژن، آهن و غیره انجام شده است (Kadlec et al., 2012; Vorkas and Lloyd, 2000, Vymazal, 2009).

پژوهش‌های بسیار محدودی پیرامون رفتار هیدرولیکی داخلی سامانه‌های تالاب مصنوعی صورت گرفته است. به همین دلیل برای بهینه‌سازی طراحی و افزایش راندمان حذف آلاینده‌ها در سامانه تالاب مصنوعی، توجه به اثرات پارامترهای هیدرولیکی بر رفتار سامانه امری ضروری به نظر می‌رسد. پارامترهای مؤثر بر میزان حجم مرده و چگونگی توزیع جریان نظیر نرخ بار هیدرولیکی، نسبت طول به عرض، ساختار ورودی و خروجی جریان، عمق آب و اندازه متوسط ذرات می‌تواند باعث بهبود رفتار هیدرولیکی سامانه و در نتیجه افزایش راندمان آن شود.

بررسی اثرات رفتار هیدرولیکی داخلی سامانه بر راندمان تصفیه، ارتباط تنگاتنگی با زمان ماند هیدرولیکی دارد (Suliman et al., 2005). این ارتباط از آنجایی مشخص می‌شود که حذف آلاینده‌ها با افزایش زمان تماس بین زیست‌توده‌های فعال و آب آلوده به دلیل تکمیل فرایندهای بیولوژیک و واکنش‌های آب



اندازه ذرات در یک متری ابتدا و انتهای سامانه یکسان و در دامنه ۱۲ تا ۲۵ میلی‌متر بود در حالی که اندازه این ذرات در قسمت میانی ۵ تا ۱۲ میلی‌متر بود. همچنین، تخلخل محیط حدود ۳۳ درصد بود. پس از عبور از محیط در داخل حوضچه‌ای برای استفاده‌های بعدی اعم از کشاورزی و غیره ذخیره می‌شد. در این سامانه از نوع نی محلی اصفهان استفاده شد.

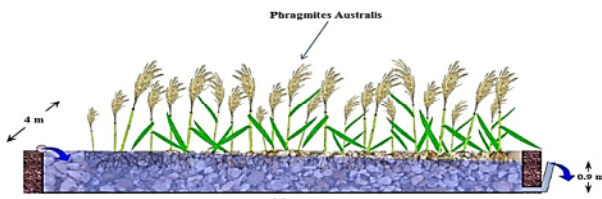


Fig. 1. Schematic of horizontal subsurface flow constructed wetland (HSSF CWs)

شکل ۱- طرح سامانه تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی

## ۱-۲- آرایش ورودی و خروجی

از آنجا که مکان قرارگیری ورودی و خروجی‌ها نیز تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر رفتار هیدرولیکی سامانه دارد، در این پژوهش آنها در مکان‌هایی قرار گرفته‌اند که میزان اثربخشی و بازیابی آنها بر توزیع جریان حداکثر باشد. این سامانه دارای لوله ورودی از جنس PVC در سطح و یک لوله PVC در قسمت انتهایی برای خروج پساب بود. سه حالت مختلف قرارگیری لوله ورودی جریان در تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی به صورت ورودی وسط، ورودی در گوشه و ورودی یکنواخت در تمام عرض تنظیم شد. در تمام حالات، خروجی سامانه از وسط بود (شکل ۲). برای تعیین روند حرکت آب در محیط متخلخل تالاب مصنوعی نیز از ۲۷ عدد پیرومتر

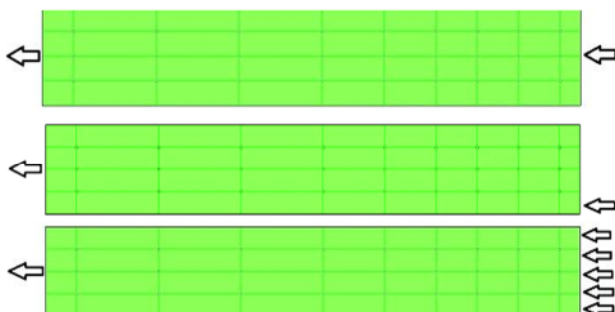


Fig. 2. Inlet and outlet configurations of the wetland system

شکل ۲- آرایش‌های ورودی و خروجی سامانه

هزینه، قابلیت تفسیر سناریوهای مختلفی را فراهم می‌سازد. از نتایج مدل‌سازی می‌توان به منظور تحلیل قدرت سامانه تالاب مصنوعی و تحلیل زمان ماند هیدرولیکی برای تصفیه پساب استفاده نمود. پژوهشگران متعددی با استفاده از مدل‌های عددی، رفتار هیدرولیکی، شیمیایی و بیولوژیکی در تالاب‌های مصنوعی سطحی و زیرسطحی را شبیه‌سازی نموده‌اند (Galvao et al., 2010, Giraldo et al., 2010, Liolios et al., 2012). سامسو و گارسیا در سال ۲۰۱۳ از نرم‌افزار کامسول با هدف شبیه‌سازی انتقال مواد بیوشیمیایی و فرایند تجزیه مواد آلی، نیتروژن و سولفور و تخمین زمان لازم برای ثابت شدن جوامع باکتری‌ها برای عملیات بهینه تصفیه در تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی استفاده نمودند. نتایج مدل‌سازی نشان داد که جوامع باکتری‌ها پس از ۸۰ روز از بهره‌برداری تالاب مصنوعی در سامانه به پایداری رسیده‌اند (Samsó and García, 2013). همچنین آنها با ارائه تئوری کارتریج در سال ۲۰۱۴ به بررسی توابع اثرگذار بر الگوهای حرکت باکتری‌ها و فرایند تجزیه در داخل سامانه تالاب مصنوعی پرداختند. تئوری حاصل شده از نتایج شبیه‌سازی به خوبی محدوده مناطق مستعد گرفتگی را نمایش و نحوه حرکت باکتری‌ها در تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی را مشخص نموده است (Samsó and García, 2014). به دلیل اهمیت رفتار هیدرولیکی تالاب مصنوعی بر عملکرد سامانه، بهینه‌سازی و مدیریت هرچه بهتر آن، ساختارهای متفاوتی از جریان ورودی و خروجی در این پژوهش بررسی و مدل‌سازی شد و شرایط داخلی سامانه تالاب مصنوعی اعم از خطوط جریان، خطوط هم‌فشار، پهنه‌بندی بار هیدرولیکی به منظور تحلیل عملکرد هیدرولیکی تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی و در نتیجه راندمان تصفیه آلاینده‌ها در آن صورت گرفت.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش از تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی با نسبت طول به عرض ۶/۵ و شیب یک درصد استفاده شد (شکل ۱). پساب مورد استفاده در این سامانه از تصفیه‌خانه شمال اصفهان تأمین شد. در این سامانه، برای غیرقابل نفوذسازی بستر، از ورق ۱/۵ میلی‌متری ژئوممبران استفاده شد.

