

بررسی ارتباط بین مقاومت نفوذسنج افقی و تنش پیش تراکم خاک

مجتبی نادری بلداجی^{۱*}، عباس همت^۲ و توماس کلر^۳

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

۲- استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

۳- پژوهشگر موسسه تحقیقات کشاورزی و منابع آگروسکوپ، زوریخ، سوئیس

۴- استاد گروه علوم خاک، دانشگاه کشاورزی سوئد (SLU)، اوپسالا، سوئد

تاریخچه مقاله	چکیده
دریافت: ۱۳۹۵/۰۱/۱۶ پذیرش نهایی: ۱۳۹۵/۰۸/۱۲	در این مطالعه، ارتباط بین تنش پیش تراکم (σ_{pc}) و مقاومت نفوذسنج افقی (PR) به منظور پیشنهاد روشی جایگزین برای اندازه گیری پیوسته σ_{pc} و مدیریت دقیق تردد پذیری خاک در مزرعه بررسی شد. اندازه گیری های نفوذسنجی در ۹ مزرعه با بافت های مختلف (محتوای رس از $584 - 1189 \text{ g kg}^{-1}$) در سوئیس انجام شد. نمونه های دست نخورده خاک در نقاط مختلف در کنار خطوط اندازه گیری PR برداشته و در آزمایشگاه مورد آزمون فشار تک محوری محصور تحت بارگذاری گام به گام قرار گرفت. σ_{pc} از نقطه بیشینه انحنا منحنی لگاریتم تنش - نسبت پوکی با تحلیل تابع گمپرتز تخمین زده شد. نتایج نشان داد که تابع گمپرتز به خوبی منحنی لگاریتم تنش - نسبت پوکی را در بافت های مختلف بیان می کند و پارامترهای این تابع با مشخصه های فیزیکی خاک در ارتباط است. همبستگی نه چندان قوی ($R^2=0/47$ ، kPa) خاک در ارتباط است. همبستگی نه چندان قوی ($R^2=0/47$ ، kPa) خاک به طور معنی داری بهبود یافت ($R^2=0/59$ ، kPa) خاک (RMSE=13/7). در محدوده تغییرات آزمون شده، نوع بافت خاک (محتوای رس) تاثیری بر رابطه بین PR و σ_{pc} نشان نداد. این مطالعه پیشنهاد می دهد که ترکیب نفوذسنج افقی و حسگر رطوبت (برای مثال حسگر دی الکتریک) خاک می تواند ابزار مناسبی برای تخمین در حال حرکت تنش پیش تراکم و تهیه نقشه های مزرعه ای تردد پذیری خاک باشد.
کلمات کلیدی: تنش پیش تراکم، مقاومت نفوذسنج، تردد پذیری، فشردگی	
* عهده دار مکاتبات Email: naderi.mojtaba@agr.sku.ac.ir	

مقدمه

مدیریت تردد و فشردگی خاک های کشاورزی از جمله چالش های مهم در کشاورزی مدرن می باشد. پیشرفت فناوری در کشاورزی، خطر فشردگی خاک را با افزایش عملیات کشاورزی و استفاده از تجهیزات و

ماشین های سنگین تر برای دستیابی به بهره وری بیشتر افزایش داده است. فشردگی خاک علاوه بر تخریب ساختار خاک، مانع رشد مناسب ریشه گیاه و در نتیجه عدم دسترسی گیاه به آب و مواد غذایی شده، تولید محصول را کاهش می دهد، فرسایش و آلودگی خاک

افزایش فشردگی به واسطه تردد ماشین آلات بر مبنای تنش پیش تراکم به عنوان حد مجاز تنش توسعه داده شده‌اند (۲۶)؛ لذا استفاده عملی از این مدل‌ها نیاز به تقسیم خاک یک مزرعه به نواحی مدیریتی ترددپذیری بر مبنای تنش پیش تراکم دارد. به عنوان یک راهکار، کنترل فشار باد تایر در حال حرکت (به شکل پیوسته) می‌تواند در کنترل انتشار تنش در زیر تایر حامل بار موثر باشد (۱۸). در نواحی با استحکام پایین (برای مثال با رطوبت بالا) می‌توان با کاهش فشار باد تایر و افزایش سطح تماس تایر-خاک، تنش منتشر شده در خاک زیر تایر را پایین‌تر از حد استحکام خاک کنترل نمود. با این حال، به منظور تهیه نقشه‌های مزرعه‌ای σ_{pc} ، استفاده از روش‌های آزمایشگاهی متداول، زمان‌بر و پرهزینه است، همچنین نیاز به نمونه‌برداری‌های نقطه‌ای در مزرعه دارد که امکان تهیه نقشه‌های دقیق ظرفیت باربری خاک را محدود می‌کند؛ لذا نیاز به توسعه روش‌های جایگزین، سریع و غیر مستقیم جهت اندازه‌گیری پیوسته (در حال حرکت) این ویژگی خاک بیش از پیش ضرورت می‌یابد (۳۲).

