



Simulation of total dissolved solids removal from domestic wastewater in vertical and horizontal subsurface constructed wetland

Zahra Karimi¹ , Maryam Navabian² 

¹ M.Sc. student of water engineering, Department of water engineering, Faculty of Agriculture Science, University of Guilan, Rasht, Iran. Email: karimi_tannaz@yahoo.com

² Corresponding Author, Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture Science, and a research member of the Water and Environmental Engineering Department of the Caspian Sea Water Basin Research Institute, University of Guilan, Rasht, Iran. Email: Navabian@guilan.ac.ir

ABSTRACT

The ever-increasing population and expansion of development activities regardless of the quantitative and qualitative management of water resources in most of the countries located in the dry belt areas have led to the aggravation of the water crisis, especially in Iran. Wastewater is one of the types of non-conventional water that can be put back into the consumption cycle if its pollutants and impurities are removed. In this research, the performance of the artificial wetland systems with vertical and horizontal subsurface flows under the cultivation of reed and typha plants for the treatment of the wastewater of Rasht city were simulated by the HYDRUS-2D model. The values of the statistical index of the normalized root-mean-square error (NRMSE) in wetlands without plants, under Reed and Typha cultivation were 6.5, 9.8 and 14.8%, respectively, which in comparison with the classification of Jaminson et al. (1991). The HYDRUS model has excellent (less than 10%) and good (10 and 20%) accuracy in simulating total dissolved solids in artificial wetlands. Therefore, the HYDRUS model recommends for the design of reducing the total dissolved solids of artificial wetlands.

Keywords: Constructed Wetland, Phytoremediation, Reed, Typha, Wastewater Treatment

Article Type: Research Article

Article history: Received: 08 April 2024 Revised: 10 July 2024 Accepted: 27 July 2024 ePublished: 22 September 2024

1. Introduction

Population growth and changes in the pattern of needs in accordance with economic growth and lifestyle changes have increased the need for suitable water sources. Treatment and reuse of wastewater is very important in order to reduce the water crisis and prevent the pollution of surface and underground water sources and ecological destruction caused by the discharge of sewage and preserv human health. Conventional wastewater treatment methods have many implementation limitations, including high cost, complex operations and maintenance, etc. For this reason, it is not possible to implement conventional and high-tech methods everywhere. While natural wastewater treatment systems have lower technology and less need for trained labor and at the same time have high efficiency. Among the solutions for green wastewater treatment, we can mention phytoremediation and artificial wetland system. An artificial terrestrial wetland that removes pollutants by creating a saturated porous environment and providing the conditions for the occurrence of physical, chemical and biological processes. Phytoremediation is a biological treatment method in which a plant reduces the pollutants by selective absorption of pollutants and accumulation of them in its tissues. In this method, various factors such as retention time, pollutant concentration, environmental factors (acidity, temperature) and plant characteristics (species, root system, etc.) are important. Since the artificial wetland is similar to a black box whose processes cannot be predicted, simulation models are used to design them with the aim of achieving the highest pollutant removal efficiency. The HYDRUS-2D model is an advanced two-dimensional model related to the simulation of water movement and solute and heat transfer in saturated and unsaturated porous media. In this model, Richards and dispersivity-diffusion equations have been used respectively to simulate water movement and solute transport, as well as features such as spatial distribution of plant roots, water absorption by plant roots, various equations of hydraulic properties of porous media and various initial and boundary conditions, the possibility to provide the simulation of an artificial wetland with plants.

2. Methodology

2.1. Experimental site and Measuring TDS

To collect the information from the model, six artificial wetland systems, including three vertical subsurface flow systems and three horizontal subsurface flow systems were constructed at the sewage treatment plant located in Fakhb, Rasht. From the three systems that were constructed, one system was considered without plants and the other two systems contained Reed and Typha plants. The wetlands were filled with Gravel in diameter of 5 to 25 mm. To adapt Plants with the cultivation environment and wastewater quality, the plants were irrigated by wastewater about three months. After the three months, the main data collection was done by sampling and checking the performance of the systems. Collecting data was for 9 months. During experiment, the raw wastewater sample was entered into the wetland systems and after the hydraulic retention time (about one month in winter and one week in spring and summer), were sampled from the outlet of the wetlands and the parameter of total dissolved solids measured.

2.2. Calibration and Validation HYDRUS-2D

In this research, the HYDRUS-2D model was used to simulate the processes governing the movement of water and transport of solutes and its

absorption by plants. S-ship model was used to estimate water absorption by Reed and Typha plants. The effective parameters of water movement and transport of solutes, including saturated hydraulic conductivity, longitudinal and transverse dispersivity, and diffusion of the wetland bed, were estimated using the inverse solution method, respectively, using the output flow data and the total dissolved solids of the output wastewater. Statistical indices were used to evaluate the accuracy of the model in the simulation of the purification process in the wetland. The data of days 112, 125, 131, 140, 146 and 152 from the start of the experiment were used for calibration and the data of days 187, 208, 215 and 222 from the start of the experiment were used to validate the wetlands.

3. Results and discussion

Comparison of the saturated water conductivity value estimated by the HYDRUS-2D model with Sheykhan et al.'s research (2019) showed that the model was able to estimate the hydraulic properties of the bed properly. The longitudinal and transverse dispersivity coefficients in the horizontal wetland were found to be almost half of the vertical wetlands, which is in line with the lower saturated water conductivity and as a result, the lower velocity of the wastewater in the pores in these wetlands compared to the vertical wetland. Dispersion coefficient was a more important factor in solute transport than dispersivity coefficients. On average, in vertical wetlands, the model was able to estimate the amount of reduction of total dissolved solids with about 2% less than the values measured in wetlands under plant cultivation, while in the horizontal wetland, this amount was between 3 and 5 percent.

4. Conclusions

According to the results of statistical indices, the estimated values of the total dissolved solids of the artificial wetland system under Reed cultivation were more consistent with the measured values than other wetlands. The results showed that the model has a suitable ability to simulate the movement of solutes and total dissolved solids, which means that it can be used in the design process of treatment in the wetland.

5. References

Pálffy, T. G., Molle, P., Langergraber, G., Troesch S., Gourdon R., & Meyer, D. (2016). Simulation of constructed wetlands treating combined sewer overflow using HYDRUS/CW2D. *Ecological Engineering*, 87, 340-347. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.11.048>

6. Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

7. Acknowledgments

The authors would like to thank Guilan Water and Wastewater Company and University of Guilan for providing the facilities to carry out the lysimetric and laboratory experiments of this study.

Cite this article: Karimi, Z., & Navabian, M. (2024). Simulation of total dissolved solids removal from domestic wastewater in vertical and horizontal subsurface constructed wetland, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(3), 17-39. DOI: 10.22126/ATWE.2024.10688.1124

Publisher: Razi University

© The Author(s).





شبیه سازی حذف کل جامدات محلول از فاضلاب شهری در تالاب مصنوعی با جریان های

زیر سطحی عمودی و افقی

زهرا کریمی^۱، مریم نوابیان^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: karimi_tannaz@yahoo.com

^۲ نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، و عضو وابسته پژوهشی گروه مهندسی آب و محیط زیست پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: Navabian@guilan.ac.ir

چکیده

افزایش روزافزون جمعیت و گسترش فعالیت های توسعه ای بدون توجه به مدیریت کمی و کیفی منابع آب در بیشتر کشورهای واقع در کمربند مناطق خشک منجر به تشدید بحران آب به ویژه در ایران شده است. فاضلاب یکی از انواع آب های نامتعارف محسوب می شود که در صورت حذف آلاینده ها و ناخالصی های آن، می تواند دوباره در چرخه مصرف قرار گیرد. تالاب های مصنوعی در ترکیب با گیاه پالایی به عنوان راهکار سبز قابلیت بهبود و استفاده مجدد از فاضلاب را فراهم می آورد. در این پژوهش، در راستای توسعه ابزارهای طراحی و مدیریت تالاب های مصنوعی، شبیه سازی عملکرد سامانه تالاب مصنوعی زیر سطحی عمودی و افقی تحت کشت دو گیاه نی و تیفا در تصفیه فاضلاب شهر رشت توسط مدل HYDRUS-2D بررسی شد. پس از ساخت تالاب های زیر سطحی عمودی و افقی، گیاهان نی و تیفا کشت و طی دوره آذر ۱۳۹۹ تا شهریور ۱۴۰۰، اقدام به نمونه برداری و اندازه گیری کل جامدات محلول از فاضلاب خام و تصفیه شده توسط تالاب ها شد. ارزیابی دقت مدل در دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی با استفاده از شاخص های آماری انجام شد. مقادیر شاخص آماری ریشه میانگین مجذور خطای نرمال شده (NRMSE) در مرحله اعتبارسنجی در تالاب های عمودی بدون گیاه، تحت کشت نی و تحت کشت تیفا به ترتیب ۶/۵، ۹/۸ و ۱۴/۸ درصد و در تالاب های افقی به ترتیب ۱۴/۸، ۶/۴ و ۱۷ درصد به دست آمد که در مقایسه با طبقه بندی جاینسون و همکاران نشان از دقت عالی (کمتر از ۱۰ درصد) و خوب (بین ۱۰ تا ۲۰ درصد) مدل HYDRUS-2D در شبیه سازی کل جامدات محلول در تالاب های مصنوعی دارد. از این رو استفاده از مدل HYDRUS-2D برای برآورد کل جامدات محلول در تالاب مصنوعی توصیه می شود هر چند دقت شبیه سازی در تالاب عمودی بیشتر از تالاب افقی بود.

واژه های کلیدی: تالاب افقی و عمودی، تصفیه فاضلاب، تیفا، گیاه پالایی، نی

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۲۰ فروردین ۱۴۰۳ اصلاح: ۲۰ تیر ۱۴۰۳ پذیرش: ۰۶ مرداد ۱۴۰۳ چاپ الکترونیکی: ۰۱ مهر ۱۴۰۳

استناد: کریمی، زهرا، و نوابیان، مریم. (۱۴۰۳). شبیه سازی حذف کل جامدات محلول از فاضلاب شهری در تالاب مصنوعی با جریان های زیر سطحی عمودی و افقی،

فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، ۴(۳)، ۱۷-۳۹. شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2024.10688.1124



مقدمه

رشد جمعیت و نیازهای بشری (مسکن، غذا و ...) از یک سو و تغییر الگوی نیازها با رشد اقتصادی و تغییر شیوه زندگی از دیگر سو، نیاز به منابع آب مناسب را افزایش داده است. پیش‌بینی‌های اخیر نیز حاکی از افزایش جمعیت به حدود ۹/۱ میلیارد نفر تا سال ۲۰۵۰ میلادی است. این به معنی این است که بخش کشاورزی بایستی نسبت به سال ۲۰۰۵ میلادی ۶۰ درصد محصول بیشتری را تولید نماید (الکساندراتوس و برانسمآ، ۲۰۱۲). از این رو با توجه به نیاز به تولید غذای بیشتر، نیاز به مصرف آب نیز افزایش می‌یابد. تصفیه و استفاده مجدد از فاضلاب موجب کاهش میزان برداشت آب از منابع سطحی و زیرزمینی شده و می‌تواند بحران کمبود آب را کاهش دهد. در کنار کاهش کمیت منابع آب، انتشار پساب‌های صنعتی، کشاورزی و شهری نیز از عوامل دیگر تهدیدکننده منابع محدود آب در ایران و جهان محسوب می‌شود. تخلیه فاضلاب به محیط‌زیست منجر به آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی، تخریب اکولوژیکی و بروز بیماری‌های حاد و مزمن می‌شود (حسینی و قدسیان^۲، ۲۰۱۱). از این رو می‌بایست قبل از تخلیه فاضلاب به منابع آب، راهکارهایی برای حذف آلاینده‌ها و بهبود وضعیت کیفی آن اندیشید.

