جذب و واجذب فلورید و پسماند هم‌دما در یک خاک آهکی اصفهان

الهام چاوشی[۱*]، مجید افیونی[۲] و محمدعلی حاج عباسی[۲]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۵/۰۱ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۲۴)

چکیده

مطالعه جذب و واجذب فلورید در توصیف حرکت آن در خاک ضروری است. این پژوهش در خاک مزرعه تحقیقاتی دانشگاه صنعتی اصفهان (دو عمق صفر تا۳۰ و ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متری) انجام شد. برای تعیین میزان جذب فلوراید از غلظت‌های صفر، ۲/۵، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم فلورید بر لیتر (با استفاده از نمک فلورید سدیم) استفاده شد. برای اندازه‌گیری مقدار واجذب فلوراید نیز از محلول کلرید سدیم ۰/۰۳ مولار استفاده شد. براساس معیارهای R^2 و SEE، مدل‌های لانگمویر و فروندلیچ جذب فلورید را در خاک به‌خوبی توصیف کردند. ضریب n مدل فروندلیچ برای دو عمق به‌ترتیب ۰/۵۷ و ۰/۵۵ و ثابت K_F به‌ترتیب ($mg^{(1-n)} L^n g^{-1}$) ۰/۰۲۶و ۰/۰۲۵ به‌دست آمد. بیشینه ظرفیت جذب خاک (q_{max}) برای فلورید براساس مدل لانگمویر $mg\ g^{-1}$ ۰/۴ و ۰/۳۵ به‌ترتیب در عمق اول و دوم تعیین شد. مدل فروندلیچ، واجذب فلورید از خاک را نیز به‌خوبی توصیف نمود. مقادیر ثابت K_F و n هم‌دماهای واجذب برای هر دو عمق خاک بیشتر از مقادیر متناظر هم‌دماهای جذب بودند. همچنین K_{sorb} کوچک‌تر از K_{desorb} بود که نشانه پسماند مثبت بود. میانگین فلورید واجذب شده از خاک بعد از دو مرحله واجذب در غلظت‌های مختلف حدود ۲۸ درصد بود. با توجه به نتایج به‌دست آمده جذب فلورید توسط خاک مورد مطالعه برگشت‌پذیر بود.

واژه‌های کلیدی: فلورید، جذب، واجذب، پسماند، لانگمویر، فروندلیچ

۱. گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

۲. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

*:مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: chavoshie@yahoo.com

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.4.6]

[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.35]

مقدمه

فلوراید یک عنصر کم‌مصرف ضروری در رژیم غذایی انسان است و در مقایسه با سایر عناصر شیمیایی، دامنه باریکی بین جذب مرتبط با اثرات مفید و اثرات مضر آن وجود دارد (۲۱). اگر چه اثرات مفید فلوراید بر سلامت انسان در مجامع علمی پذیرفته شده است. اما جذب بیش از حد این عنصر باعث فلوروسیس دندان و استخوان می‌شود. اثرات مضر جذب بیش از حد فلوراید، میلیون‌ها نفر از مردم در نقاط مختلف دنیا را تحت تأثیر قرار داده است(۱۴، ۲۱). ایران نیز یکی از این کشورها است. بیماری فلوروسیس در برخی از شهرها و روستاهای ایران نظیر برازجان، خورموج، ماکو، لار و موته در استان‌های بوشهر، آذربایجان غربی، فارس و اصفهان گزارش شده است. براساس گزارش‌های منتشر شده، انتقال فلوراید به آب‌های زیرزمینی و غلظت زیاد آن در آب عامل اصلی شیوع فلوروسیس در این مناطق است(۳).

منبع مهم ورود فلوراید به خاک و انتقال آن به آب‌های زیرزمینی، هوادیدگی کانی‌های مختلف نظیر فلوریت، بیوتیت، توپاز و سنگ‌های حاوی آنها نظیر گرانیت، بازالت و شیل است (۹). فعالیت‌های انسانی نظیر کارخانه ذوب آلومینیوم، تولید فولاد، شیشه و تولید کود منابع دیگر ورود فلوراید به محیط زیست می‌باشند (۲).

عامل مهم دیگر در انتقال فلوراید به آب‌های زیرزمینی، فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی نظیر فرآیند جذب سطحی است که در خاک اتفاق می‌افتد (۹). فرآیند جذب سطحی از مکانیسم‌های مهم در کنترل انتقال آلاینده‌ها به‌سمت آب‌های زیرزمینی می‌باشد که به‌وسیله هم‌دماهای جذب توصیف می‌شود (۱۸). هم‌دماهای جذب رابطه بین یک یون در فاز جامد و غلظت آن در محلول تعادلی را در دمای ثابت نشان می‌دهند و به‌عنوان ابزارهایی برای توصیف و پیش‌بینی مقدار جذب و پویایی عناصر در خاک به‌کار می‌روند (۲۰).

