

## بررسی اثرات pH و قدرت یونی بر جذب سطحی بور (B) روی کائولینایت

مریم آقایی و رسول راهنمایی<sup>1</sup>

دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس؛ maryamaghaee88@gmail.com

استادیار دانشگاه تربیت مدرس؛ Rasoul.Rahnemaie@modares.ac.ir

دریافت: 91/12/27 و پذیرش: 92/11/21

### چکیده

گیاهان بور (B) مورد نیاز برای رشد خود را از محلول خاک تأمین می‌کنند. غلظت بور در فاز محلول خاک به وسیله واکنش‌های جذب سطحی و رهاسازی روی کلوتیدهای آلی و معدنی خاک کنترل می‌شود. از این رو، این واکنش‌ها از دیدگاه کشاورزی و زیست محیطی اهمیت بسیار زیادی دارند. با توجه به اهمیت کانی‌های رس آلومینوسیلیکاتی در واکنش‌های جذب سطحی و رهاسازی یون‌ها در خاک، در این پژوهش، رفتار جذب سطحی بور روی کانی کائولینایت، تابعی از غلظت تعادلی، pH، غلظت کائولینایت، و قدرت یونی مورد بررسی قرار گرفت. همدماهای جذب سطحی بور در محدوده‌ی غلظت تعادلی 0 تا 1319 میکرو مولار در دو pH 5 و 8 نشان داد که جذب سطحی آن با افزایش غلظت افزایش می‌یابد و ماکزیمم آن در pH 8 به تقریباً 20 میکرو مول بر گرم کائولینایت می‌رسد. داده‌های آزمایشی همچنین نشان داد که جذب سطحی بور با افزایش pH تا pH حدود 9 افزایش می‌یابد و در این pH به حداکثر مقدار می‌رسد. سپس با افزایش مجدد pH مقدار آن تدریجاً کاهش می‌یابد. علاوه بر این، نتایج نشان داد که در غلظت ثابت بور با افزایش غلظت کائولینایت از میزان جذب سطحی بر واحد وزن کانی کاسته می‌شود. بررسی مقدار جذب سطحی بور در قدرت‌های یونی مختلف نیز نشان داد که با افزایش قدرت یونی از مقدار جذب سطحی بور کاسته می‌شود. رابطه منفی قدرت یونی با جذب سطحی بور احتمالاً به دلیل اثر قدرت‌یونی بر رفتار باری کائولینایت و بر توزیع گونه‌های بور در فاز محلول و نیز اثر رقابتی آنیون نیترات با بورات است. با توجه به مقدار بالای جذب سطحی بور روی کائولینایت و مشابهت جذب سطحی آنیون‌ها روی انواع کانی‌های رس آلومینوسیلیکاتی، می‌توان نتیجه گرفت که این کانی‌ها نقش مهمی در جذب سطحی بور در خاک‌ها و در نتیجه در کنترل قابلیت دسترسی آن برای گیاهان دارند.

واژه‌های کلیدی: بورات، کانی رس، آلومینوسیلیکات

<sup>1</sup> نویسنده مسئول، آدرس: گروه خاکشناسی، دانشگاه تربیت مدرس، ص.پ. 14115-336، تهران، ایران

## مقدمه

یونی محلول می‌باشد (کرن و اسپارک، 1994). در حالی که در بررسی اثر قدرت یونی محلول کلرید سدیم روی جذب سطحی بور روی کانی جیسیایت، 40% کاهش در ماکزیمم جذب سطحی بور مشاهده شده است (گلدبرگ و همکاران، 2005). بررسی اثر pH بر جذب سطحی بور روی کانی گئوتایت نیز نشان داده است که با افزایش pH جذب سطحی بور زیاد شده و در pH حدود 8/5 به بیشترین مقدار خود رسیده و سپس با افزایش دوباره pH کاهش می‌یابد (گلی و همکاران، 2011). همچنین در بررسی‌های مشابهی مجیدی و همکاران (1389) دریافتند، میزان جذب سطحی بور روی کانی کلسایت با افزایش pH افزایش یافته و در pH حدود 9/2 به حداکثر مقدار خود رسیده و با افزایش مجدد pH از مقدار آن کاسته می‌شود. بررسی جذب سطحی بور در خاک‌های آهکی همچنین نشان داده است که با افزایش غلظت تعادلی بور، مقدار جذب سطحی آن ابتدا با شیب زیاد افزایش یافته و سپس به مقدار نسبتاً ثابتی میل می‌کند که بیانگر حداکثر مقدار جذب سطحی بور می‌باشد (مجیدی و همکاران، 2010). مقایسه جذب سطحی بور روی کانی‌های ایلات، مونت-موریلونایت، و کائولینایت نیز نشان داده است که بیشترین مقدار جذب سطحی بور توسط ایلات صورت می‌گیرد (کرن و مزومن، 1981).