روش‌های متداول تصفیه فاضلاب محدودیت‌های اجرایی زیادی از جمله هزینه بالا، بهره‌برداری و نگهداری پیچیده و ... دارند، به همین دلیل امکان اجرای روش‌های متداول و با تکنولوژی بالا در همه‌جا وجود ندارد. درحالی‌که سامانه‌های طبیعی تصفیه فاضلاب از تکنولوژی پایین‌تر و نیاز کمتر به نیروی کار آموزش‌دیده برخوردار هستند و درعین‌حال کارایی بالایی دارند (اسپرلینگ^۳، ۱۹۹۶). از جمله انواع سامانه‌های طبیعی تصفیه فاضلاب می‌توان به سامانه طبیعی خاک (سامانه نفوذ موضعی^۴، سامانه با سرعت کند^۵، سامانه با سرعت تند^۶ و سامانه با جریان سطحی^۷)، سامانه‌های آبی (برکه‌های طبیعی^۸، برکه‌های هواده‌ی^۹ و سامانه‌های گیاهی آبی شناور^{۱۰})، گیاه‌پالایی و سامانه تالاب مصنوعی اشاره کرد (مارتین و مارتین^{۱۱}، ۲۰۰۹). از سامانه‌های طبیعی تصفیه فاضلاب می‌توان به‌عنوان روش‌های سبز (دوست‌دار محیط‌زیست) نیز یاد کرد. تالاب‌های مصنوعی^{۱۲} یکی از روش‌های پرکاربرد در زمینه تصفیه فاضلاب است. از جمله مزایای روش تالاب مصنوعی نسبت به سایر روش‌های تصفیه فاضلاب، می‌توان به اجرا و کاربری ساده، هزینه پایین ساخت، عدم تجمع حشرات و عدم تولید بوی نامطبوع اشاره نمود. تالاب عبارت است از پهنه خاکی که در تمام یا بخشی از سال مرطوب است (کادلز و والاس^{۱۳}، ۲۰۰۹) در کشورهای توسعه‌یافته برای تصفیه فاضلاب خانگی، رواناب‌های کشاورزی، فاضلاب صنایع، شیرابه محل دفن زباله، سیلاب و رواناب شهری، تصفیه پیشرفته پساب و آب‌های آلوده به نیترات و فسفات از تالاب‌های مصنوعی استفاده می‌شود. محیط‌زیست تالاب‌ها می‌تواند به‌عنوان منبع مصرف‌کننده یا تغییردهنده مواد مغذی و کربن عمل کند. در یک تالاب تعداد زیادی از فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی به‌طور هم‌زمان فعال هستند و بر یکدیگر تأثیر می‌گذارند. تالاب‌های مصنوعی با در نظر گرفتن ویژگی‌هایی مانند نوع جریان هیدرولیکی، نوع بستر و نوع گیاه تقسیم‌بندی می‌شوند (ویمازال و کروپفلوا^{۱۴}، ۲۰۰۸). متداول‌ترین تقسیم‌بندی تالاب‌های مصنوعی بر اساس نوع جریان است که شامل جریان آزاد و زیرسطحی است (سعید و

¹ Alexandratos and Bruinsma

² Hosseini and Ghodsian

³ Sperling

⁴ Local Infiltration System

⁵ Slow-rate System

⁶ Rapid Infiltration System

⁷ Surface Flow System

⁸ Natural Lagoon

⁹ Aerated pond

¹⁰ Floating plant System

¹¹ Martin and Martin

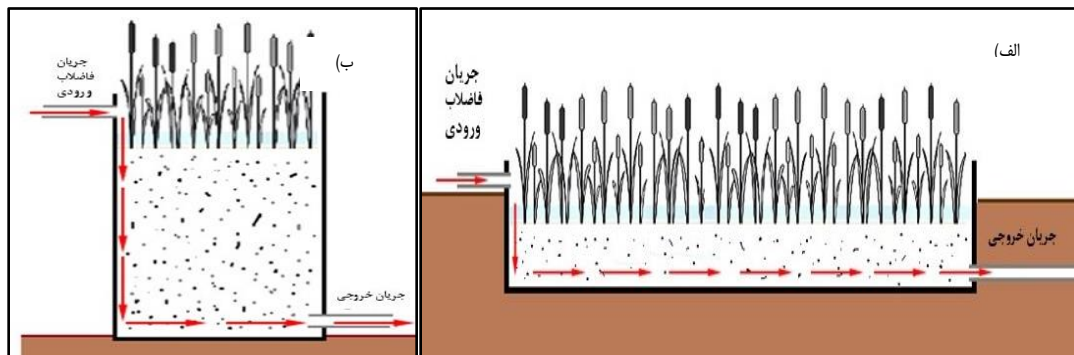
¹² Constructed Wetland

¹³ Kadlec and Wallace

¹⁴ Vymazal and Kropfelova

سان^۱، ۲۰۱۲). تالاب مصنوعی با جریان زیرسطحی عمودی توسط سیدل^۲ در سال ۱۹۶۷ طراحی شد (بخشوده^۳، ۲۰۲۰). در تالاب‌های مصنوعی با جریان زیرسطحی عمودی که در شکل (ب-۱) نشان داده شده است، تالاب به‌طور متناوب تغذیه می‌شود و این امر باعث می‌شود که زمانی که آب در بستر نفوذ کرده و بستر خالی است، اکسیژن فرصت بیشتری برای انتشار در بستر تالاب داشته باشد.

تکنولوژی تصفیه‌ی فاضلاب به کمک تالاب‌های مصنوعی با جریان زیرسطحی افقی در ابتدا در آلمان و بر اساس تحقیقات Seidel در دهه ۱۹۶۰ آغاز شد (سیدل^۴، ۱۹۶۱، سیدل، ۱۹۶۴، و سیدل، ۱۹۶۶). در تالاب مصنوعی با جریان زیرسطحی افقی که مطابق شکل (الف-۱) است، پساب از طریق لوله ورودی به سامانه تغذیه‌شده 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 به دلیل انتقال اکسیژن از ریزوم‌های گیاهان به محیط داخلی قرار دارد. به همین دلیل پساب هنگام عبور از منطقه هوازی، توسط فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی و تجزیه بیولوژیکی مورد تصفیه قرار می‌گیرد (اخروی و همکاران، ۱۳۹۴). این نوع سامانه‌های تالابی دارای توانایی بسیار بالایی برای حذف مواد آلی هستند. از جمله مزایای این نوع سامانه نیز می‌توان به تصفیه بالای ۹۰ درصد (همانند تصفیه پیشرفته در صورت طراحی دقیق)، عدم تولید بو و پشه، مدیریت بهتر و اطمینان‌پذیری بیشتر در سیال خروجی، عدم تولید لجن، بدون نیاز به انرژی به‌استثنای انرژی موردنیاز برای سستشوی بستر و تبخیر و نفوذ کم اشاره نمود. راندمان کم در حذف فسفر، گرفتگی بستر و نیاز به فضای زیاد از جمله معایب این سامانه است.



شکل ۱. شمایی از تالاب مصنوعی با جریان زیرسطحی افقی (الف) و عمودی (ب)

گیاه‌پالایی^۵ یک روش تصفیه‌ی بیولوژیک است که در آن با استفاده از گیاهان سبز شامل گونه‌های چوبی و علفی برای حذف آلاینده‌ها از آب‌و‌خاک کمک گرفته می‌شود. در این روش گیاه با جذب انتخابی آلاینده و تجمع آلاینده در بافت‌های خود موجب کاهش آن آلاینده در محیط خاک و ریشه می‌شود. این روش برای حذف مواد آلاینده از آب‌و‌خاک یا کاهش خطرات آلاینده‌های محیط‌زیست نظیر فلزات سنگین، عناصر کمیاب، ترکیبات آلی و مواد رادیواکتیو به‌کاربرده می‌شود. گیاه‌پالایی روشی ارزشمند، سازگار با محیط‌زیست و از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است. در این روش عوامل مختلفی مثل زمان ماند، غلظت آلاینده‌ها، فاکتورهای محیطی (اسیدیته، دما) و خصوصیات گیاه (گونه، سامانه ریشه و...)

¹ Saeed and Sun

² Seidel

³ Bakhshoodeha et al

⁴ Seidel

⁵ Phytoremediation

تأثیرگذار است (آناد و همکاران^۱، ۲۰۱۷). ترکیب روش های تصفیه گیاه پالایی و تالاب مصنوعی می تواند در بهبود عملکرد حذف آلاینده ها مؤثر باشد.