برای ایجاد محیط متخلخل نیز از ذرات شن استفاده شد که



## جدول ۱- شرایط جریان تالاب مصنوعی در آرایش‌های مختلف ورودی جریان

Table 1. Flow conditions of constructed wetland under different inflow configurations

Configuration	Q(m <sup>3</sup> /d)	A (m <sup>2</sup> )	n	H (m)	L (m)	HLR (cm/d)	V=Ki	V <sub>real</sub> =V/n
1	6.58	4×0.9	33.25	0.15	26	6.33	1.83	5.5
2	6.52	4×0.9	33.25	0.15	26	6.27	1.81	5.44
3	6.4	4×0.9	33.25	0.15	26	6.15	1.78	5.35

## ۲-۳- مدل‌سازی رفتار هیدرولیکی

هدف اصلی این پژوهش تحلیل رفتار هیدرولیکی داخلی سامانه تحت تأثیر تغییر شرایط ورودی جریان است. به این منظور از نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیک<sup>۱</sup> بر پایه المان محدود برای شبیه‌سازی و تعیین خصوصیات هیدرولیکی جریان در تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی استفاده شد. برتری‌های این نرم‌افزار نسبت به سایر نرم‌افزارها را می‌توان در مولتی فیزیک بودن، عدم نیاز به نرم‌افزار جانبی برای مش‌بندی، پایداری در حل مسئله و قابلیت اتصال با نرم‌افزارهای زیادی مانند Solid Works، Cad، Catia و Matlab عنوان نمود (Wang, et al., 2011).

برای مدل‌سازی با استفاده کامسول از مدول جریان زیرسطحی استفاده شد. در هر مدول از این نرم‌افزار بر اساس قوانین و پارامترهای مرتبط با آن شبیه‌سازی صورت می‌گیرد. مدول جریان زیرسطحی از قانون داریسی استفاده می‌کند که معادله دیفرانسیلی حل آن به صورت معادله ۱ است. همچنین این مدول از روش حل پایدار برای جریان دائمی (مستقل از زمان) استفاده می‌کند. در معادله ۱،  $u$  میزان سرعت جریان داریسی بوده که به هدایت هیدرولیکی ( $k$ ) و لزجت دینامیکی سیال ( $\mu$ ) وابسته است. همچنین  $p$  و  $\rho$ ، فشار و جرم مخصوص سیال و  $Q_m$  میزان قدرت جریان (دبی) است

$$\nabla \cdot (\rho \mu) = Q_m \quad u = -\frac{k}{\mu} \nabla p \quad (1)$$

پس از تعریف فیزیک مورد نظر در نرم‌افزار و ترسیم هندسه تالاب مذکور، شرایط مرزی با وارد کردن داده‌های محیط (هدایت هیدرولیکی و تخلخل) و همچنین مشخص‌سازی شرایط محیط هندسه، پارامترهایی نظیر مکان قرارگیری ورودی و خروجی جریان و مقدار آنها تعیین شد. با توجه به داده‌های برداشتی پیژومترها، سطح آب فرضی در آنها به‌عنوان بار اولیه در شرایط پایدار مدل

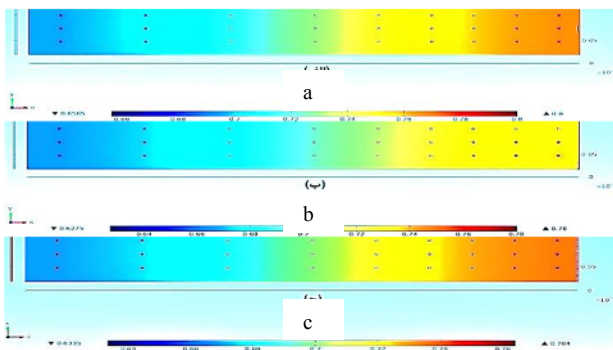
به صورت ۹ ردیف ۳ تایی مطابق با شکل ۲ استفاده شد. پیژومترها با هدف نمایش چگونگی حرکت آب در طول سامانه و واسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفتند.

