

ارزیابی آستانه‌های فرسایش پذیری خاک متأثر از نوسانات سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی

ندا محسنی* - استادیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.
امیر محسنی - دکترای علوم خاک، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه تبریز، تبریز.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۱۵ تأیید نهایی: ۱۳۹۹/۰۶/۱۱

چکیده

در مطالعه حاضر به این موضوع پرداخته شده است که چگونه تغییرپذیری در افت سطح ایستابی و متعاقباً فرونشست زمین می‌تواند آستانه‌های فرسایش پذیری خاک را متأثر سازد. برای دستیابی به این هدف، در یک منطقه مستعد به فرونشست، محدوده‌های مختلفی انتخاب شدند که بر اساس اطلاعات چاه‌های پیژومتری یک سازمان آب منطقه‌ای تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای را از لحاظ افت سطح ایستابی به معرض نمایش گذاشتند. از آنجا که فرونشست زمین مرتبط با بهره برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی بطور معنی داری حجم تخلخل کل خاک، حجم منافذ ریز و درشت خاکدانه‌ها، وزن مخصوص ظاهری خاک و ظرفیت نفوذپذیری خاک را تحت تاثیر قرار می‌دهد، این شاخص‌ها برای ارزیابی آستانه‌های فرسایش پذیری خاک در مناطق مستعد به فرونشست اندازه‌گیری شدند. در ادامه، برای ارزیابی این موضوع که چگونه تغییرپذیری در آستانه‌های فرسایش پذیری می‌تواند ویژگی‌های زیستی خاک را به عنوان شاخصی برای سنجش بهره‌وری خاک تحت تاثیر قرار دهند، برخی از شاخص‌های زیستی مرتبط با متغیرهای فیزیکی نامبرده اندازه‌گیری شدند. نتایج آماری نشان داده است، موقعیت‌هایی با بیشترین افت سطح ایستابی، بیشترین حجم تخلخل ریز، بیشترین وزن مخصوص ظاهری، کمترین میزان تخلخل کل و کاهش معنادار ضریب نفوذپذیری را در مقایسه با موقعیت‌های با کمترین افت سطح ایستابی به نمایش گذاشته‌اند. همچنین میزان کربن آلی خاک، کربن و نیتروژن زیست توده میکروبی کاهش معنی داری را در موقعیت‌هایی با کمترین سطح ایستابی نشان داده‌اند. این نتایج بیانگر نقش نوسانات سطح ایستابی در ظهور آستانه‌های متفاوت فرسایش پذیری خاک در مناطق مستعد به فرونشست زمین می‌باشد.

واژگان کلیدی: سطح ایستابی، تخلخل کل، فشردگی خاک، آستانه فرسایش پذیری.

مقدمه

فرونشست زمین ناشی از بهره برداری بی رویه از منابع آب‌های زیرزمینی یکی از مشکلات شایع در اقصی نقاط جهان که وابستگی شدیدی به منابع آب‌های زیرزمینی دارند، (پاچئو و همکاران^۱، ۲۰۰۶) از جمله ایران شناخته می‌شود. شرایط اقلیمی خشک و نیمه خشک، رشد بالای جمعیت، توسعه زمین‌های کشاورزی و فعالیت‌های صنعتی منجر به بهره برداری بی رویه و غیر اصولی از سفره‌های زیرزمینی در دشت‌های ایران شده است. این شرایط، فشردگی لایه‌های خاک و متعاقباً فرونشست زمین را در پی داشته است. ظهور و گسترش فرونشست در چنین مناطقی زمینه ساز تخریب خاک شده که نقش مهمی در تسریع روند بیابان زایی دارد. دشت نیشابور واقع در شمال شرقی ایران یکی از بحرانی‌ترین دشت‌های ایران از لحاظ بهره برداری از سفره‌های زیرزمینی شناخته می‌شود. آب زیرزمینی عمده‌ترین منبع تامین آب برای جمعیت محلی، کشاورزی و بخش‌های صنعتی در کل دشت نیشابور می‌باشد. رشد بالای جمعیت، توسعه سریع اقتصادی به علاوه خشکسالی‌های متوالی منجر به تشدید پدیده فرونشست زمین از دهه ۱۳۷۰ شده است. این شرایط اقتصادی، اجتماعی و اقلیمی، کاهش بیش از ۴۳ متری سفره‌های زیرزمینی در ۳۰ سال اخیر را به همراه داشته است. بطوریکه ظهور و گسترش ترک‌های سطحی مرتبط با فرونشست زمین یکی از نشانه‌های شایع تشدید تخریب و افزایش سطح فرسایش پذیری خاک در این مناطق می‌باشد.