از آنجایی که تالاب مصنوعی را به جعبه سیاهی تشبیه می کنند که فرآیندهای آن قابل پیش بینی نیست، طی سه دهه ی اخیر استفاده از مدل های شبیه سازی برای طراحی آن ها باهدف دستیابی به بالاترین راندمان حذف آلاینده ها رایج شد. مدل های شبیه ساز محدودیت مدل های فیزیکی در مقیاس آزمایشگاهی و واقعی را از جمله نیاز به زمان و صرف هزینه زیاد ندارند؛ بنابراین دستیابی به روند شبیه سازی به عنوان یک ابزار مناسب برای ارزیابی فرآیندهای مختلف تالاب های مصنوعی بخصوص در ترکیب با گیاه پالایی اهمیت زیادی دارد. مدل HYDRUS-2D یک مدل پیشرفته دویعدی در ارتباط با شبیه سازی حرکت آب و انتقال املاح و حرارت در محیط متخلخل اشباع و غیراشباع است که توسط سیمونک و همکاران (۱۹۹۹) در آزمایشگاه شوری خاک آمریکا ارائه شده است. در این مدل از معادلات ریچاردز^۲ و انتقال-انتشار^۳ به ترتیب برای شبیه سازی حرکت آب و انتقال املاح استفاده شده است. همچنین قابلیت هایی مانند توزیع فضایی ریشه گیاه، جذب آب توسط ریشه گیاه، معادلات مختلف خصوصیات هیدرولیکی محیط متخلخل و شرایط متنوع مرزی و اولیه، امکان شبیه سازی انتقال املاح در حضور گیاه برای شرایط اشباع و غیراشباع را فراهم آورده است.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

اولین آزمایش ها و پژوهش های صورت گرفته مبنی بر احتمال تصفیه ی فاضلاب با گیاهان تالابی در اوایل سال ۱۹۵۰ در آلمان توسط سیدل انجام شد (سیدل^۴، ۱۹۵۵). حسین و اسکولز^۵ (۲۰۱۷) به منظور تصفیه فاضلاب یک کارخانه نساجی از تالاب مصنوعی با جریان زیرسطحی عمودی در انگلستان استفاده کردند. در این پژوهش از ۲۲ تالاب مصنوعی تحت کشت گیاه نی استفاده شد. عملکرد ثبت شده در این تالاب ها برای حذف اکسیژن مورد نیاز شیمیایی بین ۵۰ تا ۹۰ درصد با توجه به غلظت اولیه ورودی، متفاوت بود. قلی پور و همکاران^۶ (۲۰۲۰)، در پژوهشی پژوهشی عملکرد یک سامانه تالاب مصنوعی با جریان زیرسطحی افقی را برای بازه زمانی چهار ماه مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق عملکرد حذف تالاب مصنوعی برای پارامترهای نیاز بیولوژیکی اکسیژن، نیاز شیمیایی اکسیژن، کل جامدات معلق، نیتروژن کل و فسفر کل به ترتیب ۸۹/۹، ۸۵/۹، ۹۹/۶، ۹۰/۹ و ۸۷/۲ درصد به دست آمد.

در خلال سال های گذشته مدل هایی با پیچیدگی های مختلف برای توصیف فرآیند تصفیه در تالاب های مصنوعی توسعه پیدا کرده اند. هدف اصلی این مدل سازی ها درک بهتر از فرآیندهای بیولوژیکی و شیمیایی است که در تالاب ها اتفاق می افتد تا بتوان با استفاده از مدل سازی شرایط طراحی را به منظور حذف بیشتر آلاینده ها بهبود بخشید. از میان مدل های موجود، مدل HYDRUS-2D یک مدل پیشرفته در ارتباط با حرکت آب و انتقال املاح در محیط متخلخل و ناحیه ی توسعه ریشه است که قابلیت برآورد جذب املاح توسط گیاه را نیز دارد.

توسکانو و همکاران^۷ (۲۰۰۸)، به شبیه سازی حذف آلاینده ها در یک طرح آزمایشی سامانه ی تالاب مصنوعی زیرسطحی در ایتالیا پرداختند. بدین منظور از داده های هشت تالاب مصنوعی که گیاه نی در آن ها کشت شده بود، استفاده شد. نتایج شبیه سازی جریان و انتقال املاح بیانگر

¹ Anand et al

² Richards

³ Advection-dispersion Equation

⁴ Seidel

⁵ Hussein and Schols

⁶ Gholipour et al

⁷ Toscano et al

این موضوع بود که برای یک شبیه‌سازی نزدیک به واقعیت باید پارامترهای هیدرولیکی را به‌طور صحیح و دقیق برای مدل تعریف نمود. نتایج نشان داد که مدل قادر است مقدار نیاز شیمیایی اکسیژن را نزدیک به مقدار اندازه‌گیری شده، تخمین بزند.

ریزو و همکاران^۱ (۲۰۱۴)، به شبیه‌سازی حذف نیاز شیمیایی اکسیژن و آمونیم در سامانه تالاب مصنوعی افقی با استفاده از مدل HYDRUS-CWM در یک طرح آزمایشگاهی در پرتغال پرداختند. در این پژوهش شش تالاب مصنوعی افقی به دو گروه سه‌تایی A و B تقسیم شدند و هر کدام از گروه‌ها تحت کشت گیاه نی و پیژر مرداب بود. میزان درصد حذف مشاهداتی COD در تالاب گروه A و B به ترتیب برابر ۶۹ و ۶۶ درصد و میزان درصد حذف تخمینی مدل به ترتیب برای گروه A و B ۶۸ و ۶۹ درصد بود. مقدار درصد خطای میانگین نیز در گروه A و B به ترتیب ۲۲ و ۱۷/۵ درصد گزارش شد. مقدار درصد خطای میانگین آمونیم برای گروه A و B به ترتیب ۳۷ و ۲۴/۳ درصد به دست آمد. آپایاد و همکاران^۲ (۲۰۱۷) گزارش کردند که تالاب‌های مصنوعی افقی توانستند به ترتیب ۶۱/۹ و ۷۲/۱۲ درصد کل جامدات محلول و معلق را تحت کشت تیفا و ۵۳/۴۷ و ۵۵/۴۶ درصد را تحت کشت نی حذف نمایند.

راعود و همکاران^۳ (۲۰۱۸)، با استفاده از مدل CW2D به شبیه‌سازی تصفیه فاضلاب یک مدرسه در کنیا در تالاب مصنوعی زیرسطحی افقی پرداختند. بدین منظور تالابی به طول، عرض و عمق ۲، ۱ و ۰/۸۶ متر ساخته شد و تحت کشت گیاه علف وتیور^۴ قرار گرفت. مدت‌زمان نمونه‌برداری ۱۶ هفته بود. جنس بستر تالاب شنی و زمان ماند هیدرولیکی در آن ۴۸ ساعت بود. در این پژوهش دقت شبیه‌سازی پارامترهای نیاز بیولوژیکی اکسیژن، فسفر کل، آمونیم، نیترات و نیتريت موردبررسی قرار گرفتند. ضریب همبستگی^۵ (r) به ترتیب برای پارامترهای ذکر شده برابر ۰/۹۵۶، ۰/۸۷۶، ۰/۹۳۵، ۰/۹۶۹ و ۰/۸۲۵ به دست آمد. نتایج ارزیابی آماری نشان داد که در مجموع مدل در پیش‌بینی مقادیر، عملکرد خوبی داشته است. راهی و همکاران^۶ (۲۰۲۰) با استفاده از مدل COMSOL، مقادیر نیاز شیمیایی اکسیژن و آمونیم خروجی از تالاب مصنوعی حاوی گیاه را شبیه‌سازی و نتایج مدل را قابل قبول گزارش کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که هدایت الکتریکی، کل جامدات محلول و سولفات از پارامترهای کیفی بودند که در خروجی تالاب نسبت به فاضلاب خاک افزایش محسوسی داشتند.

با توجه به بحران‌های آبی و نیاز به بازچرخانی^۷ ارزان، آسان و درعین‌حال با بازدهی بالا، همچنین رویکرد استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده برای کشاورزی بخصوص گیاهان حساس به شوری، هدف از این پژوهش ارزیابی شبیه‌سازی کل جامدات محلول در روند تصفیه فاضلاب در تالاب‌های مصنوعی عمودی و افقی در نظر گرفته شد.

روش پژوهش

ساخت مدل فیزیکی تالاب مصنوعی

برای جمع‌آوری اطلاعات موردنیاز در شبیه‌سازی شش سامانه تالاب مصنوعی شامل سه سامانه جریان زیرسطحی عمودی و سه سامانه جریان زیرسطحی افقی مطابق شکل (۲) در تصفیه‌خانه فاضلاب واقع در فخر رشت (عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۳۲ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۵۵ دقیقه شرقی) ساخته شد. دو سامانه تالاب مصنوعی زیرسطحی عمودی و افقی احداث شد که هر یک شامل سه تیمار گیاهی یعنی کاشت نی، کاشت تیفا و بدون کشت بودند. برای ساخت سامانه‌های تالاب مصنوعی زیرسطحی عمودی از مخازن پلی‌وینیل کلراید

¹ Rizzo et al

² Upadhyaya et al

³ Raude et al

⁴ Vetiver (Scientific name: *Chrysopogon zizanioides*)

