



19th Iranian Soil Science Congress
16-18 September, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۴۰۴ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴



مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



بررسی اثر کاربرد لئوناردیت بر فرآیندهای همدمای جذب و واجذب بور در خاک‌های

پیرامون دریاچه ارومیه

ریحانه عباسی عیسی‌کان^۱، بهنام دولتی^{۲*}، ابراهیم سپهر^۳، مرضیه پیری^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۲- نویسنده مسئول، استادیار، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه:

b.dovlati@urmia.ac.ir

۳- استاد، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۴- استادیار، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، بخش تحقیقات خاک و آب، ارومیه، ایران.

چکیده

حلالیت بور در خاک تحت تأثیر فرآیندهای جذب و واجذب قرار دارد و تغییرات آن می‌تواند یکی از عوامل اصلی بروز سمیت بور در خاک محسوب شود. در این پژوهش برای ارزیابی نقش لئوناردیت، دو نمونه خاک انتخاب و تیمارهای صفر، ۲ و ۴ درصد وزنی لئوناردیت همراه با ۹ سطح غلظتی بور (۰ تا ۱۲۰ میلی‌گرم بر لیتر) در حضور محلول سدیم کلرید ۰/۰۳ مولار بررسی شد. واجذب بور نیز با همین محلول تعیین گردید. داده‌های حاصل با مدل‌های لانگمویر، فروندلیچ، تمکین و دوبینین-رادوشکویچ برازش داده شد. یافته‌ها نشان داد افزودن لئوناردیت سبب کاهش شاخص‌های جذب نظیر ظرفیت تک‌لایه‌ای (q_{max})، ضریب انرژی لانگمویر (K_L) و ظرفیت دوبینین-رادوشکویچ (q_s) گردید. بیشترین افت q_{max} در تیمار ۴ درصد خاک ۲ مشاهده شد. همچنین مقادیر انرژی آزاد جذب (E) کمتر از ۸ کیلوژول بر مول محاسبه گردید که بیانگر غالب بودن جذب فیزیکی بور است. از سوی دیگر، کاربرد لئوناردیت به افزایش قابل توجه واجذب منجر شد و شدت این اثر در سطح ۴ درصد بیشتر از سطح ۲ درصد بود. بنابراین مصرف لئوناردیت ممکن است سبب افزایش تجمع بور و بروز سمیت آن در خاک‌های پیرامون دریاچه ارومیه گردد.

واژگان کلیدی: بور، لئوناردیت، همدمای جذب، واجذب

مقدمه

بور یکی از عناصر کم‌مصرف و ضروری برای گیاهان است که دارای قابلیت نفوذ بالایی در خاک است و می‌تواند از لایه‌های مختلف خاک عبور کند و میزان جذب آن به غلظت بور در محلول خاک وابسته است (Öcal et al., 2024). سطح این عنصر در محلول خاک عمدتاً به‌وسیله فرآیندهای تبادل و رهاسازی آن از سطوح کانی‌ها کنترل می‌شود. همچنین حد فاصل آستانه کمبود و سمیت بور در خاک برای گیاهان نسبت به تمام عناصر غذایی ضروری دیگر کمتر می‌باشد (Bai et al., 2023). منبع اصلی آزادسازی بور در خاک، تجزیه مواد معدنی و آلی در جریان معدنی‌شدن است. علاوه بر این، هنگام افزودن کودهای حاوی بور، بخشی از عنصر در محلول خاک باقی می‌ماند و قسمتی دیگر به سطح ذرات خاک متصل می‌شود (Gökmen et al., 2022). قابلیت دسترسی بور به‌شدت تحت تأثیر ویژگی‌های خاک، میزان ماده آلی، شرایط اقلیمی و pH قرار دارد. در این میان، ماده آلی یکی از عوامل کلیدی است که می‌تواند تحرک و پویایی عناصر غذایی از جمله بور را تحت تأثیر قرار دهد (Kumar et al., 2021).