## ۲-۲- اندازه‌گیری جریان

پساب از طریق پمپاژ و لوله به مکان حوضچه ورودی انتقال یافته و پس از تنظیم دبی در این حوضچه به وسیله سرریزهای تعبیه شده وارد سامانه تالاب مصنوعی زیرسطحی می‌شود. در نتیجه میزان تغییرات دبی روزانه بسیار کم و ثابت بود. به‌منظور مدل‌سازی جریان، اندازه‌گیری میزان جریان آب ورودی و خروجی تالاب ضروری است. نرخ جریان ورودی در زمان آزمایش و در آرایش‌های ورودی وسط، گوشه و یکنواخت به ترتیب ۶/۵۲، ۶/۵۸ و ۶/۴ مترمکعب بر روز بود. زمان ماند اسمی (تئوری) با پارامتر  $t_n$  از تقسیم حجم کل سامانه (حجم جریان با در نظرگیری میزان تخلخل) بر دبی جریان ورودی به دست می‌آید. این زمان به معنای زمان لازم برای عبور جریان به صورت یکنواخت از سامانه است در حالی که زمان ماند میانگین در سامانه توسط آزمایش ردیابی و منحنی زمان ماند هیدرولیکی حاصل می‌شود (Thackston et al., 1987). زمان ماند میانگین همواره از زمان ماند اسمی (شرایط ایده‌ال) کمتر بوده و افزایش اختلاف آنها به منزله کاهش پخشیدگی جریان در طول سامانه و افزایش حجم مرده در آن خواهد بود که نتیجتاً به کاهش راندمان سامانه منجر خواهد شد. به علاوه از مهم‌ترین اهداف این پژوهش نیز تفهیم اثرات آرایش‌های ورودی جریان در تغییر زمان ماند بود. زمان ماند اسمی در آرایش‌های ورودی وسط، گوشه و یکنواخت به ترتیب ۵/۱۸، ۵/۲۲ و ۵/۳۲ متر بر روز بود. پارامترهای مذکور در جدول ۱ نشان داده شده‌اند که  $Q$  دبی جریان ورودی،  $A$  سطح مقطع جریان،  $n$  تخلخل،  $H$  اختلاف ارتفاع ورودی و خروجی جریان،  $L$  طول سامانه،  $HRT$  نرخ بار هیدرولیکی،  $V$  سرعت داریسی و  $V_{real}$  سرعت واقعی جریان در محیط متخلخل است.

<sup>1</sup> Comsol Multiphysics

فشار در قسمت ورودی جریان از سمت دیگر سامانه بالاتر بوده و ناحیه کم فشاری را در سمت مخالف ایجاد نموده است. محدوده بار هیدرولیکی (۰/۶۲۷۵ تا ۰/۷۸ متر) این آرایش حاکی از تفاوت فشار ۱۵/۲۵ سانتی متری در ورودی و خروجی است. در بعضی از نقاط سامانه این مقدار از گرادیان هیدرولیکی جریان نیز بیشتر است. همچنین شکل ۳-۳ نمایانگر ورودی جریان به صورت یکنواخت در مدل است. نقاط ورودی جریان دارای فشار بالاتری نسبت به نقاط دیگر هستند. توازن فشار از ورودی به سمت خروجی جریان به طور کامل مشاهده می شود. در این حالت پخشیدگی جریان به حداکثر خود رسیده است. نواحی کم سرعت در گوشه های سامانه و در نتیجه مسیرهای میان بر نیز به حداقل خود رسیده است. تفاوت فشار در ورودی و خروجی جریان (۰/۶۳۳۵ تا ۰/۷۶۴ متر) تقریباً ۱۳/۰۵ سانتی متر است که نسبت به دو حالت قبلی کاهش محسوسی دارد.



**Fig. 3.** View of hydraulic head distribution along HSS CWs (a) Midpoint, (b) Corner, and (c) Uniform  
شکل ۳- نمایش توزیع بار هیدرولیکی در طول سامانه (a) ورودی وسط، (b) گوشه و (c) یکنواخت

خطوط جریان براساس حل معادله دیفرانسیلی حاکم در محیط متخلخل در شکل ۴ مشخص می باشند. نمایش این مسیرها در آرایش ورودی وسط در شکل ۴-۳ نمایانگر آن است که خطوط جریان پس از تغذیه از ناحیه وسط تالاب مصنوعی با تراکم بیشتری به پایین دست سامانه منتقل می شوند. در حالی که در شکل ۴-۳b، جریان به طور مستقیم از گوشه سامانه تالاب مصنوعی زیرسطحی به دلیل وجود مسیرهای میان بر به سرعت به نقطه خروجی رسیده است. عدم توازن خطوط جریان به سمت خروجی و ایجاد مسیرهای میان بر در سامانه از نقطه ورودی جریان سبب

به منظور حل معادله دیفرانسیلی خواهد بود. مشخص بودن سطح آب در پیژومترها امکان واسنجی مدل و پارامترهای دارای عدم قطعیت را فراهم می نماید. محدوده مدل مورد نظر بر اساس دستورالعمل نرم افزار کامسول و نوع مش بندی پیشنهادی آن و همچنین تجربه محققان پیشین به صورت مش مثلثی همراه با مش بندی چهاروجهی برای کنترل نهایی محدوده استفاده شده است. پس از ساخت مدل مفهومی و تعیین مؤلفه ها و لایه های آن، مدل حل و خطوط جریان و خطوط هم فشار ترسیم شد. همچنین پهنه بندی بار هیدرولیکی بر حسب متر به هدف تعیین رفتار هیدرولیکی داخلی سامانه تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی انجام شده است.