بنابر آنچه گفته شد و نیز با توجه به اهمیت واکنش‌های جذب سطحی و رهاسازی از دیدگاه کشاورزی و زیست محیطی و نقش آن‌ها در تغذیه‌ی بهینه گیاهی، در این پژوهش، رفتار جذب سطحی بور روی کانی کائولینایت، به عنوان نماینده‌ای از کانی‌های رس آلومینوسیلیکاتی خاک، تابعی از غلظت تعادلی، pH، غلظت کائولینایت و قدرت یونی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## مواد و روش‌ها

کائولینایت مورد استفاده در این تحقیق از معدن سمیرم تهیه گردید. نمونه‌هایی از کانی به روش‌های XRD و XRF آنالیز گردید. پس از تأیید نوع کانی و درجه خلوص آن، نمونه اولیه کائولینایت توسط آسیاب ماهواره-ای خرد و ذرات آن از الک 32 میکرومتری عبور داده شد. سپس ذرات کانی در هیدروکسید آمونیوم 0/3 مولار (بهرامیان و همکاران، 2007) تفکیک و ذرات کوچکتر از 1 میکرومتر آن جدا گردید. جهت همگن سازی کمپلکس تبادل، تعلیق کانی سه مرحله با محلول کلرید سدیم یک مولار شستشو داده شد (هیدمن و همکاران، 2005؛ و کرتسچمر و همکاران، 1998). تعلیق کانی سپس دیالیز و غلظت نمک‌های محلول آن به  $EC < 0.002$  ds/m رسانده

عناصر کم مصرف، نظیر بور، نقش اساسی در رشد و نمو گیاهان ایفا می‌کنند. گیاهان عناصر غذایی از جمله بور را از محلول خاک جذب می‌کنند. بور موجود در محلول خاک با بور موجود در فاز جامد (بور موجود در کانی‌ها و بور جذب سطحی شده) در حال تعادل است. شکل غالب بور در محلول‌ها، اسید بوریک ( $B(OH)_3$ ) است، که ساختار یک اسید لوویس قوی را دارد (جان و همکاران، 1995).

کلوئیدهای خاک مکان‌های مناسبی برای جذب سطحی مولکول‌ها و یون‌های موجود در محلول خاک از جمله بور می‌باشند. این کلوئیدها از نظر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی با یکدیگر تفاوت زیادی دارند (بالت 1982). ذرات کلوئیدی خاک را می‌توان در چهار گروه اکسیدها و هیدروکسیدهای آزاد، مواد آلی، کربنات‌ها، و کانی‌های رسی دسته‌بندی کرد. اکسیدها و هیدروکسیدهای خاک به طور عمده دارای بار وابسته به pH هستند. به دلیل بالا بودن نقطه صفر بار الکتریکی، این ذرات در pH معمول خاک معمولاً دارای بار سطحی مثبت می‌باشند (گلدبرگ و همکاران، 1993). کربنات‌ها نیز به میزان زیادی در خاک‌های آهکی حضور دارند و می‌تواند از طریق جذب سطحی بور بر غلظت بور محلول خاک تأثیر بگذارند (حسنی و همکاران، 1389؛ مجیدی و همکاران، 2010؛ کازملسکی، 2001). مواد آلی به دلیل داشتن گروه‌های فعال بسیار در سطح خود و نیز میل ترکیبی بالا برای واکنش با یون‌ها و مولکول‌های موجود در محلول خاک، از جمله بور، نقش بسزایی در واکنش‌های جذب-سطحی دارند.

لیکن، به دلیل کمی مقدار مواد آلی در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، نقش چندانی در جذب-سطحی بور ندارند (ارشیدی و اوکنز، 1982). کانی‌های رسی، گروه مهم دیگری از ذرات کلوئیدی هستند که در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک از جمله اکثر مناطق کشورمان به وفور یافت می‌شوند. بار سطحی کانی‌های رسی عمدتاً منفی و ناشی از جایگزینی همشکل است اما لبه این کانی‌ها دارای مقداری بار وابسته به pH است. با توجه به فراوانی این کانی‌ها در خاک، بار هر چند اندک لبه آنها نقش مهمی در جذب سطحی آنیون‌ها ایفا می‌کند. جذب سطحی بور علاوه بر مقدار و نوع کانی‌ها به عوامل دیگری نظیر pH محلول خاک، غلظت بور در فاز محلول، و غلظت املاح موجود در محلول خاک نیز بستگی دارد. مطالعات صورت گرفته روی کانی بدون بار پیروفیلایت حاکی از افزایش جذب سطحی بور به دنبال افزایش قدرت

شد. تعلیق حاصل در دمای یخچال ( $0-4^{\circ}\text{C}$ ) و بدور از نور ذخیره گردید.