از مهم‌ترین پیامدهای افت سطح ایستابی، تغییرات معنادار در ویژگی‌های فیزیکی خاک ناشی از فشردگی خاک است که نقش مهمی در شتاب بیابان زایی و تشدید فرسایش آبی به دلیل کاهش قابل توجه سطح نفوذپذیری خاک دارد. در طول زمان، بهره برداری بی رویه از آب‌های زیرزمینی منجر به افت سطح ایستابی و افزایش تلفات آب موجود در فضای خاکدانه‌ها می‌شود. این شرایط به نوبه خود حجم تخلخل کل خاک را کاهش داده و زمینه فشردگی برگشت ناپذیر خاک را در سیستم آکیفر فراهم می‌آورد (اسنید و همکاران^۲، ۲۰۰۳). شرایطی که جابجایی افقی زمین و فرونشست‌های متعاقب را تشدید و تسریع می‌کند (فیگوئرو-میراندا و همکاران^۳، ۲۰۱۸). فرونشست زمین ناشی از فشردگی لایه‌های رسی درون سیستم آکیفر است. زمانی که سطح آب زیرزمینی بطور قابل توجهی بالا است، ذرات درشت دانه مانند شن در آب بین لایه‌های خاک شناور هستند. همچنانکه سطح ایستابی کاهش می‌یابد، ضریب غوطه وری خاکدانه‌های درشت کاهش یافته و بنابراین وزن اضافی تحمیل شده از این خاکدانه‌ها منجر به ایجاد فشار مضاعف بر روی لایه‌های رسی که مابین ذرات شن قرار دارند، می‌شود. تداوم این شرایط منجر به روی هم افتادن لایه‌های خاک و به عبارتی دیگر فشردگی خاکدانه‌های رسی و متعاقباً خروج آب از فضای بین خاکدانه‌ها می‌گردد. این رخداد منجر به کاهش برگشت ناپذیر حجم فضاهای خالی و بنابراین فشردگی برگشت ناپذیر آن‌ها می‌شود. در نتیجه نشست زمین به دنبال فشردگی خاک اتفاق افتاده و حتی تغذیه سفره‌های زیرزمینی و برگشت سطح ایستابی به شرایط اولیه، نمی‌تواند تخریب ساختار خاک را جبران نماید. به عبارت دیگر، در این شرایط، امکان ترمیم ساختار تخریب شده خاک از لحاظ تخلخل کل و توزیع اندازه و حجم فضاهای خالی که اثرات مهمی بر روی میزان نفوذپذیری آب به داخل خاک و کنترل فرسایش آبی دارند، وجود نخواهد داشت.

پیامد بحرانی افت سطح ایستابی و اثرات آن بر روی نشست زمین، فشردگی برگشت ناپذیر خاک در سیستم آکیفر بوده که بطور معنی داری حجم تخلخل خاک و بخصوص تخلخل درشت را تحت تاثیر قرار می‌دهند (پاگلیا و همکاران^۴، ۲۰۰۳؛ شفر و همکاران^۵، ۲۰۰۸). این تغییرات منجر به ناپایداری در توزیع متعادل هوا و آب موجود در خاکدانه‌ها شده که می‌توانند

¹ Pacheco et al

² Sneed et al

³ Figueroa-Miranda et al

⁴ Pagliai et al

⁵ Schäffer et al

سایر ویژگی‌های فیزیکی و زیستی خاک نظیر رطوبت، نفوذپذیری، وزن مخصوص ظاهری، کربن و نیتروژن زیست توده میکروبی و کربن آلی را تحت تاثیر قرار دهند (ریچارد و همکاران^۱، ۲۰۰۱). تغییر در اندازه و حجم فضاهای خالی، اثرات چشمگیری بر توزیع رواناب دارد. در نتیجه، تغییر در ویژگی‌های فیزیکی خاک نظیر رطوبت و تخلخل ناشی از افت سطح ایستابی و نشست لایه‌های خاک، به شدت آستانه‌های فرسایش پذیری خاک را بخصوص در اکوسیستم‌های خشک که بسیار آسیب پذیر نسبت به شرایط نامطلوب محیطی هستند، تحت تاثیر قرار خواهد داد. محققان زیادی به بررسی اثرات عوامل موثر در شکل‌گیری فرورنشست زمین پرداخته‌اند (فین-ویچ و همکاران^۲، ۲۰۰۶، ایکسیو و همکاران^۳، ۲۰۰۱۳؛ گالوی و بوربی^۴، ۲۰۱۱؛ هوانگ و همکاران^۵، ۲۰۱۲؛ قنوتی و همکاران، ۱۳۹۸؛ صفری و همکاران، ۱۳۹۵؛ عقیف و همکاران، ۱۳۹۵). با این وجود، مطالعه خاصی در ارتباط با نقش نوسانات سطح ایستابی در تغییرات سطح فشردگی خاک و متعاقباً آستانه‌های فرسایش پذیری در مناطق خشک و نیمه خشک، انجام نشده است. بنابراین، سوال کلیدی در پژوهش حاضر این بوده است که چگونه نوسانات سطح ایستابی می‌تواند بواسطه تغییر در سطح فشردگی و ویژگی‌های زیستی مرتبط، آستانه‌های فرسایش پذیری خاک را در مناطق مستعد به فرورنشست متاثر سازد.

مواد و روش

توصیف منطقه مورد مطالعه و پیمایش میدانی

موقعیت‌های مورد مطالعه در دشت نیشابور، استان خراسان رضوی، شمال شرقی ایران واقع شده‌اند (شکل ۱). اقلیم منطقه خشک و نیمه خشک با متوسط بارندگی ۲۴۷ میلی متر و متوسط درجه حرارت ۱۳/۹ درجه سانتی گراد می‌باشد. بر اساس اهداف پژوهش، دو موقعیت متفاوت در دشت نیشابور (شهرآباد (الف) و اردمه (ب)) که بر اساس اطلاعات چاه‌های پیژومتری یک سازمان آب منطقه‌ای خراسان رضوی، تفاوت‌های معنی داری از لحاظ سطح ایستابی داشته‌اند، انتخاب شدند (شکل ۲). روند تغییر سطح ایستابی در طول سال‌های ۱۳۷۰-۱۳۹۸ در ۲ منطقه در شکل ۲ قابل مشاهده است. بر اساس این شکل، تفاوت‌های چشمگیری در میزان سطح ایستابی در هر دو سایت مشهود می‌باشد. موقعیت‌های منتخب، بر روی دشت سر واقع شده و از لحاظ شیب نیز شرایط کاملاً یکسانی دارند. بافت خاک در کل منطقه عمدتاً رسی-لومی با میزان کمی از پلاستیسیته می‌باشد که حساسیت سیستم آکیفر را نسبت به افت سطح ایستابی و متعاقباً فشردگی خاک بیشتر می‌سازد. پوشش گیاهی غالب منطقه *Aeliema subaphylla*, *Lycium depressum*, *Salsola* می‌باشد.

