

بررسی آلاینده های نوین در آبخوان های شهری

(مطالعه موردی: کلانشهر کرج)

محمدحسین محمدی بصیر^۱ | ، مجید خلقی^۲

۱. گروه آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: mohammadi.basir@ut.ac.ir , mb.stu90@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، استاد گروه آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: mkhoghghi@gmail.com , kholghi@ut.ac.ir

چکیده

در دو دهه اخیر ظهور آلاینده های نوین مانند پرفلوئوروآکتانویک اسید^۱ (PFOA) و پرفلوئوروآکتان سولفونیک اسید^۲ (PFOS) که برای سلامتی انسان به شدت مضر هستند، از چالش های مهم در آبهای زیرزمینی کلانشهرها می باشد. در این پژوهش آزمایشگاهی- میدانی - دفتری، در گام اول، نه محل آلودگی، محل دفن زباله، تصفیه خانه فاضلاب، شهرک صنعتی، شرکت تولیدات نساجی، کارگاه آبکاری فلزات، دو پادگان نظامی و دو ایستگاه آتش نشانی، در کرج انتخاب گردید. سپس سه نقطه برای هر محل و مجموعاً از ۲۷ نقطه نمونه برداری آبهای زیرزمینی انجام شد. برای محاسبه غلظت PFOA و PFOS، از نسبت فلوروزدایی استفاده شد. به این منظور، ابتدا غلظت یون فلوراید در آزمایشگاه محاسبه و براساس غلظت یون فلوراید، منحنی درصد فلوروزدایی و همچنین تعداد ساختار کربن - فلورئور و جایگذاری در فرمول، مقادیر غلظت آلاینده های PFOA و PFOS محاسبه گردید. نتایج نشان داد که مقادیر حداقل و حداکثر غلظت PFOA از ۰/۳۸ تا ۳/۰۱ و PFOS از ۰/۳۳ تا ۲/۶۳ میکروگرم بر لیتر متغیر است. مقایسه غلظت این آلاینده ها در آبخوان کرج با استاندارد آمریکا، با غلظت هر دو آلاینده با ۰/۰۰۴ و اروپا و سازمان بهداشت جهانی^۳ با غلظت PFOA، ۰/۵ و PFOS، ۰/۸ میکروگرم بر لیتر، وضعیت نامناسبی را نشان میدهد. کمترین مقادیر PFOA و PFOS، محل دفن زباله، کارخانه تولیدات نساجی و کارگاه آبکاری فلزات و بیشترین از شهرک صنعتی، پادگان نظامی و ایستگاه آتش نشانی است. طبق نتایج این پژوهش، ساخت شهرک های صنعتی و پادگان نظامی در کلانشهرها و انتقال مستقیم فاضلاب ایستگاه آتش نشانی به آبخوان، مطلقاً توصیه نمی شود.

کلمات کلیدی: آبخوان شهری، آلاینده، کرج

مقدمه

اخیراً وجود آلاینده جدید و نوظهور در آب های زیرزمینی کلانشهر در سراسر دنیا مطرح شده است. آلاینده ها که به طور کلی به آنها پر- پلی فلورئور آلکیل^۴ گفته می شود، ناشی از فعالیت های انسانی بوده و بسیار مضر به سلامتی انسان است. آلاینده های پر- پلی فلورئور آلکیل، با توجه به تعداد اتم های کربن و فلورئور، نحوه قرارگیری آنها و همچنین وجود گروه های عاملی مختلف، متفاوت هستند، به طوری که تاکنون حدود ۴۷۰۰ مورد از آنها شناسایی شده اند، (Interstate Technology & Regulatory Council, (2021). آلاینده های PFOA و PFOS، درموردی از قبیل فوم مورد استفاده در اطفای حریق، شیرابه محل های دفن زباله شهری، پساب تصفیه خانه های فاضلاب وجود دارند. ضعف سیستم ایمنی و کاهش اثر واکسن، تاثیر سو بر تیروئید، کاهش باروری و بروز سرطان پروستات و کبد، بخشی از اثرات این آلاینده ها بر سلامتی انسان هستند. Interstate Technology & Regulatory Council, (2021). استاندارد هایی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند عبارتند از: برای هر دو آلاینده

PFOA و PFOS استاندارد سازمان بهداشت جهانی مقدار ۰/۱، کشور آمریکا مقدار ۰/۰۴ و استاندارد اروپا مقدار ۰/۵ میکروگرم بر لیتر است. مهم‌ترین کاربری‌ها از نظر شدت و میزان آلاینده‌گی، سایت آتش‌نشانی و پادگان نظامی در نظر گرفته شد که به همین علت، برای هر کدام، دو نقطه مجزا اختصاص یافت. این دو منبع آلودگی، به صورت بالقوه می‌توانند باعث انتشار مهم‌ترین ماده شیمیایی حاوی انواع آلاینده‌های PFAS، به خصوص PFOA و PFOS، یعنی فوم مورد استفاده در اطفاء حریق ناشی از مواد قابل اشتعال شوند و این ماده می‌تواند پس از ورود به پیکره‌های آب‌سطحی، از طریق نفوذ عمقی به آبخوان‌ها راه یابد. منبع آلودگی مورد بررسی دیگر، محل دفن زباله است که در صورت عدم به کارگیری تمهیدات لازم چه در زمان انتخاب مکان مناسب و چه در زمان بعد از احداث، می‌تواند از طریق نشت شیرابه زباله‌های مختلف، آلودگی‌های زیادی از جمله دو آلاینده مذکور را به آبخوان وارد نماید. دیگر منبع مورد بررسی، تصفیه‌خانه فاضلاب است. وقتی فاضلاب وارد تصفیه خانه می‌شود، حاوی موادی است که پیش‌ساز^۶ نامیده می‌شوند و این مواد طی فرایند تصفیه می‌توانند به آلاینده‌های PFOA و PFOS تبدیل شوند. منبع آلودگی بعدی، شهرک صنعتی است که به دلیل وجود صنایع مختلف و تولید انواع محصولات حاوی مواد دارای آلاینده‌های PFAS، اهمیت دارد. یکی دیگر از کاربری‌هایی که می‌تواند عامل انتشار مواد PFAS باشد، کارخانه تولید محصولات نساجی است. موادی که در تهیه محصولات نساجی استفاده می‌شود، دارای آلاینده‌های PFAS و خصوصاً آلاینده PFOA به میزان بیشتر هستند. آخرین مورد، کارگاه آبکاری فلزات است که در ماده‌ای که برای آبکاری مورد استفاده قرار می‌گیرد، آلاینده PFOS وجود دارد^۷ (Interstate Technology & Regulatory Council, (2021)).

با توجه به مروری بر تحقیقات گذشته، در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی در زمینه آلودگی آب‌های زیرزمینی در مناطق شهری در موضوع پر-پلی‌فلوئوروآلکیل، درباره دو آلاینده پرفلوئورو اوکتانویک‌اسید و پرفلوئورو اوکتان سولفونیک‌اسید انجام شده است.

(Mohammadi Basir, 2024)، به بررسی کیفیت آب زیرزمینی در مورد وجود آلاینده‌های نوظهور PFOA و PFOS در آبخوان شهری کرج پرداخت. نتایج نشان داد میزان غلظت در شهرک صنعتی، پایگاه نظامی و ایستگاه آتش‌نشانی در مقایسه با استاندارد های جهانی به مرحله بحرانی رسیده است. همچنین، نتایج بیانگر آن است که وجود کاربری‌های بالقوه آلودگی در داخل بافت شهری نسبت به مناطقی که فعالیت‌های صنعتی کمتری دارند، میزان آلودگی بیشتری دارند.

(Propp et al. (2021)، به ارزیابی میزان تاثیر شیرابه ناشی از محل‌های دفن زباله قدیمی و سایت‌های تحت تاثیر عامل فوم آتش‌نشانی^۵ بر آب‌های زیرزمینی در استان انتاریو، کانادا پرداختند. نتایج نشان داد سایت‌های تحت تاثیر عامل فوم آتش‌نشانی نسبت به شیرابه محل دفن زباله شهری، خطر شدیدتری را ایجاد می‌کنند. (Mitchel. (2020)، درباره انتشار این آلاینده‌ها ناشی از وجود پایگاه نظامی ایالات متحده در اوکیناوا^۸ ژاپن نوشته است. مقادیر ۳/۳ و ۱۳/۹ میکروگرم بر لیتر به ترتیب برای PFOA و PFOS به دست آمده‌است. همچنین در مقاله، به بیش از دو برابر بودن غلظت PFOA از میانگین ملی و چهار برابر بودن غلظت PFOS از این میانگین اشاره شده‌است.