### ۳- نتایج و بحث

پس از اتمام حل معادلات توسط کامسول در این مدول، پهنه بندی بار هیدرولیکی توسط نرم افزار بر حسب متر مشخص شد. با توجه به میزان بار شبیه سازی شده در نرم افزار، امکان برآورد بار در هر سطحی از سامانه موجود می باشد و می توان سامانه را در شرایط دیگر مورد آزمایش و صحت سنجی قرار داد. به دلیل آنکه در سامانه مورد مطالعه کل بار هیدرولیکی همان بار فشار محسوب می شود، پهنه بندی بار هیدرولیکی کل با بار فشاری یکسان خواهد بود. دلیل این امر هندسه یکنواخت پیژومترها در مدل است. این موضوع در سامانه موجود به منظور واسنجی مدل نیز رعایت شده است. به همین خاطر بار رقوم به طور نسبی بین پیژومترها یکسان می باشد. همان طور که در شکل ۳-۳a در آرایش ورودی وسط مشخص است، در ابتدای سامانه عمل پخشیدگی جریان بیشتر بوده و میزان بار در ابتدای جریان به مراتب بیشتر است زیرا پخشیدگی یک عامل طولی و به سمت خروجی جریان، میرا است (Persson and Wittgren, 2004).

با توجه به محدوده بار هیدرولیکی کل در این آرایش (۰/۶۵۶۵ تا ۰/۸ متر)، تفاوت بار در ورودی و خروجی جریان تقریباً برابر ۱۴/۳۵ سانتی متر است. با توجه به شکل ۳-۳b، در نقطه ورودی جریان در گوشه سامانه، انتقال جریان بسیار زیاد بوده و میزان فشار به شدت در این ناحیه بالا رفته است. پهنه بندی فشار در نقاط مختلف این آرایش به خصوص نقاط ورودی جریان به صورت ناهمگون است به نحوی که



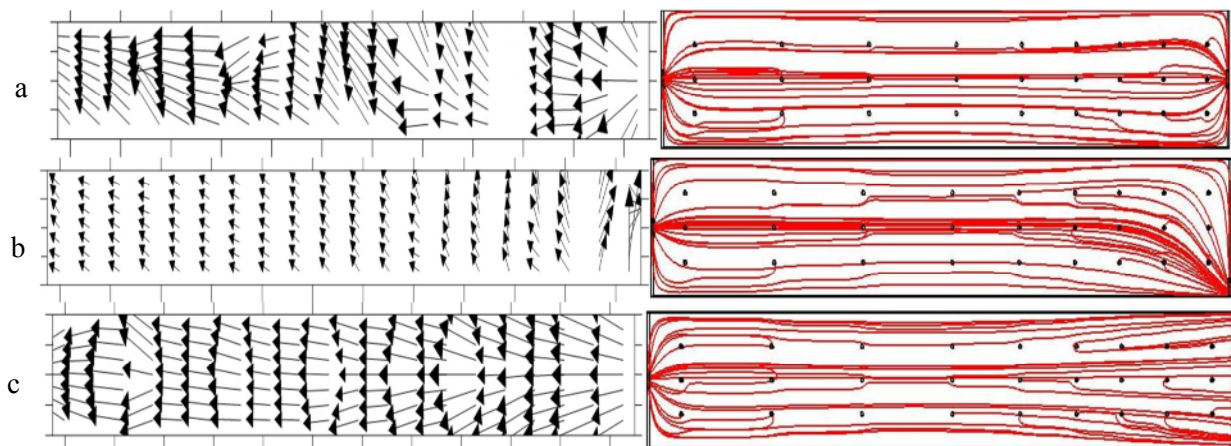


Fig. 4. View of streamlines and its direction for three different inflow configurations (a) Midpoint, (b) Corner, and (c) Uniform

شکل ۴- نمایش خطوط و جهت جریان در سه آرایش مختلف جریان ورودی

تقعر خطوط از ورودی به سمت خروجی به علت کاهش آشفتگی و افزایش یکنواختی جریان، کاهش یافته است. با توجه به اشکال ترسیمی اعم از فشار و سرعت، ناحیه کم فشار نسبی در گوشه‌های سامانه تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی مشاهده می‌شود که شدت آن در آرایش ورودی گوشه بسیار بالاتر است و علاوه بر نامنظم بودن خطوط هم‌فشار، محدوده کم فشار گوشه مخالف ورودی جریان به صورت غیر قابل استفاده و به‌عنوان حجم مرده شناخته می‌شود. در حالی که، ورودی جریان یکنواخت در سامانه سبب یکنواختی و توازن و کاهش میزان تقعر خطوط هم‌فشار در طول آن شده است.

برای نمایش تغییرات فشار در مقاطع طولی و عرضی سامانه، ۹ مقطع عرضی و ۳ مقطع طولی در این سامانه در نظر گرفته شده است. پس از حل مسئله توسط مدل و شبیه‌سازی فشار می‌توان فشار در هر نقطه از آن مورد محاسبه قرار داد. در این شکل محور  $X$  و  $Y$ ، عرض و طول سامانه است ( $۲۶ \times ۴$  متر). مقاطع عرضی به ترتیب در فواصل ۱، ۳، ۵، ۷، ۹، ۱۲، ۱۶، ۲۰ و ۲۴/۵ متری قرار دارند. فاصله مقاطع طولی با یکدیگر ۱ متر است (شکل ۶). تغییرات بار هیدرولیکی شبیه‌سازی شده در مقاطع طولی سامانه برای آرایش ورودی وسط در شکل ۷ نشان داده شده است. میزان بار هیدرولیکی توسط معادلات برآزش شده قابل محاسبه است. تغییرات بار هیدرولیکی برای هر سه نمودار تقریباً یکسان (خطی) می‌باشد. فشار در ابتدای سامانه زیاد بوده و به سمت انتهای آن کاهش یافته است و نزدیک به نقطه خروجی به دلیل تمرکز