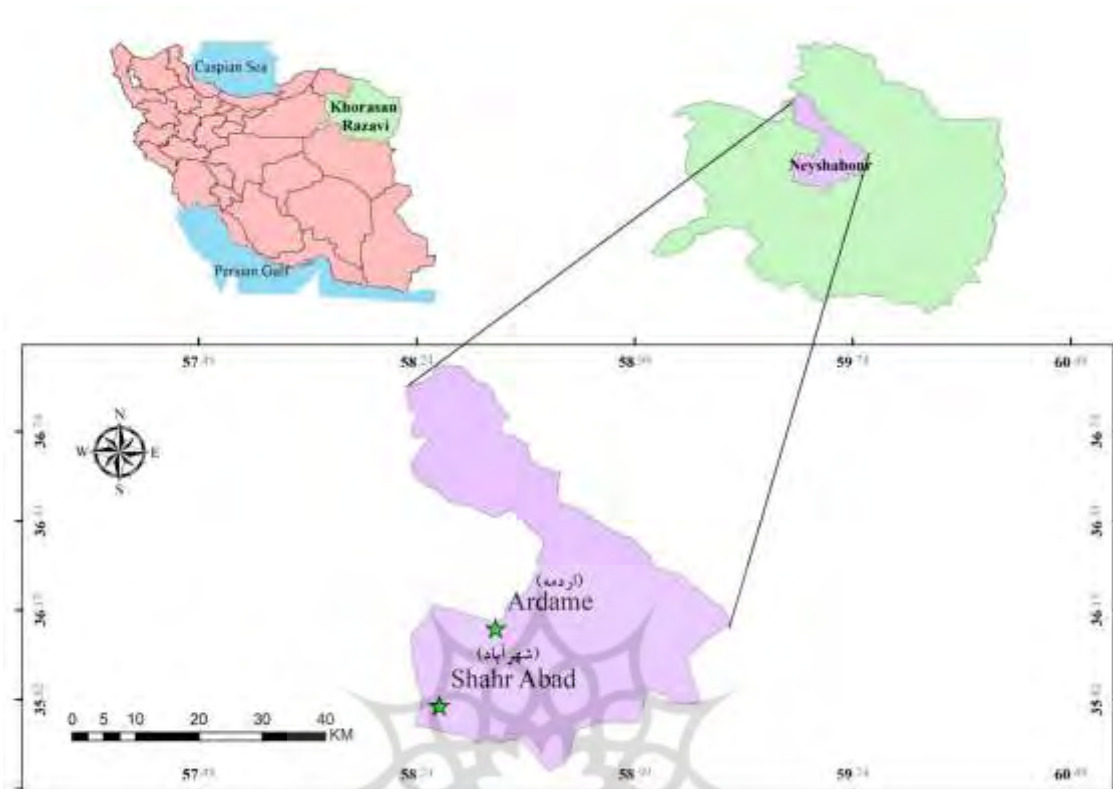
¹ Richard et al

² Phien-Wej et al

³ Xu et al

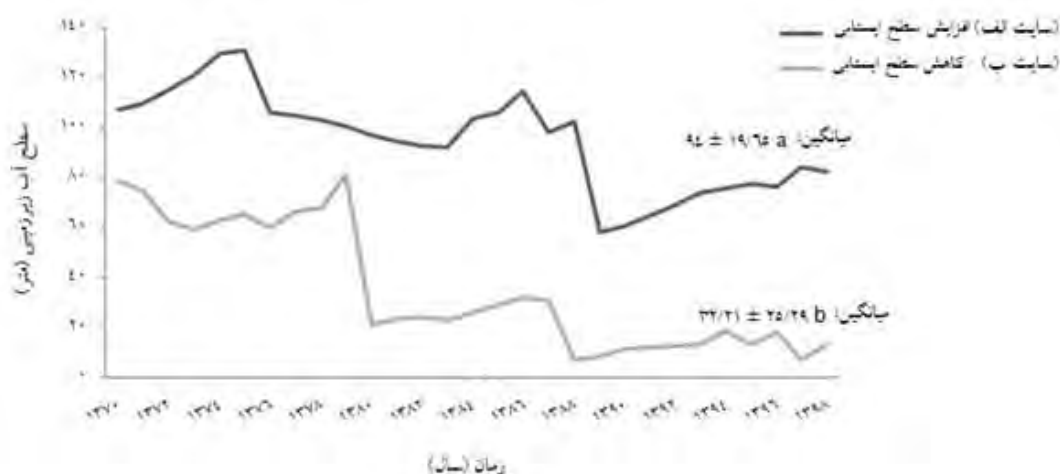
⁴ Galloway and Burbey

⁵ Huang et al



شکل ۱: موقعیت محدوده‌های مورد مطالعه در دشت نیشابور

بر اساس سیستم تاکسونومی خاک، نوع خاک منطقه در رده اریدی سل و انتی سل و زیر رده ریگوسل و لیتوسل جای دارد (شکل ۳). در هر موقعیت، ۸ شکاف سطحی انتخاب شد. نمونه های خاک از ۲۰ کوادرات ۱ در ۱ متر جمع‌آوری شدند. نمونه‌های لازم برای اندازه‌گیری وزن مخصوص ظاهری خاک با استفاده از مغزه‌های خاک دست نخورده (سیلندهایی با ۱۰ سانتی متر قطر و عمق) جمع‌آوری گردید. گاه علوم انسانی و مطالعات فرسایشی



شکل ۲: مقایسه روند افت سطح ایستابی بین محدوده‌های مورد مطالعه در بازه زمانی ۱۳۷۰-۱۳۹۸ بر اساس میانگین \pm انحراف معیار. حروف کوچک نشان دهنده تفاوت‌های آماری معنی دار سطح ایستابی بین دو سایت بر اساس نتایج آنالیز واریانس است.

