تخمین گنجایش تبادل کاتیونی خاک با استفاده از برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک

فرشید نوربخش، احمد جلالیان و حسین شریعتمداری[۱]

چکیده

گنجایش تبادل کاتیونی (CEC) از مهم‌ترین ویژگی‌های شیمیایی خاک است که کیفیت خاک‌ها را از جنبه‌های مختلف تحت تأثیر قرار می‌دهد. CEC در برآورد پتانسیل خطر فلزات سنگین و برخی آلاینده‌های آلی کاتیونی نیز مؤثر است، و یکی از مهم‌ترین پارامترهای ورودی در بسیاری از مدل‌های کامپیوتری، از جمله مدل EPIC است. روش‌های آزمایشگاهی که در اندازه‌گیری این ویژگی به کار می‌روند معمولاً وقت‌گیر و مشکل‌اند. از این رو، داشتن مدلی که بتواند CEC خاک را از روی دیگر ویژگی‌های خاک تخمین بزند ضروری است. در این پژوهش رابطه CEC (به عنوان متغیر تابع) با درصد اندازه ذرات، درصد مواد آلی و pH خاک (به عنوان متغیرهای مستقل) بررسی گردید. این بررسی با استفاده از اطلاعات ٤٦٤ نمونه خاک از افق‌های مختلف صورت گرفت.

*نتایج نشان داد CEC خاک‌ها با درصد شن هم‌بستگی معکوس (r = -۰/۳۸۹ ***)، و با درصد مواد آلی (r =۰/۷۷۲ ***)، درصد رس (r =۰/۳۹۱ ***) و درصد سیلت (r =۰/۲۳۳ ***) هم‌بستگی مستقیم دارد. میان CEC و pH خاک‌ها ارتباط معنی‌داری دیده نشد. جدا سازی خاک‌ها به افق‌های A، B و C نشان داد سهم رس و مواد آلی در CEC افق‌های مختلف یکسان نیست. جدا کردن خاک‌های اریدی‌سول و انجام هم‌بستگی‌های چند متغیره، در مقایسه با کل خاک‌ها، تخمین دقیق‌تری به دست نیاورد. جدا سازی خاک‌های اسیدی و انجام هم‌بستگی‌های چند متغیره نشان داد که در این خاک‌ها ماده آلی مهم‌ترین عامل مؤثر بر CEC خاک است.*

واژه‌های کلیدی: *گنجایش تبادل کاتیونی، هم‌بستگی ساده خطی و چند متغیره، کیفیت خاک*

۱. به ترتیب استادیار، استاد و استادیار خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-02-06]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.3.8.1]

مقدمه

گنجایش تبادل کاتیونی یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های شیمیایی و کلوییدی خاک است. این ویژگی کلیدی بر بسیاری از ویژگی‌های دیگر خاک از جمله توان نگهداری و تحرک عناصر غذایی چون پتاسیم، آمونیوم، کلسیم، منیزیم، آهن، منگنز و ... تأثیر می‌گذارد (۵ و ۱۳). در ایالت اوهایو، تخمین سطح مطلوب پتاسیم تبادلی خاک (برحسب میلی‌گرم بر کیلوگرم) از طریق یک معادله تجربی و با اطلاع از CEC به صورت زیر انجام می‌گیرد (۵):

(CEC + ۲۲۰) × ۵ = سطح مطلوب (آرمانی) پتاسیم تبادلی [۱]

از سوی دیگر، CEC یکی از ویژگی‌های مهم خاک در برآورد خطرات زیست‌محیطی حاصل از فلزات سنگین و برخی آلاینده‌های آلی کاتیونی است، به طوری که CEC بیشتر، امکان آلوده شدن آب‌های زیرزمینی و سطحی را به عوامل آلاینده کاتیونی کاهش می‌دهد. هم‌چنین، خطر ورود فلزات سنگین به زنجیره‌های غذایی در خاک‌هایی که دارای CEC بیشتری هستند، کمتر است (۱۰ و ۱۳). افزون بر این، CEC از جمله مهم‌ترین داده‌های ورودی مورد لزوم بسیاری از مدل‌های کامپیوتری است، که برای تخمین حاصل‌خیزی خاک، قابلیت جذب عناصر و فرسایش خاک به کار می‌رود. از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل EPIC اشاره کرد، که در برآورد مقدار فرسایش و قابلیت تولید محصول در یک خاک به کار می‌رود (۱٦).

روش‌های مختلفی برای تعیین CEC خاک وجود دارد، که عموماً دارای پایهٔ نظری یکسانی هستند. معمول‌ترین روش اندازه‌گیری CEC در ایران شامل شست‌شوی خاک با استات سدیم، خارج کردن نمک‌های محلول با الکل اتیلیک و سپس اندازه‌گیری سدیم حاصل از شست‌شو با استات آمونیوم است. این روش مانند بسیاری از دیگر روش‌های اندازه‌گیری CEC وقت‌گیر بوده و نیازمند صرف مواد آزمایشگاهی زیادی است. آرنود و سپتون (۳) اظهار می‌دارند CEC از یک سو به عنوان یک شاخص مهم در تعیین استعداد اراضی اهمیت دارد، و از سوی دیگر، به دلیل مشکلات اندازه‌گیری، در بسیاری موارد از آن خودداری می‌شود، به طوری که به عنوان مثال، در بسیاری از بانک‌های اطلاعاتی موارد اندازه‌گیری شده بافت و درصد کربن آلی به مراتب بیشتر از موارد اندازه‌گیری شده CEC است. به همین دلیل، کوشش‌های زیادی به منظور یافتن یک روش تخمین آزمایشگاهی آسان صورت گرفته است. سیوانت (۱۱) از روش آسان متیلن بلو برای تخمین سریع CEC شماری از خاک‌های ایالات آلاباما استفاده کرد. وی معتقد است برای تعیین محل دفن بسیاری از زباله‌ها و پس‌مانده‌های شیمیایی، آگاهی از وضعیت CEC لازم است، و از این رو تخمین CEC از طریق روش‌های سریع کفایت می‌کند. نوربخش و افیونی (۲) دریافتند که CEC اندازه‌گیری شده از روش متیلن بلو در خاک‌های آهکی، هم‌بستگی ضعیفی با CEC حاصل از روش استات آمونیوم دارد. سون (۱۲) نیز نتایج مشابهی را گزارش کرده است. دریک و موتو (٤)، و هم‌چنین آرنود و سپتون (۳) نشان دادند در صورتی که از مقدار CEC خاک اطلاعی در دست نباشد، آنالیزهای رگرسیونی چند متغیره از روی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک، موفقیت‌آمیزترین روش برآورد ظرفیت تبادل کاتیونی است. یریما و همکاران (۱۷) با استفاده از آنالیزهای رگرسیونی دریافتند که رس، کربن آلی و pH، بیش از ۵۱ درصد از تغییرات CEC کل خاک‌های مورد بررسی را توجیه می‌کند (این پژوهش با استفاده از پایگاه اطلاعاتی بلک لند تگزاس صورت گرفته است، که به طور کلی شامل بیش از ۱۲۰۰۰ اطلاعات خاک می‌باشد). این پژوهندگان گفته‌اند در خاک‌های رده‌های آلفی‌سول، اینسپتی‌سول، مالی‌سول و ورتی سول، رس و مواد آلی، بیش از ٦۷ درصد تغییرات CEC را توضیح می‌دهد، در حالی که این مقدار برای رده‌های انتی‌سول و اسپودوسول ۷۸ درصد، و در خاک‌های اریدی‌سول کمتر از ۵۰ درصد است. تامسون و همکاران (١٤) گزارش دادند سهم مواد آلی خاک در CEC خاک‌های منطقه مرکزی آیوا بیش از سهم رس‌هاست.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-02-06]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.3.8.1]