با این حال یکی از عوامل خطا در پیش بینی سرنوشت آلاینده‌ها به‌وسیله مدل‌های آلودگی خاک و آب، در نظر نگرفتن فرآیند واجذب عناصر جذب شده از فاز جامد به فاز محلول می‌باشد (۲۳). به‌منظور ارزیابی خطرپذیری و پیش بینی بهتر پویایی آلاینده‌ها ضروری است پدیده پسماند (hysteresis) و مکانیسم‌های درگیر در جذب و واجذب آلاینده‌ها مورد بررسی قرار گیرد. پدیده پسماند یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر کارایی یک جذب کننده در کاهش قابلیت فراهمی زیستی، تحرک و سرنوشت آلاینده‌های جذب شده بر روی کانی‌های خاک و جذب کننده‌های مورد استفاده در تثبیت آلاینده‌های آب و فاضلاب می‌باشد (۲۷). این پدیده عبارت است از عدم برگشت‌پذیری و یا آزادسازی کند بخشی از عنصر جذب شده بر روی فاز جامد (جذب کننده) به فاز محلول. معمولاً برای تشخیص این پدیده در فرآیند جذب یک عنصر بر روی یک جذب کننده از هم‌دماهای جذب و واجذب استفاده می‌شود. درصورتی که هم‌دماهای واجذب بر هم‌دمای جذب منطبق شوند جذب برگشت‌پذیر و در صورت انحراف هم‌دماهای جذب از هم‌دماهای واجذب، پسماند جذبی رخ داده است (۲۹).

به‌طور کلی عوامل مختلفی در جذب فلوراید بر روی کانی‌ها مؤثر است. برخی از این عوامل عبارتند از:

۱. سرعت انجام واکنش: انجام آزمایش در شرایط ایستا یا تکان دادن تأثیر زیادی بر میزان جذب فلوراید بر سطوح ذرات دارد. به‌عنوان مثال مطالعه فن و همکاران (۱۲) نشان داد که در شرایط شیکر کردن، فلوراید سریعاً روی سطوح کوارتز، کلسیت و فلورسپار جذب شده و در عرض ۲ دقیقه به تعادل رسیده است. در این مدت زمان بسیار کم، فلورسپار حدود ۲۵ درصد، کلسیت حدود ۱۲ درصد و کوارتز حدود ۶ درصد از فلوراید موجود در محلول را جذب نمودند. در شرایط ایستا، در ۱۰ دقیقه اول آزمایش تنها حدود ۳ تا ۶ درصد از فلوراید روی هر سه کانی جذب شد و بعد از آن در مدت زمان ۱۰۰ دقیقه، میزان جذب تنها حدود ۲ درصد افزایش یافت. نتایج این تحقیق نشان داد که شیکر کردن روی مرحله اول جذب فلوراید مؤثر است (۱۲).

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.4.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.35]

۲. اثر غلظت: با افزایش غلظت فلوراید در محلول، میزان جذب آن افزایش می‌یابد(۱۲).

۳. نوع رس: مطالعه جذب فلوراید بر روی کانی‌های کائولینایت و مونت‌موریلونایت نشان داد که میزان جذب در کائولینایت ۲/۴ تا۲/۸ برابر بیشتر از مونت‌موریلونایت می‌باشد. وجود بارهای دائمی منفی بیشتر در مونت‌موریلونایت، دلیل جذب کمتر فلوراید در این کانی نسبت به کائولینایت می‌باشد(۵).

۴. pH : به‌طور کلی جذب آنیون‌ها با تغییر pH تغییر می‌کند. در مورد فلوراید نیز میزان جذب با افزایش pH ، افزایش یافته و در نزدیکی pK_a آن(حدود ۴) به حداکثر می‌رسد و بعد از آن با افزایش pH جذب کاهش می‌یابد (۱). براساس مطالعه ارنسن و کروگستد(۲)، کمترین حلالیت فلوراید در pH بین ۴/۸ تا ۵/۵ وجود دارد و گونه‌های فلوراید موجود در محلول بسته به pH تغییر می‌کنند. الرشیدی و لیندزی (۱۰) کمپلکس‌های $AL\text{-}F_x$ را مهم‌ترین گونه‌های محلول فلوراید در خاک‌های اسیدی با pH کمتر از ۶ و free F را گونه غالب فلوراید در pH های بالای ۶ معرفی کردند.