آنالیزهای آزمایشگاهی و آماری

شاخص‌های فشردگی خاک شامل وزن مخصوص ظاهری، حجم تخلخل کل، حجم تخلخل درشت، حجم تخلخل ریز، رطوبت خاک و ضریب نفوذپذیری، همچنین ویژگی‌های زیستی و شیمیایی مرتبط با فشردگی خاک شامل کربن آلی خاک، کربن و نیتروژن زیست توده میکروبی اندازه‌گیری شدند.

وزن مخصوص ظاهری خاک، درصد تخلخل کل خاک (بلیچ و همکاران^۱، ۲۰۱۰)، درصد تخلخل درشت و درصد تخلخل ریز به ترتیب با استفاده از فرمول‌های زیر محاسبه شدند:

وزن مخصوص ظاهری خاک: وزن خاک خشک (گرم)/حجم خاک (سانتی متر مکعب)

$$\text{درصد تخلخل کل} = \left(1 - \left(\frac{\text{وزن مخصوص ظاهری}}{\text{فاز جامد خاک}} \right) \right) \times 100$$

درصد تخلخل درشت: رطوبت حجمی - تخلخل کل

درصد تخلخل ریز: رطوبت حجمی * ۱۰۰ / تخلخل کل

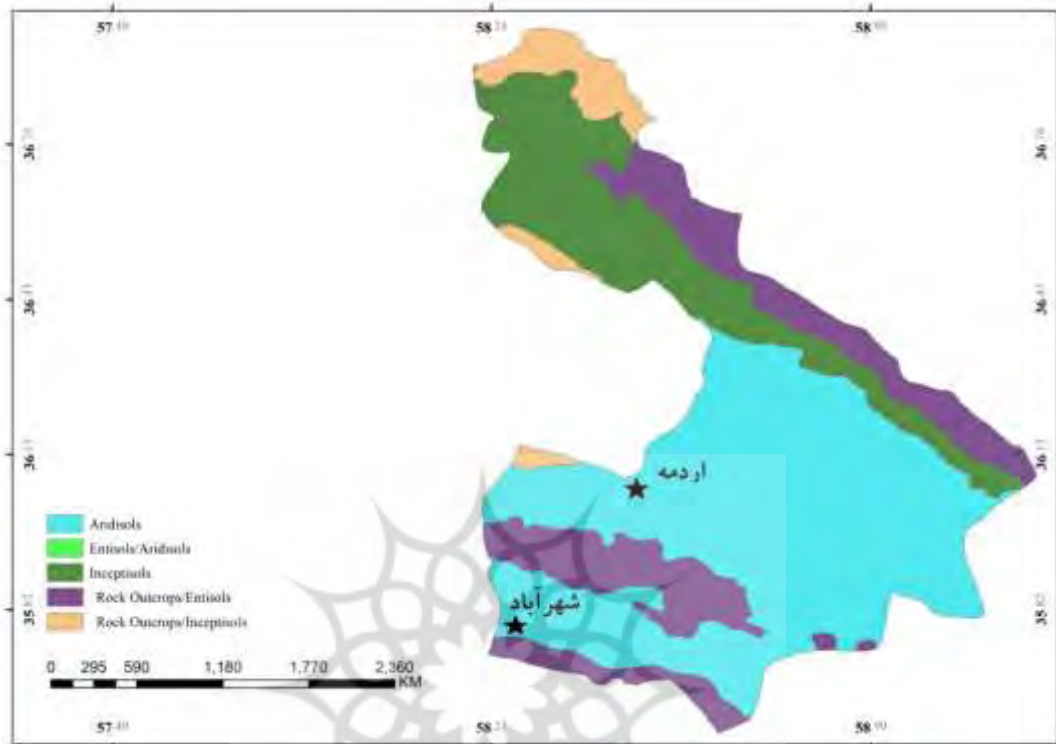
رطوبت خاک با استفاده از تفاضل بین وزن تر و خشک توده خاک (روش آون-خشک) محاسبه شد. مقادیر کربن آلی خاک (g/kg) با استفاده از روش تیتراسیون والکلی-بلک (روول^۲، ۱۹۹۴) اندازه‌گیری شد. کربن و نیتروژن زیست توده میکروبی با استفاده از روش تدخین با کلروفرم محاسبه گردید (ونس و همکاران^۳، ۱۹۸۷). نمونه‌های خاک، با کلروفرم فاقد الکل تحت تدخین قرار گرفتند. نمونه‌های کنترل و تدخین شده با 0.5 M K₂SO₄ عصاره‌گیری شده و برای ۱ ساعت شیک

^۱ Beylich et al

^۲ Rowell

^۳ Vance et al

شدند. نیتروژن زیست توده میکروبی با استفاده از تفاضل نیتروژن استخراج شده از نمونه‌های کنترل و تحت تدخین تقسیم بر فاکتور KEN محاسبه گردید (جنکینسون^۱، ۱۹۸۸).