19th Iranian Soil Science Congress
16-18 September, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴



مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور، به‌ویژه در خاک‌های شور و کم‌آب، سمیت بور به‌طور شایع مشاهده می‌شود. همچنین در برخی باغ‌های سیب استان آذربایجان غربی، به‌ویژه در حوالی دریاچه ارومیه، علائم ناشی از سمیت بور گزارش شده است (Majidi, 2010). از این رو، درک فرآیندهای مربوط به جذب و واجذب بور در خاک، برای مدیریت میزان دسترسی زیستی این عنصر اهمیت زیادی دارد.

لئوناردیت، که از دگرگونی زغال‌سنگ‌های نرم (لیگنیت) حاصل می‌شود، حاوی گروه‌های عاملی متنوعی نظیر کربوکسیل، هیدروکسیل و کربونیل است. به دلیل در دسترس بودن فراوان، هزینه پایین، قابلیت تجزیه زیستی و سازگاری با محیط زیست، این ماده به‌عنوان یک جاذب مؤثر برای عناصر غذایی و آلاینده‌ها مورد توجه قرار گرفته است. جذب بور توسط لئوناردیت می‌تواند از مسیرهای مختلفی شامل جذب فیزیکی و شیمیایی، ایجاد پیوند هیدروژنی و تبادل یونی رخ دهد که شدت هر یک وابسته به pH و شرایط شیمیایی محیط است. علاوه بر این، لئوناردیت با ترکیبات خاک تعامل دارد و از این طریق می‌تواند به بهبود حاصلخیزی و تعدیل غلظت بور کمک کند. این ماده همچنین توانایی آزادسازی بور را دارد و در حفظ تعادل عناصر غذایی نقش مؤثری ایفا می‌کند (Tlili et al., 2024).

در سال‌های اخیر، جاذب‌های آلی به دلیل کارایی بالا در حذف آلاینده‌ها از محیط‌های خاکی و آبی مورد توجه گسترده قرار گرفته‌اند؛ برای نمونه، اسید هیومیک برای حذف فلزاتی مانند کادمیوم، وانادیوم و رنگ‌های صنعتی مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین لئوناردیت به‌عنوان یک جاذب طبیعی در جذب عناصر مختلف از جمله اورانیوم، کروم و روی مورد بررسی قرار گرفته است.

با وجود ویژگی‌های مطلوب لئوناردیت، تحقیقات کمی به بررسی تأثیر غلظت‌های متفاوت آن بر فرآیندهای جذب و آزادسازی بور در خاک‌های آهکی اختصاص یافته است. بنابراین، هدف اصلی این مطالعه بررسی نقش سطوح مختلف لئوناردیت بر رفتار بور در این نوع خاک‌ها و تحلیل پارامترهای مربوط به آن با بهره‌گیری از مدل‌های ایزوترم می‌باشد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی اثرات لئوناردیت بر روی جذب و واجذب بور، ۲ نمونه خاک از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری و به فاصله ۲/۵۰ کیلومتری، از خاک‌های حاشیه دریاچه ارومیه برداشت و بعد از هوا خشک‌کردن جهت آماده‌سازی از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. برخی از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی نظیر بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1979)، اسیدیته خاک (pH) به‌وسیله دستگاه pH متر و هدایت الکتریکی (EC) در عصاره ۱:۵ خاک به آب (Thomas, 1996)، مقدار کربن آلی به روش اکسیداسیون تر والکی و بلک (Walkley and Black, 1934)، ظرفیت تبادل کاتیونی (Bower et al., 1952) و درصد کربنات کلسیم معادل خاک به روش تیتراسیون با اسید (Rayment and Higginson, 1992) اندازه‌گیری شد.

هم‌دمای جذب بور

لئوناردیت از شرکت Biotar ترکیه تهیه شد و برخی از ویژگی‌های لئوناردیت در جدول ۱ نشان داده شده است. هم‌دمای جذب و واجذب بور در خاک‌های مورد مطالعه در حضور لئوناردیت (L) در سه سطح صفر (شاهد L₀)، ۲ درصد (L₂) و ۴ درصد (L₄) مطالعه گردید. بطوریکه مقدار ۲/۵ گرم خاک الک شده با احتساب ۰، ۲ و ۴ درصد لئوناردیت در داخل فالکون ریخته شدند.



مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



سپس به مقدار ۲۵ میلی لیتر محلول بور از منبع اسید بوریک در غلظت‌های صفر-۵-۱۰-۱۵-۲۰-۴۰-۶۰-۹۰-۱۲۰ میلی گرم در لیتر با محلول زمینه سدیم کلرید ۰/۰۳ مولار در دو تکرار و در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد انجام شد.

جدول ۱. ویژگی‌های لئوناردیت مورد استفاده

میزان فلزات سنگین	رطوبت	CEC	اندازه ذرات	سطح ویژه	پتاسیم	فسفات	نیتروژن	هیومیک و فولیویک اسید	ماده آلی
	%	cmol ⁺ kg ⁻¹	mm	m ² g ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	%	%	%
مقدار کم	۱۶	۶۷	<۰/۲	۱۷/۵۰	۱۳۵	۲۴	۱/۷۹	۵۰/۵	۵۴/۵

نمونه‌ها با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۲۰ ساعت (برای اطمینان از رسیدن شرایط تعادل) در شیکر تکان داده شدند سپس نمونه‌ها سانتریفیوژ و محلول رویی پس از عبور از کاغذ صافی جمع‌آوری شد. غلظت بور در محلول رویی با استفاده از روش رنگ سنجی آزومتین-H (Keren, 1996) در طول موج ۴۲۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. داده‌های جذبی بور با استفاده از مدل‌های لانگمویر (رابطه ۱)، فروندلیچ (رابطه ۲)، تمکین (رابطه ۳) و دوبینین - رادوشکوچ (رابطه ۴) با نرم‌افزار Sigma Plot 14.1 برازش داده شدند.

$$q_e = \frac{q_{max} k_L C_e}{1 + k_L C_e} \quad (1)$$

$$q_e = k_F C_e^{1/n} \quad (2)$$

$$q_e = k_T \ln(A_T C_e) \text{ and } k_T = \frac{RT}{b_T} \quad (3)$$

$$q_e = q_s \exp(-k_{DR} \varepsilon^2) \\ \varepsilon = RT \ln(1 + 1/C_e) \\ E = 1/\sqrt{2k_{DR}} \quad (4)$$

q_e وزن جذب شونده در واحد وزن جذب کننده ($mg\ g^{-1}$)، C_e غلظت تعادلی جذب شونده ($mg\ L^{-1}$)، K_L ضریب لانگمویر و نشانگر قدرت اتصال جذب شونده به ماده جاذب و q_{max} حداکثر جذب تک لایه‌ای لانگمویر ($mg\ g^{-1}$)، K_F و n ضرایب معادله فروندلیچ که به ترتیب نمایانگر ظرفیت و شدت جذب می‌باشند، q_s ظرفیت اشباع جذب ($mg\ g^{-1}$)، k_{DR} ضریب مربوط به متوسط انرژی آزاد جذب (mol^2/J^2) و ε پتانسیل پلانی ($J\ mol^{-1}$) که مقدار آن با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌شود، T و R به ترتیب دمای مطلق (۲۹۲ کلوین) و ثابت جهانی گاز $8/314\ (J\ mol^{-1}\ K^{-1})$ طبق این مدل تغییرات $\ln q_e$ در مقابل ε^2 کشیده و براساس شیب خط حاصل از رگرسیون خطی داده‌ها ضریب k_{DR} قابل تعیین است و بدین ترتیب متوسط انرژی آزاد جذب (E) با کمک رابطه ۴ قابل تخمین است و A_T و k_T ثابت‌های مدل تمکین می‌باشد.

هم‌دمای واجذب بور

جهت خارج نمودن بور محلول و جذب نشده در خاک‌های باقی‌مانده از مرحله جذب سه بار توسط آب مقطر شستشو داده شد سپس ۲۵ میلی لیتر محلول ۰/۰۳ مولار NaCl به خاک‌های داخل لوله سانتریفیوژ اضافه گردید (Majidi et al., 2010). نمونه‌ها به مدت ۲۰ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد در شیکر تکان داده شده و سپس محلول رویی جدا و از کاغذ صافی عبور



مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



داده شد. غلظت بور با استفاده از روش رنگ سنجی آزومتین-H (Keren, 1996) در طول موج ۴۲۰ نانومتر به وسیله‌ی دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد.