پیک و ولک (۲۵) جذب و واجذب فلوراید را در تعدادی خاک با pHهای اسیدی و بازی مورد آزمایش قرار دادند. نتایج این پژوهشگران نشان داد که جذب فلوراید در تمام خاک‌ها سریع بوده و حدود ۶۰ درصد از جذب در ۶ ساعت اول و ۹۰ درصد از جذب در ۲۴ ساعت اول اتفاق می‌افتد. آنان بر این عقیده‌اند که فلورید ابتدا در معرض یک واکنش تبادلی سریع قرار گرفته و در ادامه در معرض واکنش‌های کندتر نظیر رسوب CaF_2 یا فلورآپاتیت قرار می‌گیرد. در این مطالعه واجذب فلورید نیز با گذشت زمان کاهش می‌یابد که احتمالا دلیل آن افزایش پیوند فلوراید با خاک با افزایش زمان و در نتیجه کاهش واجذب می‌باشد. با بررسی هم‌دماهای جذب فلوراید مشخص شد که جذب فلوراید در غلظت‌های پائین از معادله لانگمویر تبعیت می‌کند اما در غلظت‌های بالا شیب خط تغییر می‌کند. این تغییر در شیب خط به رسوب CaF_2 یا فلورآپاتیت در غلظت‌های بالا نسبت داده می‌شود (۲۴،۱۶ و ۲۵).

در ایران پژوهشی در مورد جذب یا واجذب فلورید در خاک انجام نشده است. براساس گزارش یونیسف، ایران یکی از ۲۷ کشوری است که غلظت زیاد فلورید در آب شرب، باعث بروز بیماری فلوروسیس می‌شود (۳۱). پژوهش‌های انجام شده در برخی نواحی ایران نیز وجود غلظت‌های زیاد فلورید در آب‌های زیرزمینی را تأیید می‌کند. بنابراین مطالعه در زمینه حرکت فلورید و عوامل مؤثر بر انتقال آن به آب‌های زیرزمینی ضروری می‌باشد. در همین راستا پژوهشی با هدف بررسی جذب و واجذب فلورید در خاک آهکی اصفهان انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در خاک مزرعه تحقیقاتی دانشگاه صنعتی اصفهان واقع در لورک نجف آباد انجام شد. این منطقه در ۴۰ کیلومتری جنوب غربی اصفهان در عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۳۲ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۲۳ دقیقه شرقی واقع شده است. رده‌بندی خاک منطقه تیپیک هاپل آرجید، فاین لومی، میکسد، ترمیک (Typic Haplargid, Fine Loamy, Mixed, Thermic) و در سری خاک خمینی شهر قرار می‌گیرد. نمونه‌برداری از لایه‌های ۰ تا ۳۰ و ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متری و در چهار تکرار با استفاده از اگر دستی انجام شد. بافت خاک به‌روش هیدرومتر (۶)، ماده آلی به‌روش اکسیداسیون تر (۳۲)، pH (۳۰) و EC (۲۶) در عصاره با نسبت ۱:۵ اندازه‌گیری شد. جذب و واجذب فلورید به‌روش زیر اندازه‌گیری شد:

سه گرم خاک عبور کرده از الک ۱۰ مش را با ۳۰ میلی لیتر محلول کلرید سدیم ۰/۰۳مولار با غلظت‌های صفر، ۲/۵، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم فلورید بر لیتر (با استفاده از نمک فلورید سدیم) در لوله‌های سانتریفوژ پلی‌اتیلنی مخلوط کرده و نمونه‌ها به‌مدت ۲۳ ساعت همزده شد. از نمک کلرید سدیم به‌جای نمک کلرید کلسیم برای ثابت نگهداشتن قدرت یونی استفاده شد زیرا کلرید کلسیم ممکن است باعث رسوب فلورید به‌صورت CaF_2 شود. سپس سوسپانسیون‌ها صاف شده و غلظت فلورید در محلول صاف شده، اندازه‌گیری شد. مقدار

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.4.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.35]

جذب از تفاوت بین غلظت‌های اولیه و غلظت‌های تعادلی محاسبه شد. در ادامه آزمایش جذب برای اندازه‌گیری مقدار واجذب در همان خاک، ۲۵ میلی لیتر از محلول کلرید سدیم ۰/۰۳ مولار جایگزین ۲۵ میلی‌لیتر از عصاره استخراج شده، گردید. نمونه‌ها به‌مدت ۲۴ ساعت هم‌زده شد. سپس سوسپانسیون‌ها صاف شد و غلظت فلوراید در محلول صاف شده قرائت گردید. آزمایشات واجذب در دو مرحله انجام شد.(۲).