تشکیل ناحیه‌ای کم‌فشار در گوشه مخالف ورودی جریان شده و منطقه‌ای مرده و غیر قابل استفاده در فرایند تصفیه را به وجود می‌آورد که میزان حجم ماندابی آن از حالت ورودی وسط بسیار بالاتر است. سرانجام در شکل ۴-۳ خطوط جریان کاملاً موازی از همان ابتدا مشاهده می‌شود و جریان در طول سامانه پخش می‌شود. مسیرهای میان‌بر در این حالت به حداقل رسیده و از تمامی حجم سامانه به منظور عملیات تصفیه استفاده می‌شود. مقایسه نتایج مدل‌سازی جریان زیرسطحی افقی با تحقیق مشابه سو و همکاران در سال ۲۰۰۹ در تالاب‌های سطحی تطابق بالایی داشته است (Su et al., 2009). خطوط جریان ترسیمی در آرایش ورودی گوشه نمایانگر مسیرهای میان‌بر متعدد و افزایش حجم ماندابی سامانه بوده است که سبب کاهش راندمان هیدرولیکی به ۶۵ درصد شده است. جهت خطوط جریان نیز به‌عنوان نمایه جهت بردار سرعت با تفسیر خطوط جریان ترسیمی مدل کامسول همگام است (شکل ۴). به نحوی که جهت خطوط جریان در آرایش ورودی یکنواخت کاملاً متوازن و با کمترین آشفتگی و تغییر جهت دیده می‌شود در حالی که تغییرات جهت خطوط جریان در آرایش ورودی وسط و به‌خصوص ورودی گوشه در طول سامانه متوازن نبوده و تحت تأثیر شرایط ورودی و خروجی جریان تغییر کرده است.

خطوط هم‌فشار ترسیمی در سامانه نشانگر دو تقعر متفاوت در ورودی و خروجی جریان است. دلیل این موضوع آشفتگی جریان در نزدیک نقطه ورودی و خروجی است (شکل ۵). همچنین میزان



تغییرات فشار در مقاطع ۵، ۶ و ۷ به صورت تقریباً خطی است. همچنین در این مقاطع هرچه از مرکز مقطع عرضی فاصله گرفته شود، بار هیدرولیکی کاهش می‌یابد. تقریباً در تمامی مقاطع عرضی جریان، بار هیدرولیکی نقاط وسط از سایر نقاط بیشتر است که این موضوع حاکی از وجود مسیرهای پرسرعت جریان در مرکز

جریان در یک نقطه فشار از مقطع قبلی خود بیشتر شده است. همانطور که در شکل ۷ مشخص است، بار هیدرولیکی در مقاطع عرضی به طور کلی از مقطع ۱ به مقطع ۹ کاهش می‌یابد. به عنوان نمونه تغییرات فشار در مقاطع نزدیک ورودی (مقطع ۱ و ۲) انحنای بیشتری نسبت به مقاطع بعدی داشته تا جایی که

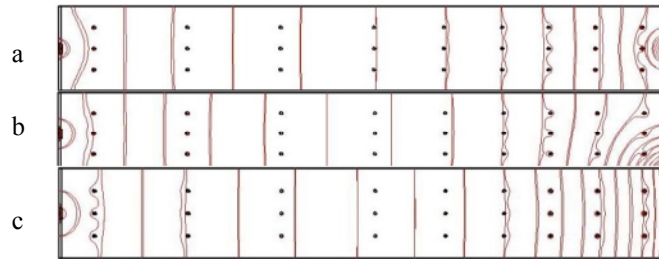


Fig. 5. Pressure contours for three different inlet flow configurations: (a) Midpoint, (b) Corner, and (c) Uniform

شکل ۵- خطوط هم فشار در سه آرایش مختلف جریان ورودی: (a وسط)، (b گوشه)، و (c یکنواخت)