(Qiao et al. (2020)، تعداد ۱۶۹ نمونه آب زیرزمینی از مناطق مختلف صنعتی و کشاورزی چین را بررسی کردند. نتایج نشان داد که مناطق صنعتی و بخصوص شهرها بیشترین میزان غلظت آلاینده را نسبت به مناطق کشاورزی دارند. (Szabo et al. (2018)، به بررسی پساب حاصل از یک تصفیه‌خانه فاضلاب در ملبورن، استرالیا، به عنوان یک منبع مواد پر-پلی‌فلوئوروآلکیل در آب‌های زیرزمینی منطقه پرداختند. تجزیه و تحلیل داده‌ها

نشان داد غلظت آلاینده‌ها، کمتر از مکان‌هایی بود که تحت تأثیر تولید فوم آتش‌نشانی قرار گرفته‌اند. (Bräunig et al. (2017، تعداد ۱۰ نمونه آب‌زیرزمینی از منطقه‌ای نزدیک به محل تمرین آتش‌نشانی، نمونه‌برداری شد. تجزیه و تحلیل نمونه‌ها بیانگر گسترش قابل توجه آلودگی در منطقه بود به نحوی که به استثنای یک چاه، همه چاه‌های آب‌زیرزمینی آزمایش‌شده به طور قابل توجهی از مقدار دستورالعمل مقدار مجاز آلودگی، فراتر رفته‌بودند. (Xiao et al. (2015، به بررسی پیامدهای وجود آلاینده‌های PFOA و PFOS در خاک و آب‌زیرزمینی در اطراف تأسیسات سابق تولید محصولات فلئوروپلیمری و یک محل دفن زباله در مینیاپولیس در ایالت مینه‌سوتا، ایالات متحده پرداختند. نتایج نشان داد که منابع اصلی آلودگی آب‌های زیرزمینی به طور مستقیم با کاربری اراضی در بالادست مرتبط است.

در این پژوهش به بررسی غلظت آلاینده‌های PFOA و PFOS در آبخوان کرج در استان البرز پرداخته شده و عوامل آلودگی و مناطق بحرانی ناشی از آنها شناسایی گردید. در این مطالعات هفت منبع مختلف در محدوده مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفت که نسبت به تحقیقات مشابه که معمولاً دو منبع است، متفاوت می‌باشد. ضمن اینکه، طبق شناخت ما، پژوهشی در زمینه بررسی غلظت آلاینده‌های PFOA و PFOS در آب زیرزمینی در محدوده‌های شهری کشور مشاهده نشده است.

۳- روش تحقیق

۳-۱- محدوده مورد مطالعه

مطالعه موردی در این پژوهش آبخوان کلانشهر کرج انتخاب گردید که تاکنون آب شرب آن به شدت به آب‌های زیرزمینی وابسته است. از طرف دیگر فعالیت‌های مختلف که پتانسیل آلودگی آبخوان به آلاینده‌های PFOA و PFOS را دارند، در مناطق مختلف کرج وجود دارد. مساحت این منطقه، حدود ۳۲۴ کیلومترمربع و مختصات طول جغرافیایی از $50^{\circ} 27' 44''$ تا $51^{\circ} 41' 51''$ و عرض جغرافیایی از $35^{\circ} 41' 29''$ تا $35^{\circ} 53' 42''$ که در شکل شماره ۱ مشخص شده است.

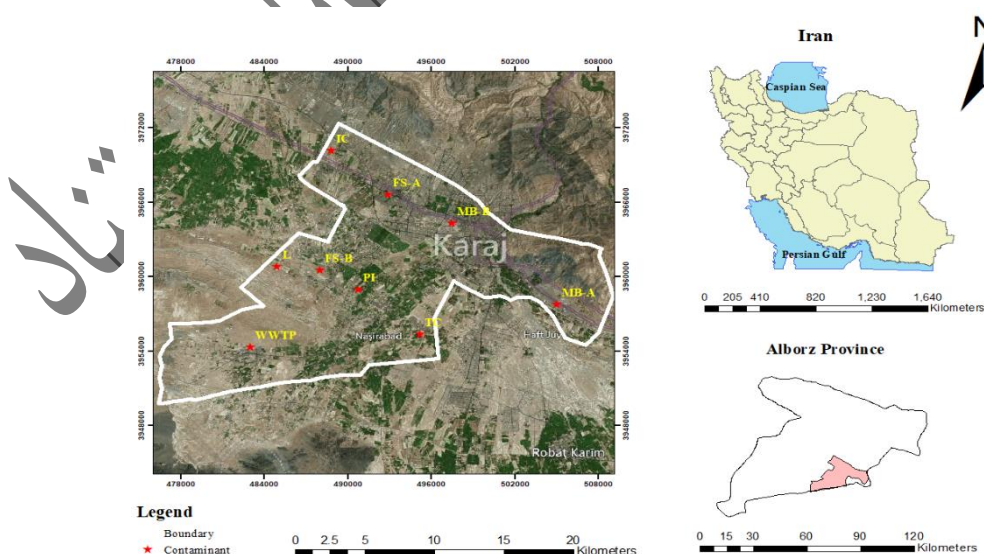


Fig. 1- Geographical location of the study area

شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی

همچنان که در بخش مقدمه ذکر گردید، هفت فعالیتی که پتانسیل آلاینده‌گی آبخوان کرج را دارند مانند ایستگاه آتش‌نشانی، پادگان نظامی، محل دفن زباله، تصفیه‌خانه فاضلاب، کارخانه تولید محصولات نساجی، کارگاه آبکاری فلزات و شهرک صنعتی در مناطق مختلف شهر کرج انتخاب شدند. به علت پتانسیل بیشتر ایستگاه‌های آتش‌نشانی و پادگان‌های نظامی در ایجاد آلاینده‌های PFOA و PFOS، برای هر یک از این فعالیت‌ها، دو محل انتخاب شد. سپس برای اینکه این تحقیق، دستاوردهای کاربردی و قابل استناد بهتری داشته باشد، در مجاورت ۹ مکان انتخابی، سه نقطه تعیین و در مجموع از ۲۷ نقطه نمونه برداری انجام گرفته شد که در جدول ۱ و نقشه ۱ ارائه شده است.

Table 1 - Sampling points

جدول ۱- نقاط نمونه برداری

Point	Sampling Site	Abbreviation	Point	Sampling Site	Abbreviation
1	Landfill-1	L1	15	Military Base-A3	MB-A3
2	Landfill-2	L2	16	Fire Station-A1	FS-A1
3	Landfill-3	L3	17	Fire Station-A2	FS-A2
4	Wastewater Treatment Plant-1	WWTP-1	18	Fire Station-A3	FS-A3
5	Wastewater Treatment Plant-2	WWTP-2	19	Industrial Campus-1	IC-1
6	Wastewater Treatment Plant-3	WWTP-3	20	Industrial Campus-2	IC-2
7	Textile Company-1	TC-1	21	Industrial Campus-3	IC-3
8	Textile Company-2	TC-2	22	Military Base-B1	MB-B1
9	Textile Company-3	TC-3	23	Military Base-B2	MB-B2
10	Plating Industry-1	PI-1	24	Military Base-B3	MB-B3
11	Plating Industry-2	PI-2	25	Fire Station-B1	FS-B1
12	Plating Industry-3	PI-3	26	Fire Station-B2	FS-B2
13	Military Base-A1	MB-A1	27	Fire Station-B3	FS-B3
14	Military Base-A2	MB-A2			