به طور کلی، در پژوهش‌هایی که CEC از روی ویژگی‌های دیگر برآورد می‌شود، فرض بر این است که CEC حاصل عمل دو جزء رس و مواد آلی خاک است. بیان ریاضی این مطلب به صورت زیر است:

$$CEC = b\ OM + c\ C \qquad [۲]$$

که در این فرمول OM و C به ترتیب درصد مواد آلی و رس خاک، و b و c ضرایب آنها می‌باشند. ضرایب b و c بیانگر CEC هر یک از اجزاء به طور خالص است. استفاده از رگرسیون‌های چند متغیره برای به دست آوردن معادلات فوق معمولاً با یک ضریب ثابت (a) همراه است، که شکل معادله را به صورت زیر در می‌آورد:

$$CEC = a + b\ OM + c\ C \qquad [۳]$$

از آن جا که ممکن است CEC تحت تأثیر عواملی چون pH قرار بگیرد، و یا ممکن است بخش کوچکی از کانی‌های موجود در بخش سیلت نیز سهم اندکی در CEC داشته باشند، و یا ممکن است در یک جامعه آماری بزرگ از خاک‌ها، هم‌بستگی معکوسی بین CEC و درصد شن خاک‌ها وجود داشته باشد، مدل فوق ممکن است به صورت زیر درآید:

$$CEC = a + b\ OM + c\ C + d\ Si + e\ S + f\ pH \qquad [٤]$$

که در این فرمول Si و S به ترتیب درصد سیلت و شن خاک‌هاست. مدل ٤ ضمن این که مدل‌های ۲ و ۳ را نیز در بر می‌گیرد، تأثیر احتمالی دیگر پارامترها را در صورت مؤثر بودن شامل شده، و ممکن است ضریب هم‌بستگی بیشتر و یا خطای استاندارد تخمین (Standard error of the estimate) کمتری ایجاد کند، که نهایتاً منجر به تخمین دقیق‌تری از CEC گردد.

مانریک و همکاران (۸) ضریب b معادله‌های فوق را برای خاک‌های مورد بررسی و مدل‌های مختلف بین ۱/۹۲۵ تا ٤/٦٧٦ (به ترتیب معادل CEC برابر با ۱۹۲/۵ تا ٤٦٧/٦ سانتی‌مول بر کیلوگرم ماده آلی) برآورد کردند.

کریمیان (۱) در پژوهش مشابهی سهم رس و مواد آلی خاک را در گنجایش تبادل کاتیونی برخی خاک‌های استان فارس برآورد کرد. نتایج این پژوهش نشان داد که سهم رس در این خاک‌ها بین ۱۹ تا ۳۸، و سهم ماده آلی بین ۱٦۱ تا ۲۸۷ سانتی‌مول بر کیلوگرم است.

در ایران، گسترش مراکز صنعتی از یک سو، و کاربرد برخی کودها همچون لجن فاضلاب از سوی دیگر، سطح بزرگی از اراضی کشور را در معرض آلودگی‌های فلزات سنگین و دیگر آلودگی‌های کاتیونی قرار داده است، که برای ارزیابی خطرات زیست‌محیطی آنها، آگاهی از برخی ویژگی‌های کلیدی مانند CEC را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد. از آن جا که اطلاعات لازم در این زمینه اندک است، و از سوی دیگر اندازه‌گیری CEC به تعداد زیاد، مستلزم صرف وقت، هزینه و نیروی آزمایشگاهی بسیار زیادی است، استفاده از مدل‌های رگرسیونی در تخمین CEC می‌تواند مفید باشد. به علاوه، اطلاع از CEC خاک‌ها، امکان استفاده از بسیاری مدل‌های کامپیوتری را میسر می‌سازد.

هدف از انجام این پژوهش یافتن امکان تخمین آماری CEC از روی برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، شامل درصد اندازه ذرات، درصد مواد آلی و pH است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش با استفاده از ٤٦٤ نمونه خاک از افق‌های مختلف A، B و C خاک‌های رده‌های اریدی‌سول، آنتی‌سول، اینسپتی‌سول، مالی‌سول، آلفی‌سول و اولتی‌سول نقاط مختلف ایران صورت گرفت. داده‌های ٤۱۰ نمونه از خاک‌ها از برخی از پایان‌نامه‌های کارشناسی ارشد رشته خاک‌شناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان، که در طول بیش از یک دهه جمع‌آوری شده است، استخراج گردید، و ٥٤ نمونه خاک نیز از خاک‌های اسیدی استان گیلان جمع‌آوری و تجزیه‌های مشابه در آنها صورت گرفت، تا باعث افزایش تنوع داده‌های مورد بررسی گردد.