نفوذسنج‌های افقی^۳ از جمله حسگرهای متداول و مورد توجه محققان کشاورزی دقیق در اندازه‌گیری در حال حرکت استحکام خاک در دو دهه اخیر بوده است (۱۹). علت محبوبیت این نوع حسگر را می‌توان در قابلیت اندازه‌گیری سریع و آسان استحکام خاک در عمق‌های مجزا در صورت به کارگیری یک سامانه چند نوکی از آن عنوان کرد (۱۱-۹ و ۲۱). مقاومت نفوذسنج افقی (PR) نیز بیان‌کننده وضعیت استحکام خاک می‌باشد که تحت تاثیر مشخصه‌های فیزیکی خاک مانند رطوبت و چگالی ظاهری می‌باشد؛ با توجه به اینکه PR و σ_{pc} هر دو پارامترهای مرتبط با وضعیت استحکام خاک می‌باشند، انتظار می‌رود که این دو پارامتر همبستگی قوی با یکدیگر داشته باشند و با اندازه‌گیری PR در حال حرکت، بلادرنگ بتوان σ_{pc} را پیش‌بینی نمود. در

را افزایش داده، باعث استفاده غیر کارآمد آب و مواد غذایی در اثر زهکشی ضعیف خاک خواهد شد (۱۷). فشردگی خاک نتیجه کاهش فضای هوا بین ذرات خاک در اثر اعمال تنش می‌باشد که منجر به افزایش چگالی ظاهری و کاهش نسبت پوکی^۱ خاک می‌گردد. عامل اصلی در افزایش فشردگی خاک تنش‌های اعمال شده بر سطح خاک به واسطه تردد ماشین‌ها می‌باشد؛ بویژه در خاک با رطوبت بالا، انتشار این تنش در خاک باعث ایجاد لایه‌های فشرده عمیق می‌شود (۱۷).

یکی از شاخص‌های سنجش تراکم‌پذیری (یا ترددپذیری) خاک تنش پیش تراکم^۲ (σ_{pc}) می‌باشد. σ_{pc} به عنوان ظرفیت باربری خاک یا تنش تسلیم، بیانگر حدی از تنش می‌باشد که مرز بین تغییر شکل‌های برگشت‌پذیر (الاستیک) و ماندگار (پلاستیک) در خاک است. در صورت کنترل تنش تا حدی کمتر از σ_{pc} ، انتظار آن می‌رود که تغییر شکل‌های ایجاد شده در خاک پس از باربرداری (عبور) برگشت‌پذیر باشد و اعمال تنش در حدی بالاتر از σ_{pc} باعث تغییر شکل‌های ماندگار و افزایش فشردگی شود (۲). σ_{pc} بیانگر استحکام ساختمان خاک در وضعیت طبیعی و یا حدی از تنش موثر که قبلاً به خاک وارد شده است، می‌باشد. مفهوم σ_{pc} در ابتدا برای خاک‌های اشباع توسعه داده شده بود (۷)؛ ولی تحقیقات نشان داد که کاربرد این مفهوم در خاک‌های غیر اشباع نیز به عنوان معیاری از ظرفیت باربری خاک مناسب می‌باشد (۳۲). اگر چه برخی مطالعات اخیر نشان می‌دهد که حتی با اعمال تنش تا حدی پایین‌تر از σ_{pc} تغییر شکل‌های ماندگار در خاک ایجاد می‌شود؛ ولی این نتیجه، نیاز به استفاده از یک ضریب اطمینان تجربی برای کنترل تنش را توصیه می‌کند (۲۸).

