Journal of Urban Management & Environmental Engineering

Journal homepage: https://jumee.kgut.ac.ir
Vol.2, No.2; 2024.pp: 42-56

Research paper

(Received Apr. 16, 2024 Accepted Jun. 8, 2024)

Modeling of municipal waste landfill leachate dispersion with finite element modeling approach using COMSOL software

Sayed Amir Masaeli*[1], Mohammad Yavari Foroushani[2,3], Hossein Vahidi[4]

[1] *Master of Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran*
[2] *Water Quality Monitoring and Control Center, Ardestan, Isfahan, Iran*
[3] *Young Researchers and Elite Club, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran*
[4] *Department of Environment, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran*

Abstract

Leachate from waste disposal is recognized as one of the primary sources of groundwater contamination. Therefore, improving the management of landfill sites is crucial for reducing and controlling environmental threats. This study focuses on modeling the dispersion of leachate in a landfill in the city of Isfahan using the finite element method, located 35 kilometers outside the city. The leachate is considered in this area with dimensions of 100 by 250 meters and a depth of 2 centimeters from the bottom. The transmission and spread of pollution across twenty sub-layers of soil have been modeled using Richards' equations and pollution transport equations in porous media. This research utilizes COMSOL software to merge different environments using two model equations, and the three-dimensional model investigates the movement and absorption of leachate based on these equations. Meshing in the landfill is done finer in the upper and bottom layers where leachate leakage exists and coarser in the lower parts. Also, mesh modeling in the software is done freely and in a hexagonal shape. According to the findings, the soil under the landfill becomes saturated over time, with the saturation occurring faster in the upper layers. Modeling results show that phosphorus metal pollution has penetrated up to a depth of 1.8 meters in the soil over 15 years, and leachate has reached approximately 10 meters deep into the ground. Given the proximity of groundwater to the soil surface, measures such as pumping wells and geomembranes must be considered to prevent pollution from entering the groundwater.

Keywords: Leachate Dispersion, Municipal Waste Landfill, COMSOL, Isfahan Municipality.

* Corresponding Author: Sayed Amir Masaeli
Email: *Amirmasaeli.tech@gmail.com*
Phone: 09139058469

Doi: 10.48306/jumee.2024.452704.1041

نشریه علمی مدیریت شهری و مهندسی محیط زیست

آدرس نشریه:https://jumee.kgut.ac.ir

سال دوم/شماره دوم/تابستان ۱۴۰۳/صفحه ۴۲-۵۶

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:۱۴۰۳ /۱/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۳/۱۹ تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۳/۲۶

مدل‌سازی انتشار شیرابه محل دفن پسماند شهری با رویکرد مدل‌سازی المان محدود با استفاده از نرم‌افزار کامسول

سید امیر مسائلی*[۱]، محمد یاوری فروشانی [۲و۳]، حسین وحیدی [۴]

۱- کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان، کرمان، ایران

۲- مرکز پایش و کنترل کیفیت آب و فاضلاب، اردستان، اصفهان، ایران

۳- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی‌شهر، اصفهان، ایران

۴- گروه محیط‌زیست، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان، کرمان، ایران

چکیده

شیرابه ناشی از دفن زباله‌ها، به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع آلودگی آب‌های زیرزمینی شناخته می‌شود. ازاین‌رو، توجه به بهبود مدیریت محل‌های دفن زباله برای کاهش و کنترل خطرات زیست‌محیطی اهمیت حیاتی دارد. پژوهش حاضر به مدل‌سازی انتشار شیرابه در لندفیل شهر اصفهان با بهره‌گیری از روش المان محدود پرداخته است، که در فاصله ۳۵ کیلومتری خارج از شهر قرار دارد. شیرابه در این مکان با ابعاد ۱۰۰ در ۲۵۰ متر و ارتفاع ۲ سانتی‌متر از کف، تصور شده است. انتقال و انتشار آلودگی در بیست لایه خاک زیرین با استفاده از معادلات ریچاردز و انتقال آلودگی در محیط‌های متخلخل مدل‌سازی شده‌اند. در این مطالعه، از نرم‌افزار کامسول استفاده‌شده است که به‌طور ترکیبی از دو مدل معادله استفاده می‌کند و مدل سه‌بعدی آن بر اساس این دو معادله، حرکت و جذب شیرابه را بررسی کرده است. مش بندی لندفیل در نواحی بالایی و زیر کف که نشت شیرابه دارد با مش ریزتر و در قسمت‌های پایینی با مش درشت‌تر صورت گرفته است. همچنین مدل‌سازی مش در نرم‌افزار به شکل آزاد و شش‌وجهی انجام‌شده است. بر اساس یافته‌ها، خاک زیر لندفیل باگذشت زمان اشباع‌شده و سرعت اشباع شدن در لایه‌های بالایی بیشتر است. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که آلودگی فلز فسفر در طول ۱۵ سال تا عمق ۱,۸ متری در خاک نفوذ کرده و شیرابه تقریباً تا عمق ۱۰ متری زمین رسیده است. با توجه به نزدیکی آب‌های زیرزمینی به سطح خاک، استفاده از تدابیری مانند چاه‌های پمپاژ و ژئوممبرین‌ها برای جلوگیری از ورود آلودگی به آب‌های زیرزمینی ضروری است.

کلمات کلیدی: انتشار شیرابه، محل دفن پسماند شهری، کامسول، شهرداری اصفهان.

* نویسنده مسئول: سید امیر مسائلی

ایمیل:Amirmasaeli.tech@gmail.com

شماره تماس: ۰۹۱۳۹۰۵۸۴۶۹

Doi: 10.48306/jumee.2024.452704.1041

۱-مقدمه

بر اساس تحقیقات به‌عمل‌آمده پس از دهه ۵۰ میلادی، محل‌های دفن زباله به دلیل تراوش شیرابه حاوی المان‌های شیمیایی مضر، باعث آلودگی منابع آب زیرزمینی می‌شوند. بحران آلودگی آب‌های زیرزمینی یک تهدید جدی، به‌ویژه برای مناطقی که سابقه دفن زباله دارند، محسوب می‌شود [۱]. بنابراین در طولانی‌مدت برای سلامت عمومی و محیط‌زیست مخرب ارزیابی می‌شوند [۳-۲]. بر همین اساس، تحقیق در مورد محل‌های دفن زباله، از قبیل ارزیابی انتشار بالقوه آلاینده‌ها، برای حفاظت از کیفیت منابع زیرزمینی بسیار ضروری به نظر می‌رسد [۴]. به‌طور مثال در یک مطالعه موردی در اوگاندا مدل‌سازی انتقال آلودگی از محل دفن زباله با استفاده از نرم‌افزار FEMLAB انجام شد. نتایج مطالعه ایشان زمانی نزدیک به ۴۰ ساعت را برای طی مسیر از محل تولید تا رسیدن موج آلودگی به آب زیرزمینی را نشان داد [۵]. در مطالعه‌ای دیگر در سال ۲۰۱۸ موریرا[۱] و همکارانش استفاده از مقاومت الکتریکی در یک سلول زباله در داخل لندفیل را، باهدف ارزیابی اثربخشی این ابزار در شناسایی نقاط نشت شونده احتمالی ژئوممبران محل دفن زباله بررسی نمودند [۶]. در تحقیق دیگر در کشور چین، رفتار انتقال و انتشار آلاینده‌های داخل شیرابه از طریق سیستم‌های مانع مانند، که در زیر لندفیل قرارگرفته‌اند با استفاده از تست سانتریفیوژ و مدل‌سازی عددی، موردبررسی قرارگرفته است. بر اساس نتایج این مطالعه اکسیژن خواهی شیمیایی یک شاخص کلیدی برای هشدار آلودگی آب‌های زیرزمینی توسط لندفیل‌ها است [۷].