از میان خاک‌های مورد بررسی، ۲۲۳ نمونه (٤۸/۱ درصد از نمونه‌ها) متعلق به خاک‌های اریدی‌سول و ٥٤ نمونه (۱۱/٦ درصد از نمونه‌ها) متعلق به خاک‌های اولتی‌سول می‌باشد. در ۳۷۹ نمونه (۸۱/۷ درصد نمونه‌ها)، pH بیشتر از ۷/۰ و در ۸٥

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-02-06]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.3.8.1]

نمونه (۱۸/۳ درصد نمونه‌ها)، pH کمتر از ۷/۰ است. هم‌چنین، ۱۲۷ نمونه (۲۷/٤ درصد نمونه‌ها) متعلق به افق A، ۲٤٦ نمونه (۵۳/۰ درصد نمونه‌ها) متعلق به افق B و ۹۱ نمونه (۱۹/٦ درصد نمونه‌ها) متعلق به افق C می‌باشند.

در تمام نمونه‌های خاک، درصد اندازه ذرات به روش پیپت (٦)، درصد مواد آلی به روش واکلی ـ بلاک (۹) و ظرفیت تبادل کاتیونی به روش بوور (۷) تعیین شده است.

مطالعات آماری شامل رگرسیون‌های ساده خطی و رگرسیون‌های چند متغیره گام به گام (Stepwise) با استفاده از نرم‌افزار استات گرافیکس صورت گرفت. برای برازش اطلاعات از معادله‌های ۳ و ٤ استفاده شد. تجزیه‌های آماری فوق یک بار برای کل داده‌ها، یک بار پس از جدا کردن اطلاعات، به طور جداگانه برای افق‌های A، B و C، یک بار اختصاصاً برای خاک‌های رده اریدی‌سول و یک بار هم اختصاصاً برای خاک‌های اسیدی (pH< ۷/۰) انجام گردید. در هر یک از موارد، ضریب هم‌بستگی، ضریب تعیین، سطح معنی‌دار بودن، خطای استاندارد تخمین، و ضرایب ویژگی‌های خاک تعیین، و براساس آن تفسیرهای لازم صورت گرفت.

نتایج و بحث

چنان که در جدول ۱ دیده می‌شود گستره وسیعی از ویژگی‌های خاک در این پژوهش به کار رفته است. خاک‌ها از نظر درصد اندازه ذرات، درصد مواد آلی و گنجایش تبادل کاتیونی دامنه نسبتاً گسترده‌ای داشتند. دامنه میزان شن، سیلت و رس در کل خاک‌های مورد بررسی به ترتیب ۰/۷–۱۰۰، ۰–۸۲/۲ و ۰–۷۲/۷ درصد است. این دامنه برای درصد مواد آلی ۰–۸/۱۱، برای pH ٤/٤–۸/۵ و برای CEC ۰–۵۱/۱ سانتی‌مول (+) بر کیلوگرم خاک بود (جدول ۱). در این پژوهش نخست کل نمونه‌ها (بدون در نظر گرفتن نوع افق و رده) به صورت یک جامعه آماری بزرگ (شامل ٤٦٤ نمونه) در نظر گرفته شد و هم‌بستگی ساده خطی و چند متغیره برای آنها انجام گردید. ماتریس هم‌بستگی‌های ساده خطی ویژگی‌های مورد بررسی در جدول ۲ به چشم می‌خورد. همان گونه که دیده می‌شود، هم‌بستگی گنجایش تبادل کاتیونی، بجز با pH، با کلیه ویژگی‌ها شامل درصد مواد آلی، رس، سیلت و شن در سطح ۰/۰۰۱ معنی‌دار است. در میان این ویژگی‌ها هم‌بستگی CEC با شن منفی ولی با مواد آلی، رس و سیلت مثبت است.

جدول ۳ نشان دهنده ضرایب رگرسیون ساده و خطای استاندارد تخمین میان CEC (به عنوان متغیر تابع) و هر یک از ویژگی‌های خاک (به عنوان متغیر مستقل) است. در این جدول ویژگی‌هایی که با CEC رابطه معنی‌دار داشتند آورده شده است. هم‌بستگی مثبت CEC با رس و مواد آلی به دلیل مشارکت آنها در ایجاد بارهای منفی و پدیده تبادل کاتیونی است، ولی هم‌بستگی منفی CEC با درصد شن از آن رو است که با افزایش شن اولاً از مقدار ذرات دیگر مانند درصد رس کاسته می‌شود. به سخن دیگر، با افزایش شن ذراتی که دارای توانایی ایجاد بار منفی و ایجاد گنجایش تبادل کاتیونی هستند کاهش می‌یابد. این پدیده به صورت یک رابطه منفی معنی‌دار بین درصد شن و درصد رس خاک‌ها به چشم می‌خورد (r=–۰/۷۷٤***). ثانیاً بین درصد شن و درصد مواد آلی خاک‌ها نیز یک ارتباط منفی معنی‌دار وجود دارد (r=–۰/۱۸۸***). بنابراین، تأثیر کاهنده درصد شن بر CEC ناشی از ارتباط منفی درصد شن با درصد رس و مواد آلی خاک‌هاست (جدول ۲). کاهش درصد مواد آلی خاک با افزایش درصد شن را می‌توان به سرعت افزون‌تر فرایندهای تجزیه در خاک‌های شنی نسبت داد، که تهویه بیشتر دارند (۱۵).

معادله ۳ به عنوان یک مدل چند متغیره، ضریب تعیین (R^2) بزرگ‌تری نسبت به دیگر مدل‌های ساده خطی نشان داد. این معادله به صورت زیر است:

$$CEC = ٤/٧٤ + ٧/٣٥\ OM + ٠/٢٧\ C \quad (\text{کل خاک‌ها}) \qquad [۵]$$

$$(R^2 = ٠/٦٦٩^{***}) \qquad SEE = ٨/٢٠$$

که در این معادله، OM و C به ترتیب درصد مواد آلی و رس، و SEE خطای استاندارد تخمین است.