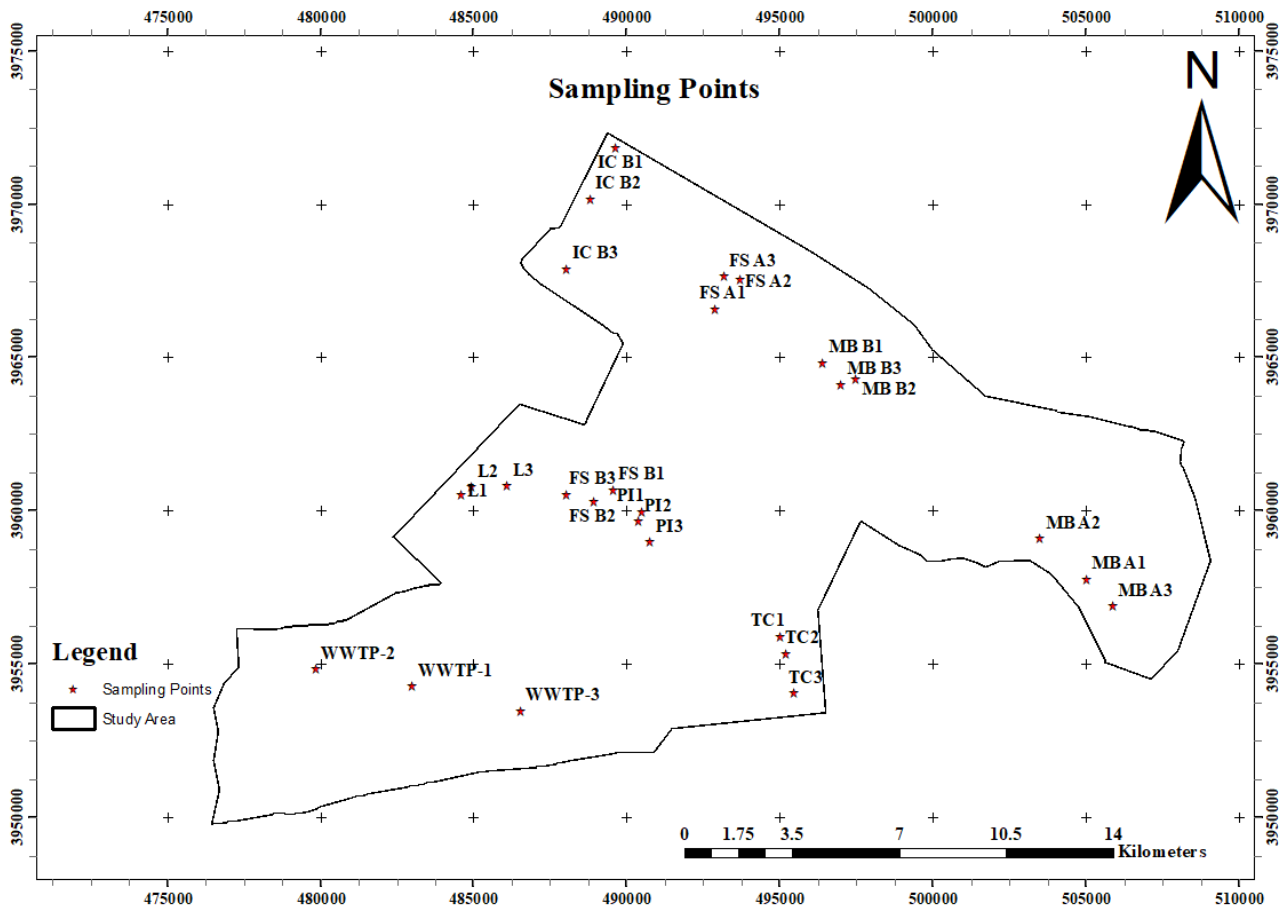


Fig. 1- Sampling Points map

نقشه ۱. نقاط نمونه برداری

۳-۲- روند انجام تجزیه و تحلیل شیمیایی

برای محاسبه غلظت آلاینده‌های PFOA و PFOS دو روش وجود دارد. اول، روش مستقیم که با استفاده از دستگاه LC-MS/MS، غلظت آلاینده‌ها اندازه گیری می‌شود. دوم، به صورت غیر مستقیم که می‌توان از درصد فلوئورزدایی و با استفاده از داده‌های تکمیلی که در ادامه به آنها اشاره می‌شود، غلظت آلاینده‌های PFOA و PFOS را تخمین زد. بدون در نظر گرفتن این داده‌ها، نمی‌توان غلظت PFAS را فقط از فرمول فلوئورزدایی (Defluorination) محاسبه کرد. علت این است که هر مولکول PFAS تعداد متفاوتی اتم فلوئور دارد. برای اینکه غلظت PFAS به طور دقیق از درصد فلوئورزدایی محاسبه شود، وجود حداقل یکی از موارد زیر لازم است:

(۱) نوع دقیق PFAS مثلاً PFOA, PFOS یا سایر ترکیبات

(۲) تعداد اتم‌های فلوئور در مولکول

(۳) جرم مولی ترکیب

(۴) مقدار یون فلوئور آزادشده (مول)

از آنجایی که موارد دو تا چهار در دسترس است، بنابراین در این پژوهش، از روش غیر مستقیم برای محاسبه غلظت استفاده شد. درصد فلوئورزدایی، از طریق الکترون‌های هیدراته تولید شده توسط UV بدست می‌آید. همان طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، محور افقی این نمودار، مدت زمان لازم برای حذف اتم فلوئور و محور عمودی، درصد فلوئورزدایی است. مدت زمان لازم برای حذف فلوئور برای هر دو آلاینده، بین ۲۴ تا ۴۸ ساعت متغیر است. در این بازه زمانی، منحنی تقریباً به صورت افقی می‌شود که نشان می‌دهد دیگر با گذشت زمان، حذف فلوئور بیشتری صورت نمی‌گیرد. بر این اساس، درصد فلوئورزدایی برای آلاینده‌های PFOA و PFOS، که در جدول ۱ نمایش داده شده به ترتیب $2/4 \pm 56/5$ و $1/2 \pm 57$ درصد تخمین زده شده است که در محاسبات برای هر دو آلاینده حدود ۵۷ درصد در نظر گرفته شد.

فرمول اصلی فلوئورزدایی به این صورت است:

$$\text{Defluorination (\%)} = \frac{F_{\text{released}}}{F_{\text{total in PFAS}}} \times 100 \quad (\text{رابطه ۱})$$

F_{released} : مقدار یون فلوئور آزاد شده (مول)

$F_{\text{total in PFAS}}$: کل فلوئور موجود در PFAS اولیه

Defluorination: درصد فلوئورزدایی

از طرفی، برای یک ترکیب مشخص:

$$C_{\text{PFAS}} = \frac{F_{\text{total}}}{n_F} \quad (\text{رابطه ۲})$$

C_{PFAS} : غلظت مولی PFAS

n_F : تعداد اتم‌های فلوئور در ملکول

در اغلب PFAS های رایج مانند PFOA و PFOS، هر اتم فلوئور فقط به یک اتم کربن متصل است؛ بنابراین:

تعداد اتم‌های فلوئور در ملکول PFAS = تعداد ساختار کربن - فلوئور C—F در ملکول PFAS

بنابراین:

$$n_F = n_{C-F}$$

با توجه به رابطه ۲، $F_{\text{total in PFAS}}$ برابر با حاصل ضرب C_{PFAS} و nf است. از طرف دیگر، C_{PFAS} همان غلظت مولی PFAS و برابر با $[PFAS]_0$ است. با جایگذاری $F_{\text{total in PFAS}} = [PFAS]_0 \times NC-F$ در رابطه ۱، رابطه ۳ به دست می آید و برابر است با:

$$\text{Defluorination (\%)} = \frac{[F]_{\text{released}}}{[PFAS]_0 \times NC-F} \times 100 \quad (\text{رابطه ۳})$$

در این معادله، متغیرها به صورت زیر می باشند:

$\% \text{ Defluorination}$ درصد فلوئورزدایی

$[F]_{\text{released}}$ غلظت یون فلوراید بر حسب مولار (M)

$[PFAS]_0$ غلظت آلاینده بر حسب مولار (M)

$NC-F$ تعداد ساختار کربن - فلوئور

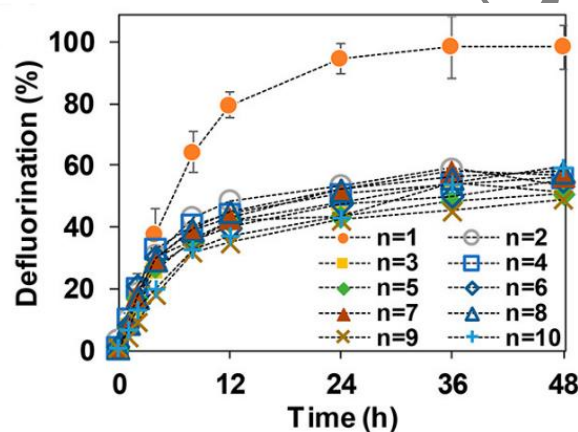


Fig. 2- Defluorination percentage curve

شکل ۲. منحنی درصد فلوئورزدایی

Table 1- Defluorination Ratio of PFCA and PFSA in Variable Fluoroalkyl Chain Lengths

جدول ۲- نسبت فلئورزدایی از PFCA و PFSA در زنجیره های مختلف فلئورواکلیل

Chain Length (n)	Perfluorocarboxylic Acids (PFCA)	Perfluoroalkanesulfonic Acids (PFSA)
1	98.2 ± 5	0.94 ± 0.18
2	53.3 ± 4.9	-
3	51.1 ± 8	-
4	56.1 ± 4.7	4.6 ± 0.8
5	51 ± 4.4	-
6	55.1 ± 1.6	31.8 ± 0.8
7	56.5 ± 2.4	-
8	58.2 ± 1.2	57 ± 1.2
9	49.1 ± 6.4	-
10	59.5 ± 0.6	-

برای تبدیل غلظت ها به mg/L از رابطه زیر استفاده می شود:

$$C \text{ (mg/L)} = C \text{ (mol/L)} \times MW \times 1000$$

رابطه ۴)

MW: جرم مولی ترکیب

Bentel et al. (2019)، ابتدا از طریق تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی توسط دستگاه کروماتوگرافی مایع/طیف سنجی جرمی پشت سر هم^۸، مقادیر غلظت آلاینده های مختلف خانواده PFAS از جمله PFOA و PFOS را تعیین کرده اند و سپس اقدام به تهیه نمودارها و فرمول های مربوطه نموده اند. با توجه به اینکه کلیه ابزار و امکانات لازم جهت طی مراحل مختلف از قبیل نمونه برداری، تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی با استفاده از دستگاه LC/MS/MS و سپس تجزیه و تحلیل های آماری و سایر موارد مورد نیاز در کشور فراهم است، بنابراین می توان نمودار پایه را که حاصل آن فرمول فوق است، به دست آورد.