در پژوهش دیگر پن[۲] و همکاران با استفاده از روش تجزیه‌وتحلیل شیمیایی سریع و غیر مخرب همچون فلورسانس سه‌بعدی القاء-انتشار[۳] و مدل‌های تحلیل موازی (PARAFAC) به شبیه‌سازی وضعیت آلودگی شیرابه پرداختند. مطابق نتایج مطالعه ایشان نسبت دانه‌بندی خاک زیر لندفیل به خاک طبیعی می‌تواند برای ارزیابی وضعیت نشت شیرابه در محل دفن زباله مورداستفاده قرار گیرد [۸]. در مطالعه‌ای دیگر که باهدف تعیین پتانسیل آلودگی آب زیرزمینی توسط شیرابه رهاشده از یک لندفیل با مساحت ۲۲ هکتار در مانیل فیلیپین صورت گرفته است، نرخ شیرابه تولیدی از محل دفن پسماند و نفوذ به مناطق زیرسطحی توسط نرم‌افزار Visual HELP موردبررسی قرار گرفت. نتایج این مدل‌سازی پیش‌بینی آلودگی آب‌های زیرزمینی به میزان ۱۵۰ و ۲۵۰ میلی‌گرم در لیتر برای ۵ و ۱۰ سال پس از زمان مدل‌سازی بود [۹]. پاپادوپولو و همکاران (۲۰۰۶) پژوهشی را به‌منظور شناسایی خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی به علت نشت شیرابه زباله و نفوذ آن در مرکز دفن زباله شهری شهر پاتراس یونان انجام دادند. نتایج این مطالعه حاکی از گسترش سریع آلودگی در جهت پایین است. همچنین شیرابه نفوذ شده در خاک در پایان دوره خشک‌سالی نسبت به شیرابه نفوذ شده در فصول بارانی در نقاط مشخصی، مقادیر بالاتر غلظت آلودگی را نشان می‌دهد [۱۰].

در زمینه مدل‌سازی پژوهش‌های فراوانی توسط نرم‌افزار کامسول صورت گرفته است. به‌طور مثال زردشت (۱۳۹۵) به شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت یک استوانه شیب‌دار دارای منبع گرمایی سینوسی پرداختند. ایشان مسئله فوق را به کمک نرم‌افزار شبیه‌ساز کامسول حل، و نتایج حاصل را با روابط به‌دست‌آمده تجربی مقایسه، و اعتبار نتایج را اثبات کردند [۱۱]. حسنی کبوترخانی(۱۳۹۵) با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری توسط نرم‌افزار کامسول، به طراحی قلب شتاب‌دهنده بتاترون ۱۵۰ مگاواتی پرداختند [۱۲]. در پژوهشی دیگر اخروی (۱۳۹۳) توزیع جریان بر رفتار هیدرولیکی و راندمان تصفیه تالاب مصنوعی توسط نرم‌افزار شبیه‌ساز کامسول را بررسی نمودند. ایشان به‌منظور امکان پیش‌بینی رفتار هیدرولیکی محیط متخلخل، توسط شبیه‌سازی نرم‌افزار کامسول روابط بین هدایت هیدرولیکی و میزان فشار را برآورد نمودند [۱۳]. از این نرم‌افزار در بررسی محل‌های دفن زباله و شبیه‌سازی شیرابه کف محل دفن نیز استفاده‌شده است. به‌طور مثال عمق یا سطح شیرابه در برخی از محل‌های دفن زباله در کشور چین به بیش از باشد ۱۰ متر می‌رسد بنابراین تغییرات عمق شیرابه ممکن است منجر به تغییر مکانیسم انتقال آلاینده‌ها شود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که غلظت آلاینده در پایین لاینر پیش‌بینی‌شده با استفاده از عمق شیرابه ثابت ممکن است در مقایسه باحالت عمق شیرابه متغیر کمتر محاسبه شود. همچنین افزایش عمق شیرابه می‌تواند منجر به پیشرفت زودتر و حالت پایدار برای انتقال آلاینده شود درنتیجه در نظر گرفتن عمق شیرابه برای طراحی یک لاینر دفن زباله پایدارتر و قابل‌اعتمادتر حیاتی است[۱۴].

در مطالعه‌ای دیگر در کشور کویت اثر آلاینده‌های حل‌شده در آب از محل‌های دفن زباله جامد بر سفره‌های زیرزمینی ارزیابی گردید. نتایج این مطالعه نشان‌دار که فرآیند جذب نقش مهمی در کنترل مهاجرت فلزات سنگین و آلودگی‌های معدنی به سفره‌های

---

[۱] Moreira

[۲] Pan

[۳] Three Dimensional Excitation-Emission Fluorescence

کم‌عمق دارد [۱۵]. سیستم لاینر کامپوزیتی معمولاً برای جلوگیری از مهاجرت شیرابه‌های سمی دفن زباله به محیط استفاده می‌شود. با توجه به این موضوع، یک مدل دوبعدی برای بررسی انتقال آلاینده از طریق لاینر کامپوزیت معیوب استفاده شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که این روش می‌تواند به‌عنوان یک ابزار تخمین کارآمد و آسان با استفاده از تکرار نتایج عددی بسیار خوب عمل کند .همچنین مهاجرت آلاینده در محل دفن زباله عمدتاً تحت تأثیر نرخ خرابی لایه ژئوممبران قرار دارد [۱۶].

با توجه به آلودگی آب‌های زیرزمینی و زمین‌های زراعی به‌واسطه نفوذ شیرابه، مراکز دفن ازجمله مهم‌ترین معضلات زیست‌محیطی مرتبط با مدیریت پسماند جامد شهری است. به دلیل محدودیت‌های اقتصادی و فنی و همچنین با توجه به پرهزینه بودن مطالعات صحرایی و عدم امکان بررسی کیفیت و کمیت انتقال آلاینده‌ها در یکایک محل‌های دفن در کشور، مدل‌های ریاضی می‌توانند به‌عنوان ابزاری مهم در ارزیابی اثرات شیرابه و انتقال آلاینده‌های موجود در لایه‌های زیرین محل دفن مورداستفاده قرار گیرند. نرم‌افزار کامسول از رابط‌های کاربردی مبتنی بر فیزیک بوده که از سیستم‌های معادلات دیفرانسیل جزئی متصل نیز پشتیبانی می‌کند. موارد مذکور امکان دقت بیشتر در مدل‌سازی و پیش‌بینی‌های دقیق‌تر را فراهم می‌کنند. بر همین اساس، تحقیق حاضر با استفاده از نرم‌افزار کامسول جهت مدل‌سازی حرکت شیرابه در لندفیل شهر اصفهان به‌منظور بررسی حرکت شیرابه در خاک ناهمگن، بررسی زمان موردنیاز برای انتقال آلودگی به منابع آبی، زمین‌های کشاورزی و مناطق مسکونی، و پیشنهاد جهت کنترل و کاهش پخش‌شدگی آلودگی در منطقه احداث لندفیل در صورت رسیدن آلودگی به منابع آب زیرزمینی و زمین‌های کشاورزی است.

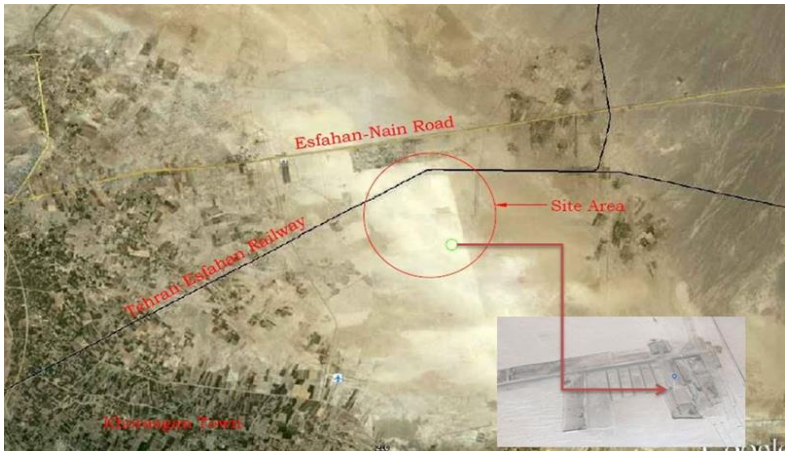
۲-مواد و روش‌ها

۲-۱-نرم‌افزار کامسول

امروزه شبیه‌سازی‌های کامپیوتری بخش مهمی از مسائل علوم و مهندسی را به خود اختصاص داده‌اند. آنالیزهای دیجیتال، مخصوصاً در توسعه یک محصول جدید و یا در طراحی‌های بهینه اهمیت پیدا می‌کنند. امروزه طیف وسیعی از گزینه‌ها برای شبیه‌سازی در دسترس هستند در محیط نرم‌افزار کامسول با انتخاب فیزیک‌های مختلفی که به‌صورت پیش‌فرض در نرم‌افزار وجود دارد با توجه به مدل موردنظر، نرم‌افزار معادلات PDE[۱] مربوطه را گردآوری کرده و با روش المان محدود گسسته سازی‌های معادلات دیفرانسیل را انجام داده و به حل معادلات می‌پردازد .