⁵ Correlation Coefficient

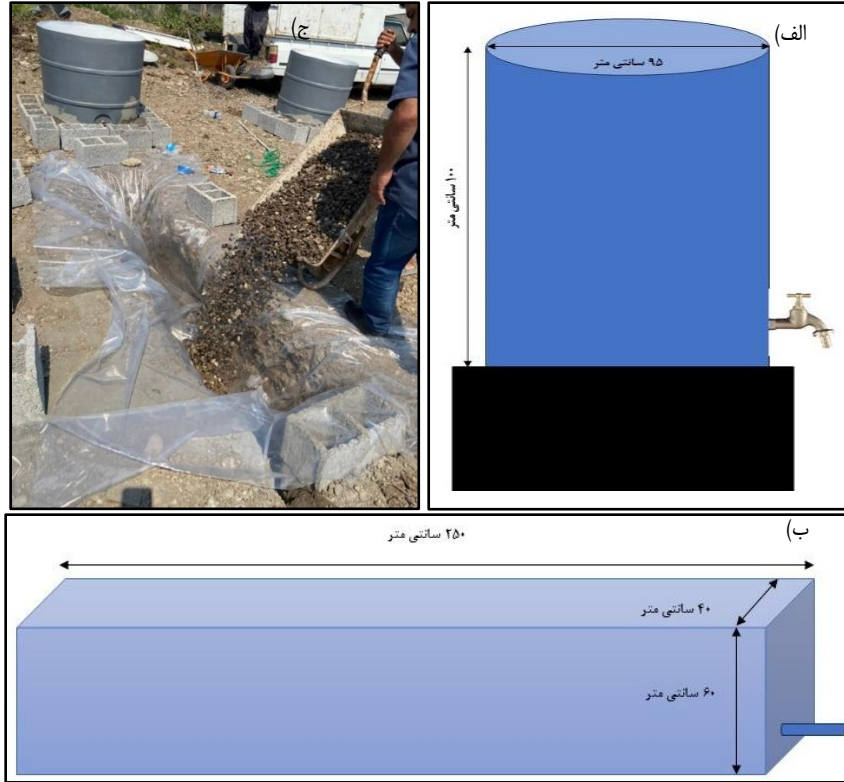
⁶ Rahi et al

⁷ Recycling

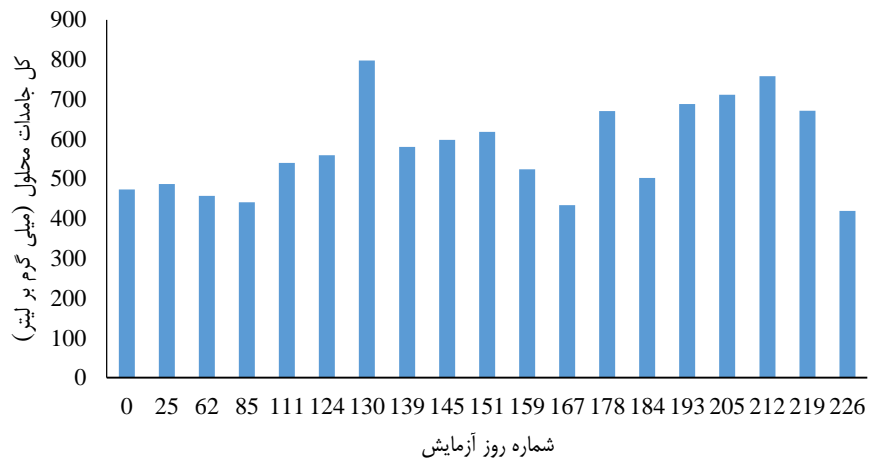
(PVC) با ارتفاع ۱۰۰ و قطر ۹۵ سانتی‌متر استفاده شد. برای ساخت سامانه‌های تالاب مصنوعی افقی، سه حوضچه به عرض ۴۰، طول ۲۵۰ و عمق ۶۰ سانتی‌متر و با شیب یک درصد در زمین تسطیح شده احداث شد. کف و دیواره‌های حوضچه‌های احداثی با یک‌لایه سیمان صاف و یکدست و سپس جهت اطمینان از جلوگیری از نشست فاضلاب، از یک‌لایه پلاستیک ضخیم برای آب‌بندی حوضچه‌ها استفاده شد. برای بستر تالاب از سنگ‌ریزه‌های مناسب موجود در بازار با قطر ۵ تا ۲۵ میلی‌متر استفاده شد. تالاب‌های افقی تا عمق ۴۰ سانتی‌متر و تالاب‌های عمودی تا عمق ۶۵ سانتی‌متر از سنگ‌ریزه پر شدند (بخشی از تالاب‌ها برای اعمال ارتفاع فاضلاب روی بستر و سرریز نشدن در زمان بارندگی خالی نگه‌داشته شد). بعد از بسترسازی مناسب تالاب‌ها، در مرحله‌ی کاشت گیاه برای اطمینان از سازگاری گیاهان با فاضلاب تصفیه‌خانه از گیاهان نی و تیقای خودرو موجود در محوطه تصفیه‌خانه استفاده شد. برای انتخاب گیاه سعی شد از گیاهانی استفاده شود که از نظر ابعاد و گستردگی ریشه در شرایط یکسانی قرار داشته باشند. در ازای حدود ۴۰۰ تا ۴۵۰ سانتی‌متر مربع از سطح، یک بوته در تالاب‌ها کاشته شد (۱۶ بوته در تالاب‌های عمودی و ۲۰ بوته در تالاب‌های افقی). در مهر ماه گیاهان به تالاب‌ها منتقل و برای سازگاری گیاهان با محیط کشت و فاضلاب و همچنین ترمیم آسیب رسیده به ریشه گیاهان در زمان انتقال، مدت‌زمان سه ماه بعد از کشت به گیاهان فرصت داده شد. در این بازه زمانی فاضلاب تصفیه‌شده به‌صورت دوره‌ای (دو هفته یک‌بار) از تالاب‌ها تخلیه و مجدداً فاضلاب خام تا ایجاد شرایط غرقاب به عمق ۱۰ سانتی‌متر به سامانه‌ها تزریق شد. بعد از طی مدت‌زمان سه ماه، داده‌برداری اصلی با نمونه‌برداری و بررسی عملکرد سامانه‌ها انجام شد. در ۲۵ آذرماه سال ۱۳۹۹ به مدت ۹ ماه، نمونه فاضلاب خام به داخل سامانه‌های تالاب وارد و پس از گذشت زمان‌مانند هیدرولیکی (حدود یک ماه در زمستان و یک هفته در فصل بهار و تابستان)، از خروجی تالاب‌ها نمونه‌برداری و پارامتر کل جامدات محلول^۱ نمونه‌ها با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج^۲ با دقت یک‌صدم میلی‌گرم بر لیتر اندازه‌گیری شد. مقادیر کل جامدات محلول فاضلاب خام تصفیه‌خانه در شکل (۳) نشان داده‌شده است. بر اساس نتایج، بیشترین و کمترین مقدار کل جامدات محلول به ترتیب در اواخر فصل بهار و زمستان روی داده است.

^۱ Total Dissolved Solids (TDS)

^۲ Multi Conductivity Meter (Jenway- England)



شکل ۲. شمایی از تالاب مصنوعی با جریان عمودی (الف) و افقی (ب) ساخته‌شده در پژوهش و نحوه آب‌بندی تالاب افقی (ج)



شکل ۳. مقادیر کل جامدات محلول فاضلاب خام در طول دوره آزمایش

واسنجی^۱ و اعتبارسنجی^۲ مدل HYDRUS-2D

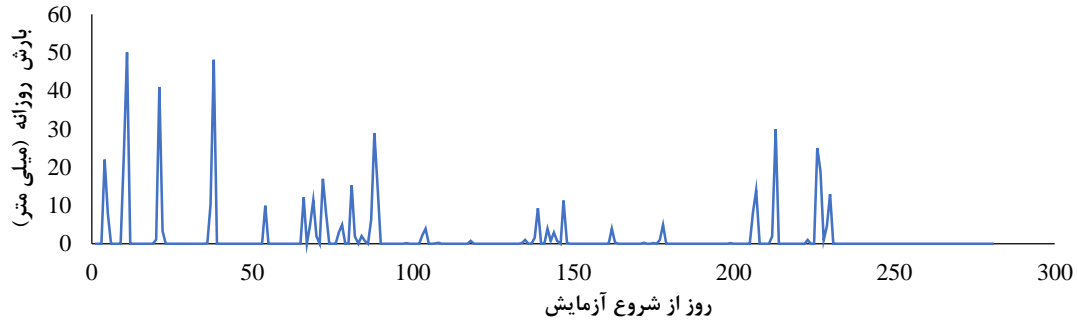
با توجه به نیاز مدل HYDRUS-2D به اطلاعات هواشناسی و مقادیر تبخیر-تعرق گیاه نی و تیفا، پارامترهای دمای کمینه، دمای بیشینه، درصد رطوبت، ساعات آفتابی، سرعت باد و بارش روزانه از ایستگاه سینوپتیک فرودگاه بین‌المللی سردار جنگل شهر رشت (کد ۴۰۷۱۹) دریافت شد. در جدول (۱) میانگین ماهانه داده‌های هواشناسی و در شکل (۴) میزان بارش روزانه در طول دوره آزمایش آورده شده است. با توجه به مقادیر جدول (۱)، بیشترین دما در مردادماه روی داده است اما بیشترین دمای میانگین ماهانه متعلق به تیر ماه بود، بنابراین انتظار می‌رود در این ماه‌ها فعالیت گیاه بیشتر باشد و تأثیر بیشتری بر جذب املاح توسط گیاه بگذارد. همان‌طور که در شکل (۴) مشخص است بیشترین میزان بارش روزانه در فصل زمستان بود و همچنین مقادیر قابل توجه بارش در اوایل فصل بهار و اواخر تابستان روی داد که می‌تواند بر غلظت فاضلاب و تبخیر از سطح تالاب تأثیرگذار باشد.

جدول ۱. میانگین ماهانه داده‌های هواشناسی منطقه مورد مطالعه در دوره آزمایش

سال	ماه	بارش (میلی‌متر)	دمای بیشینه (درجه سلسیوس)	دمای کمینه (درجه سلسیوس)	دمای میانگین (درجه سلسیوس)
۱۳۹۹	آذر	۲۴۱/۲	۱۳/۴	۲/۶	۹
۱۳۹۹	دی	۱۲۱/۷	۲۵/۴	-۱	۸
۱۳۹۹	بهمن	۸۲/۶۲	۲۷/۲	-۱/۸	۹
۱۳۹۹	اسفند	۱۲۱/۷۴	۱۹/۲	۰/۲	۷/۵
۱۴۰۰	فروردین	۷/۷۴	۳۴	۶	۱۴/۴
۱۴۰۰	اردیبهشت	۳۲/۲۶	۳۰/۸	۱۱/۸	۱۸/۷
۱۴۰۰	خرداد	۱۰۹/۱	۳۲/۲	۱۷/۲	۲۴/۳
۱۴۰۰	تیر	۴۲/۵۴	۳۵/۲	۲۰/۶	۲۷/۴
۱۴۰۰	مرداد	۱۷۴/۸۶	۳۶	۱۷/۴	۲۵/۹
۱۴۰۰	شهریور	۹۸/۹	۳۱	۱۸	۲۳/۵

¹ Calibration

² Validation

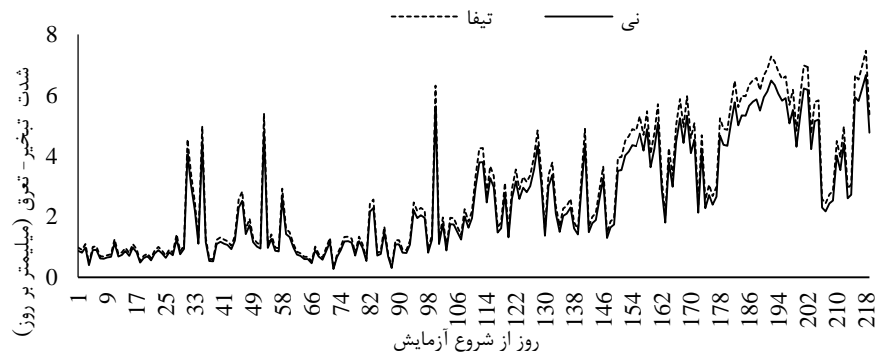


شکل ۴. بارش روزانه رخ داده در مدت انجام آزمایش

برای محاسبه تبخیر-تعرق واقعی گیاهان نی و تیفا، تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از رابطه پنمن-مانتیث و بر اساس اطلاعات هواشناسی طول دوره رشد محاسبه و در ضرایب گیاهی نی و تیفا ضرب شد (رابطه ۱). ضرایب گیاهی نی به میزان ۱، ۱/۲ و ۱ برای گیاه تیفا به میزان ۱/۱، ۱/۴ و ۱/۱ به ترتیب برای مراحل اولیه، میانی و انتهایی دوره رشد گیاه در نظر گرفته شدند (آلن و همکاران^۱، ۱۹۹۸). شکل (۵) تبخیر-تعرق گیاه نی و تیفا را طی دوره رشد نشان می‌دهد. همان‌طور که قابل مشاهده است مقدار تبخیر-تعرق گیاه تیفا از نی بیشتر است.

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (1)$$

که در آن ET_c ، ET_0 و K_c به ترتیب تبخیر-تعرق استاندارد گیاه (LT^{-1})، تبخیر-تعرق گیاه مرجع (LT^{-1}) و ضریب گیاهی هستند.