در مطالعات کمی محیط زیستی، حد کمی سازی (LOQ) از اهمیت ویژه ای برخوردار است، زیرا بیانگر کمترین غلظتی است که با دقت و صحت قابل قبول قابل اندازه گیری است. در مقابل، حد تشخیص (LOD) صرفاً نشان می دهد که حضور آنالیت از نویز زمینه قابل تفکیک است و لزوماً امکان گزارش کمی قابل اعتماد را فراهم نمی کند. از این رو، در بسیاری از مطالعات محیط زیستی، LOQ به عنوان شاخص اصلی قابلیت اندازه گیری روش گزارش می شود. در مطالعه Bentel و همکاران (۲۰۱۹)، غلظت PFAS با روش LC-MS/MS اندازه گیری شد و حد کمی سازی (LOQ) برای PFOA و PFOS به ترتیب ۰/۴۱۴ و یک میکروگرم بر لیتر گزارش گردید.

۳-۳- روش ترسیم نقشه ها

نقشه های هم تراز آب زیرزمینی و هم غلظت در محیط نرم افزار ArcGIS ترسیم گردید. برای ترسیم خطوط منحنی میزان آب زیرزمینی، از ابزار Spatial Analyst و از گزینه Contour استفاده شد. همچنین از ابزار درون یابی Interpolation و از روش Topo to raster برای تهیه نقشه هم تراز آب زیرزمینی استفاده شد. برای تهیه نقشه خطوط جهت جریان از ابزار Hydrology و گزینه Flow Direction استفاده گردید. به همین ترتیب برای تهیه نقشه های هم غلظت PFOA و PFOS از ابزار درون یابی Interpolation و از روش Topo to raster استفاده شد.

۴- نتایج و تحلیل

با آنالیز نمونه در آزمایشگاه، میزان غلظت یون فلوئورید بر حسب میلی گرم بر لیتر تعیین شد که در جدول ۲ ارائه شده است. پس از انجام محاسبات لازم با استفاده از فرمول ذکر شده، مقادیر غلظت آلاینده ها بر حسب میکروگرم بر لیتر تعیین که در جدول ۳ نشان داده شده است.

Table 2 - Fluoride ion concentration
جدول ۳- میزان غلظت یون فلوئورید

Number	Sampling Site	Fluoride (mg/l)	Number	Sampling Site	Fluoride (mg/l)
1	L1	0.25	15	MB-A3	0.2
2	L2	0.2	16	FS-A1	0.89
3	L3	0.15	17	FS-A2	0.4
4	WWTP-1	0.4	18	FS-A3	0.6
5	WWTP-2	0.7	19	IC-1	1.2
6	WWTP-3	0.5	20	IC-2	0.9
7	TC-1	0.4	21	IC-3	0.6
8	TC-2	0.15	22	MB-B1	1
9	TC-3	0.15	23	MB-B2	0.4
10	PI-1	0.2	24	MB-B3	0.7
11	PI-2	0.3	25	FS-B1	0.5
12	PI-3	0.3	26	FS-B2	0.35
13	MB-A1	0.3	27	FS-B3	0.79
14	MB-A2	0.2			

Table 3 - Concentration of PFOA and PFOS contaminants

جدول ۴- میزان غلظت آلاینده‌های PFOA و PFOS

Number	Sampling Site	PFOA (µg/l)	PFOS (µg/l)	Number	Sampling Site	PFOA (µg/l)	PFOS (µg/l)
1	L1	0.627	0.548	15	MB-A3	0.501	0.439
2	L2	0.501	0.439	16	FS-A1	2.231	1.952
3	L3	0.376	0.329	17	FS-A2	1.003	0.877
4	WWTP-1	1.003	0.877	18	FS-A3	1.504	1.316
5	WWTP-2	1.754	1.535	19	IC-1	3.008	2.632
6	WWTP-3	1.253	1.096	20	IC-2	2.256	1.974
7	TC-1	1.003	0.877	21	IC-3	1.504	1.316
8	TC-2	0.376	0.329	22	MB-B1	2.506	2.193
9	TC-3	0.376	0.329	23	MB-B2	1.003	0.877
10	PI-1	0.501	0.439	24	MB-B3	1.754	1.535
11	PI-2	0.752	0.658	25	FS-B1	1.253	1.096
12	PI-3	0.752	0.658	26	FS-B2	0.877	0.768
13	MB-A1	0.752	0.658	27	FS-B3	1.980	1.732
14	MB-A2	0.501	0.439				

۴-۲- مقایسه مقادیر استانداردهای جهانی

در این بند، اعداد بدست آمده با استانداردهای کشورهای مختلف، مقایسه شده که در شکل ۳ ارائه می‌شود. استاندارد کشور آمریکا با مقدار غلظت ۰/۰۰۴ میکروگرم بر لیتر برای هر دو آلاینده در نظر گرفته شده است (U.S. Environmental Protection Agency (2023). بعد از کشور آمریکا، استاندارد کشور استرالیا برای آلاینده PFOS ۰/۰۷ میکروگرم بر لیتر است (Natural Resource Management Ministerial Council (2022). سپس استاندارد سازمان بهداشت جهانی با مقدار ۰/۱ میکروگرم بر لیتر برای هر دو آلاینده در رتبه بعدی قرار می‌گیرد (Association of State Drinking Water Administrators (2022) بعد از آن استاندارد کشور کانادا برای PFOA به میزان ۰/۲ میکروگرم بر لیتر قرار دارد (Health Canada (2019). استاندارد کشورهای اروپایی به میزان ۰/۵ میکروگرم بر لیتر برای هر دو آلاینده در جایگاه بعدی قرار داشته (Official Journal of the European Union (2020) و در نهایت بیش‌ترین میزان غلظت برای PFOA مربوط به استاندارد کشور استرالیا با مقدار ۰/۵۶ میکروگرم بر لیتر و بیش‌ترین غلظت برای PFOS هم که برای کشور کانادا با ۰/۶ میکروگرم بر لیتر می‌باشد.

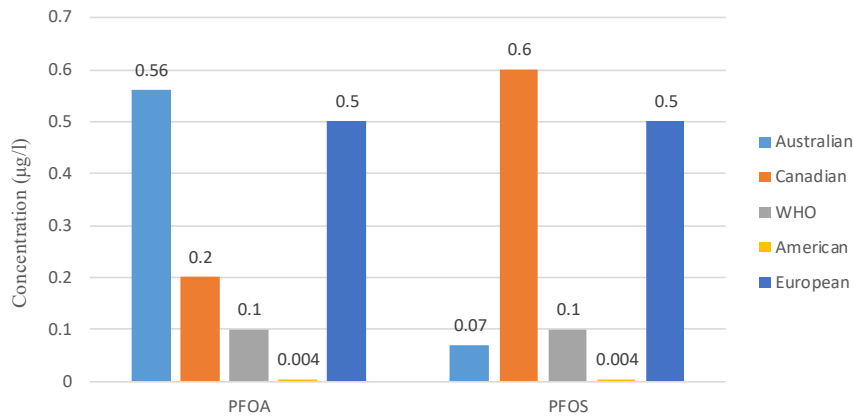


Fig. 3- Comparison between global standards

شکل ۳- مقایسه مقادیر استانداردهای جهانی

۳-۴- مقایسه داده‌های غلظت به دست آمده نسبت به استانداردهای جهانی

شکل ۴ و ۵، نشان می‌دهد که در تمام نقاط مقادیر غلظت PFOA و PFOS آب زیرزمینی محدوده شهری کرج، در مقایسه با استاندارد WHO و استاندارد آمریکا، بطور معنی داری، فراتر هستند در صورتی که در مقایسه با استاندارد کشورهای اروپایی تعداد اندکی کمتر هستند.