با توسعه فناوری کشاورزی دقیق، مدیریت موضعی تردد ماشین در مزرعه بیش از پیش مورد توجه محققان قرار گرفته است (۲۴). مدل‌های نظری برآورد خطر

1- Void ratio

2- Precompression stress

3- Horizontal penetrometer

توسط دیگر محققان نیز مجدداً برای خاک‌های با ساختمان ضعیف در ایران گزارش شد (۲۲). با مرور مطالعات گذشته، می‌توان نتیجه گرفت که نفوذسنجی (چه به شکل عمودی یا افقی) می‌تواند یک جایگزین سریع‌تر برای تخمین تنش پیش‌تراکم باشد؛ با این حال هیچ تحقیقی تا کنون مبنی بر امکان پیش‌بینی در حال حرکت σ_{pc} جهت ارائه یک اندازه‌گیری پیوسته برای کاربرد در تهیه نقشه‌های تردپذیری خاک در کشاورزی دقیق گزارش نشده است؛ لذا تحقیق حاضر با هدف بررسی امکان ارتباط بین مقاومت نفوذسنج افقی و تنش پیش‌تراکم در بافت‌های مختلف خاک انجام شد.

مواد و روش‌ها

اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای

برای انجام آزمون‌های مزرعه‌ای از نفوذسنج افقی نشان داده شده در شکل ۱ استفاده شد. این نفوذسنج افقی به صورت سوار به تراکتور متصل گردید و برای تثبیت عمق از دو چرخ فلزی بر روی شاسی آن استفاده شد. از یک لودسل^۶ ۵۰۰ kg برای اندازه‌گیری مقاومت نفوذ یک مخروط فولادی (با قطر ۲۵ mm و زاویه راس ۴۵°) استفاده شد. خروجی لودسل با استفاده از یک دیتالاگر^۷ اندازه‌گیری و ثبت شد. اندازه‌گیری‌ها در تابستان ۲۰۱۴ در ۹ مزرعه با بافت خاک متفاوت در سوئیس انجام گردید. شکل ۲ و جدول ۱ نوع بافت و مشخصات بافت خاک‌های آزمون شده را نشان می‌دهند. عمق اندازه‌گیری با نفوذسنج افقی ۰/۲۵ m و سرعت حرکت ۰/۵ m s⁻¹ بود. این سرعت با استفاده از یک تراکتور فنت (Fendt 700) در دنده ۲ سنگین و دور موتور ۲۵۰۰ دور در دقیقه تامین شد. برای دستیابی به تغییرات هرچه وسیع‌تر در متغیرهای این مطالعه، با مشاهده نقشه‌های بافت خاک از پیش موجود، اندازه‌گیری در هر مزرعه در نواحی مختلف انجام شد تا تغییرات بافت،

صورت تاثیر دیگر مشخصه‌های فیزیکی خاک مانند رطوبت و نوع بافت بر ارتباط بین PR و σ_{pc} می‌توان نفوذسنج افقی را به حسگرهای رطوبت و بافت خاک نیز تجهیز نمود (۳۵).

تا کنون تحقیقات زیادی در خصوص تغییرات فیزیکی خاک در رابطه با تنش پیش‌تراکم تحت تاثیر تردد تایر انجام شده است (۴ و ۳۱-۲۸). همچنین مطالعاتی در خصوص پیش‌بینی σ_{pc} بعنوان تابعی از چگالی خاکدانه^۱ و چگالی ظاهری خشک (۳۷)، تابعی از پارامترهای مقاومت برشی خاک (۲۰)، و یا تابعی از نسبت پوکی اولیه خاک (۲۷) انجام شده است. در مطالعه‌ای، یک مدل تجربی برای پیش‌بینی σ_{pc} خاک-های با ساختمان پایدار به عنوان تابعی از برخی خصوصیات فیزیکی (چگالی ظاهری، توزیع اندازه منافذ و هدایت هیدرولیکی اشباع) و برخی خصوصیات مکانیکی از جمله شاخص مخروط^۲ (CI) و پارامترهای مقاومت برشی (زوایه اصطکاک داخلی و چسبندگی) ارائه شد (۳۲). الکساندرو و ارل^۳ مدلی را برای پیش‌بینی تنش پیش‌تراکم حاصل از آزمون نشست صفحه با استفاده از چگالی ظاهری خشک و محتوای رطوبت حجمی به عنوان متغیرهای مستقل پیشنهاد دادند (۱). برگر و همکاران^۴ نشان دادند که پروفیل تغییرات CI در عمق شباهت زیادی به تغییرات σ_{pc} دارد (۵). مصدقی و همکاران (۳۳) گزارش نمودند که همبستگی بسیار قوی بین شاخص مخروط (CI) و σ_{pc} وجود دارد؛ به طوری که رابطه خطی حاصل بین σ_{pc} و CI بسیار نزدیک به معادله رگرسیونی گزارش شده توسط کانارچه و همکاران^۵ (۶) بود. به عنوان یک تقریب نسبتاً دقیق و کاربردی، σ_{pc} یک دهم CI گزارش شد که این نسبت