شکل ۵. میزان شدت تبخیر-تعرق گیاه نی و تیفا در مدت انجام آزمایش

در این پژوهش از مدل S-Shape مدل HYDRUS-2D برای شبیه‌سازی جذب آب توسط گیاه استفاده شد. در این مدل پارامتر P_{50} (بار آبی در زمانی که ۵۰ درصد جذب آب کاهش یابد) به روش سعی و خطا در مرحله واسنجی و پارامتر P_3 و P_w (به ترتیب بیانگر توان معادله عکس‌العمل جذب آب توسط ریشه در شرایط تنش آبی و بار آبی در نقطه پژمردگی گیاه که در کمتر از آن تعرق متوقف می‌شود) بر اساس پیشنهاد مدل HYDRUS-2D برابر با ۳ و 1×10^{15} - سانتی‌متر انتخاب شدند. در شبیه‌سازی تالاب‌های حاوی گیاه، تفاوت در لحاظ نمودن اثر حضور گیاه بر جذب آب و املاح است. از آنجاکه شرایط فیزیکی و هیدرولیکی تالاب مصنوعی حاوی نی و تیفا با تالاب مصنوعی

¹ Allen et al

شاهد (بدون گیاه) یکسان بود، از ضرایب بهینه شده در مرحله واسنجی تالاب شاهد استفاده شد. بنابراین برای تعیین پارامترهای جذب آب توسط ریشه گیاهان، در مرحله واسنجی تالاب های عمودی، با استفاده از داده های این دو تالاب و به روش سعی و خطا و مقایسه مقدار تخمینی و مشاهداتی کل جامدات محلول، پارامتر جذب آب توسط ریشه (P₅₀ در مدل جذب آب S-Shape) برای دو گیاه نی و تیفا، ۵۰- سانتی متر برآورد شد. به همین ترتیب در تالاب افقی حاوی گیاه نی و تیفا، پارامتر جذب آب توسط ریشه (P₅₀)، ۳۰- سانتی متر به دست آمد. اطلاعات توزیع ریشه شامل حداکثر عمق توسعه ریشه و عمق حداکثر تمرکز ریشه^۱ برای گیاه نی به ترتیب ۶۵ و ۳۵ سانتی متر در تالاب عمودی و به ترتیب ۴۰ و ۳۵ سانتی متر در تالاب افقی و برای گیاه تیفا به ترتیب ۲۵ و ۱۵ سانتی متر (لیپمن^۲، ۲۰۲۳) در نظر گرفته شدند. همچنین غلظت کل جامدات محلول قابل جذب توسط گیاهان نی و تیفا به ترتیب ۰/۰۴۵ و ۰/۰۳۳ میلی گرم بر سانتی متر مکعب لحاظ شدند (چن و همکاران^۳، ۲۰۱۵).

محیط مورد مطالعه شامل ابعاد و لایه بندی برای مدل تعریف و سپس مش بندی آن انجام شد. در این پژوهش با توجه به استفاده از سنگریزه در تالابها، یک لایه مواد متخلخل برای مدل تعریف شد. پارامترهای ضروری شامل زیر بخش های فرآیندهای اصلی، حل معکوس، اطلاعات زمانی، اطلاعات خروجی، مدل هیدرولیکی خاک و پارامترهای مربوط به آن، انتقال املاح، مدل های جذب آب و املاح توسط ریشه و اطلاعات مربوط به آن، دریافت داده های شرایط مرزی و داده های حل عددی معکوس در مدل HYDRUS-2D اعمال شد. در این آزمایش فرآیندهای حرکت آب، انتقال املاح و حل معکوس فعال شدند. برای شبیه سازی رفتار هیدرولیکی محیط متخلخل از مدل ون گنوختن^۴ (رابطه ۲، ۳، ۴ و ۵) برای منحنی رطوبتی خاک با در نظر گرفتن نقطه ورود هوا به خاک در مکش ۲- سانتی متر^۵ استفاده شد. در شبیه سازی فرآیند حرکت فاضلاب در تالاب به دلیل اهمیت پارامتر هدایت آبی اشباع (K_s) به روش حل معکوس موجود در مدل HYDRUS و سایر پارامترهای L، Alpha.n و θ_r که به ترتیب پارامترهای شکل مدل ون گنوختن و رطوبت باقی مانده در محیط متخلخل هستند، با استفاده از مدل Rosetta موجود در مدل HYDRUS و بر اساس محیط^۶ شنی به دست آمدند.

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |ah|]^m} \quad h < 0 \quad (2)$$

$$\theta(h) = \theta_s \quad h \geq 0 \quad (3)$$

$$K(h) = K_s S_e^L [1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})] \quad (4)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad n > 1 \quad (5)$$

که در آن ها h مکش (L)، رطوبت اشباع، θ_r رطوبت باقیمانده، n توزیع اندازه منافذ، α معکوس مقدار هوای ورودی (L⁻¹)، S_e رطوبت مؤثر، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع (L.T-1) و L شاخص شکل منحنی رطوبتی (L) هستند.

برای شبیه سازی جریان فاضلاب در تالاب، شرط مرزی جانبی به صورت بدون جریان، شرط مرزی بالادست به صورت تماس جریان با اتمسفر و مرز پایین دست به صورت بدون جریان (غیر از گره هایی که نشان دهنده خروج فاضلاب هستند) در نظر گرفته شدند. در محل خروج فاضلاب از تالابها شرط مرزی به صورت فلاکس جریان انتخاب شد. شرط اولیه شبیه سازی جریان فاضلاب نیز به صورت بار آبی در نظر گرفته شد.

¹ Depth of Maximum Intensity

² Lippmann et al

³ Chen et al

⁴ Van Genuchten

⁵ Air Entry Value of -2 cm

⁶ Material

اطلاعات مربوط به پارامترهای انتقال املاح شامل جرم مخصوص ظاهری، ضرایب انتشار پذیری، ضریب پخشیدگی مولکولی در آب، توانایی ریشه در جذب املاح و ضرایب تبدیل و زوال^۱ درجه صفر و یک هستند. جرم مخصوص ظاهری با محاسبه تخلخل محیط بر اساس حجم فاضلاب ورودی به تالابها و حجم سنگریزه و با لحاظ نمودن جرم مخصوص حقیقی ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب، ۲/۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب محاسبه (رابطه ۶) و در مدل به کار گرفته شد. از آنجاکه کل جامدات محلول مورد شبیه‌سازی قرار گرفت و تبدیل و تخریب بر روی کل جامدات محلول روی نمی‌دهد، ضرایب این پارامترها صفر اعمال شدند. بنابراین واسنجی مدل در بخش انتقال املاح و پارامترهای ضریب پخشیدگی مولکولی (DIFW) و ضرایب انتشار پذیری طولی و عرضی (DISPL و DISPT) به‌عنوان ضریب واسنجی انتخاب و به روش حل معکوس و مقادیر اندازه‌گیری شده کل جامدات محلول تعیین شدند. در فصل گرم که آزولا^۲ بر روی سطح فاضلاب در تالابها مشاهده شد، ضریب جذب درجه یک (Sink water1) برای لحاظ نمودن میزان جذب املاح توسط آزولا فعال شد که طی فرآیند حل معکوس به دست آمد.

$$\frac{V_f}{V_t} = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad (6)$$

که در آن V_t ، V_f ، ρ_b و ρ_s به ترتیب حجم خلل و فرج (L^3)، حجم کل (L^3)، جرم مخصوص ظاهری (ML^{-3}) و جرم مخصوص حقیقی (ML^{-3}) هستند. برای محاسبه جرم مخصوص ظاهری، V_f برابر با حجم فاضلاب لازم برای پر شدن بستر متخلخل تالاب و V_t بر اساس ابعاد تالاب در نظر گرفته شدند.

برای ارزیابی دقت مدل در شبیه‌سازی فرآیند تصفیه در تالاب، داده‌های آزمایش به دو بخش تقسیم شدند (۶۰ درصد داده‌ها برای واسنجی و ۴۰ درصد آن‌ها برای اعتبارسنجی در نظر گرفته شد). داده‌های روزهای ۱۱۲، ۱۲۵، ۱۳۱، ۱۴۰، ۱۴۶ و ۱۵۲ از شروع آزمایش برای واسنجی و داده‌های روزهای ۱۸۷، ۲۰۸، ۲۱۵ و ۲۲۲ از شروع آزمایش برای اعتبارسنجی تالابها استفاده شدند. به‌منظور ارزیابی دقت مدل HYDRUS-2D، از تطبیق مقادیر مشاهده‌ای با مقادیر تخمینی مدل، پارامترهای ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مجذور خطا (RMSE)، ریشه میانگین مجذور خطای نرمال شده (nRMSE)، شاخص توافق ویلموت (D-index) و میانگین خطای مطلق (MAE) به دست آمدند. روابط (۷ تا ۱۱) نحوه محاسبه هر کدام از آماره‌ها را نشان می‌دهند.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (8)$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100 \quad (9)$$

$$D\text{-index} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (10)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n} \quad (11)$$

که در این روابط P_i مقادیر تخمین زده‌شده، O_i مقادیر مشاهده‌ای، \bar{O} میانگین مقادیر مشاهده‌ای و n تعداد کل مشاهدات است. آماره R^2 نسبت پراکندگی را بین مقادیر تخمین زده‌شده و مشاهداتی نشان می‌دهد. به‌منظور بیان میزان تفاوت بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی از RMSE استفاده می‌شود که هر چه این شاخص کم‌تر باشد به معنی شبیه‌سازی بهتر مدل است. جامیسون و همکاران^۳ (۱۹۹۱)، nRMSE را

¹ Decay

² Azolla

³ Jaemison et al

برای برآورد خطا پیشنهاد دادند که زمانی که این پارامتر در محدوده کمتر از ۱۰، ۱۰ تا ۲۰، ۲۰ تا ۳۰ و بیش از ۳۰ درصد باشد به ترتیب نشان‌دهنده کار آبی عالی، بسیار خوب، متوسط و ضعیف مدل در شبیه‌سازی است. این محدوده‌ها در بررسی‌هایی که بنایان و هوگنboom^۱ (۲۰۰۸) انجام دادند نیز مورد تأیید قرار گرفت. شاخص آماری توافق ویلموت (D-index) بر اساس اندازه پراکندگی بین داده‌ها است. محدوده این شاخص بین صفر و یک است که مقدار یک بیانگر بهترین برازش و مقدار صفر نشان‌دهنده عدم تطابق بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی است (ویلموت^۲، ۱۹۸۲). MAE میانگین مطلق خطا را نشان می‌دهد که هر چه مقدار این آماره به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است.