غلظت فلوراید در عصاره‌ها با استفاده از روش پتانسیومتری و استفاده از یک الکترود فلورید (مدل متر اهم، سوئیس) و یک الکترود مرجع تعیین شد. پیش از اندازه‌گیری غلظت فلورید، عصاره جمع‌آوری شده با نسبت ۱:۱ با بافر تیزاب (Total ionic strength adjusting buffer) مخلوط شد. این بافر برای جداسازی کمپلکس‌های فلورید، ثابت کردن pH و حفظ قدرت یونی ثابت اضافه می‌شود. این بافر دارای ۵۷ میلی‌لیتر اسید استیک، ۵۸ گرم نمک کلرید سدیم و ۴ گرم (cyclohexylene dinitrilo tetra acetate) CDTA در یک لیتر می‌باشد که pH آن با استفاده از هیدروکسید سدیم ۶ نرمال روی ۵/۲ تنظیم شد (۲۲). نتایج حاصل از آزمایشات با استفاده از نرم‌افزار Curve expert 1.3 در معادلات هم‌دماهای جذب لانگمویر و فروندلیخ مورد بررسی قرار گرفت.

شکل کاربردی معادله لانگمویر به‌صورت زیر است (۱۹):

$$q_e = \frac{q_{max} K_L C_e}{1 + K_L C_e} \qquad [1]$$

که در آن q_{max} بیشینه جذب ($mg\ g^{-1}$) و q_e مقدار جذب شده در تعادل با غلظت C_e ($mg\ L^{-1}$) می‌باشند ($mg\ g^{-1}$). ثابت K_L بیانگر تمایل به تشکیل کمپلکس سطحی بوده (قدرت پیوند) به‌طوری که هر چه K_L بزرگتر باشد این تمایل بیشتر است.

شکل کلی معادله تجربی فروندلیچ عبارت است از(۱۵):

$$q = K_f C_e^n \qquad [2]$$

که در آن q_e مقدار عنصر جذب شده ($mg\ g^{-1}$)، C_e غلظت عنصر در حال تعادل ($mg\ L^{-1}$) و K_F و n ضرایب مدل می‌باشند.

با محاسبه مقادیر فلورید باقی‌مانده در فاز جامد و قرار دادن آنها در برابر غلظت‌های تعادلی مربوطه، هم‌دماهای واجذبی در دو مرحله رسم شده و مدل فروندلیچ بر داده‌های واجذبی برازش داده شد:

$$q = K_{Fdesorb} C_e^{n\,desorb} \qquad [3]$$

که در آن q_e ($mg\ g^{-1}$) مقدار فلورید موجود در فاز جامد، C_e ($mg\ L^{-1}$) غلظت فلورید در محلول تعادلی و K_{desorb} و n_{desorb} ضرایب مدل فروندلیخ برازش یافته بر داده‌های واجذب می‌باشند.

شاخص‌های مختلفی برای پدیده پسماند ارائه شده است که بیشتر آنها براساس ضرایب مدل فروندلیچ می‌باشد. در این تحقیق از شاخص پسماند ظاهری ارائه شده توسط اکانر و همکاران(۲۳) و باریوسو و همکاران (۴) استفاده شد. این شاخص برای هر جفت شاخه هم‌دمای جذب- واجذب براساس رابطه زیر تعیین می‌گردد.

$$AHI = \frac{n_{desorb}}{n_{sorb}} \qquad [4]$$

که در آن AHI، شاخص پسماند ظاهری و n_{sorb} و n_{desorb} به‌ترتیب نمایه‌های مدل فروندلیخ برازش داده شده بر داده‌های جذب و واجذب می‌باشند. این شاخص معیاری از شدت واجذب است. اگر پسماند جذبی وجود نداشته باشد $n_{desrob}=n_{sorb}$ و $K_{sorb} = K_{desorb}$ و در صورت پسماند مثبت $n_{desorb}/n_{sorb} < ۱$ و $K_{sorb} < K_{desorb}$ می‌باشد و اگر $n_{desorb}/n_{sorb} > ۱$ و $K_{sorb} > K_{desorb}$ باشد پسماند از نوع منفی خواهد بود (۴).