در آزمایش‌های جذب سطحی، حجم معینی از تعلیق کائولینایت در بطری‌های پلاستیکی 30 میلی‌لیتری ریخته شد. سپس به تیوب‌ها حجم‌های معینی از محلول 9250/7 میکرو مولار (معادل با 100 میلی‌گرم در لیتر) بور از محلول اسید بوریک اضافه گردید. قدرت یونی نمونه‌ها، با استفاده از محلول  $\text{NaNO}_3$  یک مولار تنظیم شد. به منظور تنظیم pH نمونه‌ها، حجم معینی اسید ( $\text{HNO}_3$ ) یا باز ( $\text{NaOH}$ ) 0/1 مولار به نمونه‌ها اضافه و در نهایت حجم نهایی تعلیق‌ها با آب مقطر به 20 میلی‌لیتر رسانده شد. به منظور جلوگیری از انحلال دی‌اکسید کربن و در نتیجه آلودگی تعلیق‌ها، کلیه مراحل آزمایش در اتمسفر گاز  $\text{N}_2$  انجام شد. نمونه‌ها به مدت 20 ساعت روی شیکر دورانی با 200 دور در دقیقه و در دمای  $25 \pm 2$  به تعادل رسانده و سپس در 5500 دور در دقیقه و به مدت 20 دقیقه سانتریفیوژ شدند. آنگاه مقداری از محلول صاف رویی جهت اندازه‌گیری‌های بعدی در بطری‌های پلاستیکی ریخته شد. در باقی‌مانده تعلیق، بعد از مخلوط کردن مجدد، pH تعادلی اندازه‌گیری شد.

اثر pH بر جذب سطحی بور، در سه غلظت اولیه 539/3، 925/1 و 1387/6 میکرو مولار بور بررسی شد. همچنین همدمای جذب سطحی بور در سه قدرت یونی 0/01، 0/1 و 0/5 مولار محلول نیترات سدیم اندازه‌گیری شد. اثر غلظت کائولینایت بر جذب سطحی بور نیز در غلظت‌های 5، 10 و 15 گرم در لیتر کائولینایت بررسی شد. غلظت بور در نمونه‌ها به روش آزومتین-H اندازه‌گیری گردید (بینگهام، 1982). بور با آزومتین-H تشکیل کمپلکس زرد رنگ می‌دهد. بعد از تشکیل کمپلکس شدت رنگ محلول‌ها به روش اسپکتروسکوپی در طول موج 420 نانومتر تعیین و میزان جذب سطحی بور (B) از اختلاف بین غلظت اولیه و تعادلی محاسبه گردید.

### نتایج و بحث

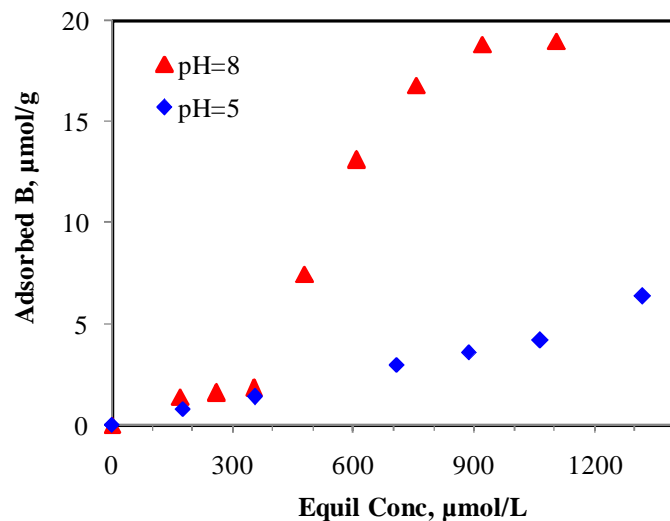
جذب سطحی بور روی کائولینایت تابعی از غلظت تعادلی آن در دو pH 5 و 8 در محدوده‌ی غلظت تعادلی صفر تا 1319/3 میکرو مولار اندازه‌گیری گردید. نتایج حاصل از این آزمایش در شکل 1 نشان داده شده است. داده‌های آزمایشی نشان می‌دهد که مقدار جذب سطحی بور در دو pH 5 و 8 بسیار متفاوت است، ولی رفتار کلی آن تقریباً مشابه می‌باشد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود در غلظت‌های پایین روند جذب سطحی و مقدار آن در دو pH 5 و 8 تقریباً مشابه است،