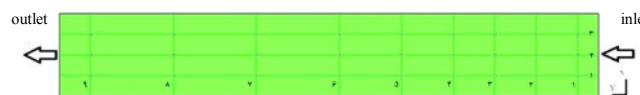


Fig. 6. Longitudinal and cross sections along the HSSF CWs

شکل ۶- مقاطع طولی و عرضی در طول سامانه

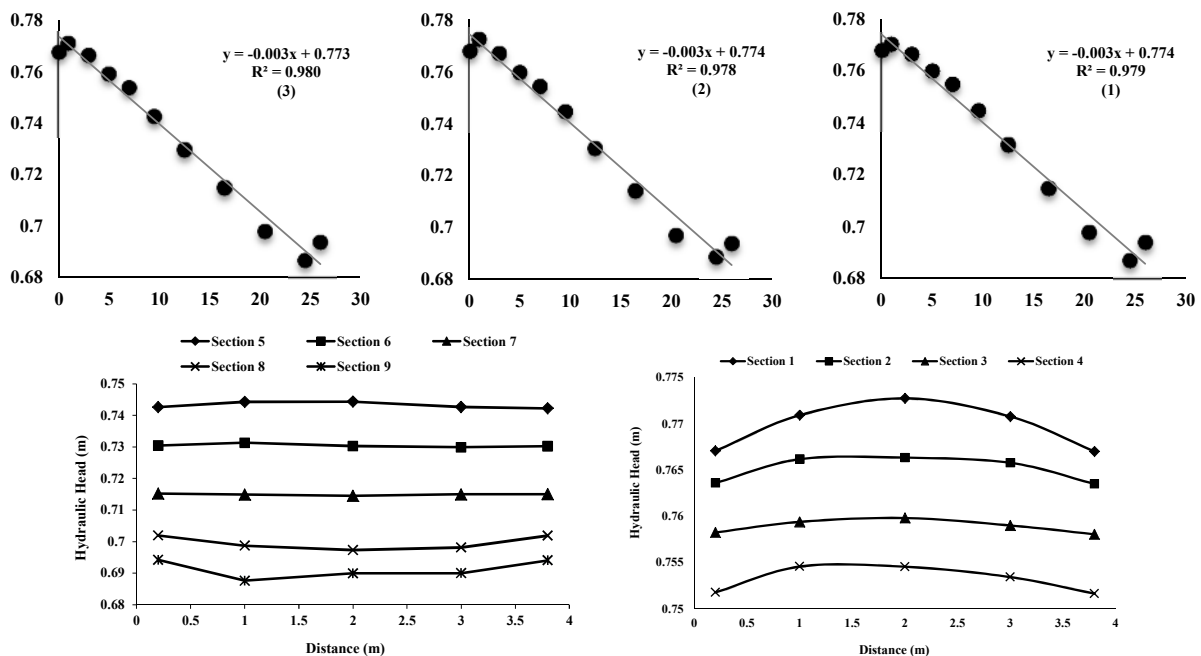


Fig. 7. Longitudinal and lateral alterations of hydraulic head in different sections for midpoint inlet configuration

شکل ۷- تغییرات طولی و عرضی بار هیدرولیکی در مقاطع مختلف آرایش ورودی وسط





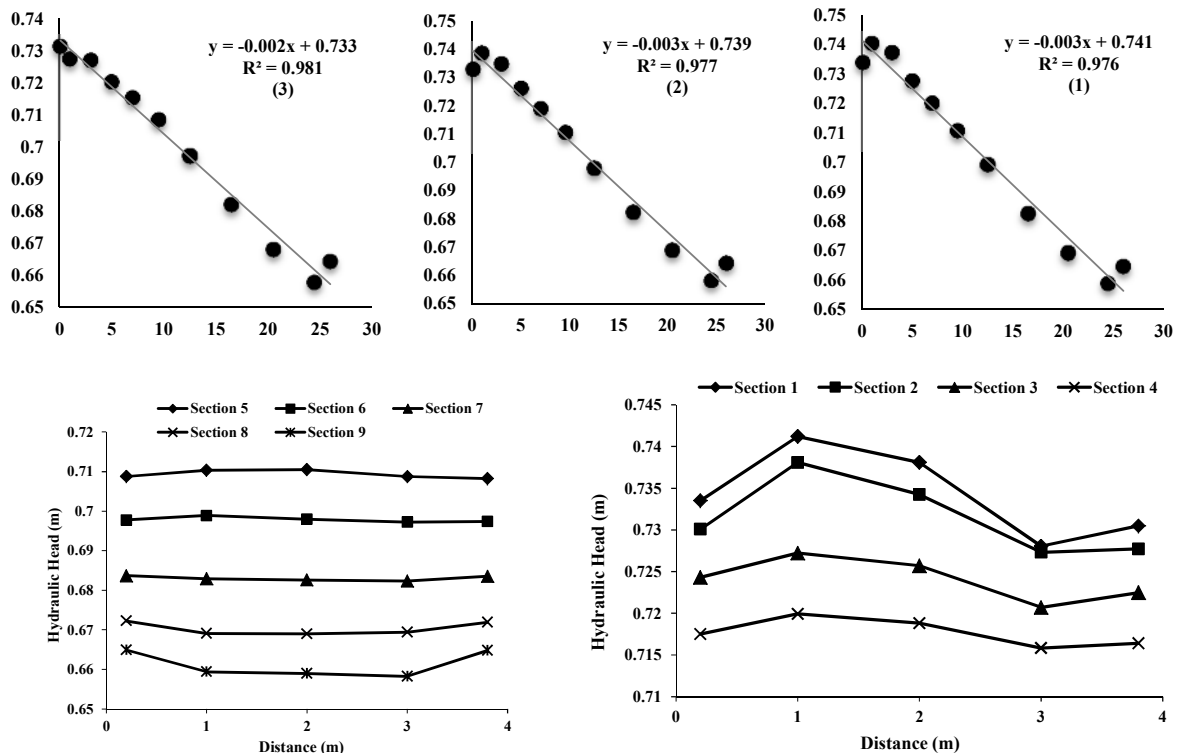


Fig. 8. Longitudinal and lateral alterations of hydraulic head in different sections for corner inlet configuration

شکل ۸- تغییرات طولی و عرضی بار هیدرولیکی در مقاطع مختلف آرایش ورودی گوشه

۰/۰۱۳، ۰/۰۱۱، ۰/۰۰۷، ۰/۰۰۵ متر است. این تغییرات نامنظم در این مقاطع به سمت مقاطع نزدیک به خروجی جریان یعنی رو به نظم بوده و توازن خطوط جریان بیشتر می‌شود. تغییرات بار هیدرولیکی در مقاطع طولی در آرایش ورودی وسط بسیار به یکدیگر نزدیک می‌باشند (شکل ۹). شیب خط هر سه مقطع یکسان بوده و شرایط یکنواخت داخل سامانه را گزارش می‌دهد. در هر سه مقطع علاوه بر یکسان بودن شیب خط جریان، عرض از مبدا آنها نیز یکسان است. توزیع فشار متوازن این آرایش ناشی از قرارگیری لوله ورودی جریان در تمام عرض سامانه است و در این حالت میزان پخشیدگی جریان در سامانه به حد اکثر خود رسیده و از تمام حجم آن برای عملیات تصفیه استفاده خواهد شد. توزیع فشار در طول سامانه به صورت یکنواخت بوده و توازنی بین نواحی پرفشار و کم فشار و نواحی با فشار متوسط دیده می‌شود. به عنوان مقایسه با حالت قبلی، تفاوت میزان فشار فاصله ۱ و ۳ متری در چهار مقطع اول به ترتیب برابر با ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۰۱ متر است. این تغییرات به طور کلی بسیار کوچک است اما دامنه آن در ورودی جریان بیشتر است. در مقاطع بعدی نیز دامنه

تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی است. در مقاطع نزدیک به خروجی جریان، نقاط وسط سامانه دارای بار هیدرولیکی کمتری می‌باشند که دلیل آن کاهش فشار در نزدیک خروجی جریان و افزایش نسبی فشار در گوشه‌های آن مقاطع است.