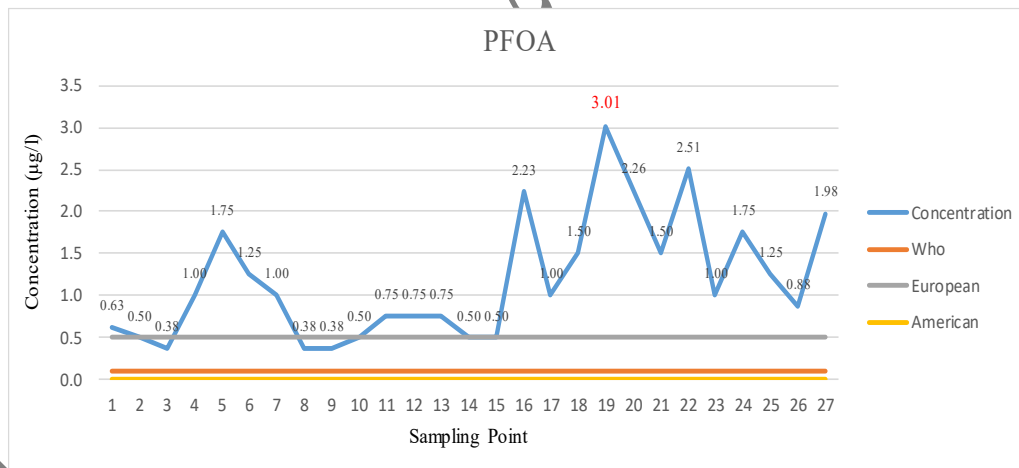


Fig. 4- Comparison of PFOA concentration data with global standards

شکل ۴- مقایسه داده‌های غلظت PFOA با استانداردهای جهانی

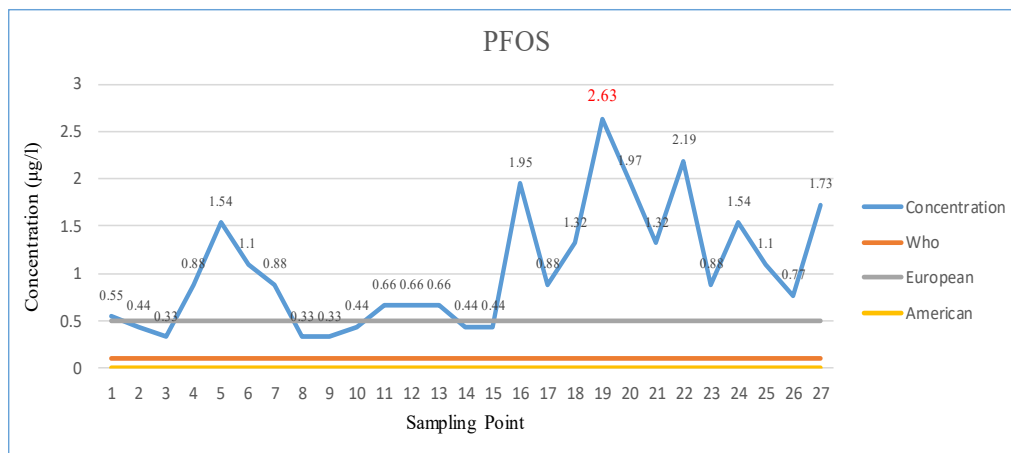


Fig. 5- Comparison of PFOS concentration data with global standards

شکل ۵- مقایسه داده‌های غلظت PFOS با استانداردهای جهانی

مقایسه مقدار بدست آمده از غلظت PFOA و PFOS برای هر یک از منابع آلاینده‌ی نه گانه در مقایسه با استانداردهای جهانی در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده است. میزان غلظت آلاینده‌ها در بعضی منابع آلاینده، حتی با وجود نزدیک بودن موقعیت مکانی و یا یکسان بودن منبع آلودگی به صورت ناگهانی تغییر کرده‌است. علت بیشتر بودن میزان غلظت هر دو آلاینده در رابطه با منبع تصفیه‌خانه فاضلاب، نسبت به سایر منابع آلاینده‌ای که تقریباً در همان منطقه هستند، این است که یک کارخانه تولید رنگ و رزین صنعتی و همچنین یک بیمارستان در فاصله کمی از این منبع واقع شده‌اند و آلودگی ناشی از این دو مورد، باعث افزایش غیر قابل انتظار غلظت در رابطه با تصفیه‌خانه فاضلاب شده‌است. تفاوت در میزان غلظت آلاینده‌ها در رابطه با منبع آلودگی پادگان نظامی A و B، می‌تواند به دلیل تفاوت در فاصله نقاط نمونه‌برداری نسبت به منبع آلودگی باشد، به طوری که فاصله نقاط نمونه‌برداری از مرکز نظامی B در مقایسه با فاصله نقاط نمونه‌برداری مربوط به مرکز A، تقریباً نصف است و این موضوع باعث افزایش بیش از دو برابری غلظت آلاینده‌ها در مرکز نظامی B شده‌است. علت دیگری که می‌توان برای این موضوع در نظر گرفت این است که مرکز نظامی B در درون بافت شهری و در مجاورت منابع آلودگی مختلف قرار دارد و نسبت به مرکز نظامی A که تقریباً در حومه شهر قرار گرفته، بیشتر تحت تاثیر آلودگی‌های شهری قرار دارد. همچنین، بر این اساس، می‌توان در نظر گرفت که منابع آلودگی محل دفن زباله و شرکت تولیدات ساجی به دلیل دور بودن نسبی از مرکز شهر نسبت به سایر منابع، کمترین میزان غلظت PFOA یعنی ۰/۳۷۶ و کمترین میزان غلظت PFOS یعنی ۰/۳۲۹ را به خود اختصاص داده‌اند.

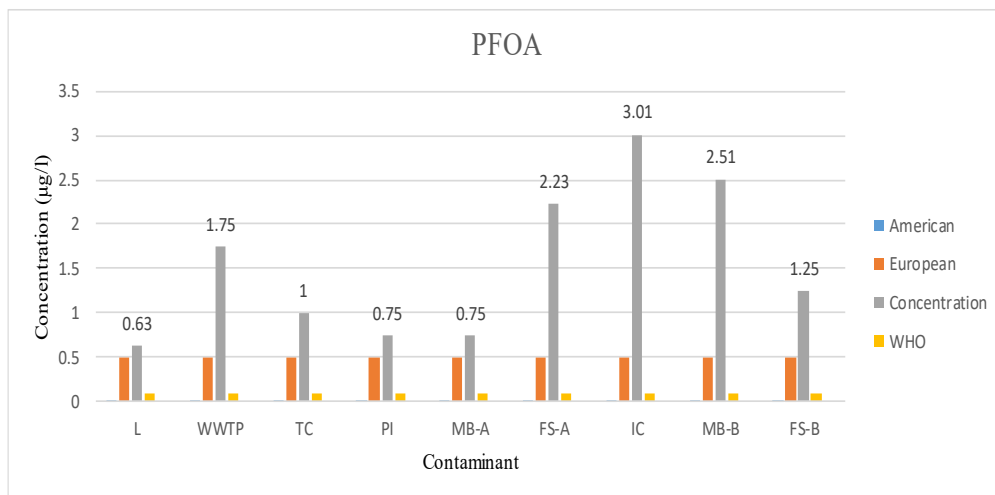


Fig. 6- Comparison of PFOA concentration data by source of contamination and type of standard

شکل ۶- مقایسه داده‌های غلظت PFOA به تفکیک منشأ آلودگی و نوع استاندارد

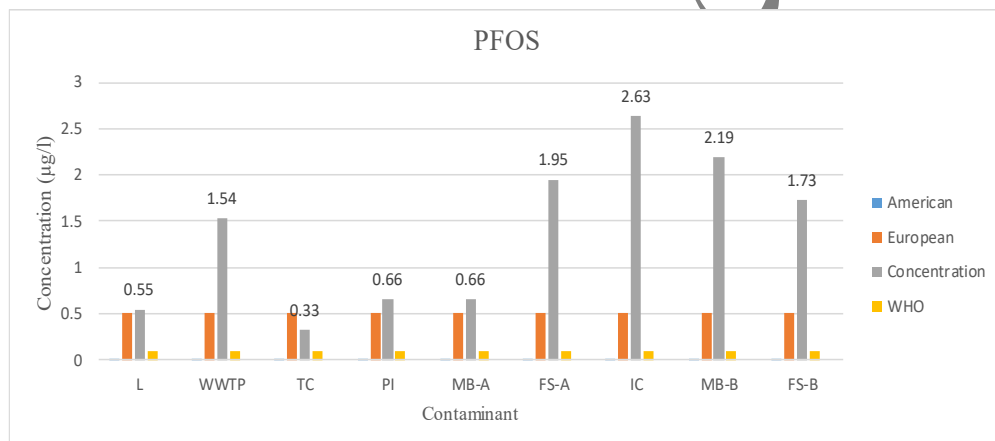


Fig. 7- Comparison of PFOS concentration data by source of contamination and type of standard

شکل ۷- مقایسه داده‌های غلظت PFOS به تفکیک منشأ آلودگی و نوع استاندارد

۴-۴- بررسی ارتباط بین آلاینده‌ها و جهت جریان آبریززمینی

همان‌طور که در نقشه شماره ۱ مشاهده می‌شود، منحنی‌های هم تراز سطح آبریززمینی^۹ در محدوده شهر کرج از ارتفاع ۱۳۴۰ متر بالاتر از سطح دریا در شمال‌شرق (منطقه گرمدره) آغاز و به سمت جنوب‌غربی آن (منطقه ماهدشت) ادامه می‌یابد و به ارتفاع ۱۱۴۰ متر ختم می‌شود. بطور کلی می‌توان ذکر کرد که گرادیان آبریززمینی در محدوده شهری کرج، شمال‌شرقی به جنوب‌غربی است.