۲-۲-منطقه موردبررسی

لندفیل به‌صورت گودالی حفاری‌شده در ۳۵ کیلومتری خارج شهر و در مختصات ۳۲,۶۴۳۳۲۵ ,۵۲,۰۴۲۵۸۴ واقع‌شده است. شکل ۱ نمایی از لندفیل و مناطق مسکونی و شهرک‌های اطراف را نشان می‌دهد. پس از دریافت داده‌ها نزدیک‌ترین منابع آب زیرزمینی و سطحی، زمین‌های کشاورزی، شهرک‌های مسکونی و صنعتی به لندفیل با استفاده از سیستم مختصات جغرافیای مشخص شد.

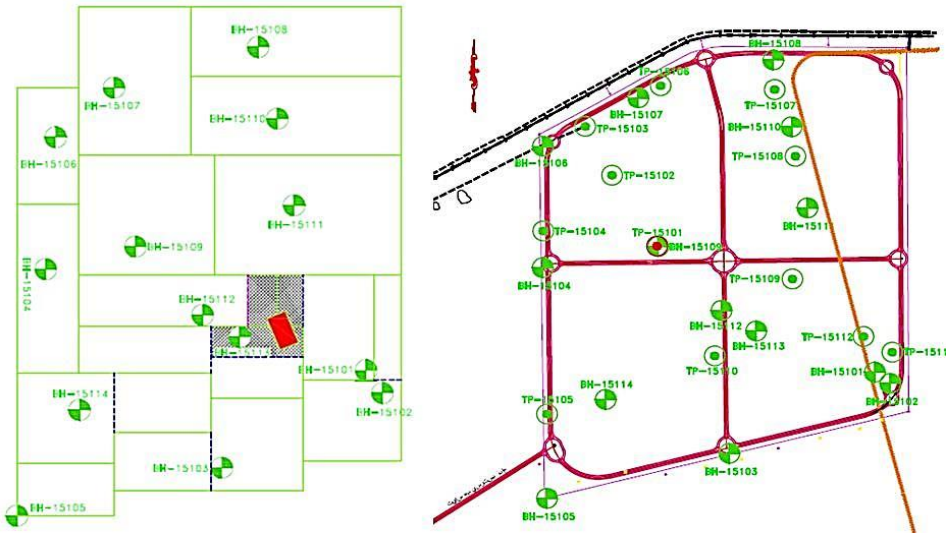


شکل ۱- منطقه موردمطالعه و نزدیکی آن با شهر اصفهان

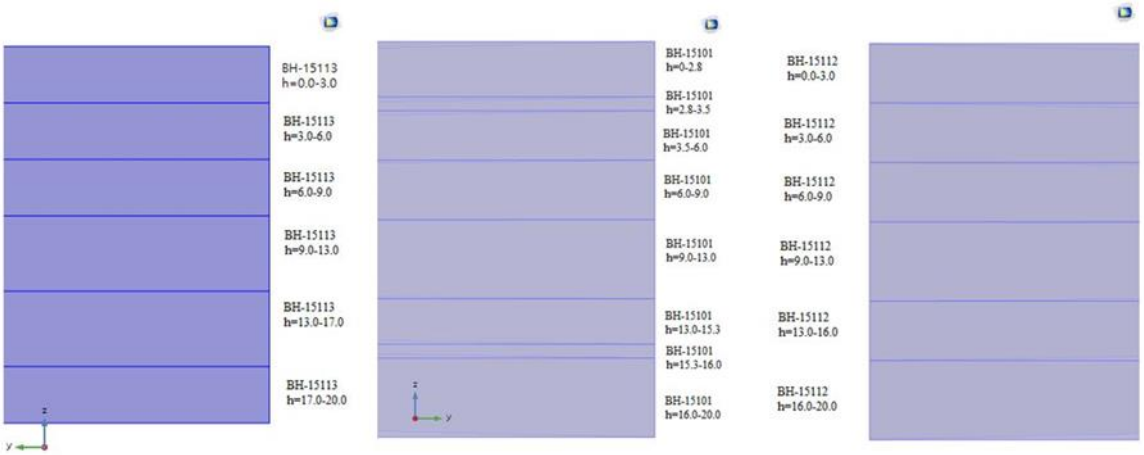
[۱] Partial Differential Equation

۲-۳-مشخصات لندفیل

این گودال به مساحت ۲۵۰۰۰ مترمربع، که ارتفاع شیرابه مانده در کف گودال حدوداً ۲ سانتی‌متر به‌صورت ثابت است (سازمان مدیریت پسماند شهرداری اصفهان). سطح منطقه لندفیل برای بررسی‌های ژئوتکنیکی در ۱۴ حفاری عمیق ۲۰متری (BH) و ۱۲ حفاری سطحی ۳ متری (TP) نمونه‌برداری شده است. در شکل ۲ جهت مدل‌سازی بر اساس فاصله گمانه‌های زده‌شده، به‌صورت فرضی زون بندی انجام‌شده است که هر زون مشخصات همان گمانه را به خود اختصاص می‌دهد. شکل ۳ نشان می‌دهد محل موردنظر جهت مدل‌سازی بر روی قسمت‌های BH-15101 و BH-15112 و BH-15113 قرارگرفته است که هرکدام از این قسمت‌ها در عمق‌های مختلف دارای مشخصات ژئوتکنیکی متفاوتی می‌باشند.



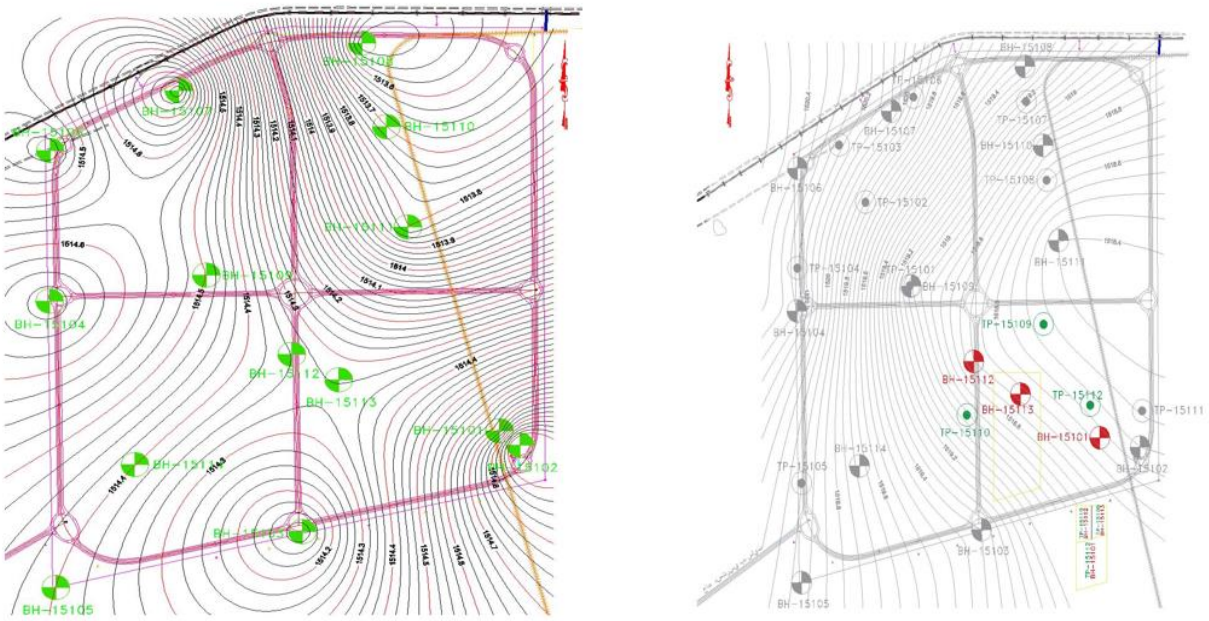
شکل ۲- زون بندی لندفیل شهر اصفهان



شکل ۳- زون بندی لندفیل شهر اصفهان

۲-۳-۱-مشخص نمودن عوارض

شکل ۴ منحنی‌های تراز توپوگرافی و گمانه‌های زده‌شده در منطقه و سطح آب زیرزمینی در زیر لندفیل را نشان می‌دهد.