یافته‌ها

سامانه تالاب مصنوعی عمودی

از آنجاکه در تالاب شاهد، فرآیند جذب آب و املاح توسط گیاه وجود نداشت، از داده‌های آن برای تعیین پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح به روش حل معکوس استفاده شد. جدول (۲) مقادیر ضریب واسنجی را نشان می‌دهد. مقایسه مقدار هدایت آبی اشباع (۳/۳۶۵۸۲۳ سانتی‌متر بر روز) با هدایت آبی اشباع گزارش شده توسط پلفی و همکاران^۳ (۲۰۱۴)، توسکانو و همکاران^۴ (۲۰۰۹)، شیخیان و همکاران (۱۳۹۸) و پلفی و همکاران (۲۰۱۶) که به ترتیب ۱۷۲۸۰۰ سانتی‌متر بر روز (قطر ۱/۳-۰/۳ میلی‌متر)، ۱۲۰۰۰۰۰ سانتی‌متر بر روز (قطر ۳۲-۱۶ میلی‌متر)، ۳۰۳۹۵۵/۲ تا ۴۲۳۹۶۴/۸ سانتی‌متر بر روز (قطر ۵/۵ تا ۱۵/۵ میلی‌متر) و ۲۴۹۶۰۰ سانتی‌متر بر روز (قطر ۲/۸ میلی‌متر) نشان داد که مدل توانسته است، مقادیر منطقی برای هدایت آبی اشباع در محیط متخلخل مورد استفاده در تالاب تعیین نماید. تفاوت هدایت آبی گزارش شده در پژوهش‌های ذکر شده با این پژوهش می‌تواند به دلیل قطر متفاوت سنگریزه‌های مورد استفاده باشد. توسکانو و همکاران (۲۰۰۹) مقادیر ضریب انتشار پذیری طولی و عرضی را برای قطر سنگریزه ۰/۰۶ تا ۴ میلی‌متر به ترتیب ۵۰ و ۱۵ سانتی‌متر گزارش کردند که بزرگ‌تر بودن مقدار ضرایب انتشار پذیری در این پژوهش (به ترتیب ۱۱۰/۲ و ۲۸/۷۶ سانتی‌متر) را می‌توان به قطر بزرگ‌تر سنگریزه و در نتیجه اختلاف منافذ خلل و فرج نسبت داد. به دلیل ساکن بودن فاضلاب در تالاب در طول دوره آزمایش، ضریب پخشیدگی عامل مهم‌تری در انتقال املاح به سمت پایین تالاب بود که مقدار بزرگ‌تر به دست آمده در این پژوهش (۳/۸۹ سانتی‌متر مربع بر روز) در مقایسه با گزارش پلفی و همکاران (۲۰۱۴) که این پارامتر را ۱/۷۳ سانتی‌متر مربع بر روز اعلام کرده بودند، این فرضیه را تأیید می‌نماید.

جدول ۲. نتایج بهینه یابی پارامترهای هیدرولیکی و انتقال و جذب املاح توسط ریشه گیاه آزولا در تالاب عمودی

تالاب	هدایت آبی اشباع (cm/day)	ضریب انتشار پذیری طولی (cm)	ضریب انتشار پذیری عرضی (cm)	ضریب پخشیدگی (cm ² /day)	جذب املاح توسط آزولا (mg/cm ³ day)
بدون گیاه	۳۶۵۸۲۳/۳	۱۱۰/۲	۲۸/۷۶۲	۳/۸۹	۰/۰۳۷
تیفا	۳۶۵۸۲۳/۳	۱۱۰/۲	۲۸/۷۶۲	۳/۸۹	۰/۰۳۰
نی	۳۶۵۸۲۳/۳	۱۱۰/۲	۲۸/۷۶۲	۳/۸۹	۰/۰۱۷

¹ Bennayan and Hoogenboom

² Willmott

³ Palfy et al

⁴ Toscano et al

مقادیر شاخص‌های آماری ارزیابی مدل در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی در جدول (۳) آورده شده است. نتایج نشان داد که دقت مدل در تالاب‌های شاهد و حاوی گیاه نی، با توجه به ضریب تعیین بالا، مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین مطلق خطای نسبتاً کم و همچنین میانگین مربعات خطای نرمال شده عالی بر اساس طبقه‌بندی جامیسون و همکاران (۱۹۹۱)، نتایج مدل از اعتبار خوبی برخوردار است؛ اما نتایج شاخص‌های آماری در تالاب حاوی گیاه تیفا، با توجه به ضریب تعیین بالا، میانگین مطلق خطای نسبتاً کم، مجذور میانگین مربعات خطا و همچنین میانگین مربعات خطای نرمال شده بسیار خوب با توجه به طبقه‌بندی جامیسون و همکاران (۱۹۹۱)، قابل قبول برآورد می‌شود که دقت کمتری نسبت به دو تالاب دیگر داشت.

جدول ۳. شاخص‌های آماری و ارزیابی مدل در واسنجی و اعتبارسنجی برای کل جامدات محلول در تالاب‌های عمودی

R ² (-)	nRMSE (%)	RMSE (mg/cm ³)	MAE (mg/cm ³)	D-index (-)	تالاب
۰/۹۹۳	۸/۹۷	۰/۰۳۸	۰/۰۲۹	۰/۷۲۷	بدون گیاه مرحله واسنجی
۰/۹۹۶	۶/۵۵۱	۰/۰۳۴	۰/۰۲۷	۰/۸۷۶	مرحله اعتبارسنجی
۰/۹۹۹	۲/۱۳۸	۰/۰۱۱	۰/۰۰۷	۰/۸۳۲	گیاه نی مرحله واسنجی
۰/۹۹۱	۹/۸۷	۰/۰۶	۰/۰۵۶	۰/۵۲۵	مرحله اعتبارسنجی
۰/۹۹۹	۱/۵۸۲	۰/۰۰۸	۰/۰۰۵	۰/۹۸۸	گیاه تیفا مرحله واسنجی
۰/۹۸۰	۱۴/۸۳	۰/۰۸۲	۰/۰۶۹	۰/۷۲۵	مرحله اعتبارسنجی

سامانه تالاب مصنوعی افقی

جدول (۴) مقادیر ضرایب واسنجی را در تالاب افقی شاهد نشان می‌دهد. مقادیر به دست آمده برای هدایت آبی اشباع در تالاب عمودی و افقی نشان می‌دهد مدل توانسته است برآورد خوبی از رفتار هیدرولیکی و جریان فاضلاب در تالاب را شبیه‌سازی نماید. تفاوت مشاهده شده بین هدایت آبی اشباع در دو تالاب، به دلیل تفاوت خلل و فرج بستر در جهات افقی و عمودی می‌تواند باشد. ضرایب انتشار پذیری طولی و عرضی در تالاب افقی تقریباً نصف تالاب عمودی به دست آمد که در راستای کمتر به دست آمدن هدایت آبی اشباع و در نتیجه سرعت کمتر فاضلاب در خلل و فرج در این تالاب‌ها نسبت به تالاب عمودی است؛ اما همچنان مقادیر ضریب انتشار پذیری طولی و عرضی در مقاله توسکانو و همکاران در دامنه (۱۰ تا ۵۰ سانتی‌متر) بود.

جدول ۴. نتایج بهینه یابی پارامترهای واسنجی هیدرولیکی، انتقال املاح و جذب املاح توسط ریشه گیاه آزولا در تالاب افقی

تالاب	هدایت آبی اشباع (cm/day)	ضریب انتشار پذیری طولی (cm)	ضریب انتشار پذیری عرضی (cm)	پخشیدگی (cm ² /day)	جذب املاح توسط آزولا (mg/cm ³ day)
بدون گیاه	۳۵۴۹۰۰	۵۵	۱۴	۳/۸۹	۰/۰۳۰۰۷۷
تیفا	۳۵۴۹۰۰	۵۵	۱۴	۳/۸۹	۰/۰۳۳۴۵۰
نی	۳۵۴۹۰۰	۵۵	۱۴	۳/۸۹	۰/۰۳۱۲۰۰

مقادیر شاخص‌های آماری ارزیابی مدل در تالاب افقی در جدول (۵) آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که به شبیه‌سازی مدل در هر دو حالت بدون گیاه و با گیاهان نی و تیفا با توجه ضریب تعیین بالا، میانگین مطلق خطای نسبتاً کم، مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین

مربعات خطای نرمال شده عالی و یا بسیار خوب بر طبق دسته‌بندی جامیسون و همکاران (۱۹۹۱) می‌توان اعتماد نمود. اگرچه دقت مدل در شبیه‌سازی تالاب افقی تحت کشت نی از دو تالاب دیگر بهتر به دست آمد.

جدول ۵. نتایج شاخص‌های آماری ارزیابی مدل در واسنجی و اعتبارسنجی کل جامدات محلول در تالاب‌های افقی

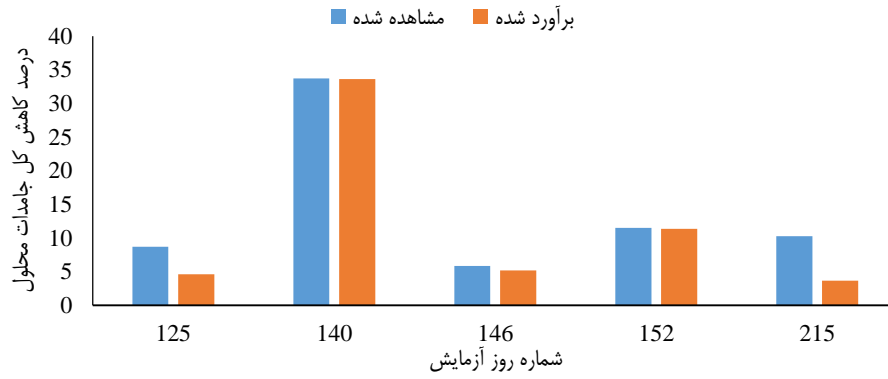
تالاب	D-index (-)	MAE (mg/cm3)	RMSE (mg/cm3)	nRMSE (%)	R2 (-)
بدون گیاه	۰/۹۰۹	۰/۰۲	۰/۰۲۴	۸/۰۷۹	۰/۹۹۴
مرحله واسنجی	۰/۷۲۵	۰/۰۶۹	۰/۰۸۲	۱۴/۸۳۱	۰/۹۹۰
گیاه نی	۰/۷۵۶	۰/۰۳۷	۰/۰۴۰	۹/۷۹۵	۰/۹۹۱
مرحله اعتبارسنجی	۰/۷۳۰	۰/۰۲۹	۰/۰۳۴	۶/۴۲۷	۰/۹۹۷
گیاه تیفا	۰/۸۷۸	۰/۰۳۶	۰/۰۴۰	۹/۶۴۷	۰/۹۹۴
مرحله اعتبارسنجی	۰/۶۸۷	۰/۰۷۷	۰/۰۹۱	۱۷/۰۱	۰/۹۷۲