لیکن با افزایش غلظت تعادلی میزان جذب سطحی بور متفاوت می‌شود که می‌توان آن را به تفاوت در pH نمونه‌ها نسبت داد، به طوری که با افزایش pH میزان حداکثر جذب سطحی افزایش پیدا می‌کند. حداکثر جذب سطحی بور در pH 5 کمتر از حداکثر جذب سطحی آن در pH 8 می‌باشد. این تفاوت در جذب سطحی بیانگر آن است که با افزایش pH جذب سطحی بور افزایش می‌یابد. بررسی جذب سطحی بور روی کانی رس (گل‌دبرگ و همکاران، 2005)، اکسید آهن (گئوتایت) (گلی و همکاران، 2011) و کانی کلسایت (مجیدی و همکاران، 1389) نیز نشان داده است که جذب سطحی بور با افزایش pH افزایش می‌یابد و در pH حدود 8-10، بسته به نوع کانی، به حداکثر مقدار می‌رسد. این نوع رفتار جذب سطحی بور روی کانی‌های مختلف به دلیل ساز و کار جذب سطحی آن است. بدین صورت که با افزایش pH گونه مولکولی اسید بوریک در فاز محلول به گونه یونی بورات تغییر می‌کند، بنابراین تغییر گونه‌ها در فاز محلول، موجب تغییر در ساز و کار جذب سطحی می‌شود. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود در هر دو pH 5 و 8 با افزایش غلظت تعادلی بور مقدار جذب سطحی آن ابتدا با شیب کم افزایش یافته، سپس شیب بیشتر شده و نهایتاً به مقدار نسبتاً ثابتی میل کرده است، این مقدار بیانگر حداکثر مقدار جذب سطحی بور در pHهای 5 و 8 می‌باشد.

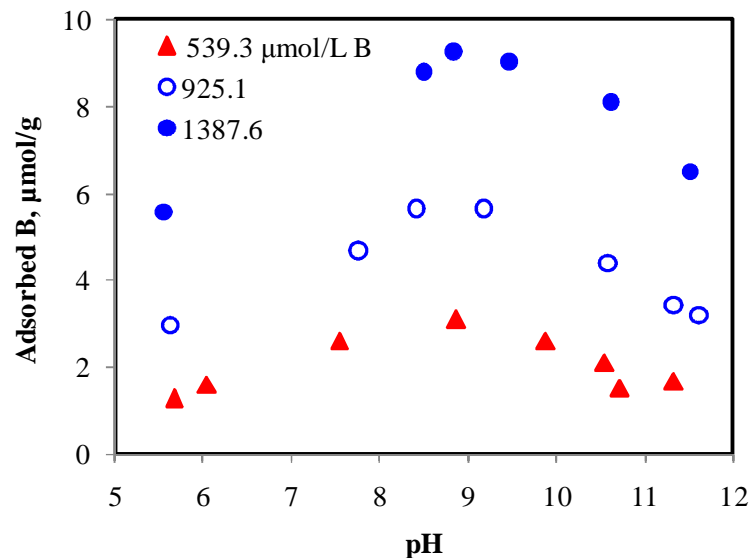
همدمای جذب سطحی بور تابعی از pH، در سه غلظت اولیه 539/3، 925/1 و 1387/6 میکرو مولار بور در شکل 2 نشان داده شده است. داده‌ها نشان می‌دهد که در هر سه غلظت اولیه‌ی بور با افزایش pH تا حدود 9 مقدار جذب سطحی بور افزایش یافته تا به یک مقدار حداکثر رسیده و سپس با بالا رفتن مجدد pH مقدار آن کاهش می‌یابد. همان‌طور که ذکر شد، بخشی از این نوع رفتار جذب سطحی بور ناشی از تغییر در توزیع گونه‌های آن در فاز محلول و بخشی دیگر ناشی از افزایش بار منفی لبه کانی با افزایش pH است. علاوه بر این، در این شکل مشاهده می‌شود که در یک pH ثابت با افزایش غلظت اولیه بور به ترتیب از 539/3 به 925/1 و به 1387/6 میکرو مولار مقدار جذب سطحی آن افزایش پیدا می‌کند. این امر بیان‌کننده رابطه مستقیم مقدار غلظت اولیه بور و میزان جذب سطحی آن می‌باشد، همانند آنچه در همدمای جذب سطحی در شکل 1 نشان داده شد. به عبارت دیگر با افزایش غلظت اولیه بور در محلول و به دنبال آن تماس بیشتر یون‌ها با سطح جاذب مقدار جذب سطحی نیز افزایش پیدا می‌کند. گل‌دبرگ و گلابیک (1986) با بررسی جذب سطحی بور تابعی از pH روی

سطحی در کانی کائولینایت با خاصیت کریستالی ضعیف-تر، بیشتر بوده است (گلدبرگ و گلابیک، 1986).