نتایج و بحث

نتایج برخی از ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۲ ذکر شده است. دامنه اسیدیته خاک‌ها بین ۷/۸۵-۷/۸۴، مقدار کربن آلی (OC) و کربنات کلسیم معادل (CCE) خاک‌ها به ترتیب بین ۰/۷۵-۰/۲۴ درصد و ۲۲/۵ درصد قرار داشتند. دامنه ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به ترتیب ۸/۴۷-۱۹/۵۰ میلی‌اکی والان بر ۱۰۰ گرم خاک به دست آمد. از آنجایی که آهک، مقدار رس و ظرفیت تبدالی کاتیون از پارامترهای مهم در فرایند جذب و واجذب هستند لذا انتظار می‌رود مقادیر جذب و واجذب بور در خاک‌ها متفاوت باشد. همچنین دامنه شوری (EC) خاک‌های مورد مطالعه بین ۱/۷-۰/۸۰ دسی زیمنس بر متر بود. مقدار بور قابل استفاده خاک‌های مورد مطالعه در محدوده ۱/۴۱ - ۳/۷۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم قرار گرفته است (جدول ۲).

جدول ۲. ویژگی‌های خاک‌های مورد مطالعه

شماره خاک	Texture	CEC (cmol+ kg ⁻¹)	clay %	CCE %	OC %	pH	EC (dS m ⁻¹)	B (mg kg ⁻¹)
۱	Clay Loam	۱۹/۵۰	۳۰/۸	۲۲/۵	۰/۷۵	۷/۸۵	۱/۷	۳/۷۶
۴	Sandy Loam	۸/۴۷	۱۵/۲	۲۲/۵	۰/۲۴	۷/۸۴	۰/۸	۱/۴۱

EC، pH، در عصاره گل اشباع، CCE: کربنات کلسیم معادل، CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی

هم‌دمای جذب بور

داده‌های جذب بور تحت تأثیر لئوناردیت بر معادلات لانگمویر، فروندلیچ، دوبیین - رادوشکوویچ و تمکین برآزش داده شدند. نتایج حاصل از بررسی ضرایب رگرسیونی (R^2) لانگمویر ($R^2=0/89-0/97$)، فروندلیچ ($R^2=0/75-0/94$)، تمکین ($R^2=0/98-0/91$)، دوبیین-رادوشکوویچ ($R^2=0/93-0/98$) نشان داد که این مدل‌ها واکنش جذب بور را می‌توانند به خوبی توصیف کنند، از این میان مدل‌های دوبیین - رادوشکوویچ و لانگمویر با ضریب تبیین بیشتر برآزش خوبی به نسبت مدل‌های فروندلیچ و تمکین را نشان دادند (جدول ۳).

جدول ۳. پارامترهای معادلات لانگمویر، فروندلیچ، تمکین، دوبیین - رادوشکوویچ در سطوح مختلف لئوناردیت

soil	L	لانگمویر				فروندلیچ				تمکین				دوبیین-رادوشکوویچ					
		K_L (L mg ⁻¹)	q_{max} (mg g ⁻¹)	R^2	R_L	SE	K_F (mg ^{1-1/n}) $L^{1/n}/k$ (g)	1/n	R^2	SE	b_T (J mol ⁻¹)	A_T (L g ⁻¹)	R^2	SE	q_s (mg g ⁻¹)	E (KJ/mol)	K_{DR} (mol ² kJ ⁻²)	R^2	SE
۱	L0	۰/۱۰	۱۰۷۱	۰/۹۶	۰/۳۷		۱۲۸	۲/۰۵	۰/۸۸		۱۳/۴	۱/۴۰	۰/۹۴		۶۹۹	۱/۶۲	۰/۰	۰/۹۸	
	L2	۰/۰۶	۹۵۰	۰/۹۷	۰/۴۴	۵۰	۹۱/۰	۱/۸۱	۰/۹۲	۸۴	۱۳/۰	۰/۸۹	۰/۹۷	۵۶	۶۴۲	۱/۴۱	۰/۰	۰/۹۵	۶۰
	L4	۰/۰۳	۹۳۲	۰/۹۷	۰/۵۴		۶۰/۹	۱/۵۶	۰/۹۴		۱۲/۱	۰/۵۶	۰/۹۸		۶۴۳	۱/۱۴	۰/۰	۰/۹۳	
۲	L0	۰/۱۱	۸۳۷	۰/۹۳	۰/۳۶		۱۳۱	۲/۲۷	۰/۸۰		۱۳/۶	۱/۱۵	۰/۹۳		۵۸۳	۱/۵۶	۰/۰	۰/۹۸	
	L2	۰/۰۹	۷۴۸	۰/۹۳	۰/۳۹	۷۳	۱۰۵	۲/۳۱	۰/۸۰	۱۰۶	۱۴/۴	۰/۸۴	۰/۹۴	۷۰	۵۷۲	۱/۴۹	۰/۰	۰/۹۸	۶۸
	L4	۰/۰۸	۶۸۰	۰/۸۹	۰/۴۱		۹۱	۲/۲۳	۰/۷۵		۱۵/۲	۰/۶۸	۰/۹۱		۵۲۲	۱/۳۹	۰/۰	۰/۹۷	