ضرایب OM (۷/۳۵) و C (۰/۲۷) بیانگر آن هستند که

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-02-06]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.3.8.1]

جدول ۱. ویژگی‌های خاک‌های مورد بررسی

ویژگی خاک	شاخص آماری	کل نمونه‌ها	افق A	افق B	افق C	خاک‌های اریدی‌سول	خاک‌های اسیدی
شن (٪)	میانگین	۳٤/۷	۳۳/۷	۲۹/٦	٤۹/۷	۳۸/۵	۳۲
	انحراف معیار	۲۵/۷	۲۲/۸	۲۵/۵	۲٤/٤	۲٦/۸	۱۸
	دامنه	۰/۷–۱۰۰	۰/۷–۸۸/٤	۰/۷–۹۵/۲	۳/۷–۱۰۰	۱/۳–۱۰۰	۱/۵–۷٦
سیلت (٪)	میانگین	۳۷/۱	۳۹/۱	۳۹/۰	۲۹/٤	۳۵/۵	۳۷/٦
	انحراف معیار	۱٦/۵	۱٦/۳	۱۵/۸	۱٦/٤	۱۷/٦	۱۱
	دامنه	۰–۸۲/۲	۷/۳–۸۲/۲	۰/۲–۷۷/۳	۰–۷۳/٤	۰–۸۱/۷	۹/۷–۵۵/۷
رس (٪)	میانگین	۲۸/۱	۲٦/۹	۳۱/۵	۲۰/۸	۲٦/٤	۳۰/۱
	انحراف معیار	۱۵/۳	۱۲/۷	۱٦/۲	۱۳/۰	۱۵/۵	۱۰/٦
	دامنه	۰–۷۲/۷	٤/۳–٦۱/۵	۱/۵–۷۲/۷	۰–۵۲/۵	۰–٦۰	۸/٦–٦۳/۳
مواد آلی (٪)	میانگین	۱/۰۱	۲/۰۲	۰/۷۵	۰/۲۸	۰/۳۳	۳/۲۳
	انحراف معیار	۱/٤۷	۲/۱۱	۰/۹٦	۰/۳۲	۰/۳٦	۱/۸۸
	دامنه	۸/۱۱	۰–۸/۱۱	۰/۰۲–٤/۸۲	۰–۱/۷	۰/۰۲–۲/۲۱	۰/۳۳–۸/۱۱
pH	میانگین	۷/٤	۷/۳	۷/۵	۷/۳	۷/٦	۵/٦
	انحراف معیار	۰/٦	۰/۷	۰/٦	۰/۵	۰/٤	۰/۵
	دامنه	٤/٤–۸/۵	٤/٤–۸/۵	٤/۷–۸/۵	۵/۵–۸/۳	٦–۸/۵	٤/٤–٦/۲
CEC ($cmol_c$ / kg)	میانگین	۱۹/۸۵	۲٤/٤٤	۲۰/۱۲	۱۲/۵	۱۱/۰	۳۸/۸
	انحراف معیار	۱٤/۹۳	۱۷/٦٦	۱٤/٦۳	٦/۷	۵/۸	۱۵/۷
	دامنه	۰–٦۹/۰	٤/۱۹–٦۷/۰	۰/۹۱–٦۹/۰	۰–٤۳/٦	۰–۳۷/۳	۱۱/۳–٦۹

جدول ۲. ماتریس هم‌بستگی ویژگی‌های خاک‌های مورد بررسی

	pH	درصد شن	درصد سیلت	درصد رس	درصد مواد آلی
گنجایش تبادل کاتیونی	۰/۰۹ n.s	–۰/۳۸۹ ***	۰/۲۳۳ ***	۰/۳۹۱***	۰/۷۷۲***
درصد مواد آلی	–۰/۲۸۹***	–۰/۱۸۸ ***	۰/۱۳۹ ***	۰/۱۵۷ ***	۱
درصد رس	۰/۰۲ n.s	–۰/۷۷٤ ***	۰/۳۰٤ ***	۱	
درصد سیلت	۰/۰۳ n.s	–۰/۸۱۳ ***	۱		
درصد شن	–۰/۰۳ n.s	۱			

افزایش یک درصد ماده آلی سبب ۷/۳۵ واحد افزایش در CEC می‌شود، حال آن که افزایش یک درصد رس سبب ۰/۲۷ واحد افزایش در CEC می‌گردد. در شکل ۱، نمودار پراکنش CEC تخمینی از معادله ۵، در برابر CEC اندازه‌گیری شده خاک‌ها نشان داده شده است. چنان که دیده می‌شود، ضریب تعیین این رابطه ۰/٦٦۹ است، که در سطح ۰/۰۰۱ معنی‌دار است.

استفاده از معادله ٤ به عنوان یک مدل چند متغیره، نیز نتیجه تقریباً مشابهی برای CEC کل خاک‌ها به همراه دارد:

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-02-06]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.3.8.1]

جدول ۳. مشخصات آماری هم‌بستگی CEC با سایر ویژگی‌های خاک‌های مورد بررسی

	ضریب هم‌بستگی	ضریب تعیین (٪)	SEE	عرض از مبدأ (a)	شیب (b)
		کل خاک‌ها			
مواد آلی	۰/۷۷۲***	۵۹/۶۷	۹/۵۲	۱۱/۹۳	۷/۷۸
رس	۰/۳۹۱***	۱۵/۲۹	۱۳/۸۱	۹/۰۶	۰/۳۸۳
سیلت	۰/۲۳۳***	۵/۴۵	۱۴/۵۹	۱۱/۹۸	۰/۲۱
شن	-۰/۳۸۹***	۱۵/۱۰	۱۳/۸۲	۲۷/۶۹	-۰/۲۳
		افق A			
مواد آلی	۰/۸۶۷***	۷۵/۲۴	۸/۹۹	۹/۲۶	۷/۱۹
رس	۰/۳۷۵***	۱۴/۰۶	۱۶/۷۵	۸/۵۲	۰/۵۹
سیلت	ns ۰/۱۱	۱/۳	۱۷/۹۵	۱۸/۷۵	۰/۱۲
شن	-۰/ ۲۷***	۷/۶۶	۱۷/۳۶	۳۱/۲۴	-۰/۲۲
		افق B			
مواد آلی	۰/۷۶۰***	۵۷/۸۴	۹/۵۳	۱۱/۶۹	۱۰/۹۹
رس	۰/۳۵۷***	۱۲/۷۳	۱۳/۷۲	۹/۹۷	۰/۳۲
سیلت	۰/۲۰۹***	۴/۳۹	۱۴/۳۶	۱۲/۵۴	۰/۱۹
شن	-۰/۳۶۱***	۱۳/۰۵	۱۳/۶۹	۲۶/۲۵	-۰/۲۱
		افق C			
مواد آلی	۰/۵۴۲***	۲۹/۴۰	۵/۶۸	۹/۲۸	۱۱/۴۳
رس	۰/۵۴۸***	۳۰/۰۳	۵/۶۶	۶/۶۶	۰/۲۸
سیلت	۰/۳۸۵***	۱۴/۸۶	۶/۲۴	۷/۸۹	۰/۱۶
شن	-۰/۵۸۶***	۳۴/۳۸	۵/۴۸	۲۰/۵۰	-۰/۱۶
		خاک‌های اریدی‌سول			
مواد آلی	۰/۴۳۸***	۱۹/۱۸	۵/۲۸	۸/۸۲	۶/۵۳
رس	۰/۴۳۱***	۱۸/۶۲	۵/۲۹	۶/۶۹	۰/۱۶
سیلت	۰/۴۰۱***	۱۶/۰۷	۵/۳۸	۶/۲۵	۰/۱۳
شن	-۰/۴۹۷***	۲۴/۷۰	۵/۰۹	۱۵/۱۵	-۰/۱۱