سه نمونه کانی کائولینایت حداکثر مقدار جذب سطحی را برای هر سه کانی در محدوده‌ی pH 8 تا 9 به دست آوردند. با وجود شباهت بسیاری که در منحنی‌های جذب سطحی این کانی‌ها وجود داشته، لیکن مقدار جذب



شکل 1- همدماهای جذب سطحی بور تابعی از غلظت تعادلی آن در دو pH 5 و، قدرت یونی 0/01 مولار نیترات سدیم و غلظت 10 گرم در لیتر کائولینایت



شکل 2- همدماهای جذب سطحی بور تابعی از pH در سه غلظت اولیه‌ی 539/3، 925/1 و 1387/6 میکرو مولار بور، قدرت یونی 0/01 مولار نیترات سدیم و غلظت 10 گرم در لیتر کائولینایت

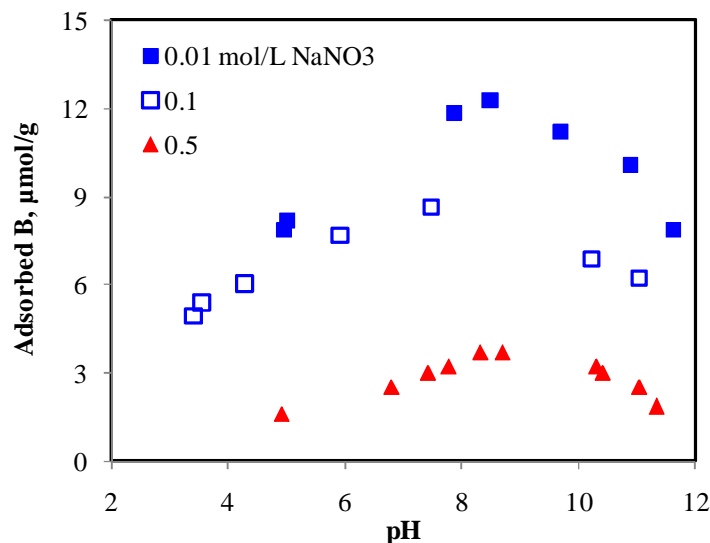
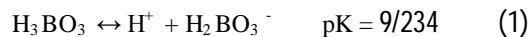
اولیه‌ی 1387/6 میکرو مولار بور، در حدود 10 میکرو مول بر گرم کائولینایت است که بسیار کمتر از ماکزیمم جذب سطحی اندازگیری شده در همدماهای جذب سطحی ارائه شده در شکل 1 است. دلیل این تفاوت در واقع ناشی از غلظت اولیه‌ی کمتر بور در این آزمایش

همان‌طور که در بررسی همدمای جذب سطحی بور (شکل 1) نیز نشان داده شد با افزایش pH میزان جذب سطحی بور افزایش می‌یابد. اگرچه داده‌های شکل 2 ماکزیمم جذب سطحی بور را در pH حدود 9 نشان می‌دهد، اما ماکزیمم مقدار جذب سطحی شده در غلظت

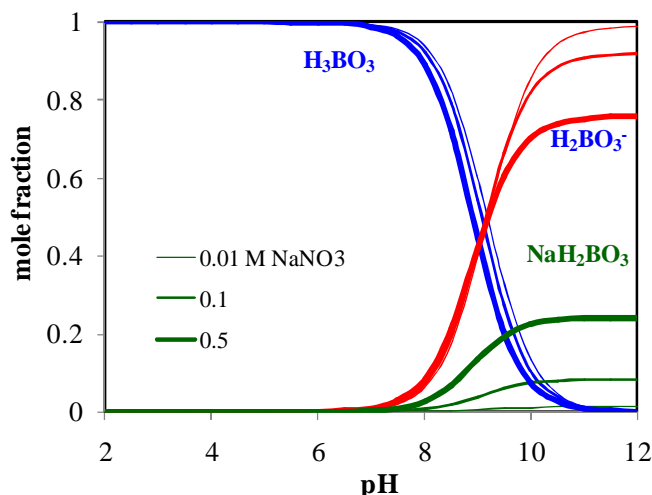
البته تفکیک اسید بوریک و تشکیل یون بورات از pH های اسیدی شروع می‌شود، ولی غلظت گونه‌ی بورات در pH های اسیدی و خشی بسیار کم است. در محلول خالص اسید بوریک و در pH های کوچکتر از 7 غلظت یون بورات کمتر از 1% کل بور در فاز محلول است. لیکن، در  $pH > 7$  مقدار یون بورات به سرعت زیاد می‌شود، به طوری که در  $pH 8$  به 6% و در  $pH 9$  به 37% و در  $pH = pK_a = 9/234$  به 50% می‌رسد. در صورت افزایش یک الکتروولیت نظیر نیترات سدیم به محلول حاوی اسیدبوریک، کاتیون الکتروولیت با آنیون بورات واکنش می‌دهد (معادله‌ی 2).