نتایج و بحث

برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه گردیده است. در این خاک، بافت، درصد کربن آلی، pH و EC با عمق تغییر معنی‌داری نداشته‌اند ولی ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) با افزایش عمق کاهش معنی‌داری (سطح ۵ درصد) را نشان داده است.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.4.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.35]

جدول ۱. برخی از ویژگی‌های خاک مطالعاتی واقع در مزرعه لورک

عمق خاک (سانتی‌متر)	بافت خاک	درصد سیلت	درصد رس	درصد کربن آلی	pH (۱:۵)	EC(۱:۵) (dSm^{-1})	CEC ($cmol_c\ kg^{-1}$)
۰-۳۰	SiCL	۴۸/۳	۳۶/۷	۰/۴	۸/۲	۰/۲۱	۱۶/۶
۳۰-۶۰	SiCL	۴۳	۳۹	۰/۳۵	۸/۳	۰/۱۶	۱۵/۸

SiCL: Silty Clay Loam

جدول۲. ثابت‌ها، ضرایب تبیین و خطاهای استاندارد برآورد حاصل از برازش مدل‌های لانگمویر و فروندلیچ بر داده‌های جذب فلورید در خاک

مدل	عمق (سانتی‌متر) ۰-۳۰	عمق (سانتی‌متر) ۳۰-۶۰
لانگمویر		
$q_{max}\ (mg\ g^{-1})$	۰/۴	۰/۳۵
$K_L\ (L\ mg^{-1})$	۰/۰۳۶	۰/۰۳۷
R^2	۰/۹۷	۰/۹۸
SEE	۰/۰۱۹	۰/۰۱۹
فروندلیچ		
$K_F\ (mg^{(1-n)}L^n g^{-1})$	۰/۰۲۶	۰/۰۲۵
n	۰/۵۷	۰/۵۵
R^2	۰/۹۷	۰/۹۷
SEE	۰/۰۳	۰/۰۲۸

هم‌دماهای جذب فلورید

ثابت‌ها، ضرایب تبیین و خطاهای استاندارد برآورد حاصل از برازش مدل‌های لانگمویر و فروندلیچ بر داده‌های جذب فلورید در جدول ۲ ارائه گردیده است. براساس معیارهای انتخاب هم‌دماهای مناسب یعنی R^2 و SEE، هر دو مدل جذب فلورید را در خاک به‌خوبی توصیف کردند. البته باید توجه داشت که برازش مناسب معادله لانگمویر بر داده‌های جذب عناصر بر روی ذرات خاک لزوماً به مفهوم درست بودن این فرضیات نبوده و تأییدی بر سازوکار برون جذبی تک لایه‌ای نمی‌باشد. این معادله در برخی آزمایش‌ها که در آنها فرآیند جذب با سازوکار رسوب سطحی همراه بوده است نیز به‌خوبی بر داده‌ها برازش یافته است (۲۸). به‌عبارت دیگر، این معادله در بسیاری از مطالعات جذب یون‌ها بر روی اجزاء خاک همانند یک معادله تجربی عمل خواهد کرد. در مطالعه گاپتا و همکاران (۱۶) و چهابرا و همکاران (۸) هم‌دماهای جذب لانگمویر جذب فلورید را به‌خوبی توصیف کرد. در مطالعه پیک و ولک (۲۵) و امتی و جونز (۲۴) نیز جذب فلورید به‌وسیله هم‌دمای جذب فروندلیچ به‌خوبی توصیف شد. ثابت n در معادله فروندلیچ معیاری از انحنای معادله برازش یافته بوده و به‌عنوان شاخص شدت جذب شناخته می‌شود. به عقیده اسینگتون n می‌تواند میزان ناهمگنی سطح جذب کننده را نشان دهد به‌طوری که هرچه n به‌سمت صفر میل نماید ناهمگنی و تنوع مکان‌های جذب افزایش یافته و با نزدیک شدن n به سمت یک سطح جذب کننده همگن‌تر خواهد شد (۱۱). ضریب n مدل

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.4.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.35]

جدول۳. ثابت‌ها، ضرایب تبیین و خطاهای استاندارد برآورد حاصل از برازش مدل فروندلیچ بر داده‌های واجذب فلوراید در خاک

مدل فروندلیچ	لایه (سانتی‌متر) ۰ـ۳۰	لایه (سانتی‌متر) ۳۰ـ۶۰
واجذب اول		
K_{desorb}	۰/۰۳	۰/۰۳
n_{desorb}	۰/۵۴	۰/۵۱
R^2	۰/۹	۰/۹
SEE	۰/۰۲۷	۰/۰۲۷
واجذب دوم		
K_{desorb}	۰/۰۶	۰/۰۶
n_{desorb}	۰/۵۶	۰/۵۴
R^2	۰/۸۸	۰/۹
SEE	۰/۰۳۱	۰/۰۳۱