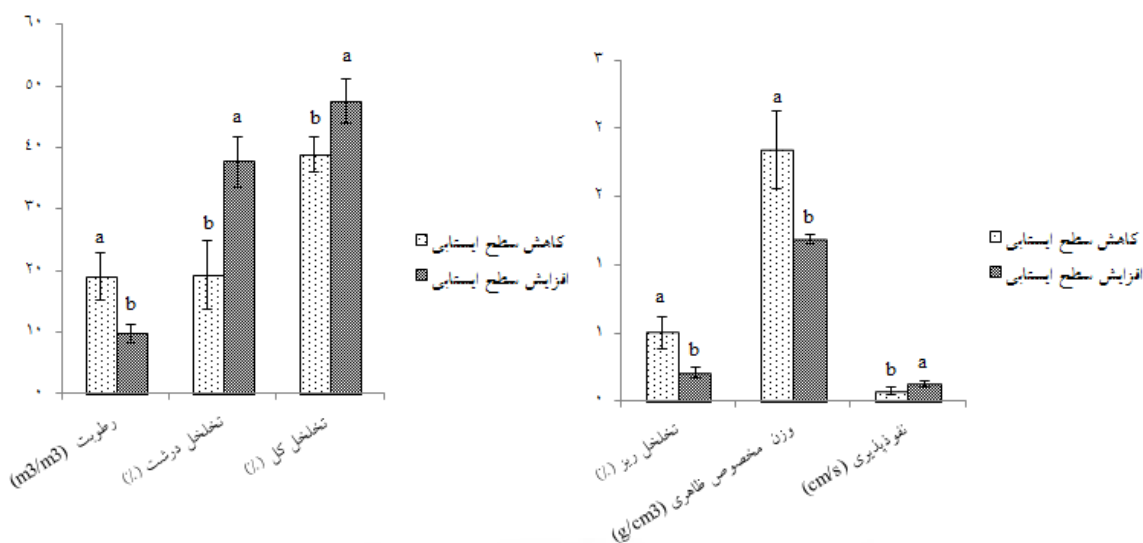
شکل ۳: نقشه طبقه بندی خاک دشت نیشابور و محدوده‌های مورد مطالعه

برای مقایسه تفاوت در افت سطح ایستابی، شاخص‌های فشردگی خاک و متغیرهای بیوشیمیایی مرتبط بین سایت‌های مختلف، از آنالیز واریانس استفاده شد. همچنین برای تعیین ارتباط بین نوسان سطح ایستابی و تغییر در سطح فشردگی و سایر شاخص‌ها، آنالیز همبستگی پیرسون مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج و بحث

همچنانکه در شکل ۲ نشان داده شده است، محدوده‌های مورد مطالعه تفاوت‌های معنی داری از لحاظ سطح ایستابی در طول ۲۸ سال به نمایش گذاشته‌اند. بطوریکه محدوده الف، بالاترین سطح ایستابی را در مقایسه با محدوده ب (با پائین‌ترین سطح ایستابی) به نمایش گذاشته است. نتایج آماری از شاخص‌های مرتبط با فشردگی خاک نشان دهنده ظهور درجات متفاوتی از سطح فرسایش پذیری در امتداد نوسانات معنی دار سطح ایستابی است (شکل ۴). شایان ذکر است که سطوح مختلف فشردگی خاک مرتبط با نشست زمین به عنوان شاخصی برای ارزیابی سطح فرسایش پذیری خاک در نظر گرفته شده است. وزن مخصوص خاک بطور معنی داری در سایت الف (با بیشترین سطح ایستابی) کاهش یافته است.

¹ Jenkinson



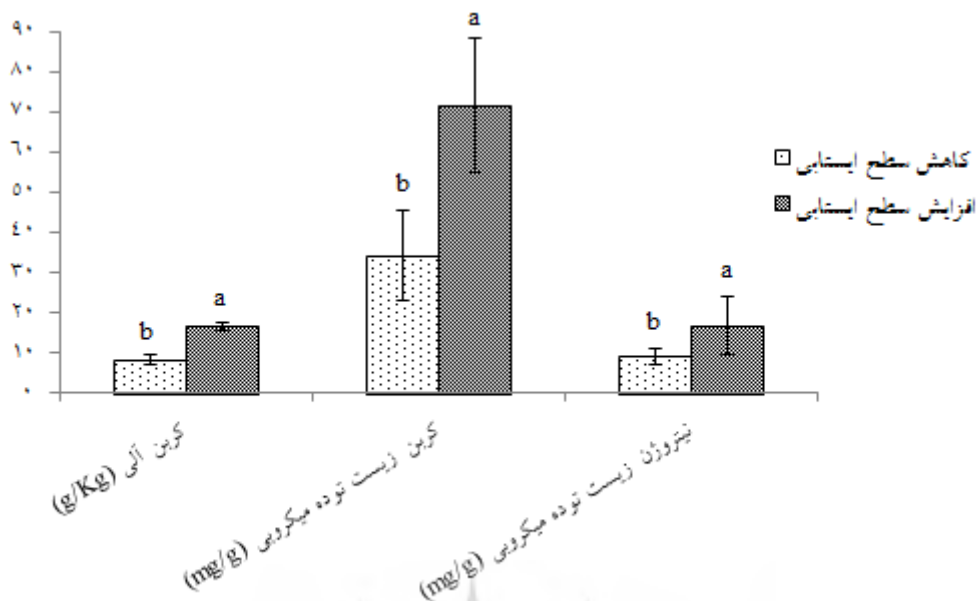
شکل ۴: تفاوت‌های معنی دار آماری شاخص‌های فشردگی خاک در محدوده‌هایی با مقادیر متفاوتی از سطح ایستابی. مقادیر بر اساس میانگین متغیرها \pm انحراف معیار تعریف شده‌اند. حروف کوچک نشان دهنده تفاوت‌های معنی دار بر اساس نتایج آنوا هستند.