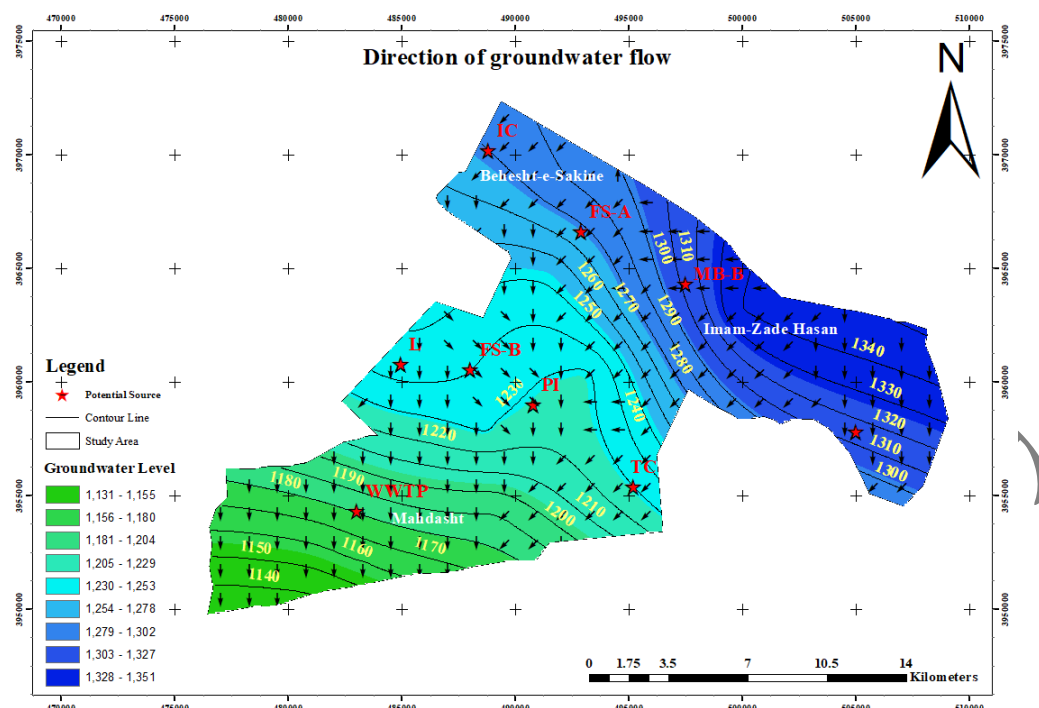


Fig. 8- Direction of groundwater flow

نقشه ۲ - جهت خطوط هم تراز آب زیرزمینی

از طرف دیگر، همان گونه که در نقشه های ۲ و ۳ مشاهده می شود، خطوط هم غلظت^{۱۰} دو آلاینده نشان می دهد که میزان غلظت با جهت جریان آب زیرزمینی مطابقت دارد. در بخش شمال غربی محدوده مورد مطالعه، بیش ترین میزان غلظت PFOA به میزان ۳/۰۱ میکروگرم بر لیتر وجود دارد که مربوط به شهرک صنعتی است. این میزان غلظت، با حرکت به سمت پایین محدوده، کاهش می یابد. این کاهش غلظت تا بخش جنوبی نقشه یعنی منطقه استقرار شرکت تولیدات نساجی ادامه می یابد و به کم ترین میزان خود یعنی ۰/۳۸ میکروگرم بر لیتر می رسد. اما در قسمت جنوب غربی محدوده، بر خلاف روند حاکم که بر کاهش غلظت دلالت داشت، افزایش میزان غلظت دیده می شود. این افزایش غلظت، در نقاط نمونه برداری مربوط به تصفیه خانه فاضلاب رخ داده است که میزان غلظت تا حداکثر ۱/۷۵ میکروگرم بر لیتر هم می رسد که همان گونه که پیشتر ذکر شد، وجود منابع آلاینده دیگر، عامل این افزایش غلظت است. لازم به ذکر است تمام روندهای ذکر شده در بالا هم برای PFOA و هم برای PFOS صدق می کند و تفاوت معناداری در میزان غلظت به دست آمده و نوع رفتار دو آلاینده دیده نمی شود. طبق نقشه های هم غلظت رسم شده، بیش ترین میزان غلظت آلاینده برای مراکز آلودگی به ترتیب عبارتند از: شهرک صنعتی، پادگان نظامی B، ایستگاه آتش نشانی A و سپس ایستگاه آتش نشانی B. همچنین کم ترین میزان غلظت به ترتیب عبارتند از: محل دفن زباله و کارگاه آبکاری فلزات و کارخانه تولیدات نساجی.

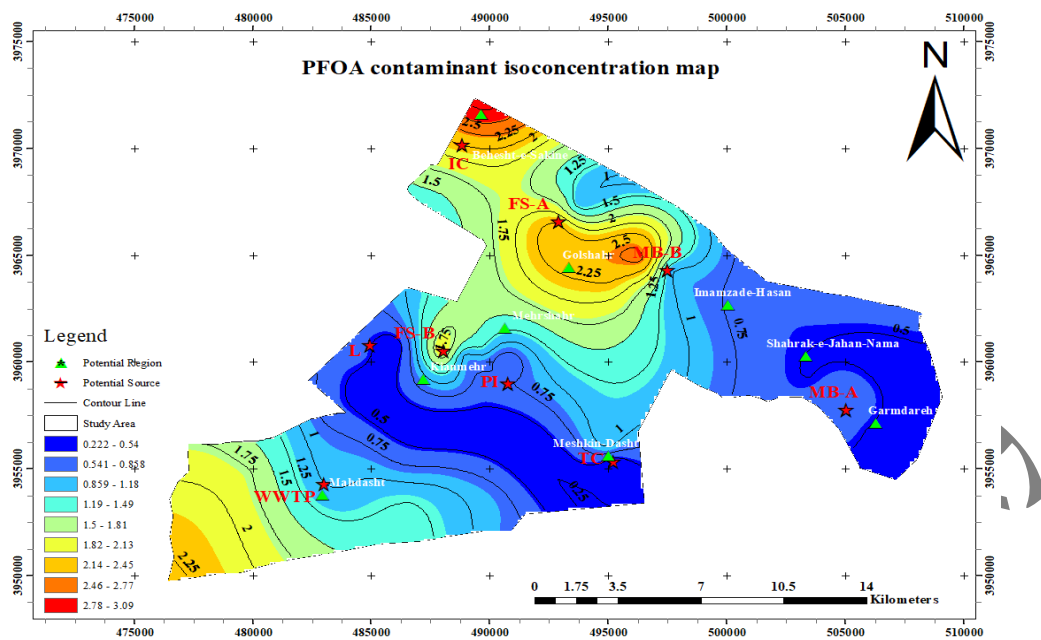


Fig. 9- PFOA Pollutant isoconcentration map

نقشه ۳- خطوط هم‌غلظت آلاینده پرفلئورو اکتانویک اسید

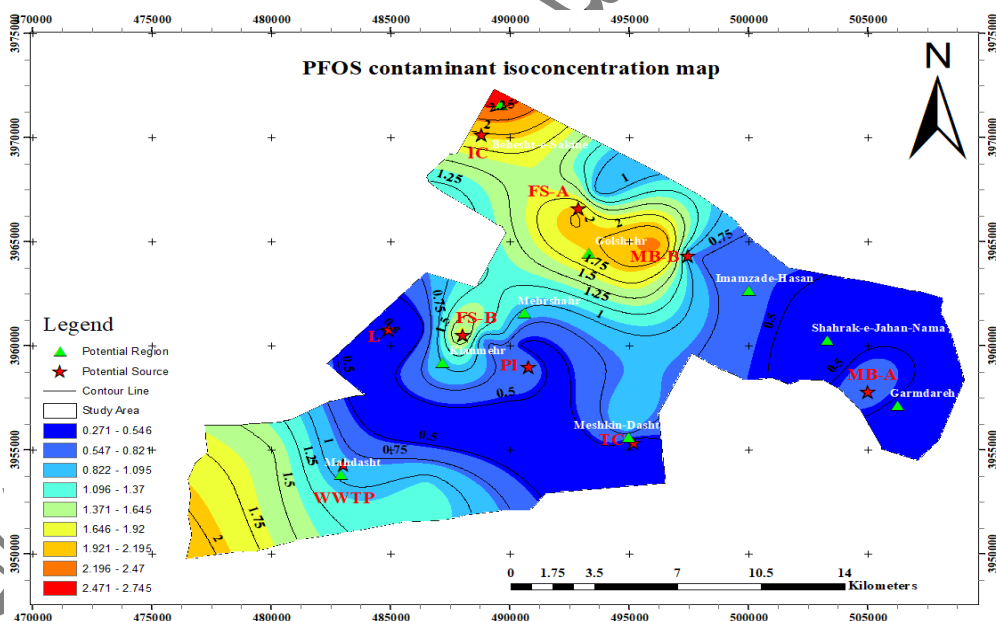


Fig. 10- PFOS Pollutant isoconcentration map

نقشه ۴- خطوط هم‌غلظت آلاینده پرفلئورو اکتان سولفونیک اسید

۵- بحث

۵-۱- مقایسه نتایج به دست آمده با پژوهش‌های پیشین

مقدار غلظت به دست آمده برای آلاینده PFOA در محل دفن زباله به صورت حداکثر مقدار غلظت در میان سه نمونه آب برداشت شده در پژوهش حاضر، عدد 0.63 میکروگرم بر لیتر است در حالی که در یک منطقه در جنوب غربی ملبورن استرالیا از نظر میزان غلظت این آلاینده برای

محل دفن زباله بررسی شده و عدد 0.03 میکروگرم بر لیتر به دست آمده است. به همین ترتیب، مقدار غلظت آلاینده PFOS در این پژوهش، عدد 0.55 میکروگرم بر لیتر به دست آمده است در حالی که در مقاله مذکور، عدد 0.03 میکروگرم بر لیتر گزارش شده است. غلظت کم آلاینده‌ها در محل دفن زباله در منطقه ملبورن استرالیا، می‌تواند به دلیل وجود اقداماتی باشد که جهت عدم نفوذ شیرابه محل دفن زباله به داخل آبخوان انجام شده است Hepburn et al. (2019). این اقدامات شامل یک سری الزامات اجرایی است که در مورد هر محل دفن زباله باید در نظر گرفته شود. این الزامات، به طور خلاصه، شامل: یافتن بهترین مکان برای احداث، طراحی سیستم‌هایی که نفوذ از محل دفن زباله را به حداقل برساند، انجام برنامه‌های نظارت به صورت سالیانه و در نهایت، انجام مواردی که برای رفع ایرادات به وجود آمده در محل دفن زباله نیاز است Victoria Environment Protection Authority (2001).