با توجه به مقاطع طولی شکل ۸ برای آرایش ورودی گوشه می‌توان نتیجه گرفت که مقاطع ۱ و ۲ در این آرایش به یکدیگر بسیار شبیه هستند و تغییرات طولی موزونی را دنبال می‌کنند. در این دو مقطع شیب خط یکسان است. اما مقطع طولی ۳ به دلیل وجود ناحیه کم فشار در ابتدای آن، نمودار متوازی نداشته است. در این مقطع فشار در ابتدا بسیار کم و به سمت نقطه خروجی رو به افزایش است. تفاوت بار هیدرولیکی در مقاطع ورودی جریان یعنی چهار مقطع اول بیشتر بوده و به سمت خروجی از میزان تغییرات کاسته می‌شود. نقطه حائز اهمیت در این آرایش، مکان قرارگیری نقطه‌ای با فاصله سه متری از محور X است که دارای جریان ماندابی است (گوشه مخالف جریان ورودی). نمایش خطوط هم‌فشار در این آرایش نیز مصداق این امر می‌باشد (شکل ۵). تفاوت میزان فشار فاصله ۱ و ۳ متری در چهار مقطع اول به ترتیب برابر با



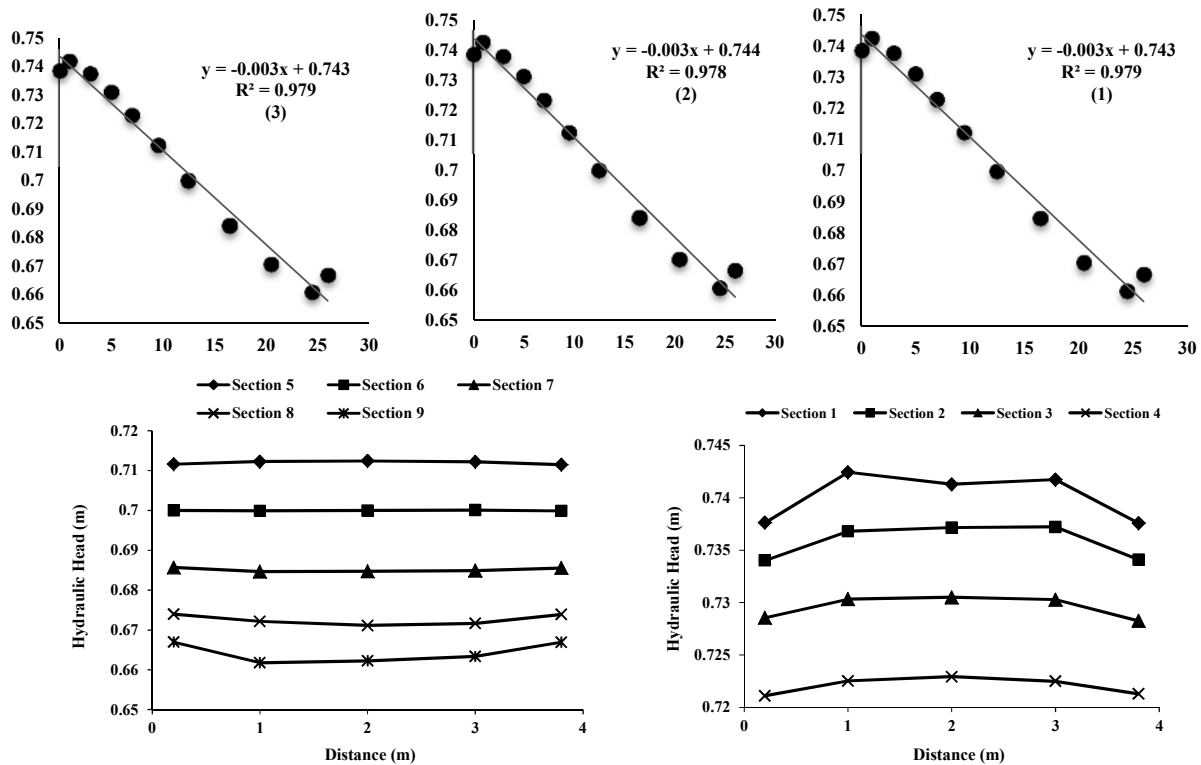


Fig. 9. Longitudinal and lateral alterations of hydraulic head in different sections for uniform inlet configuration