شکل ۴- تراز توپوگرافی و سطح آب زیرزمینی در زیر لندفیل

۲-۴-نمونه‌های خاک

اطلاعات خاک منطقه، جایی که لندفیل در آن واقع‌شده است، از طریق ۱۴ نمونه حفاری‌شده، جمع‌آوری گردیده است. اطلاعات مذکور از سازمان مدیریت پسماند و سازمان عمران شهرداری اصفهان اخذشده است. جزئیات مربوط به نوع خاک و مختصات هر نمونه نیز با استفاده از اطلاعات حفاری در جدول۱ به‌طور خلاصه ثبت‌شده است.

جدول ۱- جزئیات مربوط به نوع خاک و مختصات هر نمونه

شماره نمونه	عمق لایه m	k_F m/d	γ_d kg/m^3	رطوبت ٪	Porosity, N
TP-15112	0-2.8	0.36	1350	0.17	0.45
BH-15101	2.8 – 3.5	0.00493	1500	0.23	0.41
BH-15101	3.5 - 6	0.003049	1470	0.41	0.43
BH-15101	6 - 9	0.001028	1420	1	0.45
BH-15101	9 - 13	0.0003957	1610	1	0.41
BH-15101	13 – 15.3	0.0003957	1315	1	0.42
BH-15101	15.3 - 16	0.1408	1390	1	0.53
BH-15101	16 - 20	0.001537	1670	1	0.53
TP-15110	0 - 3	0.0043	2000	0.22	0.43
BH-15112	3 – 6.6	0.0043	2100	0.31	0.31
BH-15112	6.6 - 8	0.004760	1897	0.57	0.47
BH-15112	8 – 13.3	0.004924	1475	1	0.30
BH-15112	13.3 - 17	0.0967	1506	1	0.51
BH-15112	17 - 20	0.02842	1570	1	0.54

شماره نمونه	عمق لایه m	k_F m/d	γ_d kg/m^3	رطوبت ٪	Porosity, N
TP-15109	0 – 4.5	2.04	1510	0.27	0.49
BH-15113	4.5 - 6	0.00432	1640	0.45	0.33
BH-15113	6 - 9	0.02384	1470	1	0.24
BH-15113	9 – 12.3	0.000967	1790	1	0.21
BH-15113	12.3 - 17	0.01676	1630	1	0.51
BH-15113	17 - 20	0.01304	1570	1	0.51

۲-۵-مشخصات شیرابه

در جدول ۲، مشخصات شیرابه تولیدشده از زباله‌های شهری شهر اصفهان آورده شده است. این شیرابه در سال ۱۳۹۶ توسط شهرداری اصفهان مورد آزمایش قرارگرفته و گزارش مربوطه تهیه‌شده است. چگالی محاسبه‌شده برابر با kg/m3 ۱۰۵۰ است. روزانه حدود ۲۰۰ مترمکعب زباله به لندفیل تخلیه می‌شود، و درصد رطوبت زباله‌ها در زمان جمع‌آوری از سطح شهر ۴۰ درصد، بارگیری در تریلی ۳۰ درصد و در زمان تخلیه در لندفیل ۱۵ درصد است.

جدول ۲- نتایج آنالیز شیرابه استخر تابستان ۹۶

ردیف	پارامتر	واحد	مقادیر	ردیف	پارامتر	واحد	مقادیر
۱	دبی(Q)	L/s	-	۱۳	کروم	mg/L	۰/۱۵
۲	EC	dS/m	۴۰/۷	۱۴	کادمیم	mg/L	۰/۰۶۷
۳	pH	-	۶/۲	۱۵	سدیم	mg/L	۹۱۰۰
۴	TSS	mg/L	۲۷۲۹۴	۱۶	کلسیم	mg/L	۶۶۸۰
۵	TDS	mg/L	۴۶۵۹۰	۱۷	منیزیم	mg/L	۲۷۴۰
۶	COD	mg/L	۸۶۴۰۰	۱۸	پتاسیم	mg/L	۳۱۴۰
۷	BOD	mg/L	۴۵۲۰۰	۱۹	روی	mg/L	۱۰
۸	ازت کل	mg/L	۱۷۰۰	۲۰	مس	mg/L	۰/۴
۹	فسفر	mg/L	۲۱۵۰	۲۱	منگنز	mg/L	۴/۸
۱۰	آهن	mg/L	۶۵/۲	۲۲	سولفات	mg/L	۳۴۱۲
۱۱	سرب	mg/L	۰/۹۵	۲۳	نیترات	mg/L	۴۷۰۰
۱۲	نیکل	mg/L	۰/۸	۲۴	چگالی شیرابه	g/L	۱۰۵۰

۳-مدل‌سازی

۳-۱-معادلات

مدل‌سازی انتقال و انتشار آلودگی در خاک زیر لندفیل بر اساس رابطه معادله ریچاردز برای تعریف روابط غیرخطی خاک با خواص نفوذپذیر استفاده می‌کند [۱۷]. همچنین می‌توان گفت که معادله ریچاردز جریان آب اشباع‌شده یا نشده را در خاک کنترل می‌کند. هوای سطح خاک به اتمسفر باز است، بنابراین شما می‌توانید فرض کنید که تغییر فشار در هوا، جریان آلودگی در خاک را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد و از معادله ریچاردز در اینجا برای جریان‌های تک فازی استفاده‌شده است [۱۸]. رابطه (۱) معادله مؤثر ریچاردز را در مدل‌سازی نشان می‌دهد.

$$(\mathrm{C}+\mathrm{SeS})\frac{\partial \mathrm{H_P}}{\partial \mathrm{t}}+\nabla.\left(-\mathrm{K}\nabla(\mathrm{H_P}+\mathrm{D})\right)=0 \qquad (۱)$$

در رابطه (۱) C نشان‌دهنده ظرفیت رطوبت خاص و Se اشباع مؤثر خاک است. H هد هیدرولیکی Hp هد فشاری بوده که متناسب با متغیر وابسته است. T نشان‌دهنده زمان و K برابر هدایت هیدرولیکی است. همچنین D جهت (که به‌طورمعمول، جهت قائمz است) و ارتفاع عمودی را نشان می‌دهد.

جریان آب زیرزمینی و انتقال مواد با سرعت مایعات ارتباط دارد. در فرم معادله حمل‌ونقل که به شرح زیر است، سرعت‌های مایع باید از قانون دارسی پیروی کند که به‌صورت رابطه (۲) است:

$$U = K_S k_r \nabla(H_P + D) \qquad (۲)$$

در این عبارت، U میدان سرعت Darcy برحسب متر بر ثانیه است. همچنین، معادله‌ای که بر پیشگیری، پراکندگی، جذب و انحلال حلال‌ها در آب‌های زیرزمینی برقرار است مطابق با رابطه (۳) است:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\theta_C\right)+\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho_b.\,C_p\right)+u.\,\nabla c+\nabla.\left[-\theta D_L\nabla c\right]=\Sigma R_L+\Sigma R_P+S_C \qquad (۳)$$

معادله انتقال آلودگی در محیط‌های متخلخل، پارامترهای θ، ϵ_pو Cm را در هر گام زمانی به‌صورت کوپل هم‌زمان با حل معادله ریچارد از این معادله استخراج و اقدام به محاسبات انتقال و انتشار آلودگی در محیط موردمطالعه می‌کند.