مقدار غلظت حداکثر به دست آمده برای آلاینده PFOA در تصفیه‌خانه فاضلاب در پژوهش حاضر، عدد $1/754$ میکروگرم بر لیتر به دست آمده است. در حالی که در یک منطقه در غرب ملبورن استرالیا از نظر میزان غلظت این آلاینده، عدد 0.002 میکروگرم بر لیتر به دست آمده است. همچنین غلظت آلاینده PFOS در پژوهش حاضر، عدد $1/54$ میکروگرم بر لیتر به دست آمده است در حالی که در مقاله مذکور، عدد 0.02 میکروگرم بر لیتر گزارش شده است. این آلودگی کم به دلیل نظارت بر وجود پیش‌سازهایی است که در فرایند تصفیه فاضلاب به مواد آلاینده نهایی یعنی PFOA و PFOS تبدیل می‌شوند (Szabo et al. 2018).

غلظت آلاینده PFOA در مراکز استفاده‌کننده از فوم آتش‌نشانی مثل ایستگاه آتش‌نشانی که در دو منطقه A و B بررسی شده است، در پژوهش حاضر به صورت حداکثر مقدار بین سه نمونه آب برداشت شده، به ترتیب، عدد $2/23$ و $1/98$ میکروگرم بر لیتر به دست آمده است. این در حالی است که در یک فرودگاه نظامی قدیمی در حومه استکهلم سوئد، مقدار این آلاینده، 0.5 میکروگرم بر لیتر گزارش شده است. همچنین مقدار غلظت آلاینده PFOS نیز در پژوهش حاضر، برای مراکز A و B به صورت میانگین به ترتیب، عدد $1/95$ و $1/73$ میکروگرم بر لیتر به دست آمده است در حالی که در مقاله مذکور، عدد $4/04$ میکروگرم بر لیتر به ثبت رسیده است. این بالاتر بودن میزان غلظت PFOS در فرودگاه استکهلم، احتمالاً به دلیل استفاده بیشتر و مکرر از فوم آتش‌نشانی در آن منطقه است که باعث نفوذ بیشتر به آبخوان شده است (Filipovic et al. 2015).

آلاینده PFOA ناشی از عامل شهرک صنعتی در این مطالعه، دارای بیش‌ترین میزان غلظت در میان سایر عوامل آلودگی مورد مطالعه، یعنی $3/01$ میکروگرم بر لیتر است که به نحو قابل ملاحظه‌ای از استانداردهای جهانی فراتر رفته است. در مقاله‌ای وجود آلاینده‌های پرفلئوروآلکیل اسید در اطراف یک شهرک صنعتی در کشور چین مورد بررسی قرار گرفت. در مورد آلاینده PFOA نتایج مشابهی با پژوهش حاضر به دست آمده است. میزان غلظت این آلاینده در مقاله مذکور با مقدار 240 میکروگرم بر لیتر که بسیار از استانداردهای جهانی بیشتر است، نشان می‌دهد که در اطراف شهرک‌های صنعتی، آلاینده PFOA، گونه غالب آلاینده‌های قابل انتشار است (Liu et al. 2016).

در پژوهش حاضر در مورد عامل پایگاه نظامی، به دلیل اهمیت زیادی که در انتشار آلودگی دارد، در دو منطقه مجزای A و B مورد بررسی قرار گرفت. برای آلاینده PFOA میزان غلظت در منطقه A و B به صورت حداکثر مقدار غلظت سه نمونه آب به ترتیب مقادیر 0.75 و $2/51$ میکروگرم بر لیتر و برای PFOS در منطقه A و B به ترتیب 0.66 و $2/19$ به دست آمده است. در مقاله‌ای درباره انتشار این آلاینده‌ها ناشی از وجود پایگاه نظامی

ایالات متحده در اوکیناوا ژاپن نوشته شده است، مقادیر $3/3$ و $13/9$ میکروگرم بر لیتر به ترتیب برای PFOA و PFOS به دست آمده است. همچنین در مقاله مذکور، به بیش از دو برابر بودن غلظت PFOA از میانگین ملی و چهار برابر بودن غلظت PFOS از این میانگین اشاره شده است (Mitchel, 2020).

۵-۲- بحث و نتیجه گیری

علاوه بر نیترات و فلزات سنگین که آبخوان های کلانشهرها را تهدید میکنند، تقریباً از ابتدای قرن ۲۱ میلادی، دو آلاینده PFOA و PFOS که به شدت برای سلامتی انسان مضر هستند، در اکثر سفره های آب زیرزمینی شهرهای بزرگ دنیا ظاهر شده اند. منشأ اصلی این آلاینده ها فعالیت های انسانی مانند ایستگاه فوم آتش نشانی، پادگان نظامی، محل دفن زباله، تصفیه خانه فاضلاب، کارخانه تولید محصولات نساجی، کارگاه آبکاری فلزات و شهرک صنعتی هستند.

در این پژوهش میدانی، آزمایشگاهی و دفتری، میزان دو آلاینده نوظهور PFOA و PFOS در آبخوان کرج بررسی گردید. هدف اصلی این بود که آیا در شهرهای بزرگ کشور، چنین آلاینده هایی وجود دارند؟ و اگر وجود دارند، مقدار آن نسبت به استانداردهای مهم دنیا چگونه است. برای این منظور، ابتدا ۹ منبع که بالقوه امکان انتشار این آلاینده ها در سطح کلانشهر کرج را داشتند، شناسایی شد و سپس به منظور بررسی دقیق تر میزان آلاینده ها، ۳ نقطه در مجاورت هر کدام انتخاب و در مجموع از ۲۷ محل و به فواصل مختلف، نمونه برداری آب زیرزمینی صورت گرفت. پس از انتقال به آزمایشگاه کیفیت، میزان غلظت یون فلوئورید تعیین گردید و سپس با استفاده از فرمولی، مقدار غلظت PFOA و PFOS محاسبه شد. نتایج حاصل در مرحله بعدی، با استانداردهای سازمان بهداشت جهانی، اروپا و آمریکا مقایسه شد. در این بررسی مشخص گردید که بجز اندکی از نقاط، تمامی غلظت های به دست آمده از استانداردهای جهانی فراتر رفته اند و این بیشتر بودن میزان غلظت در مناطق بحرانی یعنی شهرک صنعتی، پایگاه نظامی B و ایستگاه آتش نشانی A و ایستگاه آتش نشانی B، (جدول ۱ و نقشه ۱) در مقایسه با بعضی از استانداردها یعنی استاندارد آمریکا و استاندارد سازمان بهداشت جهانی، به میزان حدود ۱۰ برابری و حتی بیشتر می رسد. علاوه بر منابع آلاینده ای که در این پژوهش به آنها اشاره شد، منابع دیگری به طور بالقوه امکان انتشار آلودگی را دارند که می توان مواردی از قبیل بیمارستان ها و صنایع کوچک و بزرگ دیگری را نام برد که قابلیت افزایش آلاینده ها را دارند. در همین راستا، بر اساس نتایج، میتوان بیان کرد که یک کاربری بالقوه انتشار آلودگی در داخل بافت شهری و یا در حومه شهرها، که فعالیت های صنعتی کمتر هم دارند، می تواند عامل تاثیرگذاری در میزان آلودگی آبخوان در آن منطقه خاص باشد. به عنوان مثال در این مطالعه، پادگان نظامی در دو منطقه شهری و حومه بطور مجزا مورد بررسی قرار گرفت و غلظت های به دست آمده می دهد که غلظت پادگانی که در بافت شهری قرار دارد بیش از سه برابر از پادگان واقع شده در حومه، بیشتر است.