شکل ۹- تغییرات طولی و عرضی بار هیدرولیکی در مقاطع مختلف آرایش ورودی یکنواخت

سامانه تالاب مصنوعی اعم از پهنه‌بندی بار هیدرولیکی، خطوط جریان، خطوط هم‌فشار و مسیرهای میان‌بر استفاده شده است. کاهش در میزان مسیرهای میان‌بر نشان‌دهنده یکنواختی توزیع جریان در محیط متخلخل سامانه تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی شده و در نتیجه به‌طور مستقیم با افزایش زمان ماند در میزان راندمان هیدرولیکی آن اثرگذار است. همچنین افزایش میزان مسیرهای میان‌بر سبب کاهش زمان لازم برای فعالیت میکروارگانیسم‌ها شده و فرایند بیولوژیکی تصفیه پساب به درستی انجام نمی‌شود. به‌همین دلیل تغییرات بار هیدرولیکی در طول و عرض سامانه برای درک رفتار هیدرولیکی داخلی سامانه مدل‌سازی شد. دامنه تغییرات بار هیدرولیکی در آرایش‌های ورودی وسط، گوشه و یکنواخت به ترتیب ۱۴/۳۵، ۱۵/۲۵ و ۱۳/۰۵ سانتی‌متر است. این اعداد نمایشگر حداکثر و حداقل ناهمگونی فشار در آرایش ورودی گوشه و یکنواخت است. دلیل این امر، افزایش حجم مؤثر در آرایش ورودی یکنواخت، توازن تغییر فشار از ورودی به سمت خروجی سامانه و پخشیدگی یکنواخت جریان و کاهش میزان

تغییرات بسیار کم بوده و همین روند ادامه دارد. سرانجام برآزش معادلات محاسبه میزان بار هیدرولیکی در هر نقطه از سامانه و در آرایش‌های ورودی وسط، گوشه و یکنواخت به صورت خلاصه در معادلات ۲، ۳ و ۴ مشخص شده است. در این معادلات  $y$  میزان بار هیدرولیکی بر حسب متر و  $x$  میزان فاصله طولی نقطه مورد نظر از ورودی جریان است

$$y = -0.003x + 0.774 \quad (2)$$

$$y = -0.003x + 0.739 \quad (3)$$

$$y = -0.003x + 0.743 \quad (4)$$

#### ۴- نتیجه‌گیری

تشریح شرایط داخلی سامانه‌های تالاب مصنوعی اعم از زیرسطحی افقی و عمودی و یا هیبریدی، موضوع جدیدی است. به این منظور مدل‌سازی به‌عنوان ابزاری کارآمد برای نمایش شرایط داخلی



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 نیز این تفاوت‌ها قابل ملاحظه هستند.

مسیرهای میان‌بر در آن است. همچنین مقدار بار هیدرولیکی در هر نقطه و در هر آرایش را از معادلات برازش شده قابل محاسبه خواهد بود. به‌طور کلی با توجه به تفسیر نتایج هیدرولیکی مدل می‌توان استنتاج نمود که عملکرد هیدرولیکی سامانه تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی در آرایش ورودی یکنواخت ایده‌ال، در ورودی وسط مناسب و در آرایش ورودی گوشه ضعیف است. با

## References

- Deblina, G.H. & Gopal, B. 2010. Effect of hydraulic retention time on the treatment of secondary effluent in a subsurface flow constructed wetland. *Ecological Engineering*, 3, 1044-1051.
- Galvão, A.F., Matos, J.S., Ferreira, F.S. & Correia, F.N. 2010. Simulating flows in horizontal subsurface flow constructed wetlands operating in Portugal. *Ecological Engineering*, 36, 596-600.
- Giraldi, D., Vitturi, M.D.M. & Iannelli, R. 2010. FITOVERT: A dynamic numerical model of subsurface vertical flow constructed wetlands. *Environmental Modeling and Software*, 25, 633-640.
- Jafet Rodríguez, D., Giacomán Vallejos, G. & 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.
- Kadlec, R.H., Pries, J. & Lee, K. 2012. The Brighton treatment wetlands. *Ecological Engineering*, 47, 56-70.
- Kargar Bideh, R., Doosti, M.R. & Sayyadi, M. 2013. The use of horizontal subsurface flow constructed wetland for nitrogen components removal in cold and dry climate: A case Study of Birjand, Iran. *Journal of Water and Wastewater*, 25(3), 38-47. (In Persian)
- Liolios, K.A., Moutsopoulos, K.N. & Tsihrintzis, V.A. 2012. Modeling of flow and BOD fate in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Chemical Engineering Journal*, 200, 681-693.
- Mæhlum, T. & Jenssen, P.D. 2003. *Design and performance of integrated subsurface flow wetlands in a cold climate*. WIT Press, Southampton, UK.
- Okhravi, S.S., Eslamian, S.S. & Mohammadzade Miyab, N. 2015. Investigation and comparison between applications of different type of constructed wetland for wastewater treatment. *Water Engineering Conference and Exhibition*, Tehran, Iran. (In Persian)
- Persson, J. & Wittgren, H.B. 2004. How hydrological and hydraulic conditions affect performance of ponds. *Ecological Engineering*, 21, 259-269.
- Samsó, R. & García, J. 2013. Bacteria distribution and dynamics in constructed wetlands based on modelling results. *Science of the Total Environment*, 461, 430-440.
- Samsó, R. & 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.
- Su, T.M., Yang, Sh., Shih, S. & Lee, H. 2009. Optimal design for hydraulic efficiency performance of free-water-surface constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 35, 1200-1207.



- Suliman, F., French, H., Haugen, L.E., Klove, B. & 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.
- Thackston, E.L.F., Shields, Jr. & Schroeder, P.R. 1987. Residence time distributions of shallow basins. *Journal of Environmental Engineering*, 113, 1319-1332.
- Vorkas, C. & 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.
- Vymazal, J. 2009. The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. *Ecological Engineering*, 35, 1-17.
- Wang, X., Yue, H., Liu, G. & Zhao, Z. 2011. The application of COMSOL multiphysics in direct current method forward modeling. *Procedia Earth and Planetary Science*, 3, 266-272.