L0: نمونه شاهد (بدون لئوناردیت)، L2: کاربرد ۲ درصد لئوناردیت، L4: کاربرد ۴ درصد لئوناردیت



19th Iranian Soil Science Congress
16-18 September, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴



مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



نتایج نشان داد با افزایش میزان لئوناردیت پارامتر حداکثر جذب تک لایه‌ای (q_{max}) کاهش می‌یابد (جدول ۳)، این روند در کلیه نمونه‌های خاک مشاهده شد، با این حال میزان کاهش در برخی نمونه‌ها چشمگیرتر بود. بطوریکه بیشترین کاهش در مقدار q_{max} با افزودن ۴ درصد لئوناردیت (L_4) در خاک ۲ (با کمترین میزان بور اولیه) ثبت شد، در این تیمار، مقدار q_{max} از ۸۳۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار شاهد (L_0) به ۶۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کاهش یافت. در مقابل، کمترین کاهش در مقدار q_{max} مربوط به خاک ۱ (با بیشترین میزان بور اولیه) بود. در این خاک، مقدار q_{max} از ۱۰۷۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار L_0 به ۹۳۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار L_4 رسید. این مقدار کاهش نشان‌دهنده‌ی پایداری نسبی ظرفیت جذب این خاک در برابر افزایش لئوناردیت است (جدول ۳). نتایج مقدار پارامتر انرژی جذب لانگمویر (K_L) نشان می‌دهد که کاربرد لئوناردیت منجر به افزایش این پارامتر می‌گردد (جدول ۳). براساس ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک‌های مورد مطالعه تفاوت در مقدار جذب بور می‌تواند دلیل تفاوت در مقدار کربنات کلسیم معادل، مقدار بور اولیه و ظرفیت تبادل کاتیونی باشد (جدول ۲). لئوناردیت به دلیل دارا بودن مقادیر بالای ماده آلی، اسید هیومیک و فولویک، می‌تواند با تشکیل کمپلکس با اکسی‌آنیون‌هایی مانند بور، جذب این عنصر را در خاک کاهش دهد (Al-Temimi, 2019). این مواد آلی با پوشش سطح ذرات خاک و اشغال سایت‌های جذب معدنی، دسترسی یون بور به مکان‌های فعال را محدود می‌کنند. همچنین گروه‌های عاملی مانند کربوکسیل و هیدروکسیل با یون بور رقابت کرده و موجب کاهش انرژی جذب آن می‌شوند (Tlili et al., 2024). مطالعات مختلف نشان داده‌اند که ماده آلی هم می‌تواند جذب بور را افزایش دهد و هم کاهش دهد؛ این رفتار دوگانه به نوع، غلظت ترکیبات آلی و شرایط خاک بستگی دارد (Van Eynde et al., 2020). همچنین خاک‌هایی با محتوای بالای رس، کربنات کلسیم، و یون‌هایی مانند کلسیم، منیزیم و سدیم، جذب کمتری از بور نشان داده‌اند (Aboud and Sherif, 2022).