۳-۲-اطلاعات ورودی به نرم‌افزار

بر اساس جدول ۲ یکی از فلزات آلوده‌کننده شیرابه که با غلظت نسبتاً زیادی در گزارش سازمان پسماند شهرداری اصفهان آمده است عنصر فسفر است. فسفر عنصری شیمیایی است که با نماد P نشان داده می‌شود و عدد اتمی آن ۱۵ و جرم اتمی استاندارد آن برابر ۳۰/۹۷ گرم برمول است. فسفر در محیط‌زیست بیشتر به‌صورت فسفات یافت می‌شود. مقادیر زیاد فسفات می‌تواند باعث به وجود آمدن مشکلات سلامتی شود مانند آسیب رساندن به کلیه گردد. در حین تصفیه آب، فسفات‌ها اغلب به‌طور کامل از آب جدا نمی‌شوند تا اینکه آن‌ها می‌توانند در یک مسافت طولانی منتشر شوند و در آب‌های سطحی یافت شوند. با توجه به جدول ۲ مقدار فلز فسفر در شیرابه زباله ۲۱۵۰ (mg/l) ۶۹,۴۱۳ (mol/m3) است و دلیل انتخاب این عنصر برای نشت آلودگی به آب‌های زیرزمینی علاوه بر سمی بودن آن، غلظت نسبتاً بالای آن در شیرابه حاصل از زباله شهری اصفهان است. برای مدل‌سازی از نرم‌افزار کامسول استفاده‌شده است که به‌صورت مولتی فیزیک با دو مدل معادله ریچارد و معادله انتقال آلودگی کوپل شده است. مدل مسئله از نوع 3D است. با کوپل کردن دو معادله‌ی فوق، حرکت شیرابه در زمین و جذب آن بر اساس زمان بررسی‌شده است. اطلاعات مدل‌سازی برای جریان مایع و انتقال و انتشار آلاینده در جداول ۳ و ۴ مشخص‌شده است.

جدول ۳- ضرایب جذب لانگ‌مویر برای خاک‌های منطقه

نوع خاک	خاک کف لندفیل	ضرایب جذب لانگمویر		مرجع
		C_{max} (mol/kg)	K (mol/m^3)	
خاک‌های نسبتاً شنی	GML	3.163×10^{-3}	12.389	[۱۹]
خاک‌های نسبتاً ماسه‌ای	SML	3.517×10^{-3}	0.523	[۲۰]
خاک‌های نسبتاً لای دار	ML	0.011×10^{-3}	12.051	[۲۱]
خاک‌های نسبتاً رسی	CL	11.53×10^{-3}	0.092	[۲۲]
خاک‌های ترکیبی	MLS MLC	23.82×10^{-3}	0.068	[۲۰]

جدول ۴- ورودی و اطلاعات فیزیکی (مدل انتقال و انتشار آلاینده در محیط متخلخل)

متغیر	واحد	توصیف	مقدار	توضیحات
ρ	kg/m^3	Leachate density	۱۰۵۰	چگالی شیرابه
α_r	m	Longitudinal dispersivity	۰/۰۰۵	ضریب انتشار طولی
α_z	m	Transverse dispersivity	۰/۰۰۱	ضریب انتشار عرضی
Φ_L	d^{-1}	Decay rate in liquid	۰/۰۵	نرخ انحلال آلودگی (نرخ کاهش آلودگی توسط سیال آب)
Φ_P	d^{-1}	Decay rate on solid	۰/۰۱	نرخ انحلال آلودگی در برخورد با ذرات خاک و جذب شدن آن‌ها
C_Θ	mgr/L	Solute concentration in ring	۲۱۵۰	غلظت آلودگی در محل ورودی

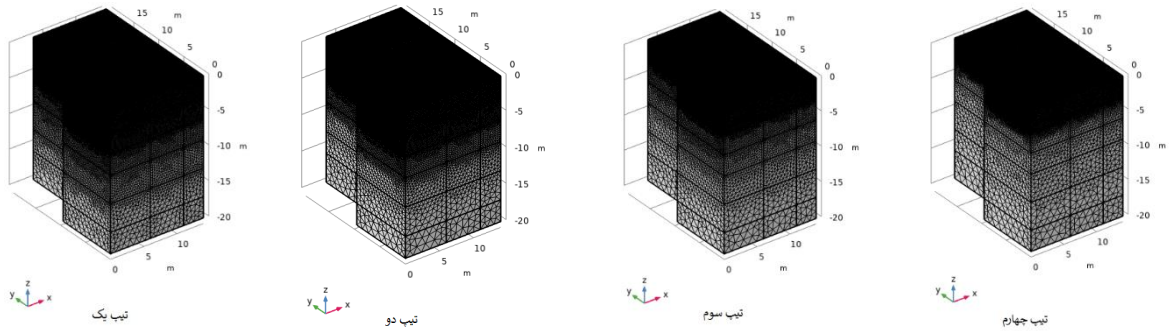
۳-۳-مقطع لندفیل و مش بندی

مش بندی تقسیم دامنه به تعدادی تقسیمات کوچک‌تر است که باهم تداخل ندارند. نتیجه این تقسیم یک شبکه (یا مش) از سلول‌ها است. تولید مش و مش بندی یکی از مهم‌ترین بخش‌های هر شبیه‌سازی است [۲۳]. برخلاف تکنیک Structured، تکنیک Triangle Mesh از هیچ نوع الگوی از پیش تعیین‌شده‌ای استفاده نمی کند. به همین جهت در بسیاری از مواقع از این تکنیک بانام Unstructured نیز یاد می‌شود.نتایج حاصل از این بررسی در جدول ۵ قابل‌بررسی است.

جدول ۵- اطلاعات مربوط به انتخاب مش بندی مناسب

تیپ	تعداد المان‌های مرزی	تعداد المان‌ها	مدت‌زمان Compute(d)	درصد اختلاف در نتایج با تیپ دو
یک	۱۵۵،۵۰۳	۴۵،۰۰۰،۰۰۰	-	Error
دو	۷۹،۸۴۶	۱۱،۰۰۰،۰۰۰	۱۹	-
سه	۶۱،۳۲۷	۷،۰۰۰،۰۰۰	۱۲	۲٪
چهار	۳۰،۶۶۷	۳،۵۵۱،۴۴۹	۷،۵	۶٪

در مش بندی با تیپ سه و چهار نتایج به‌دست‌آمده از هد فشاری در کانتورها و نفوذ آلودگی در ۱۰ سال بعد از شروع استفاده از محل دفن تا دو رقم اعشار در واحد متریک یکسان می‌باشند و درصد اختلاف دو نمونه مش بندی را نسبت به هم برابر صفر در نظر گرفته شد. حال با توجه به موارد ذکرشده حالت بهینه برای انتخاب مش بندی مدل، تیپ چهارم مورداستفاده قرار گرفت.