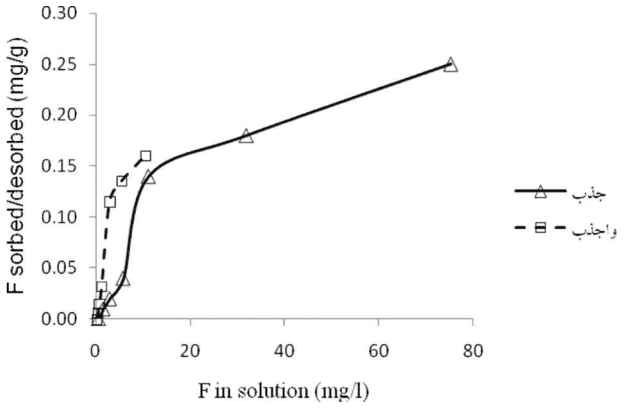
فروندلیچ برای دو عمق به‌ترتیب ۰/۵۷ و ۰/۵۵ بود. انحراف n از واحد ($n \leq 1$) نشان‌دهنده جذب غیرخطی بر روی سطوح غیرهمگن می‌باشد و با افزایش پوشش سطح بر روی کانی‌های مذکور انرژی جذب به‌صورت توانی کاهش می‌یابد (۱۱). ثابت K_F مدل فروندلیچ که معیاری از ظرفیت جذب است (۲۰)، برای دو عمق مورد مطالعه به‌ترتیب ($mg^{(1-n)} L^n g^{-1}$)۰/۰۲۶و ۰/۰۲۵ به‌دست آمد. کوچک بودن این مقادیر نشان‌دهنده این است که جذب فلوراید در این خاک‌ها کم است. ثابت K_L در معادله لانگمویر نیز بیانگر تمایل به تشکیل کمپلکس سطحی بوده (قدرت پیوند) به‌طوری که هر چه K_L بزرگ‌تر باشد این تمایل بیشتر است. همان‌گونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، K_L در این آزمایش بسیار کوچک است. بیشینه ظرفیت جذب خاک q_{max} تعیین شده به‌وسیله مدل لانگمویر برای فلوراید برای دو عمق صفر تا ۳۰ و ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متری به‌ترتیب $mg\ g^{-1}$ ۰/۴ و ۰/۳۵ می‌باشد. همانگونه که مشاهده می‌شود جذب با افزایش عمق، کاهش یافته است.

هم‌دماهای واجذب فلوراید

مدل فروندلیچ، واجذب فلوراید در خاک را به‌خوبی توصیف نمود(شکل ۱). ثابت‌ها، ضرایب تبیین و خطاهای استاندارد برآورد حاصل از برازش مدل فروندلیچ بر داده‌های واجذب در جدول ۳ ارائه شد. همان‌گونه که در جدول مشاهده می‌شود، مقادیر ثابت K_F و n هم‌دماهای واجذب برای هر دو عمق خاک بیشتر از مقادیر متناظر هم‌دماهای جذب می‌باشد. همچنین $K_{sorb} < K_{desorb}$ می‌باشد که نشانه پسماند مثبت است. فولر و همکاران(۱۳) با مطالعه جذب فلوراید در خاک‌های اسیدی و آهکی دریافتند که جذب فلوراید در خاک‌های اسیدی برگشت‌پذیر است اما در خاک‌های آهکی پدیده پسماند وجود دارد که علت این پدیده به رسوب CaF_2 نسبت داده می‌شود.

میانگین فلوراید واجذب شده از خاک بعد از دو مرحله آزادسازی حدود ۲۸ درصد در غلظت‌های مختلف می‌باشد(جدول ۴). به‌نظر می‌رسد که جذب فلوراید روی خاک برگشت‌پذیر است. هینگستون و همکاران (۱۷) معتقدند که برگشت‌پذیری جذب فلوراید روی گئوتیت و گیبسایت و واجذب سریع فلوراید به‌دلیل تشکیل پیوند یک دندانه‌ای فلوراید با جاذب است. اما پیک و ولک (۲۵) این فرضیه را به‌دلیل عدم برگشت‌پذیری جذب فلوراید در خاک‌های دارای مقادیر زیاد

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.4.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.35]