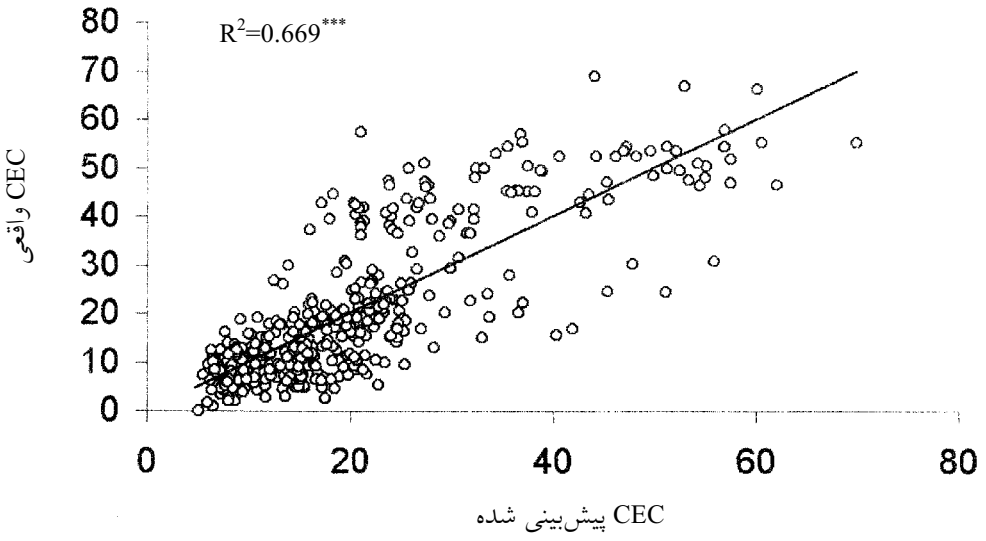
$$CEC = ۸/۷۴ + ۷/۲۹\ OM + ۰/۲۰\ C - ۰/۰۵S \qquad [۶]$$

$$SEE = ۸/۵۷ \qquad (R^۲ = ۰/۶۷۵***)$$

مانریک و همکاران (۸) برای مدلی مشابه با معادله ۳، ضریب تعیین ($R^۲$) را ۰/۵۵ به دست آوردند، ولی با وارد کردن

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-02-06]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.3.8.1]



شکل ۱. CEC تخمینی از معادله ۵ در برابر CEC اندازه‌گیری شده (واقعی)

آلومینیم تبادلی به مدل توانستند آن را تا ۰/۹۱ افزایش دهند. ولی در پژوهش حاضر ورود درصد شن به مدل تنها باعث افزایش ضریب تعیین مدل از ۰/٦٦٩ به ۰/٦٧٥ شد. pH و درصد سیلت نیز در روش هم‌بستگی گام به گام وارد مدل نگردید.

نکته دیگری که در جدول ۲ به چشم می‌خورد، هم‌بستگی منفی معنی‌دار میان مواد آلی خاک و pH آن است. زیرا، نخست آن که نمونه‌های خاک با pH کم مربوط به نقاط دارای بارندگی زیاد و در نتیجه پوشش گیاهی بهتر و مواد آلی بیشتر هستند، و در نتیجه CEC این خاک‌ها نسبت به خاک‌های دارای pH زیادتر از ۷، بیشتر شده است (جدول ۱ نشان می‌دهد که میانگین CEC خاک‌های اسیدی ۳۸/۸ است، حال آن که میانگین CEC کل خاک‌ها ۱۹/۸۵ می‌باشد). به علاوه، با افزایش مواد آلی خاک مقدار گاز دی‌اکسید کربن حاصل از تجزیه آن نیز افزایش می‌یابد. با افزایش گاز دی‌اکسید کربن، اسید کربنیک بیشتری حاصل می‌شود، که باعث کاهش pH می‌گردد (۱۳).