حجم تخلخل کل بطور معنی داری در سایت الف با بالاترین سطح ایستابی در مقایسه با سایت ب، افزایش نشان داده است. برعکس، حجم تخلخل ریز و رطوبت در محدوده الف کاهش معنی داری را از لحاظ آماری نشان داده‌اند. همچنین میزان نفوذپذیری در محدوده‌هایی با بیشترین سطح ایستابی، افزایش معنی داری را در مقایسه با محدوده‌هایی با کمترین سطح ایستابی نشان داده است. این یافته‌ها بیانگر اثرات نشست زمین مرتبط با نوسان سطح ایستابی در ظهور آستانه‌های متفاوت فرسایش‌پذیری همراه با تغییرات در سطح فشردگی خاک می‌باشد. اگرچه مطالعه خاصی در ارتباط با اثرات سطح ایستابی بر روی میزان فشردگی خاک به عنوان شاخصی برای ارزیابی سطح فرسایش‌پذیری خاک در مناطق مستعد به فرونشست زمین انجام نشده است، سایر مطالعات در رابطه با فشردگی خاک ناشی از ماشین آلات کشاورزی می‌تواند تأییدی بر نتایج ما باشد (بجارانو و همکاران^۱، ۲۰۱۰؛ بلیچ و همکاران^۲، ۲۰۱۰؛ کمبی و همکاران^۳، ۲۰۱۷؛ شاه و همکاران^۳، ۲۰۱۷). نتایج ما در تطابق با مطالعات اشاره شده نشان داده است که فشردگی خاک می‌تواند بشدت حجم تخلخل خاک و توزیع فضاهای خالی ریز و درشت را درون پروفیل خاک متاثر سازد. همچنین، نتایج آماری مرتبط با شاخص‌های بیوشیمیایی خاک‌های متاثر از فرونشست زمین بیانگر این نتیجه است که چگونه تغییر در سطح فشردگی خاک ناشی از تغییرپذیری در سطح ایستابی می‌تواند آستانه‌های فرسایش‌پذیری خاک را متاثر سازد (شکل ۵). کربن آلی خاک تفاوت‌های معنی داری را بین محدوده‌های الف با بیشترین سطح ایستابی و محدوده‌های ب با کمترین سطح ایستابی به نمایش گذاشته است. کربن و نیتروژن زیست توده میکروبی، کمترین مقدار را در بیشترین افت سطح ایستابی نشان داده‌اند. این نتیجه بیانگر اثرات بحرانی فشردگی شدید خاک ناشی از افت عمیق آب زیرزمینی بر کاهش سطح فعالیت‌های میکروبی است.

¹ Bejarano et al

² Cambi et al

³ Shah et al



شکل ۵: تفاوت‌های معنی دار آماری در ویژگی‌های زیستی خاک در محدوده‌های مورد مطالعه

بر اساس جدول ۱، ارتباط معنی داری بین افت سطح ایستابی با شاخص‌های فرسایش پذیری خاک دیده می‌شود. ارتباط بین افت سطح ایستابی با وزن مخصوص ظاهری خاک و تخلخل ریز معنی دار و منفی بوده است. به عبارت دیگر، وزن مخصوص ظاهری خاک و حجم تخلخل ریز افزایش یافته است همچنانکه سطح ایستابی بیشتر و بیشتر کاهش می‌یابد. در حالی که، تخلخل کل و تخلخل درشت همبستگی معنی دار و مثبتی با نوسان سطح ایستابی نشان داده‌اند. این بدان معنا است که حجم تخلخل کل و تخلخل درشت کاهش می‌یابد همچنانکه سطح ایستابی کاهش یافته است. بنابراین، افت بیشتر سطح ایستابی در طول زمان منجر به افزایش وزن مخصوص ظاهری خاک، کاهش تخلخل و ظرفیت نفوذپذیری خاک خواهد شد (گریسن و سندز^۱، ۱۹۸۰؛ هوانگ و همکاران^۲، ۱۹۹۶). چنین تغییرات منفی در ویژگی‌های فیزیکی خاک در امتداد روند افت سطح ایستابی بطور معنی داری ویژگی‌های بیوشیمیایی خاک را متأثر می‌سازند. این شرایط منجر به کاهش فعالیت‌های میکروبی و کاهش جذب مواد مغذی توسط گیاهان می‌گردد. این تغییرات وابسته به یکدیگر، متعاقبا آستانه‌های فرسایش پذیری خاک‌های مناطق خشک را تحت تاثیر قرار می‌دهند. مطالعات بسیاری بر روی نقش بهره برداری بی رویه از منابع آب‌های زیرزمینی در ظهور فرونشست زمین و اثرات مخرب این مخاطره بر روی زمین‌های کشاورزی و زیرساخت‌ها انجام شده است. چنین مطالعاتی مکانیزم‌های وقوع فرونشست زمین و پایش این مخاطره را بررسی کرده‌اند (گالوی و بوربی، ۲۰۱۱؛ پاچئو و همکاران، ۲۰۰۶؛ ایکسیو و همکاران، ۲۰۱۳؛ هوانگ و همکاران، ۲۰۱۲؛ پاچئو-مارتینز و همکاران^۳، ۲۰۱۵). با این وجود، مطالعه خاصی در ارتباط با این مسئله که چگونه نوسان سطح ایستابی می‌تواند آستانه‌های فرسایش پذیری خاک‌های مستعد به فرونشست را تحت تاثیر قرار دهد، دیده نمی‌شود. در نتیجه، تغییرات معنی دار در متغیرهای فیزیکی و شیمیایی خاک (شاخص‌های فرسایش پذیری مطالعه شده) در محدوده‌های مختلف می‌تواند به ارتباط قوی بین افت سطح ایستابی، فرونشست زمین و آستانه‌های فرسایش پذیری خاک تاکید کند. سیستم آکیفر منطقه مورد مطالعه بر روی توالی ناهمگنی از سازندهای دوران اول، دوران دوم (ماسه سنگ‌های دگرگون