شبیه‌سازی درصد کاهش کل جامدات محلول در تالاب‌های عمودی و افقی

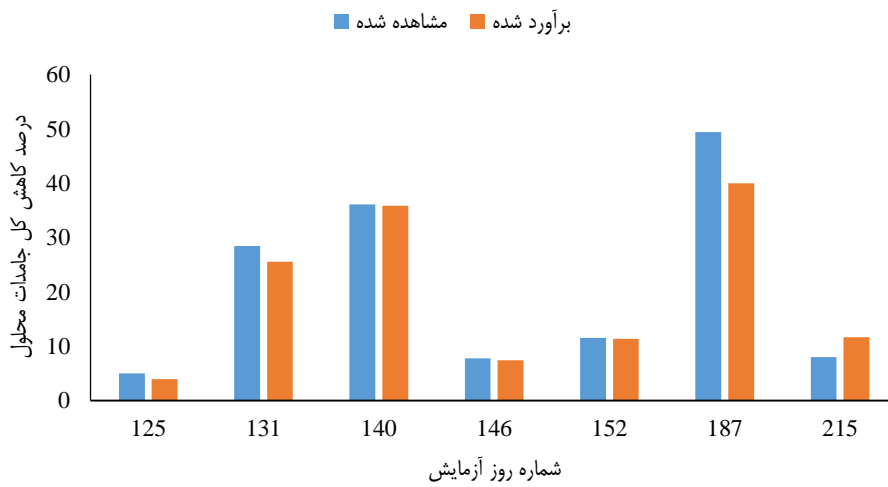
پس از اعتبارسنجی مدل، درصد کاهش کل جامدات محلول در تالاب‌های افقی و عمودی نسبت به کل جامدات محلول فاضلاب ورودی به تالاب در روزهای نمونه‌برداری برآورد و با مقادیر محاسبه‌شده بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده مقایسه شدند. شکل‌های (۶) تا (۸) درصد کاهش کل جامدات محلول را در تالاب‌های عمودی به ترتیب حاوی گیاه نی، گیاه تیفا و بدون گیاه نشان می‌دهند. همچنین در جدول (۶) به‌طور میانگین درصد کاهش کل جامدات محلول در تالاب عمودی و افقی ارائه شده است. نتایج نشان داد که به‌طور میانگین مدل درصد کاهش کل جامدات محلول را ۲ تا ۳ درصد کمتر نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده در تالاب‌های افقی یا عمودی دارای گیاه برآورد نمود که دقت قابل قبولی است. این در حالی است که میان مقادیر برآورد و اندازه‌گیری شده میانگین درصد کاهش کل جامدات محلول در تالاب بدون گیاه، مشابهت بیشتری دیده شد. روند برآورد درصد کاهش کل جامدات محلول در تالاب‌های دارای گیاه نشان می‌دهد که دقت برآورد در اواسط دوره (اواسط اردیبهشت تا اواسط خردادماه) بیشتر از ابتدا (فروردین‌ماه) و انتهای دوره (مردادماه) بود که می‌تواند ناشی از وضعیت گیاه در شروع فصل گرما در فروردین و یا افزایش سایه‌اندازی گیاه و تأثیر آن بر برآورد تبخیر و تعرق در مردادماه باشد.

جدول ۶- مقادیر میانگین درصد کاهش کل جامدات محلول مشاهده و برآورد شده توسط مدل HYDRUS-2D

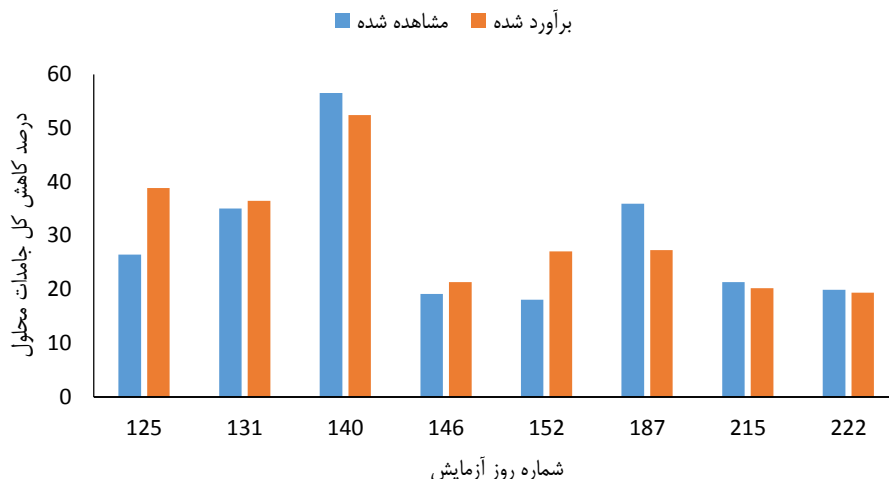
تالاب	درصد کاهش	گیاه نی	گیاه تیفا	بدون گیاه
عمودی	بر اساس مقادیر مشاهده‌شده	۱۴/۰۲	۲۰/۳۴	۲۴/۷۱
	بر اساس مقادیر برآورد شده مدل	۱۱/۷	۱۸/۳۴	۲۵/۸۷
افقی	بر اساس مقادیر مشاهده‌شده	۱۵/۴۵	۱۹/۴۹	۱۴/۱۸
	بر اساس مقادیر برآورد شده مدل	۱۸/۵۲	۲۵/۱۷	۱۹/۰۵



شکل ۶- مقایسه درصد کاهش در مقادیر مشاهده و برآورد شده کل جامدات محلول در تالاب عمودی حاوی گیاه نی

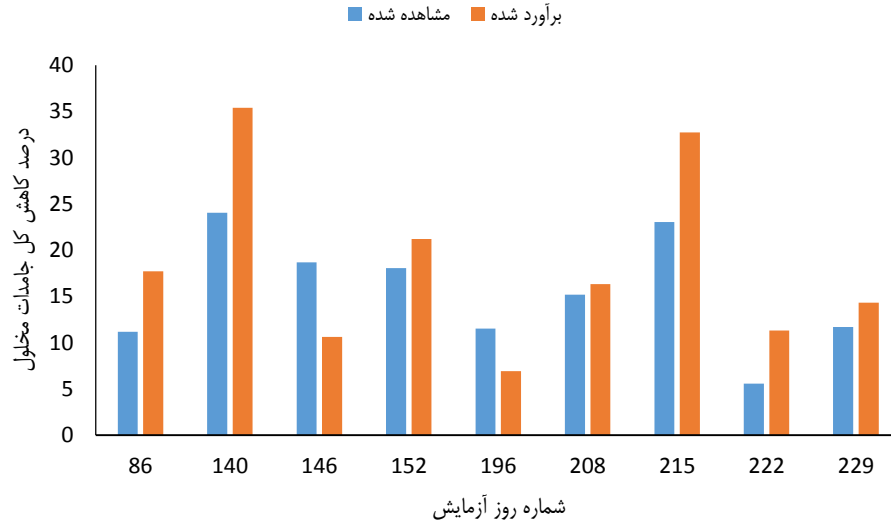


شکل ۷. مقایسه درصد کاهش مشاهده و برآورد شده کل جامدات محلول در تالاب عمودی حاوی گیاه تیفا

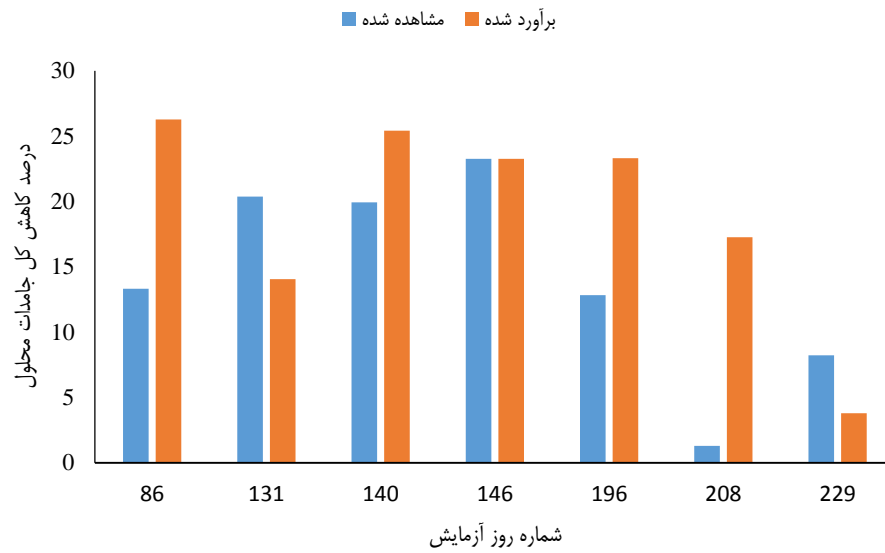


شکل ۸ مقایسه درصد کاهش مشاهده و برآورد شده کل جامدات محلول در تالاب عمودی بدون گیاه

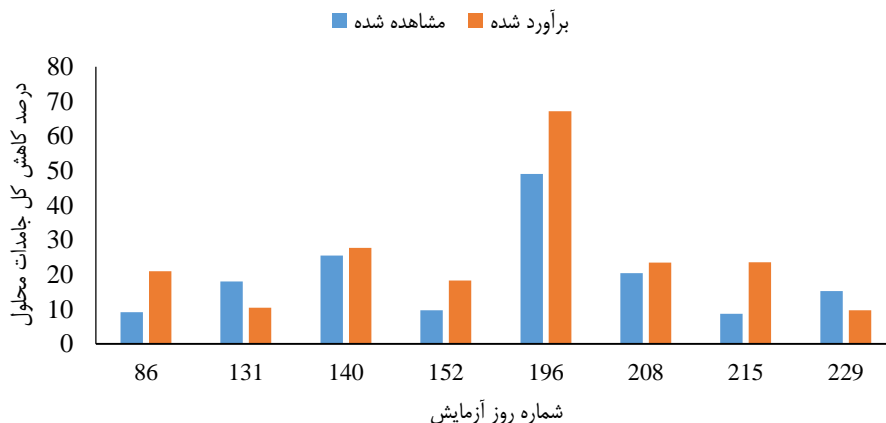
در شکل‌های (۹) تا (۱۱) درصد کاهش کل جامدات محلول در تالاب‌های افقی به ترتیب حاوی گیاه نی، گیاه تیفا و بدون گیاه در برخی از روزهای نمونه‌برداری ارائه شده است. میانگین درصد کاهش کل جامدات محلول بر اساس مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی (جدول ۶) نشان می‌دهد که مدل بین ۳ تا ۵ درصد نسبت به محاسبه بر اساس مقادیر مشاهده‌شده، بیش برآورد داشت. مقایسه میانگین درصد کاهش کل جامدات محلول بین تالاب‌های عمودی و افقی نشان داد که شبیه‌سازی در تالاب‌های عمودی با دقت بیشتری نسبت به تالاب‌های افقی انجام شد که می‌تواند تحت تأثیر برآورد تبخیر-تعرق و توزیع ریشه گیاهان نی و تیفا باشد به طوری که در تالاب‌های افقی به دلیل سطح تماس بیشتر با اتمسفر نقش تبخیر-تعرق در شبیه‌سازی بیشتر بود. همچنین به دلیل عمق کمتر تالاب‌های افقی نسبت به عمودی، توزیع عمودی ریشه می‌تواند تحت تأثیر قرار گرفته و رشد افقی ریشه اتفاق افتاده باشد.