شکل ۱. هم‌دماهای جذب و واجذب فلورید

جدول ۴. درصد فلورید واجذب شده از خاک بعد از دو مرحله واجذب

غلظت اولیه $mg\ F\ L^{-1}$	مقدار فلورید جذب شده $mg\ g^{-1}$	مقدار دفع فلورید در مرحله دوم $mg\ g^{-1}$	درصد فلورید واجذب شده ٪
۰	۰	۰	۰
۲/۵	۰/۰۱	$۳/۸\times۱۰^{-۳}$	۳۸
۵	۰/۰۲	$۶/۴\times۱۰^{-۳}$	۳۲
۱۰	۰/۰۴	$۱/۱\times۱۰^{-۲}$	۲۸
۲۵	۰/۱۴	$۲/۲\times۱۰^{-۲}$	۱۶
۵۰	۰/۱۸	$۳/۷\times۱۰^{-۲}$	۲۱
۱۰۰	۰/۲۵	$۸/۲\times۱۰^{-۲}$	۳۳

جدول ۵. شاخص پسماند جذب- واجذب (AHI) فلورید در خاک

شاخص پسماند	لایه (سانتی‌متر) ۰ـ۳۰	لایه (سانتی‌متر) ۳۰ـ۶۰
واجذب اول	۰/۹۵	۰/۹۳
واجذب دوم	۰/۹۸	۰/۹۸

آلومینیوم بی‌شکل، رد می‌کنند. آنان بر این عقیده‌اند که جذب فلورید در خاک‌ها پیچیده‌تر از یک واکنش تبادلی لیگاند ساده تک دندانه‌ای می‌باشد.

اختلاف بین جذب و واجذب متناظر هم‌دمای فروندلیچ به‌وسیله شاخص پسماند یا هیسترسیس ظاهری (apparent hysteresis index) استاندارد گردیده که مقادیر آنها در جدول ۵ نشان داده شده است. بزرگ‌تر بودن مقدار این شاخص نشان‌دهنده آزادسازی سریع‌تر و راحت‌تر عنصر جذب‌شده بر

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.4.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.35]

روی کانی می‌باشد (۴ و ۷). همان‌گونه که در جدول مشاهده می‌گردد مقادیر این شاخص برای فلوراید بزرگ بوده که نشان‌دهنده آزادسازی فلوراید از مکان‌های جذب خاک و تأیید کننده فرضیه هینگستون و همکاران (۱۷) می‌باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که جذب و واجذب فلوراید از خاک به‌خوبی توسط مدل فروندلیچ توصیف می‌گردد. مدل لانگمویر نیز جذب فلوراید در خاک را به‌خوبی توصیف کرد. میزان جذب فلوراید در خاک آهکی مورد بررسی کم بوده و بیشینه ظرفیت جذب خاک (q_{max}) تعیین شده به‌وسیله مدل لانگمویر برای فلوراید به‌ترتیب ($mg\ g^{-1}$) ۰/۴ و ۰/۳۵ برای لایه‌های ۳۰-۰ و ۶۰-۳۰ سانتی‌متری خاک به‌دست آمد. همچنین هم‌دماهای واجذب فلوراید از خاک بر هم‌دماهای جذب آن منطبق نشده که نشان دهنده برگشت‌ناپذیر بودن جذب یا پدیده پسماند بود. مقدار هیسترسیس از پارامترهای جذب و واجذب فروندلیچ (K_F و n) و با استفاده از شاخص هیسترسیس ظاهری ارزیابی شد. بزرگ بودن مقدار این شاخص نشان دهنده آزادسازی سریع فلوراید از خاک بود.

منابع مورد استفاده

۱. اوستان، ش(مترجم). ۱۳۸۳. *شیمی خاک با نگرش زیست محیطی*. چاپ اول، انتشارات دانشگاه تبریز(مؤلف: دونالد ال. اسپارکس)