1- Aggregate density

2- Cone Index

3- Alexandrou & Earl

4- Burger *et al.*

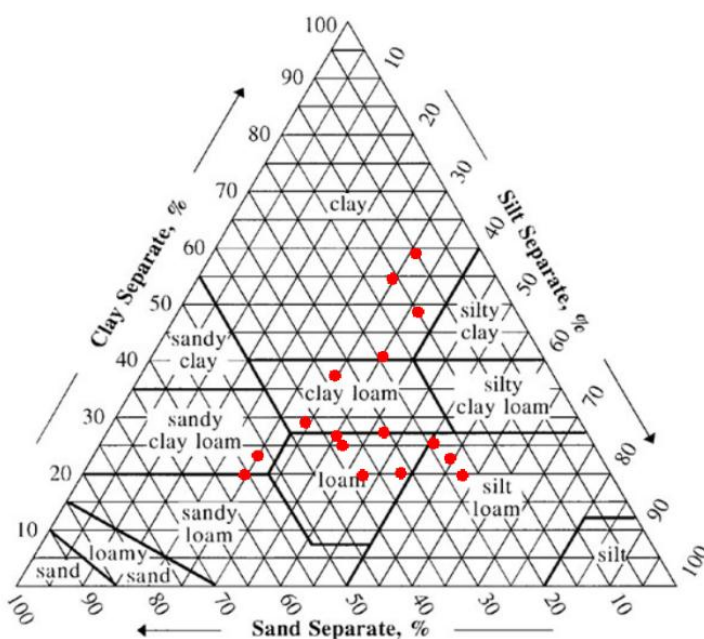
5- Canarache *et al.*

6- Model DBBP, Bongshin Load Cell Co., Ltd., Korea

7- IOtech, Personal Daq/ 56TM Series, USA



شکل (۱) نفوذسنج افقی تک نوکی مورد استفاده در این مطالعه (۳۴).
 Figure(1) The single-tip horizontal penetrometer implemented in this study.



شکل (۲) بافت خاک‌های آزمون شده (USDA). محورها بر حسب درصد وزنی می‌باشند.
 Figure(2) USDA soil texture classes of the tested soils. The axes are in terms of weight percentage.

که به علت تراکم زیادتر خاک در این نواحی، تنش پیش تراکم و مقاومت نفوذسنج بالاتری مشاهده شد.

رطوبت خاک و چگالی منجر به تغییر مقاومت نفوذسنج و تنش پیش تراکم شوند؛ همچنین در هر مزرعه، اندازه گیری در نواحی سرزمین^۱ نیز انجام شد

1- Headland

جدول (۱) ترکیب بافت خاک‌های آزمون شده

Table(1) Textural composition of the tested soils.

نوع بافت (USDA)	n*	شن (g kg ⁻¹)	سیلت (g kg ⁻¹)	رس (g kg ⁻¹)	مواد آلی (g kg ⁻¹)	چگالی ذرات جامد (Mg m ⁻³)
(USDA soil texture)		(Sand)	(Silt)	(Clay)	Organic matter	(Particle density)
لوم سیلتی (Silty loam)	9	238-254	498-571	190-247	15-21	2.56
لوم شنی (Sandy loam)	6	569	240	191	17	2.65
لوم رسی شنی (Sandy clay loam)	7	533	242	225	41	2.65
لوم (Loam)	8	320-434	305-475	190-226	19-40	2.55
لوم رسی (Clay loam)	7	254-430	284-344	284-401	29-33	2.59
رسی (Clay)	7	113-171	290-358	480-585	55-168	2.6