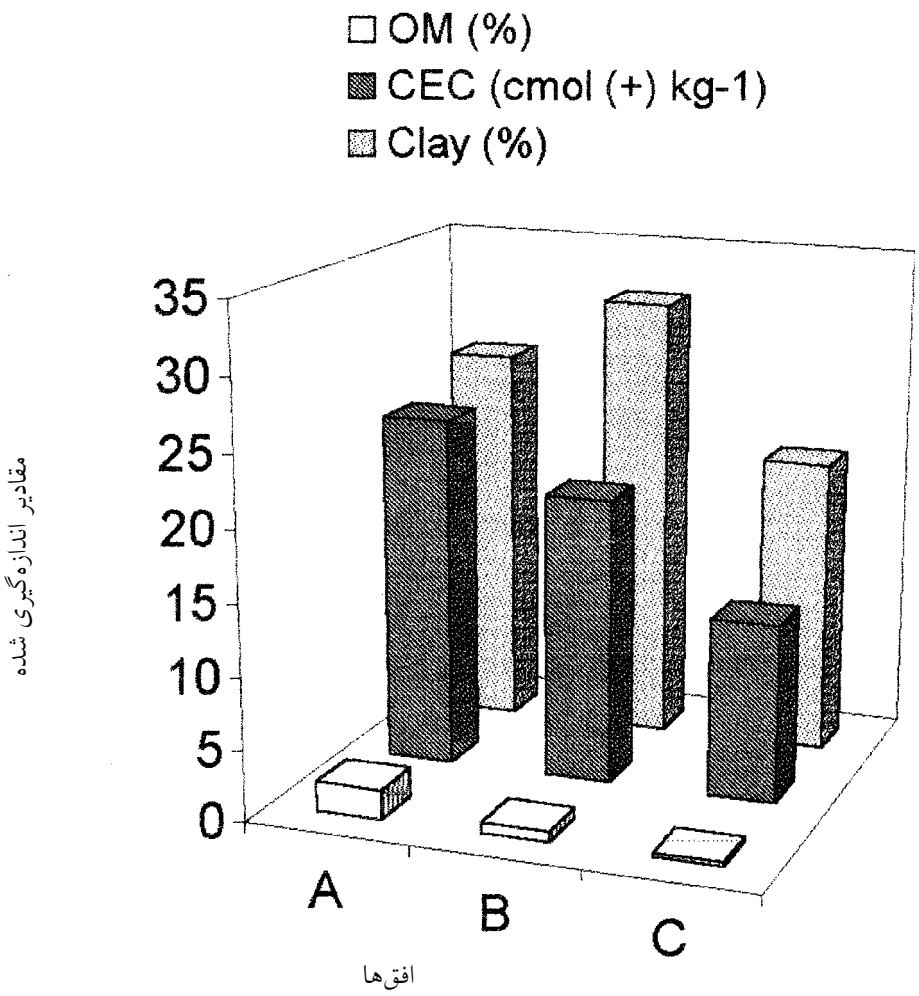
بررسی هم‌بستگی‌های ساده خطی و چند متغیره به جدا سازی افق‌ها

شکل ۲ میانگین درصد رس، درصد مواد آلی و گنجایش تبادل کاتیونی را در افق‌های A، B و C نشان می‌دهد. درصد مواد آلی افق A بیشتر از افق B، و درصد مواد آلی افق B بیشتر از افق C است. این کاهش با توجه به روند معمول توزیع مواد آلی در پروفیل خاک، کاملاً طبیعی به نظر می‌رسد. آزمون t- استیودنت نشان داد که بین درصد کربن آلی در افق‌های A و B اختلاف معنی‌دار (P<۰/۰۱) وجود دارد. این اختلاف معنی‌دار بین افق‌های B و C نیز دیده می‌شود. از سوی دیگر، روند تغییر درصد رس در پروفیل خاک‌ها به گونه دیگری است، به طوری که رس در افق B انباشته شده است. این انباشتگی ناشی از پدیده انتقال است، که باعث جا به جایی رس‌ها از افق‌های سطحی (اپی‌پدون‌ها) به افق‌های تحت‌الارضی (افق‌های B) می‌گردد (۳).

آزمون t نشان داد که درصد رس در افق B به طور معنی‌دار (P<۰/۰۱) بیشتر از افق‌های A و C است. توزیع پروفیلی گنجایش تبادل کاتیونی با توزیع درصد رس و مواد آلی متفاوت است. آزمون t نشان می‌دهد که میان گنجایش تبادل کاتیونی افق‌های A و B در سطح یک درصد (P<۰/۰۱) تفاوت معنی‌داری وجود ندارد. نبودن تفاوت معنی‌دار در CEC افق‌های A و B (P<۰/۰۱) از آن رو است که اگرچه کاهش مواد آلی افق B نسبت به افق A ممکن است باعث کاهش CEC در

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-02-06]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.3.8.1]



شکل ۲. میانگین درصد رس، درصد مواد آلی و CEC خاک‌های مورد بررسی در افق‌های مختلف

افق B شود، ولی انباشتگی رس حاصل از فرایند انتقال به افق B باعث افزایش CEC از منشأ رس شده، سرانجام یکدیگر را جبران کرده‌اند. در این باره باید توجه داشت که سهم مواد آلی و رس در CEC افق‌های A و B یکسان نیست.

وجود چنین تمایزهای نهادین میان افق‌های خاک‌ها، نویسندگان این مقاله را بر آن داشت تا تحلیل‌های رگرسیون ساده خطی و چند متغیره را برای هر یک از افق‌های A، B و C جداگانه انجام دهند. در جدول ۳ نتایج تحلیل رگرسیون‌های ساده خطی دیده می‌شود. در هر یک از افق‌ها نیز ارتباط معنی‌دار مثبت بین CEC و درصد ماده آلی، رس و سیلت به چشم می‌خورد. هم‌چنین، ارتباط معکوس معنی‌دار CEC و درصد شن باقی است.

به کارگیری مدل چند متغیره معادله ۳ برای افق‌های A منجر به معادله زیر گردید:

$$CEC = ۲/٤٧ + ٦/٨٤\ OM + ۰/۲۹\ C \qquad [۷]$$

$$(R^۲ = ۰/٧٨٦^{***}) \qquad SEE = ٨/٣٩٨$$

کاربرد معادله ٤ برای خاک‌های افق A نیز منجر به معادله فوق می‌شود، و هیچ ویژگی دیگری مانند شن، سیلت، یا pH وارد مدل نمی‌شود. با توجه به ضرایب OM و C می‌توان دریافت که با افزایش یک درصد ماده آلی، ٦/٨٤ واحد به CEC خاک اضافه می‌شود، حال آن که با افزایش یک درصد رس تنها ۰/۲۹ واحد به CEC خاک افزوده می‌شود.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-02-06]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.3.8.1]