معیار دیگری که در توصیف فرآیند جذب اهمیت ویژه‌ای دارد تعیین پارامترهای ترمودینامیکی جذب است. برای این منظور از رابطه دوبینین-رادشکوویچ استفاده می‌شود. در این معادله سطح جاذب همگن فرض نمی‌شود، بعلاوه در این مدل پتانسیل جذب بر روی سطح جاذب یکسان نبوده و معمولاً از طریق محاسبه متوسط انرژی آزاد جذب (E) برای تعیین ماهیت جذب استفاده می‌شود که به صورت جذب فیزیکی یا شیمیایی است (Nazir, 2020). نتایج نشان داد مقدار انرژی آزاد جذب در حضور لئوناردیت در هر چهار خاک مورد مطالعه کاهش یافت و بیانگر این است که جذب بور از فرآیند فیزیکی پیروی می‌کند، به دلیل اینکه اگر در فرآیند جذب مقدار E بین ۸ تا ۱۶ کیلوژول بر مول باشد، چنین استنباط می‌شود که جذب از فرآیند شیمیایی پیروی می‌کند و در صورتی که مقدار E کمتر از ۸ کیلوژول بر مول است، جذب فیزیکی فرآیند غالب در جذب محسوب می‌شود (Jing et al., 2024) (جدول ۳). نتایج به دست آمده از مدل دوبینین-رادشکوویچ نشان داد که با افزایش میزان لئوناردیت، پارامتر ظرفیت جذب (q_s) در تمامی خاک‌ها کاهش یافت (جدول ۳). بیشترین کاهش مقدار q_s در خاک ۲ (کمترین مقدار بور اولیه و درصد آهک یکسان) به طوری که مقدار q_s از ۵۸۳ میلی‌گرم بر گرم در تیمار L_0 به ۵۲۲ میلی‌گرم بر گرم در تیمار L_4 کاهش یافت. در مقابل، کمترین میزان کاهش q_s در خاک ۱ دیده شد، که دارای بیشترین مقدار بور اولیه و درصد آهک یکسان بود. در این خاک، مقدار q_s از ۶۹۹ میلی‌گرم بر گرم در تیمار L_0 به ۶۴۳ میلی‌گرم بر گرم در تیمار L_4 کاهش یافت. این موضوع می‌تواند ناشی از پوشش سطح ذرات خاک توسط ماده آلی لئوناردیت یا تشکیل کمپلکس‌های آلی-بور باشد که مانع از جذب مستقیم بور توسط سایت‌های معدنی خاک می‌شود (Van Eynde et al., 2020).

هم‌دمای واجذب بور



مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



داده‌های واجذب بوردر خاک‌های مورد مطالعه تحت تأثیر درصدهای مختلف لئوناردیت با مدل لانگمویر ($R^2=0.93-0.99$) برازش داده شدند (جدول ۴). یافته‌ها بیانگر آن است که افزایش میزان لئوناردیت منجر به بالا رفتن مقدار q_{max} واجذب گردید، به نحوی که بیشترین واجذب در خاک شماره ۲ و کمترین در خاک شماره ۱ مشاهده شد که این اختلاف ناشی از تفاوت در ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی از جمله مقدار بور اولیه خاک‌ها دانست. مطالعه‌ی Mahdavi و همکاران (۲۰۲۰) نیز تایید می‌کند که فرآیند واجذب بور با میزان ماده آلی، درصد آهک، مقدار بور اولیه و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک رابطه‌ای مثبت و معنادار دارد. بررسی تغییرات پارامتر K_L نشان داد که افزودن لئوناردیت کاهش این شاخص را به دنبال دارد و شدت این کاهش در خاک شماره ۴ نسبت به ۲ چشمگیرتر بود (جدول ۴). علاوه بر این، میان مقدار آهک و K_L همبستگی مثبت معنی‌داری مشاهده شد، به گونه‌ای که با افزایش درصد آهک، مقدار K_L روندی افزایشی پیدا کرد. مقدار K_L با افزایش لئوناردیت کمتر شده است بر این اساس مشاهده می‌شود که مقدار واجذب بور هم بیشتر شده است. در منابع گزارش شده است که کربنات کلسیم معادل فعال و مقدار بور اولیه با q_{max} و K_L لانگمویر دارای همبستگی مثبت هستند (Boparai and Manchanda, 2018).