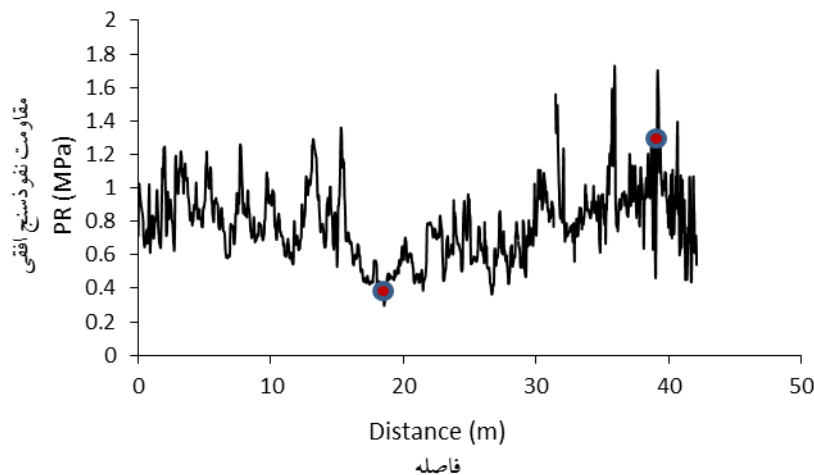
*n: تعداد نمونه های دست نخورده از هر خاک

اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی

برای تعیین تنش پیش‌تراکم از آزمون فشار تک‌محوری محصور استفاده شد. نمونه‌های استوانه‌ای دست‌نخورده (با رطوبت مزرعه) همراه با سیلندر بر روی دستگاه ادمتر^۱ قرار گرفت و فشار به صورت گام به گام به ترتیب در سطوح ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۵، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ kPa در گام-های سه دقیقه‌ای به نمونه‌ها وارد شد (۲ و ۱۳). با استفاده از تغییر شکل‌های ثبت شده در انتهای هر گام، منحنی تنش - نسبت پوکی نمونه‌ها محاسبه و مورد تحلیل قرار گرفت. نسبت پوکی از رابطه ۱ با محاسبه چگالی ظاهری در انتهای هر گام تنش محاسبه شد.

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (1)$$

در هر مزرعه، خطوطی به طول تقریبی ۳۰ متر در نواحی مختلف با استفاده از نفوذسنج افقی اندازه‌گیری شد. سپس با مشاهده تغییرات PR، نقاطی برای نمونه‌برداری انتخاب شدند. نقاط در بیشینه و کمینه‌های محلی PR در هر خط انتخاب شدند (۳۶). شکل ۳ یک نمونه از اندازه‌گیری PR در یک خط و نقاط انتخاب شده برای نمونه‌برداری را نشان می‌دهد. در هر نقطه، دو نمونه استوانه‌ای دست‌نخورده (با استفاده از سیلندرهای استیل) به قطر ۱۰۰ و ارتفاع ۶۰ mm جهت تعیین رطوبت، چگالی ظاهری، بافت و مشخصه تنش-کرنش برداشته شد. نمونه‌ها در لایه عمق ۰/۲۸-۰/۲۲ m برداشته شدند (که به‌طور تقریبی ۰/۲۵ m در مرکز آن قرار دارد). در اطراف هر نقطه نیز شاخص مخروط تا عمق ۰/۵ m استفاده از یک نفوذسنج دستی (ساخت Eijkelkamp هلند با مساحت مقطع مخروط ۱ cm² و زاویه ۶۰°) با ۵ تکرار اندازه‌گیری شد. در کل، در ۴۴ نقطه از انواع بافت خاک، نمونه برداری انجام شد.



شکل (۳) یک نمونه از اندازه‌گیری PR در طول یک خط و نقاط انتخاب شده برای نمونه‌برداری.
Figure(3) A typical PR signal along a transect and the points selected for core sampling.

است که بیانگر حساسیت تراکم‌پذیری (مقاومت به تراکم) خاک می‌باشد. شیب بزرگتر (Cc بزرگتر) بیانگر مقاومت کمتر خاک در مقابل تراکم می‌باشد. بین این دو ناحیه، قسمت منحنی شکل، ناحیه گذار از رفتار الاستیک به پلاستیک می‌باشد، جایی که نقطه تسلیم به وضوح قابل تشخیص نمی‌باشد. روش ترسیمی کاساگرانده (V) یکی از روش‌های استاندارد برای تعیین σ_{pc} می‌باشد. در این روش با رسم نسبت پوکی (e) یا کرنش محوری در مقابل لگاریتم تنش با استفاده از روش ترسیمی نشان داده شده در شکل ۴، σ_{pc} تخمین زده می‌شود. خط A مماس بر منحنی در نقطه بیشینه انحنای خط B خط افقی از نقطه بیشینه انحنای خط C نیمساز زاویه بین خطوط A و B می‌باشد. از تقاطع خط C و VCL تنش پیش‌تراکم تعیین می‌گردد.