چنان که از مدل چند متغیره معادله ۳ برای افق‌های B نیز استفاده گردد، معادله زیر به دست می‌آید:

$$CEC = ٤/٩٦ + ١٠/٤٦\ OM + ٠/٢٣\ C \qquad [٨]$$

$$(R^{٢} = ٠/٦٤٠^{***}) \qquad SEE = ٨/٨٣$$

تفاوت ضریب OM در معادله‌های ۷ و ۸ ناشی از تفاوت ماهیت مواد آلی در افق‌های A و B است. هرچه ضریب OM در فرمول‌های فوق بیشتر باشد، نشان دهنده آن است که گنجایش تبادل کاتیونی به ازای واحد وزن ماده آلی خالص بیشتر است. مواد آلی راه یافته به افق B مواد تجزیه شده و کاملاً هوموسی هستند که یا همراه رس‌ها به صورت کمپلکس‌های رس- مواد آلی، و یا به صورت محلول مهاجرت کرده‌اند. از آن جا که بخش محلول هوموس خاک عمدتاً شامل فعال‌ترین بخش هوموس است (۱۳)، انتظار می‌رود با توجه به ضرایب معادلات ۷ و ۸، CEC مواد آلی افق B بیشتر از مواد آلی افق A باشد. به دلیل آن که در افق A هر ساله مقداری مواد آلی عمدتاً حاصل از بقایای گیاهی تازه اضافه می‌شود، و چون در هر زمان بخشی از این مواد در مراحل اولیه فرایند هوموسی شدن می‌باشند، CEC حاصل از ماده آلی در افق A معمولاً کمتر از CEC مواد آلی افق B است، ولی به علت فراوانی بیشتر مواد آلی (درصد مواد آلی) در افق A سهم ماده آلی در CEC کل افق A، نسبت به افق B بیشتر است. مانریک و همکاران (۸) نیز گزارش کردند CEC مواد آلی برای افق B بیشتر از افق A است (٤٢٦ در برابر ٣٦٧). کاهش بخش رس افق A در اثر انتقال آن به افق B نیز این پدیده را تشدید می‌کند.

استفاده از مدل چند متغیره معادله ٤ برای افق‌های B، معادله زیر را به دست می‌دهد:

$$CEC = ١٠/٣٨ + ١٠/٣٩\ OM + ٠/١٣\ C + ٠/٠٨\ S \qquad [٩]$$

$$(R^{٢} = ٠/٤٣٥^{***}) \qquad SEE = ٧/٧٣$$

ضریب تعیین این معادله نسبت به معادله ۸ افزایش چندانی ندارد. به سخن دیگر، ورود شن به این مدل نمی‌تواند کمک زیادی به افزایش دقت و اعتبار مدل کند.

در جدول ۳ نتایج تجزیه رگرسیون‌های ساده خطی برای افق‌های C نیز دیده می‌شود. CEC این افق نیز با درصد مواد آلی، رس و سیلت هم‌بستگی مستقیم و با درصد شن هم‌بستگی معکوس دارد. نتایج تجزیه رگرسیون‌های چند متغیره با استفاده از معادله ۳، نتیجه زیر را برای افق‌های C به دست می‌دهد:

$$CEC = ٤/٤٨ + ١٠/٠٨\ OM + ٠/٢٥\ C \qquad [١٠]$$

$$(R^{٢} = ٠/٥٢٥^{***}) \qquad SEE = ٤/٦٩$$

ضریب مواد آلی در این افق از ضریب مواد آلی در معادله مربوط به افق‌های A بیشتر است، که نشان می‌دهد احتمالاً مواد آلی موجود در افق‌های C به رغم اندک بودن، شدیداً هوموسی شده و گنجایش تبادل کاتیونی زیادی دارند. برای اثبات این فرضیه لازم است در آینده کیفیت مواد آلی افق‌های مختلف و شدت هوموسی شدن آنها بررسی شود. اگر از معادله ٤ به عنوان مدل چند متغیره استفاده شود، تأثیر شن نیز معنی‌دار شده و معادله ۱۰ به صورت زیر در می‌آید:

$$CEC = ١٢/٣٣ + ٩/٨٤\ OM + ٠/١٢\ C + ٠/١\ S \qquad [١١]$$

$$(R^{٢} = ٠/٥٩٦^{***}) \qquad SEE = ٤/٣٥$$

این معادله نسبت به معادله ۱۰ ضریب تعیین چندان بزرگ‌تری ندارد. به سخن دیگر، ورود شن به معادله در ایجاد تخمین دقیق‌تر CEC نقش چشم‌گیری ندارد.

بررسی هم‌بستگی‌های چند متغیره خاک‌های اریدی‌سول

منطقه مرکزی ایران غالباً دارای رژیم رطوبتی اریدیک (توریک) است. مهم‌ترین رده خاک (بر اساس سیستم طبقه‌بندی خاک ایالات متحده) که در این منطقه امکان تشکیل می‌یابد، اریدی‌سول (Aridisols) است. در پژوهش حاضر مجموع خاک‌های متعلق به رده اریدی‌سول بالغ بر ۲۲۳ نمونه خاک است که ٤٨/١ درصد از کل خاک‌های مورد بررسی را به خود اختصاص می‌دهد. بین CEC خاک‌های اریدی‌سول (شامل نمونه‌های متعلق به افق‌های A، B و C) با درصد مواد آلی، درصد رس و درصد سیلت آنها هم‌بستگی خطی مستقیم و با درصد شن هم‌بستگی خطی معکوس وجود دارد (جدول ۳). نتایج تحلیل رگرسیون‌های چند متغیره بر اساس معادله ۳ برای

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-02-06]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.3.8.1]

خاک‌های اریدی‌سول به صورت زیر است:

$$CEC = ۵/۶۹ + ۵/۳۸\ OM + ۰/۱۳\ C \qquad [۱۲]$$

$$(R^۲ = ۰/۳۱***) \qquad SEE = ۸/۴۲$$

ضریب تعیین این معادله کوچک‌تر از ضرایب تعیین معادلات مربوط به افق‌ها است. چنین به نظر می‌رسد که جداسازی خاک‌ها بر اساس افق‌ها، توفیق بیشتری در افزایش ضریب تعیین روابط آماری مدل‌های چند متغیره نسبت به مدل‌های ساده خطی داشته است.

بررسی هم‌بستگی‌های چند متغیره در خاک‌های اسیدی

در پژوهش حاضر، ۸۵ نمونه خاک با pH< ۷ وجود دارد، که متعلق به خاک‌های مالی‌سول، آلفی‌سول و اولتی‌سول استان گیلان می‌باشند. بررسی هم‌بستگی چند متغیره گام به گام نشان می‌دهد که بجز ماده آلی خاک، هیچ ویژگی دیگری وارد مدل نمی‌شود، و معادله نهایی به صورت زیر در می‌آید.

$$CEC = ۲۰/۳۱ + ۵/۷۱\ OM \qquad [۱۳]$$

$$(r^۲ = ۰/۴۶۱***) \qquad SEE = ۱۱/۵۹$$

البته این نتیجه ممکن است مربوط به روش اندازه‌گیری CEC نیز باشد.