¹ Greacen and Sands

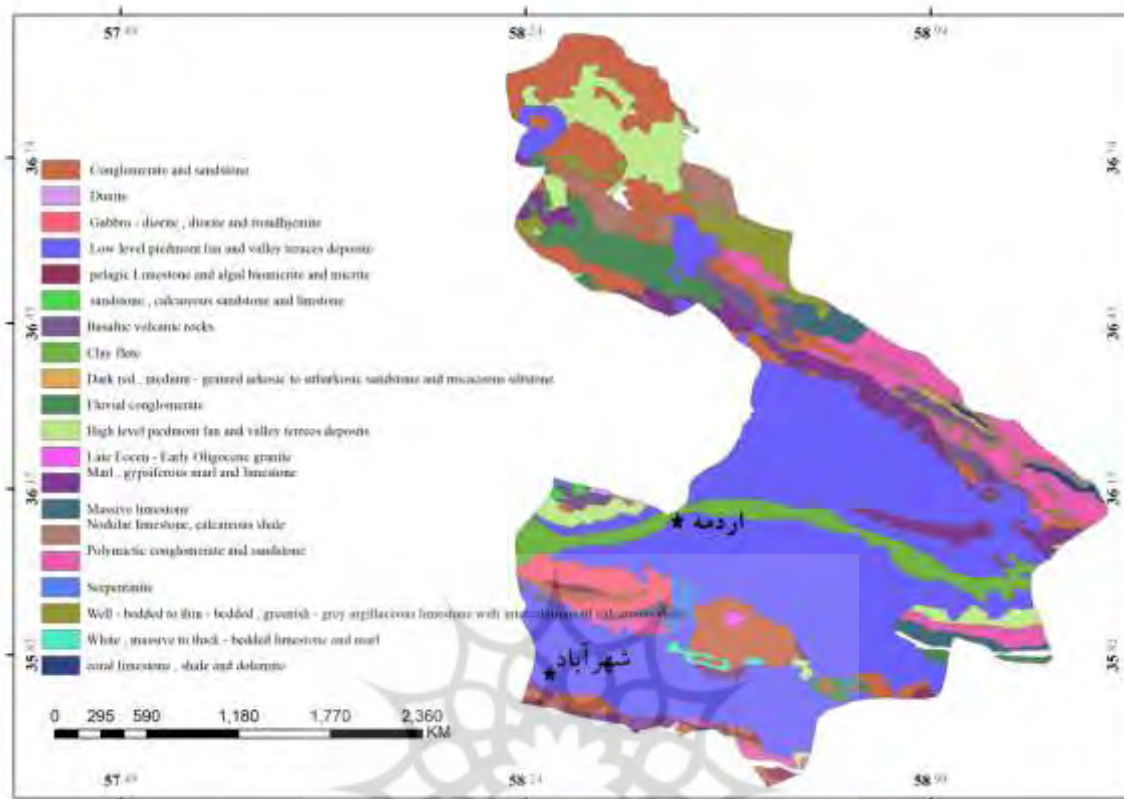
² Huang et al

³ Pacheco-Martínez

شده مستعد به فرسایش) و رسوبات ترشیاری با درجات متفاوتی از تراکم پذیری، شامل کنگلومرا، شن و سیلت (بخصوص ژبیس‌های مارنی) و لایه‌هایی از مارن‌های نئوژن، به علاوه رسوبات آبرفتی کواترنری با درجات کمی از تراکم پذیری که بطور بالقوه مستعد به واگرایی هستند، قرار گرفته است (شکل ۶). بنابراین با توجه به ویژگی‌های ذاتی دشت نیشابور از لحاظ سطح آسیب پذیری به مخاطره نشست زمین و علیرغم اینکه در همه موقعیت‌های مطالعه شده، افت سطح ایستابی منجر به توسعه بحرانی فرونشست زمین شده است، تغییرپذیری‌های اندک در سطح ایستابی توانسته منجر به بروز اختلافات معنی دار در سطح فشردگی و آستانه‌های فرسایش پذیری خاک گردد. بر اساس این نتایج، اگرچه در مقیاس چشم‌انداز، ویژگی‌های زمین شناختی دشت نیشابور منجر به آسیب پذیری بالای خاک‌های این منطقه نسبت به فرونشست می‌شود، بهره برداری بی رویه از آب‌های زیرزمینی و متعاقبا نوسانات معنی دار افت سطح ایستابی، سطح ارتجاع پذیری خاک‌های این منطقه را در مقابل پیامدهای فرونشست زمین می‌تواند تحت تاثیر قرار دهد.

جدول ۱: ارتباط بین افت سطح ایستابی و شاخص‌های فشردگی و ویژگی‌های بایوسیمیایی خاک در مناطق مستعد به فرونشست بر اساس نتایج آنالیز پیرسون.

<i>P value</i>	متغیر مسه‌قل/سطح ایستابی	متغیرهای وابسته
<۰/۰۰۱	۰/۷۹	تخلخل کل (%)
<۰/۰۰۱	۰/۷۷	تخلخل درشت (%)
<۰/۰۰۱	-۰/۸۱	تخلخل ریز (%)
<۰/۰۱	-۰/۷۸	وزن مخصوص ظاهری (g/m^3)
<۰/۰۰۱	۰/۸۳	رطوبت (m^3/m^3)
<۰/۰۵	۰/۵۶	کربن زیست توده میکروبی (mg/g)
<۰/۰۵	۰/۶۸	نیترژن زیست توده میکروبی (mg/g)
<۰/۰۵	۰/۵۱	کربن آلی (g/kg)



شکل ۶: نقشه زمین شناسی دشت نیشابور و محدوده‌های مورد مطالعه

نتیجه‌گیری

نوسانات سطح ایستابی در طول زمان بطور قابل توجهی آستانه‌های فرسایش پذیری خاک را بواسطه افزایش فشردگی خاک تحت تاثیر قرار داده است. در محدوده ب با کمترین سطح ایستابی در مقایسه با محدوده الف با بیشترین سطح ایستابی در طول سال‌های مختلف، مشاهده شد که حجم تخلخل کل، حجم فضاهای خالی درشت و ظرفیت نفوذپذیری بطور معنی داری کاهش داشته است. این شرایط با کاهش معنی دار کربن و نیتروژن زیست توده میکروبی، منجر به کاهش قابل توجه سطح فعالیت‌های میکروبی شده است. ظهور و گسترش چنین تغییراتی می‌تواند تسهیل و شتاب فرسایش آبی و فرایند تخریب خاک را در پی داشته باشد. یافته‌ها، نقش مهم نوسانات معنی دار سطح استابی و فرونشست‌های ناشی از آن را در افزایش سطح فرسایش پذیری خاک‌های مناطق خشک که بسیار آسیب پذیر نسبت به شرایط نامطلوب محیطی هستند، نشان می‌دهند.