علاوه بر روش ترسیمی کاساگرانده، برخی روش‌های تحلیلی نیز جهت تخمین تنش پیش‌تراکم پیشنهاد شده‌اند. گرگوری و همکاران^۶ (۱۶) نشان دادند که برآزش تابع گمپتر (۱۵) بر منحنی لگاریتم تنش - نسبت پوکی دقیق - ترین تخمین از σ_{pc} را در نقطه بیشینه انحنای دست می‌دهد که دقیق‌تر و تا حدودی کمتر از σ_{pc} حاصل از روش

که ρ_d و ρ_s به ترتیب چگالی ذرات جامد^۱ و چگالی ظاهری خاک می‌باشند. چگالی ذرات جامد برای هر خاک با استفاده از پیکنومتر^۲ اندازه‌گیری شد (۱۴). پس از آزمون فشار، نمونه‌ها برای تعیین محتوای رطوبت و چگالی ظاهری اولیه در آون با دمای 105°C به مدت ۲۴ ساعت خشکانده شدند (۳) و سپس مورد آنالیز بافت با روش هیدرومتری و تعیین محتوای مواد آلی با روش افت وزن در اثر سوزاندن (۳۹) قرار گرفتند.

تحلیل تنش پیش‌تراکم

شکل ۴ نمونه‌ای از مشخصه فشردگی^۳ خاک‌های کشاورزی را نشان می‌دهد که اثر تنش فشاری را به تغییر حجم خاک (در اینجا e) در آزمون تک‌محوری محصور ارتباط می‌دهد. مطابق شکل، رفتار تراکم خاک را می‌توان در دو ناحیه نسبتاً واضح، متمایز نمود که ناحیه قبل از انحنای منحنی برگشت‌پذیر و ناحیه بعد از آن تغییر شکل‌های ماندگار در امتداد خط فشردگی بکر^۴ (VCL) را نشان می‌دهد. شیب خط VCL نمایه فشردگی^۵ (Cc)

- 1- Particle density
- 2- Pycnometer
- 3- Compaction characteristic
- 4- Virgin compression line
- 5- Compression index

6- Gregory et al.

نتایج و بحث

ارتباط پارامترهای تابع گمپرتز با مشخصه‌های فیزیکی خاک

برازش تابع گمپرتز بر منحنی‌های فشردگی با دقت بالا (R^2 بزرگتر از ۰/۹۹۸ و RMSE کمتر از ۰/۰۰۳) انجام شد که نشان داد این تابع به خوبی رابطه لگاریتم تنش - نسبت پوکی در خاک‌های مختلف را توجیه می‌کند. جهت ارزیابی تاثیر مشخصه‌های فیزیکی خاک بر پارامترهای این تابع، تحلیل‌های همبستگی انجام شد. جدول ۲ ماتریس همبستگی پارامترهای تابع گمپرتز (a , b , c و m) با رطوبت چگالی (ρ_d)، چگالی ظاهری (θ)، چگالی پوکی اولیه (e_0) محتوای رس (CC) و مواد آلی (OM) را نشان می‌دهد. رطوبت در بافت‌های مختلف بین $0.19-0.81 \text{ kg kg}^{-1}$ و چگالی ظاهری بین $0.74-1.64 \text{ Mg m}^{-3}$ تغییر کرد. بالاترین رطوبت و کمترین چگالی ظاهری در خاک رسی با محتوای مواد ارگانیک 168 g kg^{-1} مشاهده شد. پارامتر a دقیقاً با نسبت پوکی اولیه خاک برابر می‌باشد (۲۷) که از ۰/۵۵ تا ۲/۳ تغییر کرد. پارامتر b ارتباط ضعیفی با مشخصه‌های فیزیکی و بافت خاک نشان داد و بین ۰/۱ تا ۱/۹۴ تغییر کرد. در تابع گمپرتز، پارامتر $a+c$ بیانگر حد کمینه نسبت پوکی (بیشینه تراکم خاک) با میل تنش به بی‌نهایت می‌باشد. پارامتر c (بین ۰/۹۸-۰/۲۳) به‌طور یکسان با θ و e_0 همبستگی نشان داد؛ همچنین ارتباط قوی c با ρ_d به‌خاطر اثر متقابل قوی بین θ و ρ_d می‌باشد که با افزایش تراکم خاک رطوبت آن کاهش یافته است. نادری بلداجی و همکاران (۳۶) با استفاده از معادله منحنی مشخصه نگهداشت آب خاک^۲ و با تخمین پارامترهای آن از توابع تجربی توسعه داده شده در تحقیقات قبلی (۴۰) نشان دادند که در صورت انجام اندازه‌گیری مزرعه‌ای در یک بازه زمانی محدود به طوری که پتانسیل آبی خاک تغییر معنی‌دار نکند، ارتباط بین θ و ρ_d می‌تواند بسیار قوی باشد.