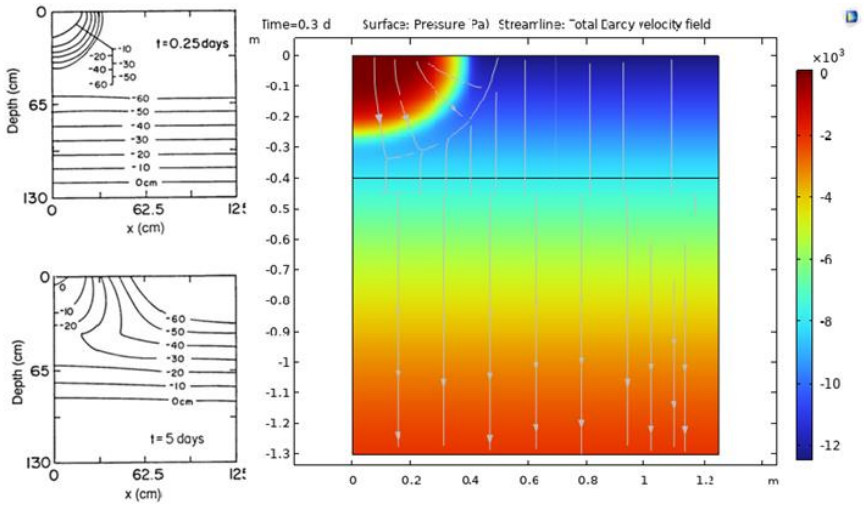


شکل ۵- تراکم مش بندی در تیپ‌های انتخابی

۳-۴-آنالیز و مدل‌سازی

۳-۴-۱- صحت سنجی روش مدل‌سازی با نرم‌افزار کامسول

جهت اطمینان از روش مدل‌سازی و نتایج حاصل از مدل‌سازی با نرم‌افزار کامسول مطمئن به مدل‌سازی بر اساس یک شبیه‌سازی نفوذ آلودگی در محیط نیمه اشباع متخلخل پرداخته شد. مسئله انتخاب‌شده باید تا حد امکان نزدیک به موضوع مدل‌سازی با نرم‌افزار کامسول باشد تا تحلیل نتایج آسان‌تر و دقیق‌تر باشد. در سال ۱۹۹۴ سیمونک[۱] و همکاران با استفاده از یک برنامه کامپیوتری که به نام کد دستوری SWMS-2D مشخص‌شده است شروع به شبیه‌سازی حرکت آب و سیالات محلول در آن در یک محیط متخلخل با درجه اشباع متغیر(تقریباً نیمه اشباع) کردند. شبیه‌سازی انجام‌شده با کد دستوری SWMS-2D با نرم‌افزار کامسول نیز انجام گرفت و نتایج حاصل از مدل‌سازی در شکل ۶ آورده شده است. بر اساس مقایسه نتایج شبیه‌سازی با کد کامپیوتری SWMS-2D و مدل‌سازی با نرم‌افزار کامسول نتایج به‌دست‌آمده بسیار با یکدیگر همخوانی دارد [۱۷].



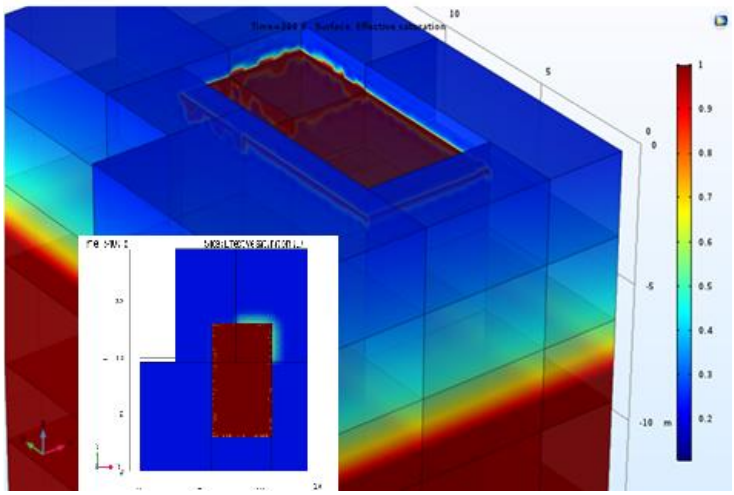
شکل ۶- اشباع مؤثر در مدت t=2.5-3d (نتیجه تحلیل SWMS-2D و نرم‌افزار کامسول)

[۱] Simunek

۴-بحث و نتایج

۴-۱-نتایج حاصل از مدل‌سازی لندفیل اصفهان با نرم‌افزار کامسول

در شکل ۷ که تقریباً ۱۵ سال آینده را نشان می‌دهد، بیان‌کننده جریان شیرابه در خاک است. رنگ زمینه نشان‌دهنده اشباع مؤثر است که مقادیر آن در راهنمای میله‌ای نمودار مشخص‌شده است. به دلیل اینکه خاک منطقه به‌صورت لایه‌های ناهمگن در نظر گرفته‌شده و مدل‌سازی نیز به‌صورت سه‌بعدی انجام‌گرفته است، بنابراین برای نشان داده حرکت شیرابه در زمان‌های مختلف، از مقطع زدن (Slice) در جهات مختلف کمک گرفته شد.

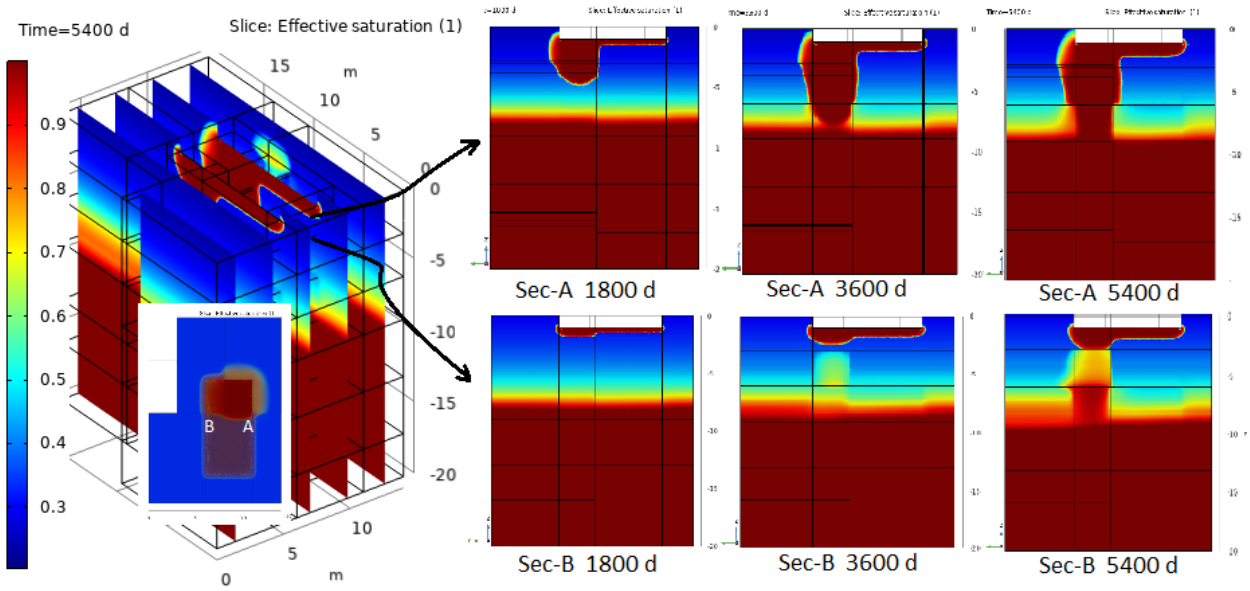


شکل ۷- جریان شیرابه در خاک

به‌طورکلی می‌توان نتیجه گرفت که در قسمت‌هایی از لایه‌های خاک که در معرض انتقال آلودگی به‌صورت سیال قرارگرفته‌اند، اگر خاک با خاصیت رسی چسبنده قرارگرفته باشد از انتقال سریع آلودگی به لایه‌های زیرین خاک جلوگیری می‌کند و با توجه به این مسئله که هد هیدرولیکی آب زیرزمینی منطقه در زیر لندفیل در عمق ۱۰ متری است و با توجه به مشاهدات و برداشت‌های میدانی منطقه، نزدیک‌ترین زمین قابل‌کشت و زراعت به لندفیل، از شرق حدود ۵/۸ کیلومتر و از غرب حدود ۳/۶۰ کیلومتر است و درنتیجه آلودگی انتشار پیداکرده در محیط خاکی، باعث خطر زیست‌محیطی برای انسان و موجودات زنده می‌شود.