است. به عبارت دیگر، چنانچه غلظت اولیه‌ی بور 2775/2 میکرو مولار انتخاب می‌شود، یعنی مشابه با داده‌های شکل 1، آن وقت انتظار می‌رفت که در حداکثر جذب سطحی، غلظتی در حدود 20 میکرومول بر گرم (مشابه شکل 1) به دست آید. البته در چنین حالتی، احتمالاً ماکزیمم جذب سطحی بزرگ‌تر از 20 میکرومول در گرم می‌شد چرا که pH تعادلی در شکل 1 برابر 8 است، در حالی که ماکزیمم جذب سطحی طبق داده‌های شکل 2 در pH حدود 9 می‌باشد. در نتیجه می‌توان انتظار داشت که ماکزیمم جذب سطحی بور در pH حدود 9 حدود 22 تا 24 میکرو مول بر گرم کائولینایت باشد.

علاوه بر pH، قدرت‌یونی محلول نیز از عوامل بسیار مهم در میزان جذب سطحی بور می‌باشد. همانطور که در شکل 3 مشاهده می‌شود داده‌های آزمایشی نشان می‌دهند که با افزایش قدرت‌یونی، میزان جذب سطحی بور روی کائولینایت کاهش می‌یابد. اثر منفی قدرت‌یونی بر میزان جذب سطحی بور را می‌توان با بررسی اثر pH و قدرت‌یونی محلول بر رفتار باری کائولینایت و بر توزیع گونه‌های بور در فاز محلول (شکل 4) توضیح داد. محاسبه توزیع گونه‌های بور در فاز محلول تابعی از pH و قدرت‌یونی مشابه با شرایط آزمایشی شکل 3 نشان داد که در  $pH < pK_a$  یعنی در pH های کوچکتر از 9/234 گونه  $H_3BO_3$  اصلی بور در فاز محلول است که طبق معادله‌ی 1 به یون بورات تفکیک می‌شود.



شکل 3- جذب سطحی بور تابعی از pH تعادلی در سه قدرت‌یونی 0/01، 0/1 و 0/5 مولار نیترات سدیم در غلظت اولیه 740/05 میکرو مولار بور و 10 گرم در لیتر کائولینایت



شکل 4- توزیع گونه‌های بور محلول تحت تأثیر تغییر pH و غلظت نیترات سدیم

نقطه‌ی صفر بار الکتریکی لبه کائولینایت در pH حدود خنثی می‌باشد. واکنش اکسیژن‌های لبه کانی با یون پروتون موجب می‌شود که در  $\text{pH} < \text{PZC}$  لبه‌ی کانی دارای بار مثبت و در  $\text{pH} > \text{PZC}$  دارای خالص بار منفی باشد. افزایش قدرت یونی در  $\text{pH} < \text{PZC}$  موجب افزایش بار مثبت و در  $\text{pH} > \text{PZC}$  موجب افزایش بار منفی روی لبه‌ی کانی می‌شود. بنابراین، در محدوده‌ای از pH که جذب سطحی بور روی کائولینایت اندازگیری شده است، خالص بار کانی منفی است. افزایش قدرت یونی به دلیل افزایش بار منفی روی لبه‌ی کانی، روی جذب سطحی اثر منفی دارد. از طرف دیگر، به دلیل کاهش ضخامت لایه‌ی دو گانه اثر مثبت می‌گذارد. اثر منفی دیگر ناشی از افزایش قدرت یونی، به دلیل رقابت آنیون نیترات با آنیون بورات می‌باشد، که باعث کاهش جذب سطحی بور می‌گردد.

اثر غلظت کائولینایت و یا اثر نسبت فاز جامد به فاز محلول بر همدماهای جذب سطحی بور نیز در غلظت 925/1 میکرو مولار بور تابعی از pH اندازه‌گیری گردید که نتایج آن در شکل 5 نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش pH میزان جذب سطحی بور در هر سه غلظت کائولینایت افزایش یافته و در pH تقریباً 8 به حداکثر مقدار خود رسیده و با افزایش دوباره pH کاهش پیدا کرده است. این در حالی است که با افزایش غلظت کائولینایت به ترتیب از 5 به 10 و 15 گرم در لیتر از میزان جذب سطحی بور به ازای واحد وزن کائولینایت کاسته شده است. کاهش در جذب سطحی بور ناشی از افزایش غلظت کائولینایت در غلظت ثابت بور اولیه می‌باشد.