جدول ۴. پارامترهای واجذب بور تحت تأثیر لئوناردیت (L) در مدل لانگمویر برای خاک‌های مورد مطالعه

شماره خاک	L	لانگمویر		
		K_L (L mg ⁻¹)	q_{max} (mg kg ⁻¹)	R^2
۱	L0	۰/۱۲۰	۴۹/۳	۰/۹۷
	L2	۰/۰۱۵	۶۲۵	۰/۹۹
	L4	۰/۰۰۶	۱۶۶۶	۰/۹۹
۲	L0	۰/۰۴۶	۹۴	۰/۹۶
	L2	۰/۰۰۸	۶۶۶	۰/۹۶
	L4	۰/۰۰۲	۳۳۳۳	۰/۹۳

L0: نمونه شاهد، L2: کاربرد ۲ درصد لئوناردیت، L4: کاربرد ۴ درصد لئوناردیت

نتیجه‌گیری

کاربرد سطوح مختلف لئوناردیت موجب تغییر در ویژگی‌های جذب و واجذب بور در خاک‌های اطراف دریاچه ارومیه گردید. نتایج نشان داد که حضور لئوناردیت در مقایسه با تیمار شاهد، کاهش جذب و افزایش واجذب بور را به همراه داشت. این تأثیر در سطح چهار درصد لئوناردیت نسبت به سطح دو درصد بارزتر بود؛ به گونه‌ای که در تیمار چهار درصد، خاک شماره ۲ با بیشترین کاهش ظرفیت جذب لانگمویر (q_{max}) را تجربه کرد، در حالی که کمترین تغییر در خاک شماره ۱ با مشاهده شد. علاوه بر این، تحلیل ترمودینامیکی با استفاده از مدل دوبینین-رادوشکویچ بیانگر آن بود که جذب بور در خاک‌های مورد مطالعه عمدتاً ماهیتی فیزیکی داشته و تحت تأثیر نیروهای واندروالسی ضعیف قرار دارد ($E < 8 \text{ kJ mol}^{-1}$). با توجه به اینکه استفاده از لئوناردیت سبب کاهش جذب و افزایش واجذب بور گردید، توصیه می‌شود کاربرد آن در خاک‌های اطراف دریاچه‌ی ارومیه، به‌ویژه در اراضی با غلظت بالای بور، با احتیاط و براساس نتایج آزمون خاک و میزان بور موجود صورت پذیرد. زیرا مصرف بیش از حد این ماده آلی می‌تواند زیست‌دسترس پذیری بور را افزایش دهد.

فهرست منابع



19th Iranian Soil Science Congress
16-18 September, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۴۰۴ شهریور ۲۷ تا ۲۵



مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



Abood, N. K., Sherif, A. M. (2022). Effect of humic acid on adsorption and desorption of boron in saline calcareous soil. *Indian Journal of Ecology*, 49, 432-438.

Al-Temimi, A.O.A.F. (2019). Boron desorption in different calcareous soils texture. *Agricultural Research*, 24(1), 14-22.

Bai, C., Zhang, H., Luo, Q., Ye, X., Liu, H., Li, Q., Li, J., Wu, Z. (2023). Boron separation by adsorption and flotation with Mg-Al-LDHs and SDBS from aqueous solution. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 4, 34-65.

Boparai, A. K., Manchanda, J. S. (2018). Extractability of available boron and its sequential fractionation in alkaline calcareous soils of India. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(17), 2197-2208.

Bower, C. A., Reitemeyer, R., & Fireman, M. (1952). Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil science*, 73, 251-262.

Choudhary, R. S., Mondal, A. K., Sharma, V., Puniya, R., Bhanwaria, R., Yadav, N. K., Jhajhra, S. (2023). Effect of Organic Manures and Boron Application on Yield Attributes and Yield of Mustard (*Brassica juncea* L.) under Jammu Region. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 54(8), 1024-1041.

Gee, G., Bauder, J. (1979). Particle size analysis by hydrometer: a simplified method for routine textural analysis and a sensitivity test of measurement parameters. *Soil Science Society of America Journal*, 43, 1004-1007.

Gökmen, F., Usta, S., Uygur, V. (2022). Boron Adsorption and Desorption in Soils with High Boron Content. *International Journal of Agriculture Forestry and Life Sciences*, 6(2), 55-59.