۴-۲-نتایج حاصل از روند آلوده شدن خاک توسط شیرابه

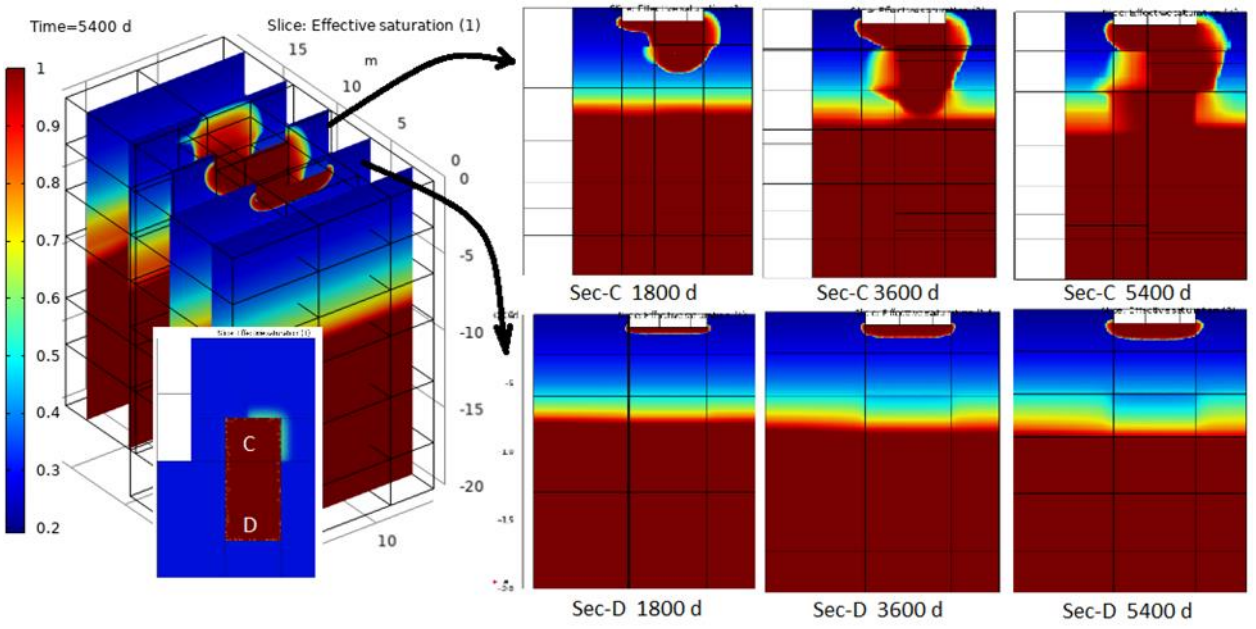
شکل ۸، اشباع مؤثر (طرح سطح) و سرعت سیال در خاک را نشان می‌دهد که رنگ قرمز تیره نشان‌دهنده اشباع کامل خاک (Sr=1) با شیرابه زباله در واحد زمان است و به طبع رنگ آبی تیره نشان‌دهنده ظرفیت خشک خاک (Sr=0) است. با توجه به Sec-A و Sec-B در شکل ۸، در ناحیه شمال شرقی لندفیل نفوذ شیرابه به لایه‌های عمیق‌تر خاک با سرعت بیشتری نسبت به دیگر ناحیه‌ها انجام‌گرفته است که این قسمت در محدوده نمونه‌برداری BH-15101 قرار دارد و تقریباً شیرابه در سال دهم به سطح آب زیرزمینی رسیده است.در تصویر Sec-B 3600d و Sec-B 5400d لکه‌های رنگی بین نفوذ شیرابه از کف لندفیل و سطح آب زیرزمینی، بیانگر نشت افقی شیرابه‌ای است که از لایه‌های BH-15101 به‌سرعت عبور کرده و در جهت افقی (شرق به غرب) وارد لایه‌های خاک BH-15112 (بعد از ۱۰ سال) شده است.



شکل ۸- نمایش نفوذ شیرابه در Sec-A و Sec-B در زمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ سال پس از بهره‌برداری از لندفیل

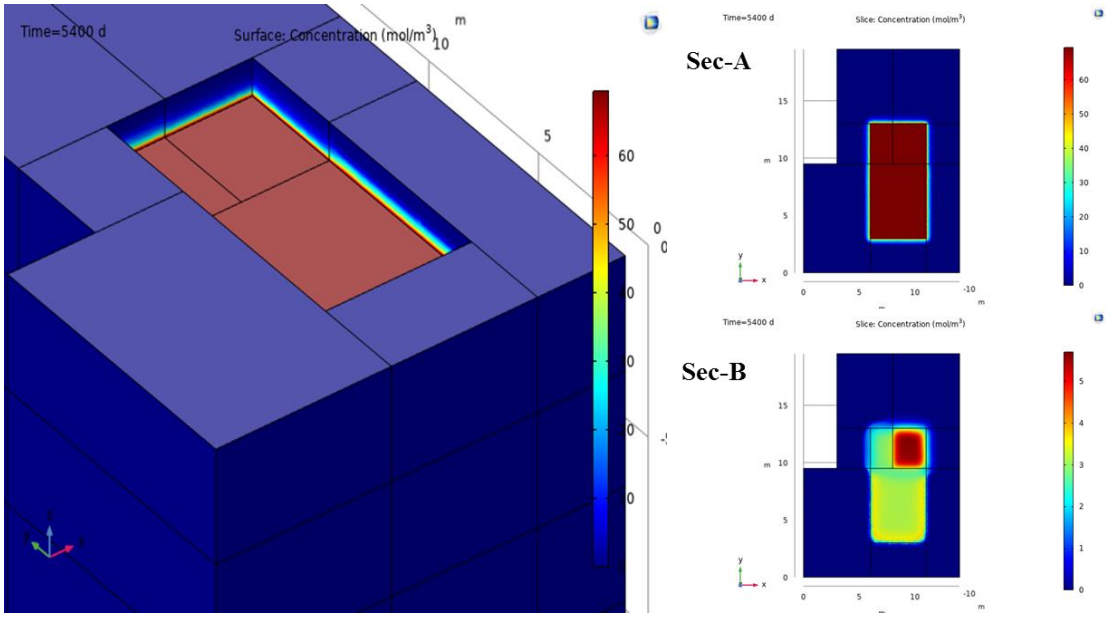
در تصویر Sec-B 3600d و Sec-B 5400d لکه‌های رنگی بین نفوذ شیرابه از کف لندفیل و سطح آب زیرزمینی، بیانگر نشت افقی شیرابه‌ای است که از لایه‌های BH-15101 به‌سرعت عبور کرده و در جهت افقی (شرق به غرب) وارد لایه‌های خاک BH-15112 (بعد از ۱۰ سال) شده است.

در شکل ۹ در جهت شرقی-غربی لندفیل Sec-D مشخص می‌کند که به دلیل ظرفیت نفوذپذیری که در محدوده BH-15113 در فاصله زمانی ۱۵ سال شیرابه کمتر از ۳ متر نیز نفوذ کرده است و این به علت وجود لایه‌های رس متراکم در محدوده این قسمت از خاک است و در Sec-C و تمایل حرکت افقی شیرابه از لایه‌های خاک در محدوده BH-15101 به BH-15112 پس از رسیدن به سطح آب زیرزمینی (حدوداً ۱۰ سال پس از بهره‌برداری از لندفیل) کاملاً مشخص است و این امر خود پتانسیل نفوذ شیرابه در لایه‌های کم نفوذ BH-15112 را نیز افزایش می‌دهد.



شکل ۹- نمایش نفوذ شیرابه در Sec-C و Sec-D در زمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ سال پس از بهره‌برداری از لندفیل

در شکل۱۰ که تقریباً ۱۵ سال آینده را نشان می‌دهد، بیان‌کننده پخش‌شدن آلودگی در محیط خاکی است. رنگ زمینه مقدار آلودگی در محیط را به‌صورت mol/m3 در خاک را نشان می‌دهد که مقادیر آن در ستون legend گراف در سمت راست شکل ۱۰ مشخص‌شده است.



شکل ۱۰- پخش شدن فسفر در کف لندفیل و عمق ۲ متری خاک پس از ۱۵ سال

با توجه به Sec-A در شکل ۱۰ ، ۱۵ سال پس از بهره‌برداری بیشترین مقدار آلودگی در کف لندفیل که در فاصله افقی تقریباً ۰,۷۵ متری از کف لندفیل مقدار آزاد یا جذب نشده سطحی ذرات خاک به مقدار 35 mol/m3 رسیده است. در Sec-B مقدار آزاد یا فعال (حلال در شیرابه) فسفر در عمق ۲ متری خاک را نشان می‌دهد با توجه به تصویر قسمت قرمزرنگ در محدود خاک-BH 15101 قرارگرفته و به دلیل نفوذپذیری بالای خاک در این ناحیه مقدار فسفر حلال جذب نشده در شیرابه (5.1mol/m3) به‌مراتب بیشتر از لایه‌های BH-15112(2.8mol/m3) و BH-15113(3.1mol/m3) است.