شکل ۹. مقایسه درصد کاهش مشاهده و برآورد شده کل جامدات محلول در تالاب افقی حاوی گیاه نی



شکل ۱۰. مقایسه درصد کاهش مشاهده و برآورد شده کل جامدات محلول در تالاب افقی حاوی گیاه نیفا



شکل ۱۱. مقایسه درصد کاهش مشاهده و برآورد شده کل جامدات محلول در تالاب افقی بدون گیاه

بحث

تالاب‌های مصنوعی در ترکیب با گیاه‌پالایی به‌عنوان راهکار سبز قابلیت بهبود و استفاده مجدد از فاضلاب را فراهم می‌آورد. در این پژوهش، در راستای توسعه ابزارهای طراحی و مدیریت تالاب‌های مصنوعی، شبیه‌سازی عملکرد سامانه تالاب مصنوعی زیرسطحی عمودی و افقی تحت کشت دو گیاه نی و تیفا در تصفیه فاضلاب شهر رشت توسط مدل HYDRUS-2D بررسی شد. پس از ساخت تالاب‌های زیرسطحی عمودی و افقی، گیاهان نی و تیفا کشت و طی دوره آذر ۱۳۹۹ تا شهریور ۱۴۰۰، اقدام به نمونه‌برداری و اندازه‌گیری کل جامدات محلول از فاضلاب خام و تصفیه‌شده توسط تالاب‌ها شد. ارزیابی دقت مدل در دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی با استفاده از شاخص‌های آماری انجام شد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای بستر تالاب‌ها از سنگ‌ریزه‌هایی با قطر ۵ تا ۲۵ میلی‌متر استفاده شد و مقایسه مقدار هدایت آبی اشباع برآورد شده توسط مدل HYDRUS-2D با پژوهش‌های پیشین نشان داد که مدل توانسته است برآورد مناسبی از خصوصیات هیدرولیکی بستر داشته باشد. نتایج نشان داد که هندسه سنگ‌ریزه و خلل و فرج و نوع جریان عمودی یا افقی در تالاب بر روی پارامترهای انتقال املاح تأثیرگذار است. با توجه به نتایج ارزیابی‌های آماری، مقادیر تخمینی کل جامدات محلول در تالاب مصنوعی تحت کشت نی نسبت به سایر تالاب‌ها تطابق بیشتری با مقادیر اندازه‌گیری شده داشت. شاخص‌های آماری در مراحل اعتبارسنجی مدل در هریک از سه تالاب موردبررسی نشان داد که مدل قابلیت مناسبی برای شبیه‌سازی حرکت املاح و کل جامدات محلول دارد که به معنای قابلیت استفاده از آن در فرآیند طراحی تصفیه در تالاب است.

تقدیر و تشکر

در پایان از شرکت آب و فاضلاب استان گیلان و تصفیه‌خانه فاضلاب فخب رشت برای فراهم آوردن امکان اجرای آزمایش در تصفیه‌خانه فخب، سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- اخروی، سید سعید، و اسلامیان، سید سعید. (۱۳۹۹). تالاب مصنوعی، چالش - راهکار - طراحی. نشریه علمی علوم و مهندسی آب و فاضلاب، (۳)۵، ۲۱-۵. <https://doi.org/10.22112/JWWSE.2020.214377.1180.5-21>
- شیخان، امیر، شایان‌نژاد، محمد، و عرب نصرآبادی، وحید. (۱۳۹۸). بررسی کارایی تالاب مصنوعی زیرسطحی هیبریدی در تصفیه تکمیلی پساب شهری. علوم آب و خاک، (۲)۳۳، ۱۲۶-۱۱۵. <https://doi.org/10.292.52/Jstnar.23.2.115/115-126>

References

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome 300, D05109. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3084-0_13
- Anand, S., Bharti, S. K., Dviwedi, N., Barman, S. C., & Kumar, N. (2017). Macrophytes for the reclamation of degraded waterbodies with potential for bioenergy production. *Phytoremediation Potential of Bioenergy Plants*, 333-351. <https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/4M8qjLb7/>
- Bakhshoodeh, R., Alavi, N., Oldham, C., Santos, R. M., Babaei, A. A., Vymazal, J., & Paydary, P. (2020). Constructed wetlands for landfill leachate treatment: A review. *Ecological Engineering*, 146, 105725. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105725>
- Bannayan, M., & Hoogenboom, G. (2009). Using pattern recognition for estimating cultivar coefficients of a crop simulation model. *Field Crop Research*, 11(3), 299-302. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.01.007>
- Chen, Y. Y., Sun, P., Chen, G. L., & Wang, N. N. (2015). A contrastive study on salt-alkaline resistance and removal efficiency of nitrogen and phosphorus by *Phragmites australis* and *Typha angustifolia* in coastal estuary area. *Huan Jing ke Xue= Huanjing Kexue*, 36(4), 1489-1496. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26164931/>
- Alexandratos, N.; & Bruinsma, J. (2012). World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://doi.org/10.22004/ag.econ.288998>
- Jamieson, P. D., Porter, J. R., & Wilsin, D. R. (1991). A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crop grown in New Zealand. *Field Crop Research*, 27, 337-350. [https://doi.org/10.1016/0378.4290\(91\)90040-3](https://doi.org/10.1016/0378.4290(91)90040-3)
- Gholipour, A., Zahabi, H., & Stefanakis, A. I. (2020). A novel pilot and full-scale constructed wetland study for glass industry wastewater treatment. *Chemosphere*, 247, 125966. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125966>
- Hosseini, H.R., & Ghodsian M. (2011). Wetlands their benefits and disadvantages, Proceedings of the 2th Public Conference of Application Usage Researches, May 18-19, Zanjan, Iran.
- Hussein, A., & Scholz, M. (2017). Dye wastewater treatment by vertical-flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 101, 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.01.016>
- Kadlec, R.H., & Wallace, S.D. (2009). *Treatment Wetlands*, 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, FL. https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/KADLEC%20WALLACE%202009%20Treatment%20Wetlands%202nd%20Edition_0.pdf
- Lippmann, T. J., Heijmans, M. M., Van der velde, Y., Dolman, H., Hendriks, D. M., & Van huissteden, K. (2023). Peatland-VU-NUCOM (PVN 1.0): Using dynamic PFTs to model peatland vegetation, CH4 and CO2 emissions. *Geoscientific Model Development Discussions*, 16(22): 6773-6804. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-6773-2023>

- Martin, E. J., & Martin, E. T. (1991). *Technologies for small water and wastewater systems*. 1th ed, John Wiley and Sons, Inc, New York. 366.
https://books.google.com/books/about/Technologies_for_Small_Water_and_Wastewa.html?id=PVR4QgAACA-AJ
- Okhravi, S., & Eslamian, S. (2020). Constructed Wetland, Challenge-Approach-Design. *Journal of Water and Wastewater Science and Engineering*, 5(3), 5-21. <http://doi.org/10.22112/jwwse.2020.214377.1180>. [In Persian]
- Pálffy, T.G. & Langergraber, G. (2014). The verification of the Constructed Wetland Model No. 1 implementation in HYDRUS using column experiment data. *Ecological Engineering*, 68, 105-115. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.016>
- Pálffy, T. G., Molle, P., Langergraber, G., Troesch S., Gourdon R., & Meyer, D. (2016). Simulation of constructed wetlands treating combined sewer overflow using HYDRUS/CW2D. *Ecological Engineering*, 87: 340-347. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.11.048>
- Rahi, M.A., Faisal, A. A.H., Naji, L.A., Almuktar, S. A., Abed, S.N., & Scholz, M. (2020). Biochemical performance modelling of non-vegetated and vegetated vertical subsurface-flow constructed wetlands treating municipal wastewater in hot and dry climate. *Journal of Water Process Engineering*, 33, 101003. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.101003>
- Raude, J. M., Mutua, B. M., & Kamau, D. N. (2018). Simulation of the hydraulics and treatment performance of horizontal subsurface flow constructed wetland treating greywater. *International of Ecotoxicology and Eco biology*, 3 (2), 40-55. <https://doi.org/10.11648/j.ijee.20180302.12>
- Rizzo, A. G., Langergraber, A., Galvão, F. Boano, R., & Revelli, L. (2014). Modelling the response of laboratory horizontal flow constructed wetlands to unsteady organic loads with HYDRUS-CWM1. *Ecology Engineering*, 68, 209-213. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.073>
- Saeed, T., & Sun, G. (2012). A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media. *Journal of environmental management*, 112, 429-448. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.08.011>
- Seidel, K., (1955). *Die Flechtbinde: Ökologie, Morphologie und Entwicklung, ihre Stellung bei den Völkern und ihre wirtschaftliche Bedeutung*. Schweizerbart, Stuttgart, Germany. <https://doi.org/10.1002/JPLN.19560720110>
- Seidel, K. (1961). Zur Problematik der Keim-und Pflanzgewässer. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 14 (2), 1035-1043. <https://doi.org/10.1080/03680770.1959.11899410>
- Seidel, K. (1964). Abbau von bacterium coli durch höhere wasserpflanzen. *Naturwissenschaften*, 51. <https://doi.org/10.1007/BF00637265>
- Seidel, K. (1966). Reinigung von Gewässern durch höhere Pflanzen. *Naturwissenschaften*, 53 (12), 289-297. <https://doi.org/10.1007/BF00712211>
- Simunek, J., Sejna, M., & Van Genuchten, M. (1999). The HYDRUS-2D software package for simulating two-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably saturated media. Version 2.0. International Ground Water Modeling Center, Colorado School. Colorado. <https://www.researchgate.net/publication/236901785>.
- Sheykhani, A., Shayannejad, M., & Arab-Nasrabadi, V. (2019). Performance Review of Hybrid Subsurface Constructed Wetlands in Urban Wastewater Supplementary Treatment. *Journal of Water and Soil Science*; 23 (2):115-126. <http://doi.org/10.29252/jstnar.23.2.115> [In Persian]

- Sperling, M. V. (1996). Comparison among the most frequently used systems for wastewater treatment in developing countries. *Water Science and Technology*, 33(3), 59-72. [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(96\)00301-0](https://doi.org/10.1016/0273-1223(96)00301-0)
- Toscano, A., Langergraber, G., Consoli, S., & Cirelli, G. L. (2009). Modelling pollutant removal in a pilot-scale two-stage subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 35 (2), 281-289. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.07.011>
- Vymazal, J., & Kropfelova, L. (2008). Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow. Springer science & business media. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8580-2>
- Upadhyaya, A. K., Singh, N. K., Bankotib, N. S., & Rai, U. N. (2017). Designing and construction of simulated constructed wetland for treatment of sewage containing metals. *Environmental Technology*, 38 (21), 2691-2699. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8580-2>
- Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63 (11), 1309-1313. <http://doi.org/10.1175/1520-0477>