به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که در مواردی که به داشتن مقادیر دقیق CEC نیاز نباشد، برای تخمین CEC می‌توان از معادلات معنی‌دار آماری به دست آمده استفاده کرد، ولی با توجه به ضرایب هم‌بستگی، استفاده از این معادلات در شرایطی که نیاز به مقادیر دقیق CEC وجود دارد توصیه نمی‌شود. بدین منظور، جداسازی خاک‌ها به افق‌های مختلف باعث افزایش اعتبار آماری روابط گردید. هم‌چنین، معلوم شد CEC مواد آلی (بر حسب سانتی‌مول بر کیلوگرم ماده آلی) موجود در افق‌های زیرین بیشتر از CEC مواد آلی افق A می‌باشد، اگرچه سهم مواد آلی در CEC افق A بیشتر از افق‌های زیرین است. تساوی آماری CEC بین افق‌های A و B گویای آن است که به رغم کاهش مواد آلی نسبت به عمق، افزایش رس در فرایند انتقال باعث یکسان نگه داشتن توزیع CEC در ناحیه سولوم (Solum) خاک‌های مورد بررسی شده، به طوری که بین افق‌های A و B تفاوت معنی‌داری (P<۰/۰۱) در مقدار CEC دیده نشد. تحلیل‌های آماری داده‌های خاک‌های اریدی‌سول به عنوان گسترده‌ترین رده موجود در منطقه مرکزی ایران، ضریب هم‌بستگی بزرگ‌تری در روابط آماری فوق ایجاد نکرد. برای تخمین CEC خاک‌های اسیدی، تنها آگاهی از درصد مواد آلی آنها ۴۶/۱ درصد از تغییرات CEC را توجیه می‌کند.

در پایان لازم است تأکید گردد تخمین CEC از روی معادلات به دست آمده هرگز نمی‌تواند به طور کامل جای‌گزین اندازه‌گیری CEC خاک گردد. بنابراین، استفاده از این روابط تنها در مواردی که احتیاج به تخمین CEC (و نه اطلاع از میزان دقیق آن) وجود دارد، توصیه می‌شود.

سپاسگزاری

هزینه انجام این تحقیق از محل اعتبارات پژوهشی دانشگاه صنعتی اصفهان تأمین شده که بدین وسیله قدردانی می‌گردد. از جناب آقای مهندس صدر ارحامی نیز به دلیل همکاری ایشان در آزمایشگاه سپاسگزاری می‌شود.

منابع مورد استفاده

۱. کریمیان، ن.ع. ۱۳۷۵. سهم رس و مواد آلی در ظرفیت تبادل کاتیونی خاک‌های آهکی استان فارس. خلاصه مقالات پنجمین کنگره علوم خاک ایران، آموزشکده کشاورزی کرج.

۲. نوربخش، ف. و م. افیونی. ۱۳۷۶. بررسی امکان استفاده از جذب سطحی متیلن بلو جهت تخمین سریع ظرفیت تبادل کاتیونی خاک. پژوهش و سازندگی ۳۴: ۱۶۸-۱۷۰.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-02-06]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.3.8.1]

3. Arnaud, R. J. and G. A. Septon. 1972. Contribution of clay and organic matter to cation exchange capacity of chernozemic soils. Can. J. Soil Sci. 52: 124-126.
4. Drake, E. H. and H. L. Motto. 1982. An analysis of the effects of clay and organic matter content on cation exchange capacity of New Jersey soils. Soil Sci. 133(5): 281-288.
5. Foth, H. D. and B. G. Ellis. 1997. Soil Fertility. 2nd ed., Lewis Publ., Boca Raton, FL, USA.
6. Gee, G. W. and J. W. Bauder. 1986. Particle size analysis. PP. 383-411. *In*: A. Klute (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part l. Am. Soc. Agron., Madison, Wisconsin, USA.
7. Hesse, P. R. 1971. A Text Book of Soil Chemical Analysis. John Murray Ltd., London.
8. Manrique, L. A., C. A. Jones and P. T. Dyke. 1991. Predicting cation-exchange capacity from soil physical and chemical properties. Soil Sci. Soc. Am. J. 55: 787-794.
9. Nelson, D. W. and L. P. Sommers. 1986. Total carbon, organic carbon and organic matter. PP. 539-579. *In*: A. C. Page (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 2. Am. Soc. Agron., Madison, Wisconsin, USA.
10. Pierzynski, G. M., J. T. Sims and G. F. Vance. 1994. Soils and Environmental Quality. CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, USA.
11. Savant, N. K. 1994. Simplified methylene blue method for rapid determination of cation exchange capacity of mineral soils. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 25 (19&20): 3357-3364.
12. Soon, Y. K. 1988. A rapid method for cation exchange capacity estimation of mineral soils using methylene blue adsorption. Can. J. Soil Sci. 68: 165-169.
13. Sparks, D. L. 1995. Environmental Soil Chemistry. Academic Press, Inc., N. Y., USA.
14. Thompson, M. L., H. Zhang, M. Kazemi and J. A. Sandor. 1989. Contribution of organic matter to cation exchange capacity and specific surface area of fractionated soil materials. Soil Sci. 148: 250-257.
15. Thuries, L., M. Pansu, C. Feller, P. Herrmann and J. C. Remy. 2001. Kinetics of added organic matter decomposition in a Mediteranean sandy soil. Soil Biol. Biochem. 33: 997-1010.
16. Williams, J. R., C. A. Jones, J. R. Kiniry and D. A. Spanel. 1989. The EPIC crop growth model. Trans. ASAE 32: 497-511.
17. Yerima, B. P. K., L. P. Wilding, C. T. Hallmark and F. G. Calhoun. 1989. Statistical relationships among selected properties of northern Cameroon Vertisols and associated Alfisols. Soil Sci. Soc. Am. J. 53: 1758-1763.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-02-06]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1382.7.3.8.1]