2. Arnesen, A. K. M. and T. Krogstad. 1998. Sorption and desorption of fluoride in soil polluted from the aluminium smelter at ardal in western Norway. Water Air Soil Pollut. 103: 357-373.
3. Asghari Moghadam, A. and E. Fijani. 2008. Distribution of fluoride in groundwater of Maku area, northwest of Iran. Environ Geol. 56: 281-287.
4. Barriuso, E., D. A. Laird, W. C. Koskinen and R. H. Dowdy. 1994. Atrazine desorption from smectites. Soil Sci. Soc. Am. J. 58: 1632-1638.
5. Bar-Yosef, B., I. Afik and R. Rosenberg. 1988. Fluoride sorption by montmorillonite and kaolinite. Soil Sci. 145(3): 194-200.
6. Bouyoucos, C. J. 1962. Hydrometer method improved for making particle-size analysis of soils. Agron. J. 4: 464-465.
7. Chernet, T., Y. Travi and E. Valles. 2001. Mechanism of degradation of the quality of natural water in the lakes region of the Ethiopian Rift Valley. Water Res. 35: 2819-2832.
8. Chhabra, R., A. Singh and I. P. Arbol. 1980. Fluorine in sodic soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44:33-36.
9. Edmunds, M. and P. Smedley. 2005. Fluoride in Natural Waters. PP. D-301-D-329. *In*: Selinus, B. J., J. A. Alloway, R. B. Centeno, R. Finkelman, U. Fuge, U. Lindh, P. Smedley (Eds.), Essentials of Med Geology, Impact of Natural Environment on Public Health, Elsevier Academic Press, Lodon, UK.
10. Elrashidi, M. A. and W. L. Lindsay. 1986. Chemical equilibria of fluorine in soils: A theoretical development. Soil Sci. 141(4): 274-280.
11. Essington, M. E. 2004. Soil and Water Chemistry: An Integrative Approach. CRC Press. Boca Raton. 1-145. Florida. USA.
12. Fan, X., D. J. Parker and M. D. Smith. 2003. Adsorption kinetics of fluoride on low cost materials. Water res. 37: 4929-4937.
13. Fluhler, H., J. Polomski and P. Blaser. 1982. Retention and movement of fluoride in soils. J. Environ. Qual. 11: 461-468.
14. Fomon, S. J., S. J. Ekstrand and E. E. Ziegler. 2000. Fluoride intake and prevalence of dental fluorosis: trends in fluoride intake with special attention to infants. J. Public Health Dent. 60:131-139.
15. Freundlich, H. M. F. 1966. Over the adsorption in solution. J. Phys. Chem. 57:43-49.
16. Gupta, R. K., R. Chhabra and I. P. Arbol. 1982. Fluorine adsorption behavior in alkali soils: relative roles of pH and sodicity. Soil Sci. 133: 364- 368.
17. Hingston, F. J., A. M. Posner and J. P. Quirk. 1974. Anion adsorption by goethite and gibbsite: 2. Desorption of anions from hydrous oxide surfaces. Soil Sci. 25:16-26.
18. Kau, P. M. H., D. W. Smith and P. J. Binning. 1998. Experimental sorption investigations of fluoride by kaolinite and bentonite. Geoderma 84:89-108.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.4.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.35]

19. Langmuir, I. 1918. Adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. J. Am. Chem. Soc. 40: 1361-1403.
20. Limousin, G., J. P. Gaudet, L. Charlet., S. Szenknect, V. Barthès and M. Krimissa. 2007. Sorption isotherms: A review on physical bases, modeling and measurement. Appl Geochem. 22: 249-275.
21. Malinowska, E., I. Inkielewicz., W. Czarnowski. 2008. Assessment of fluoride concentration and daily intake by human from tea and herbal infusions. Food Chem Toxicol.46: 1055-1061.
22. McQuaker, N. R. and M. Gurney. 1977. Determination of total fluoride in soil and vegetation using an alkali fusion selective ion electrode technique. Anal Chem. 49:53-56.
23. O'Connor, G. A., P. J. Wierenga., H. H. Cheng and K. G. Doxtader. 1980. Movement of 2, 4, 5-T through large soil columns. Soil Sci. 130: 157-162.
24. Omuetti, J. A. I. and R. L. Jones. 1977. Fluoride adsorption by Illinois soils. Soil Sci. 28: 564-572.
25. Peek, D. C. and V. V. Volk. 1985. Fluoride sorption and desorption in soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 49: 583- 586.
26. Rhoades, J. D. 1996. Salinity: electrical conductivity and total dissolved solid. PP: 417-436. *In:* Sparks, D. L., A. L. Page, P. A. Helmke. R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston, M. E. Sumner. (Eds.), Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods. American Society of Agronomy, Madison, WI.
27. Sander, M., Y. F. Lu and J. J. Pignatello. 2005. A thermodynamically based method to quantify true sorption hysteresis. J. Environ. Qual. 34: 1063-1072.
28. Sparks, D. L. 2003. Environmental Soil Chemistry. Academic Press. San Diego. California. USA.
29. Strawn, D. G., A. M. Scheidegger and D. L. Sparks. 1998. Kinetics and mechanisms of Pb(II) sorption and desorption at the aluminum oxide-water interface. Environ. Sci. Technol. 32: 2596-2601.
30. Thomas, G. W. 1996. Soil pH and soil acidity. PP: 475-490. *In:* Sparks, D. L., A. L. Page, P. A. Helmke. R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston, M. E. Sumner (Eds.), Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods. American Society of Agronomy, Madison, WI. 31. UNISEF Publication on Water, Environment, Sanitation and Hygiene. Fluoride in water: An overview, issue 13, December 1999.
32. Walkey, A. and I. A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci. 37: 29-38.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.73.4.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.73.35]