دستاوردهای مهم این پژوهش نشان میدهد که آبخوان شهری کرج با توجه به وجود عوامل موثر در انتشار مواد آلاینده ای که بسیار مضر برای سلامتی انسان می باشد، وضعیت مناسبی ندارد و مقدار غلظت آلاینده های PFOA و PFOS از استانداردهای مطرح دنیا مانند سازمان بهداشت جهانی، اروپا و آمریکا، به مراتب بیشتر هستند. با توجه با اینکه تامین آب کلانشهر کرج به شدت به آب های زیرزمینی وابسته است لذا برای

پیشگیری از انتشار بیشتر این آلاینده ها و تبعات منفی آن در سلامتی انسان، راهکارهای عملیاتی زیر میتواند گام به گام برای مدیریت آبخوان کرج و پیشگیری از افزایش غلظت این مواد آلاینده به آبهای زیرزمینی کرج پیشنهاد شود:

۱- پایش گسترده مکانی و زمانی غلظت آلاینده های PFOA و PFOS در تعداد زیادی نقطه که بتواند بطور کامل آبخوان کرج را پوشش دهد و شناخت دقیق ابعاد مسئله، ۲- بررسی سیستم فاضلاب واحدهای صنعتی، نظامی، ایستگاه های آتش نشانی، بیمارستان ها و مراکز درمانی و بهسازی آن، ۳- همزمان با موارد ۱ و ۲، امکان سنجی انتقال واحدهای صنعتی (کوچک و بزرگ) و پادگان های نظامی به خارج از شهر، ۴- عدم صدور مجوز احداث هرگونه واحد صنعتی در شهر کرج و حومه آن. ۵- تعیین محل دفن زباله ها به مکانی به مراتب دور از کلانشهر کرج و حومه آن و ایجاد تمهیداتی برای پیشگیری از ورود شیرابه زباله به آبخوان.

۶- پی نوشت ها

- 1- Perfluorooctanoic acid
- 2- Perfluorooctane sulfonic acid
- 3- World Health Organization
- 4- Per- and polyfluoroalkyl substances
- 5- Aqueous Film Forming Foam
- 6- Precursor
- 7- Defluorination ratio
- 8- Liquid chromatography with tandem mass spectrometry
- 9- Groundwater level curves
- 10- Isoconcentration curves

۷- مراجع

- Bentel, M. J., Yu, Y., Xu, L., Li, Z., Wong, B. M., Men, Y., & Liu, J. (2019). Defluorination of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) with Hydrated Electrons: Structural Dependence and Implications to PFAS Remediation and Management. *Environmental Science & Technology*, 53(7), 3718-3728. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06648>
- Bräunig, J., Baduel, C., Heffernan, A., Rotander, A., Donaldson, E., & Mueller, J. F. (2017). Fate and redistribution of perfluoroalkyl acids through AFFF-impacted groundwater. *Science of The Total Environment*, 596-597, 360-368. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.095>
- Filipovic, M., Woldegiorgis, A., Norström, K., Bibi, M., Lindberg, M., & Österås, A.-H. (2015). Historical usage of aqueous film forming foam: A case study of the widespread distribution of perfluoroalkyl acids from a military airport to groundwater, lakes, soils and fish. *Chemosphere*, 129, 39-45. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.09.005>
- Hepburn, E., Madden, C., Szabo, D., Coggan, T. L., Clarke, B., & Currell, M. (2019). Contamination of groundwater with per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) from legacy landfills in an urban re-development precinct. *Environmental Pollution*, 248, 101-113. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.02.018>

- Propp, V. R., De Silva, A. O., Spencer, C., Brown, S. J., Catingan, S. D., Smith, J. E., & Roy, J. W. (2021). Organic contaminants of emerging concern in leachate of historic municipal landfills. *Environmental Pollution*, 276, 116474. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116474>
- Qiao, X., Jiao, L., Zhang, X., Li, X., Hao, S., Kong, M., & Liu, Y. (2020). Contamination profiles and risk assessment of per- and polyfluoroalkyl substances in groundwater in China [Article]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(2), Article 76. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-8005-z>
- Szabo, D., Coggan, T. L., Robson, T. C., Currell, M., & Clarke, B. O. (2018). Investigating recycled water use as a diffuse source of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) to groundwater in Melbourne, Australia. *Science of The Total Environment*, 644, 1409-1417. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.048>
- Xiao, F., Simcik, M. F., Halbach, T. R., & Gulliver, J. S. (2015). Perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctanoate (PFOA) in soils and groundwater of a U.S. metropolitan area: Migration and implications for human exposure. *Water Research*, 72, 64-74. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.09.052>
- Brunn, H., Arnold, G., Körner, W., Rippen, G., Steinhäuser, K. G., Valentin, I. (2023). PFAS: forever chemicals—persistent, bioaccumulative and mobile. Reviewing the status and the need for their phase out and remediation of contaminated sites. *Environmental Sciences Europe*, 35, 20. <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00721-8>
- ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council). 2021. *PFAS Technical and Regulatory Guidance Document and Fact Sheets PFAS-1*. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, PFAS Team. <https://pfas-1.itrcweb.org/>
- EPA's Proposal to Limit PFAS in Drinking Water (2023). In EPA.gov. Retrieved January 2, 2024, from <https://www.epa.gov/sdwa/proposed-pfas-national-primary-drinking-water-regulation>
- Natural Resource Management Ministerial Council (2022). *Australian Drinking Water Guidelines 6 2011*. Australian Government. <https://www.nhmrc.gov.au/sites/default/files/documents/reports/aust-drinking-water-guidelines>
- Association of State Drinking Water Administrators (2022). *WHO Releases Draft Guidelines for PFOA and PFOS, Values Significantly Higher than EPA Health Advisories*. <https://www.asdwa.org/2022/10/13/who-releases-draft-guidelines-for-pfoa-and-pfos-values-significantly-higher-than-epa-health-advisories/>
- Health Canada (2019). *Water talk: Summary of drinking water values for PFOS, PFOA and other PFAS*. Government of Canada. <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/environmental-workplace-health/reports-publications/water-quality/water-talk-per-polyfluoroalkyl-substances-drinking-water.html>
- Official Journal of the European Union (2020). *Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption*. European Union. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj/eng>
- Shoemaker, J. and Dan Tettendorst. (2020) Method 537.1 Determination of Selected Per- and Polyfluorinated Alkyl Substances in Drinking Water by Solid Phase Extraction and Liquid Chromatography/Tandem Mass Spectrometry (LC/MS/MS). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC,.
- Victoria. Environment Protection Authority. (2001). Siting, design, operation and rehabilitation of landfills [electronic resource]. Southbank, Vic. : Environment Protection Authority <http://www.epa.vic.gov.au/Publications>
- Liu, Z., Lu, Y., Wang, T., Wang, P., Li, Q., Johnson, A. C., Sarvaja yakesavalu, S., Sweetman, A. J. (2016). Risk assessment and source identification of perfluoroalkyl acids in surface and ground water: Spatial distribution around a mega-fluorochemical industrial park, China. *Environment International*, 91, 69-77. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.02.020>
- Mitchell, Jon. (2020). PFAS Contamination from US Military Facilities in Mainland Japan and Okinawa. *The Asia-Pacific Journal: Japan Focus*, 18, 1-21.
- Mohammadi Basir, M.H (2024) Investigation of Perfluorooctane sulfonic acid (PFOS) and Perfluorooctanoic acid (PFOA) contamination in urban aquifers and it's Reduction Approaches (Case Study: Karaj City Aquifer). M.Sc. Dissertation. Faculty of Agricultural, University of Tehran, Iran (In Persian)

Investigation of emerging contaminants in urban aquifers

(Case study of metropolitan Karaj)

Mohammad Hosein Mohammadi Basir¹ | Majid Kholghi^{2✉}

1. Department of Irrigation & Reclamation Eng, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: :

mohammadi.basir@ut.ac.ir, mb.stu90@yahoo.com

2. Corresponding Author, Department of Irrigation & Reclamation Eng, College of Agriculture & Natural Resources, University of

Tehran, Karaj, Iran. E-mail: kholghi@ut.ac.ir, mkholghi@gmail.com

Abstract:

In the last two decades, the new pollutants such as perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctane sulfonic acid (PFOS), which are harmful to human health, is one of the major challenges in the groundwater of metropolitan cities. In this laboratory-field-office research, nine pollution sites, landfill, wastewater treatment plant, industrial park, textile manufacturing company, metal plating workshop, two military barracks, and two fire stations were selected in Karaj. Three points for each location and a total of 27 groundwater sampling points were conducted. To calculate the concentration of PFOA and PFOS, the defluorination ratio was used. For this purpose, the fluoride ion concentration was calculated in the laboratory and based on it, the percentage defluorination curve, as well as the number of carbon-fluorine structures and placement in the formula, the concentration values of PFOA and PFOS were calculated. The results showed that the PFOA minimum and maximum ranged from 0.38 to 3.01 and PFOS from 0.33 to 2.63 micrograms per liter. Comparing contaminants with the American standard, with both contaminants of 0.004, and the European and World Health Organization with PFOA of 0.5 and PFOS of 0.1 micrograms per liter, shows an inappropriate situation. The lowest of PFOA and PFOS are found in landfills, textile factories, and metal plating workshops, and the highest are found in industrial estates, military barracks, and fire stations. According to the results, the construction of industrial estates and military barracks in Karaj and the direct transfer of fire station wastewater to the aquifer are not recommended.

Keywords: Urban aquifer-pollutant-Karaj