این واکنش منجر به تفکیک بیشتر اسید بوریک می‌شود. افزایش غلظت نیترات سدیم موجب افزایش بیشتر غلظت  $\text{NaH}_2\text{BO}_3$  می‌شود. به عبارت دیگر در  $\text{pH} > \text{pK}_a$  با افزایش غلظت الکترولیت از گونه  $\text{H}_2\text{BO}_3^-$  کاسته می‌شود و به گونه  $\text{NaH}_2\text{BO}_3$  افزوده می‌شود. در  $\text{pH} > 10/5$  غلظت این دو گونه مستقل از تغییرات pH می‌شود. توزیع گونه‌های بور محلول تحت تأثیر تغییر pH و غلظت نیترات سدیم در شکل 4 ارائه شده است.

همان‌طور که ذکر شد علاوه بر توزیع گونه‌های بور که تحت تأثیر pH و قدرت یونی محلول قرار می‌گیرد، رفتار باری کانی نیز متأثر از تغییرات شرایط محیطی است. کائولینایت دارای مقداری بار منفی روی صفحات جانبی است که منشاء آن عمدتاً جایگزینی یون  $\text{Al}^{3+}$  به جای  $\text{Si}^{4+}$  در ورقه‌ی تتراهدرال کانی است. بار منفی صفحات جانبی ثابت و مستقل از تغییر pH و قدرت یونی محلول می‌باشد (معادله‌ی 3). بار تولید شده به طور مساوی بین اکسیژن‌های تتراهدرال توزیع می‌شود.

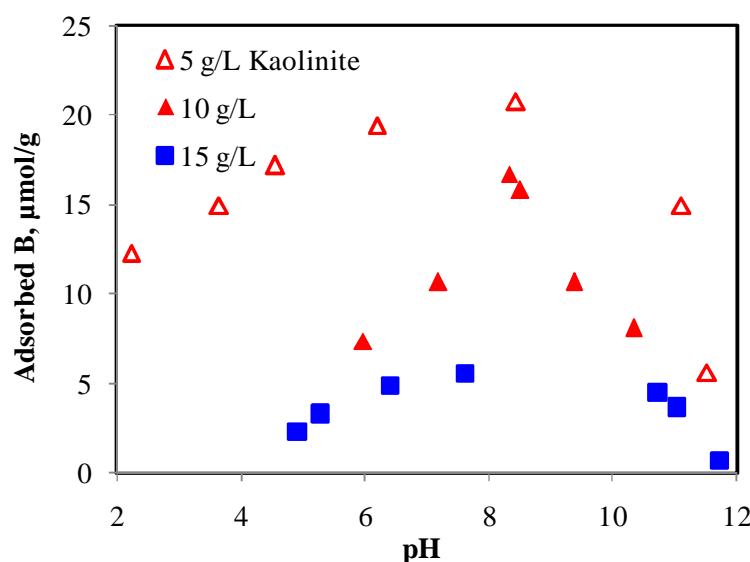


بخشی دیگر از بار کائولینایت روی لبه‌ی کانی تشکیل می‌شود، یعنی جایی که اکسیژن سطحی گروه‌های  $\text{SiO}^-$  و  $\text{AlOH}^{-0/5}$  به دلیل باردار بودن، به شدت با یون پروتون و سایر کاتیون‌های فاز محلول واکنش می‌دهد. در pH های اسیدی پروتونه شدن گروه آلومینول منشاء تشکیل بار مثبت روی لبه‌ی کانی می‌باشد. هر دو گروه آلومینول و سیلانول در pH های متوسط و بازی عمدتاً دارای بار منفی می‌باشند.

## نتیجه‌گیری

سطحی بور روی کائولینیت کاسته شد که این رفتار به اثر pH و قدرت یونی محلول بر رفتار باری کائولینیت و بر توزیع گونه‌های بور در فاز محلول نسبت داده شد. در مجموع نتایج نشان داد کانی‌های رس نقش مهمی در کنترل غلظت بور در فاز محلول و در نتیجه بر قابلیت دسترسی آن برای گیاهان دارند. قابلیت دسترسی بور با افزایش pH کاهش و با افزایش غلظت املاح افزایش می‌یابد. اثر منفی قدرت یونی محلول بر جذب سطحی بور، یکی از دلایل غلظت بالای بور در خاک‌های شور است.