Jing, K., Min, X., Song, W., Xu, D., Li, X. (2024). Effect of filling materials on reconstructed soil phosphorus adsorption and desorption in mining area. *Soil and Tillage Research*, 2(5), 105-895.

Keren, R. (1996). Boron. p. 603-626. In D. L. Sparks et al. (ed.) *Methods of soil analysis*. Part 3. Chemical methods.

Kumar, N., Meena, M. C., Dwivedi, B. S., Datta, S. P., Dey, A. (2021). Comparison of kinetic models for boron adsorption in major soil groups of India. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 69 (1), 45-49.

Mahdavi, S., Tarhani, Z., Sayyahzadeh, A. H., Naderi Peikam, E. (2020). Effect of nano-MgO, biochar and humic acid on boron stabilization in soil in bath and leaching columns. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 29(6), 595-612.

Majidi, A. 2010. Interaction between boron adsorbed with phosphorous and silicon in calcareous soils. Ph. D. thesis. Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. 215 pp. (in Persian).

Öcal, Z. B., Öncel, M. S., Keskinler, B., Khataee, A., Karagündüz, A. (2024). Sustainable treatment of boron industry wastewater with precipitation-adsorption hybrid process and recovery of boron species. *Process Safety and Environmental Protection*, 182, 719-726.

Rayment, G., Higginson, F. R. (1992). "Australian laboratory handbook of soil and water chemical methods," Inkata Press Pty Ltd.

Thomas, G. (1996). Soil and Soil acidity, P 475-490. *Methods of Soil Analysis*. Part III. 3rd Ed., Journal of The American Society of Agronomy., Madison, WI.

Tlili, A., Dridi, I., De Feudis, M., Vittori Antisari, L., Jedidi, N. (2024). Boron characterization and distribution in particle-size fractions and humic substances in forest and agricultural Tunisian soils. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 6, 1-14.

Van Eynde, E., Mendez, J. C., Hiemstra, T., Comans, R. N. (2020). Boron adsorption to ferrihydrite with implications for surface speciation in soils: Experiments and modeling. *ACS Earth and Space Chemistry*, 4(8), 1269-1280.

Walkley, A., Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science* 37, 29-38.

Investigation of the Effect of Leonardite Application on Isothermal Adsorption and Desorption Processes of Boron in Soils Around Lake Urmia

Reyhaneh Abbasi Esakan¹, Behnam Dovlati^{2*}, Ebrahim Sepehr³, Marzieh Piri⁴



19th Iranian Soil Science Congress
16-18 September, 2025



نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۴۰۴ شهریور ۲۷ تا ۲۵



مدیریت جامع نگر و هوشمند خاک و آب

Holistic and Smart Soil and Water Management

دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran



- 1- Ph.D. Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Iran
- 2*- Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Iran
- 3- Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran
- 4- Assistant Professor, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of West Azarbaijan Province, Soil and Water Research Department, Urmia, Iran

Abstract

Boron solubility in soils is primarily controlled by adsorption and desorption processes, and variations in its availability can significantly contribute to boron toxicity. In the present study, four calcareous soils were selected to investigate the effect of leonardite. Soil treatments consisted of 0, 2, and 4% (w/w) leonardite combined with nine boron concentrations (0–120 mg L⁻¹) in the presence of 0.03 M NaCl solution. Boron desorption was also evaluated using the same solution. The experimental data were fitted to the Langmuir, Freundlich, Temkin, and Dubinin–Radushkevich isotherm models. Results demonstrated that leonardite application led to a reduction in adsorption parameters, including monolayer adsorption capacity (q_{max}), Langmuir adsorption energy coefficient (K_L), and Dubinin–Radushkevich adsorption capacity (q_s), with the most pronounced decrease in q_{max} observed in the 4% treatment of soil 2. Additionally, the calculated adsorption free energy (E) values were below 8 kJ mol⁻¹, indicating that boron adsorption was predominantly physical. Conversely, leonardite application markedly enhanced boron desorption, with the effect being more pronounced at the 4% application level compared to 2%. These findings suggest that leonardite amendment may promote boron accumulation, potentially exacerbating boron toxicity in calcareous soils.

Keywords: Adsorption isotherm, Boron, Desorption, Leonardite