۵-نتیجه‌گیری

دفع نامناسب زباله‌های جامد شهری پیامدهای منفی عمده‌ای برای خاک، کیفیت آب، اکوسیستم و سلامت انسان خواهد داشت. تشکیل شیرابه هنگام تخلیه زباله‌های جامد و متعاقباً آلودگی آب‌های زیرزمینی ازجمله این پیامدها خواهد بود. با توجه به محدود بودن منابع آب زیرزمینی پیش‌بینی آلودگی منابع آبی در درازمدت، منابع موجود را از خطرات و تهدیدات زیست‌محیطی حفظ خواهد نمود. در همین راستا، مطالعه حاضر باهدف بررسی آلودگی منابع زیرزمینی توسط انتشار شیرابه محل دفن زباله شهری اصفهان با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز کامسول صورت گرفت. مدل‌سازی پخشیدگی شیرابه در خاک با در نظر گرفتن عنصر فسفر موجود در شیرابه در ۵، ۱۰ و تقریباً ۱۵ سال آینده، نشان می‌دهد که خاک زیر لندفیل باگذشت زمان اشباع‌شده به‌طوری‌که سرعت آن در لایه‌های بالایی بیشتر است. همچنین بررسی ظرفیت خاک برای نگه‌داری شیرابه و جذب آلودگی بر ذرات خاک‌نشان داد که سرعت حرکت شیرابه در هر لایه با توجه به مشخصات فیزیکی خاک متفاوت است. مطابق نتایج این مطالعه ضریب هدایت هیدرولیکی بیشترین تأثیر را در نحوه نفوذ شیرابه در هر لایه از خاک داشته است. نتایج مدل‌سازی نشان داد که ضریب تأخیر به رطوبت، تخلخل و چگالی بالک خاک بستگی دارد، به‌گونه‌ای که آلاینده‌هایی با تمایل بالاتر برای جذب در محیط متخلخل، ضریب تأخیر بالاتری دارند. همچنین فرآیند جذب بیشترین پتانسیل را در جلوگیری از حرکت آلاینده در نواحی خشک دارد و در مناطق اشباع، آلودگی تقریباً با سرعت آب زیرزمینی حرکت می‌کند.

۶-منابع و مراجع

1. Salem ZB, Capelli N, Laffray X, Elise G, Ayadi H, Aleya L. Seasonal variation of heavy metals in water, sediment and roach tissues in a landfill draining system pond (Etueffont, France). Ecological Engineering. 2014 Aug 1;69: 25-37. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.072
2. Baderna D, Caloni F, Benfenati E. Investigating landfill leachate toxicity in vitro: A review of cell models and endpoints. Environment international. 2019 Jan 1;122: 21-30. https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.11.024
3. Maurya PK, Rønde VK, Fiandaca G, Balbarini N, Auken E, Bjerg PL, Christiansen AV. Detailed landfill leachate plume mapping using 2D and 3D electrical resistivity tomography-with correlation to ionic strength measured in screens. Journal of Applied Geophysics. 2017 Mar 1;138:1-8. https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.01.019
4. Wang X, Dan Z, Cui X, Zhang R, Zhou S, Wenga T, Yan B, Chen G, Zhang Q, Zhong L. Contamination, ecological and health risks of trace elements in soil of landfill and geothermal sites in Tibet. Science of the total environment. 2020 May 1;715: 136639. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136639
5. Tauhid-Ur-Rahman M. AN INVESTIGATION OF THE CONTAMINANT TRANSPORT FROM THE WASTE DISPOSAL SITE, USING FEMLAB. Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation. 2009 May 1;4(2).
6. Moreira CA, Helene LP, Nogara P, Ilha LM. Analysis of leaks from geomembrane in a sanitary landfill through models of electrical resistivity tomography in South Brazil. Environmental earth sciences. 2018 Jan; 77:1-9. https://doi.org/10.1007/s12665-017-7180-x
7. Shu S, Zhu W, Wang S, Ng CW, Chen Y, Chiu AC. Leachate breakthrough mechanism and key pollutant indicator of municipal solid waste landfill barrier systems: centrifuge and numerical modeling approach. Science of the Total Environment. 2018 Jan 15;612: 1123-31. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.185
8. Pan H, Lei H, Liu X, Wei H, Liu S. Assessment on the leakage hazard of landfill leachate using three-dimensional excitation-emission fluorescence and parallel factor analysis method. Waste management. 2017 Sep 1;67: 214-21. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.041
9. Azari T, Kadar-Ghale MT, Kardel F. Influence of the Babolsar landfill leachate on groundwater quality. Kharazmi Journal of Earth Sciences. 2023 Sep 10;9(1):227-59.http://doi.org/10.22034/KJES.2023.9.1.106451
10. Papadopoulou MP, Karatzas GP, Bougioukou GG. Numerical modelling of the environmental impact of landfill leachate leakage on groundwater quality–a field application. Environmental Modeling & Assessment. 2007 Feb;12:43-54.https://doi.org/10.1007/s10666-006-9050-x

۱۱. زرد شت، م.، شهرکی، ف. ۱۳۹۵. به شبیه سازی عددی انتقال حرارت جابجایی آزاد یک ا ستوانه شیبدار دارای منبع گرمایی سیسنوسی، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه سیستان وبلوچستان.

۱۲. حسنی کبوتر خانی، ع.، ۱۳۹۵. طراحی قلب شتاب‌دهنده بتاترون(۱۵۰ مگاواتی) با استفاده از شبیه سازی کامپیوتری(COMSOL). پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده فیزیک دانشگاه شهید باهنر کرمان.

۱۳. اخروی، س.، ۱۳۹۳. بررسی توزیع جریان بر رفتار هیدرولیکی و راندمان تصفیه تالاب مصنوعی. پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

14. Xie H, Wu J, Thomas HR, Cai P, Yan H, Chen Y. An analytical model for contaminant transport in landfill liner with fluctuating leachate head. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2023 Feb;47(3):482-94. https://doi.org/10.1002/nag.3478
15. Aliewi A, Hadi K, Bhandary H, Al-Qallaf H, Rashed T, Abdulhadi A, Al-Salem SM. Investigation of landfill leachate pollution impact on shallow aquifers using numerical simulation. Arabian Journal of Geosciences. 2021 Oct;14: 1-4. https://doi.org/10.1007/s12517-021-08536-8
16. Li T, Sun D, Chen Z, WANG L. Semi-Analytical Solution for Two-Dimensional Contaminant Transport Through Composite Liner with Strip Defects. Available at SSRN 4809098.
17. Šimůnek J, Suarez DL. Two-dimensional transport model for variably saturated porous media with major ion chemistry. Water Resources Research. 1994 Apr; 30(4):1115-33. https://doi.org/10.1029/93WR03347
18. Bear J. Hydraulics of groundwater. Courier Corporation; 2012 Mar 15.
19. Azevedo RP, Salcedo IH, Lima PA, da Silva Fraga V, Lana RM. Mobility of phosphorus from organic and inorganic source materials in a sandy soil. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture. 2018 Jun;7:153-63.https://doi.org/10.1007/s40093-018-0201-2
20. Tamatamah RA. Phosphorus sorption in relation to soil grain size and geochemical composition in the Simiyu and Kagera river basins, Tanzania. Tanzania Journal of Science. 2005;31(2):33-9. DOI:10.4314/tjs.v31i2.18418
21. Zhang C, Tang H, Chen M, Xiao Y, Wang D. Adsorption of phosphorus on different sediments. InAdvances in Water Resources and Hydraulic Engineering: Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS 2009 (pp. 1090-1095). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-89465-0_191
22. Ahmed MF, Kennedy IR, Choudhury AT, Kecskés ML, Deaker R. Phosphorus adsorption in some Australian soils and influence of bacteria on the desorption of phosphorus. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 2008 May 1;39(9-10):1269-94.https://doi.org/10.1080/00103620802003963
23. Brooks RH, Corey AT. Properties of porous media affecting fluid flow. Journal of the irrigation and drainage division. 1966 Jun;92(2):61-88. https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0000425