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که همدم‌های جذب سطحی بور تابعی از غلظت تعادلی از مدل همدمای S شکل و همدمای آن تابعی از pH از مدل سهمی شکل پیروی می‌کند. بدین گونه که با افزایش غلظت تعادلی بور جذب سطحی آن توسط کائولینیت ابتدا با شیب کم و سپس با شیب زیاد افزایش یافت، و نهایتاً به مقدار نسبتاً ثابتی میل کرد که بیانگر حداکثر مقدار جذب سطحی بور بود. حداکثر جذب سطحی بور با افزایش pH تا حدود 9 افزایش و سپس کاهش نشان داد. همچنین با افزایش قدرت یونی محلول، از میزان جذب



شکل 5- جذب سطحی بور تابعی از pH تعادلی در سه غلظت 5، 10 و 15 گرم در لیتر کائولینیت، قدرت یونی 0/01 مولار نیترات سدیم و غلظت اولیه ی 925/06 میکرو مولار بور.

## فهرست منابع:

1. حسینی، ا.، راهنمایی، ر.، ملکوتی، م. ج.، 1389. اثر کربنات کلسیم و قدرت یونی بر جذب سطحی بور در خاک‌های آهکی. مجله پژوهش‌های خاک، جلد 24 شماره 2.
2. Bahramian, A. R., M. kokabi, M. H. Behshty. and M. H. Navid famili. 2007. Thermal Degradation Process of Resol Type Phenolic Matrix/Kaolinite Layered Silicate Nanocomposite Iranian Polymer Journal. 16(6):375-387.
3. Bingham, F.T. 1982. Boron In: Page, A.L. (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 2. ASA, SSSA Inc., Madison, WI, pp. 431-447.
4. Bolt, G. H. 1982. Soil Chemistry. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford-New York.
5. Elrashidi, M. A., and G. A. Oconnor. 1982. Boron Sorption and Desorption in Soils. Soil Science Society of America Journal. 46:27-31.
6. Goldberg, S., D. L. Corwin, P. J. Shouse. and D. L. Suarez. 2005. Prediction of boron adsorption by field samples of divers texture. Soil Science Society of America Journal 69:1379-1388.

7. Goldberg, S., H. S. Forster. and E. L. Heick. 1993. Boron Adsorption Mechanisms on Oxides, Clay Minerals, and Soils Inferred from Ionic Strength Effects. *Soil Science Society of America Journal*. 57:704-708.
8. Goldberg, S., and R. A. Glaubig. 1986. Boron Adsorption and Silicon Release by the Clay Minerals Kaolinite, Montmorillonite and Illite. *soil science Society of America Journal*. 50:1442-1448.
9. Goli, E., R. Rahnemaie, T. Hiemstra. and M. J. Malakouti. 2011. The interaction of boron with goethite: Experiments and CD-MUSIC modeling. *Chemosphere*. 82(10):1475-1481.
10. Heidmann, I., I. Christl, C. Leu. and R. Kretzschmar. 2005. Competitive sorption of protons and metal cations onto kaolinite: experiments and modeling. *Journal of Colloid and Interface Science*. 282(2):270-282.
11. Herwig, U., E. Klumpp, H.-D. Narres. and M. J. Schwuger. 2001. Physicochemical interactions between atrazine and clay minerals. *Applied Clay Science*. 18(5-6):211-222.
12. Jun, L., X. Shuping. and G. Shiyang. 1995. FT-IR and Raman spectroscopic study of hydrated borates. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 51(4):519-532.
13. Keren, R., and U. Mezuman. 1981. Boron adsorption by clay minerals using a phenomenological equation. *Clays and Clay Mineral*. 29( 3):198-204.
14. Keren, R., and D. Sparks. 1994. Effect of pH and ionic strength on boron adsorption by pyrophyllite. *Soil Science Society of America Journal*. 58(1095-1100).
15. Kosmulski, M. 2009. pH-dependent surface charging and points of zero charge. 5. Update and new approach. *Journal of Colloid and Interface Science*. 337:439-448.
16. Kretzschmar, R., H. Holthoff. and H. Sticher. 1998. Influence of pH and Humic Acid on Congulation Kinetics of Kaolinite: A Dynamic Light Scattering Study. *Journal of colloid and interface science*. 202:95-103.
17. Li, H., B. J. Teppen, D. A. Laird, C. T. Jonhston. and S. A. Boyd. 2006. Effects of increasing potassium chloride and calcium chloride ionic strength on pesticide sorption by potassium- and calcium-smectite. *Soil Science Society of America Journal*. 70(6):1889-1895.
18. Majidi, A., R. Rahnemaie, A. Hassani. and M. J. Malakouti. 2010. Adsorption and desorption processes of boron in calcareous soils. *Chemosphere*. 80(7):733-739.
19. Zhao, X.-K., and G.-P. Yang. 2002. Study on the sorption of 2-naphthol on marine sediments. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 211 (2-3):259-266.