منابع

- صفاری، ا.، جعفری، ف.، توکلی صبور، م.، ۱۳۹۵. پایش فرونشست زمین و ارتباط آن با برداشت آب‌های زیرزمینی مطالعه موردی: دشت کرج - شهریار. مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۵، شماره ۲، صص ۸۲-۹۳.
- عقیقی، م. ا.، ۱۳۹۵. ارزیابی پتانسیل فرونشست زمین و عوامل موثر بر آن (مطالعه موردی: دشت سیدان فاروق مرودشت). مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۵، شماره ۳، صص ۱۲۱-۱۳۲.
- قنواتی، ع.، شریفی کیا، م.، حسین، ا.، ۱۳۹۸. تبیین اثر و فرایند ژئومورفولوژیکی پدیده فرونشست در تغییر الگوی لند فرم‌های ژئومورفولوژیکی مطالعه موردی دشت یزد- اردکان، مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، دوره ۸، شماره ۳، صص ۱-۱۶.

- Bejarano, M.D., Villar, R., Murillo, A.M. and Quero, J.L., 2010. Effects of soil compaction and light on growth of *Quercus pyrenaica* Willd.(Fagaceae) seedlings. *Soil Tillage Research*, 110, PP. 108-114.
- Beylich, A., Oberholzer, H.R., Schrader, S., Höper, H. and Wilke, B.M., 2010. Evaluation of soil compaction effects on soil biota and soil biological processes in soils. *Soil Tillage Research*, 109, PP. 133-143.
- Cambi, M., Hoshika, Y., Mariotti, B., Paoletti, E., Picchio, R., Venanzi, R. and Marchi, E., 2017. Compaction by a forest machine affects soil quality and *Quercus robur* L. seedling performance in an experimental field. *Forest Ecological Management*, 384, PP. 406-414.
- Galloway, D.L. and Burbey, T.J., 2011. Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 19, PP. 1459-1486.
- Figueroa-Miranda, S., Vargas, J.T., Ramos-Leal, J.A., Hernández-Madrigal, V.M. and Villaseñor-Reyes, C.I., 2018. Land subsidence by groundwater over-exploitation from aquifers in tectonic valleys of Central Mexico: a review. *Engineering Geology*, 246, PP. 91-106.
- Greacen, E.L. and Sands, R., 1980. Compaction of forest soils: a review. *Australian Journal of Soil Research*, 18, PP. 163-189.
- Huang, B., Shu, L. and Yang, Y., 2012. Groundwater overexploitation causing land subsidence: hazard risk assessment using field observation and spatial modelling. *Water Resource Management*, 26, PP. 4225-4239.
- Huang, J., Lacey, S.T. and Ryan, P.J., 1996. Impact of forest harvesting on the hydraulic properties of surface soil. *Soil Science*, 161, PP. 79-86.
- Jenkinson, D.S., 1988. Determination of microbial biomass carbon and nitrogen in soil. In: Wilson, J.R. (Ed.), *Advances in Nitrogen Cycling in Agricultural Ecosystems*. CAB International, Wallingford, pp. 368-385.
- Pagliai, M., Marsili, A., Servadio, P., Vignozzi, N. and Pellegrini, S., 2003. Changes in some physical properties of a clay soil in Central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. *Soil Tillage Research*, 73, PP. 119-129.
- Pacheco-Martínez, J., Cabral-Cano, E., Wdowinski, S., Hernández-Marin, M., Ortiz-Lozano, J. and Zermeño-de-León, M., 2015. Application of InSAR and gravimetry for land subsidence hazard zoning in Aguascalientes, Mexico. *Remote Sensing*, 7, PP. 17035-17050.
- Pacheco, J., Arzate, J., Rojas, E., Arroyo, M., Yutsis, V. and Ochoa, G., 2006. Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data and finite element modeling in the Querétaro valley, México. *Engineering Geology*, 84, PP. 143-160.
- Phien-Wej, N., Giao, P. and Nutalaya, P., 2006. Land subsidence in bangkok, Thailand. *Engineering Geology*, 82, 187-201.
- Rowell, D., 1994. *SoilScience: methods & applications*. Longman Scientific & Technical, Harlow, UK.
- Schäffer, B., Stauber, M., Mueller, T., Müller, R. and Schulin, R., 2008. Soil and macropores under uniaxial compression. I. Mechanical stability of repacked soil and deformation of different types of macropores. *Geoderma* 146, PP. 183-191.
- Shah, A.N., Tanveer, M., Shahzad, B., Yang, G., Fahad, S., Ali, S., Bukhari, M.A., Tung, S.A., Hafeez, A. and Souliyanonh, B., 2017. Soil compaction effects on soil health and cropproductivity: an overview. *Environmental Science Pollution Research*, 24, PP. 10056-10067.
- Sneed, M., Ikehara, M.E., Stork, S.V., Amelung, F. and Galloway, D.L., 2003. Detection and measurement of land subsidence using interferometric synthetic aperture radar and global positioning system, San Bernardino County, Mojave Desert, California. *Water resources investigations report*, 3, PP. 4015.

- Vance, E.D., Brookes, P.C. and Jenkinson, D.S., 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 19, PP. 703–707.
- Xu, Y.S., Shen, S.-L., Du, Y.J., Chai, J.C. and Horpibulsuk, S., 2013. Modelling the cutoff behavior of underground structure in multi-aquifer-aquitard groundwater system. *Natural hazards*, 66, PP. 731-748.