ترسیمی کاساگراند می‌باشد؛ لذا در این مطالعه نیز از تابع سیگموئیدی گمپرتز (رابطه ۲) برای این منظور استفاده شد:

$$e = a - c \exp[-\exp(-b(\log \sigma) - m)] \quad (2)$$

که σ تنش فشاری تک‌محوری (kPa)، e نسبت پوکی ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) و a , b , c و m پارامترهای مثبت تابع می‌باشند. این تابع به شکلی است که مجانب افقی آن در حد بالای تنش نشان دهنده بیشینه تراکم قابل دستیابی در یک خاک می‌باشد (شکل ۵). برای یافتن نقطه بیشینه انحنا از مشتق دوم تابع گمپرتز (رابطه ۳) استفاده شد.

$$\frac{d^2 e}{d(\log \sigma)^2} = [b^2 c \exp(-\exp(b(\log \sigma) - m))] \times [\exp(b(\log \sigma) - m)] \times [\exp(b(\log \sigma) - m) - 1] \quad (3)$$

که با استفاده از مشتق دوم، تابع انحنا با رابطه ۴ محاسبه شد:

$$\kappa = \frac{d^2 e / d(\log \sigma)^2}{[1 + (\frac{d e}{d(\log \sigma)})^2]^{3/2}} \quad (4)$$

برای یافتن نقطه بیشینه انحنا، اکسترمم رابطه ۴ محاسبه (رابطه ۵) و تنش متناظر آن به عنوان σ_{pc} تعیین شد:

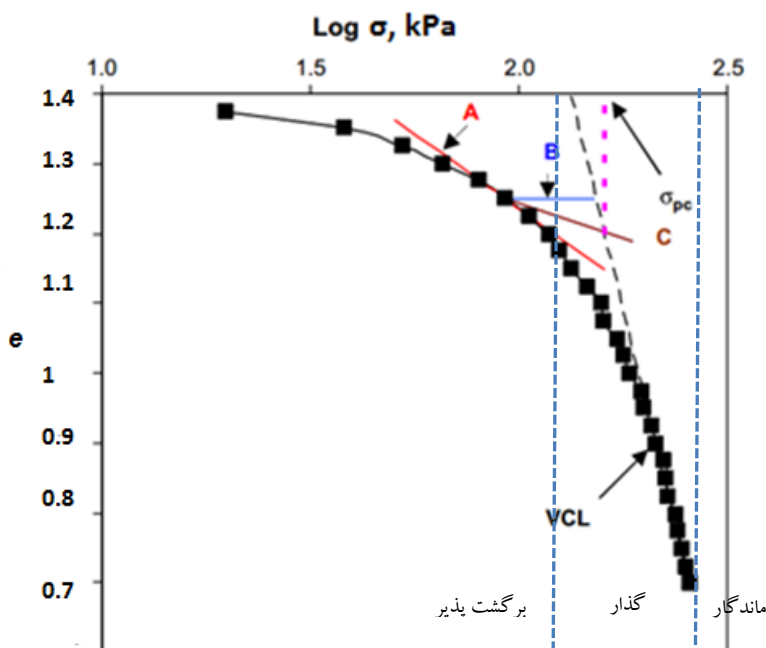
$$\frac{d \kappa}{d \log \sigma} = 0 \quad (5)$$

جهت اجرای مراحل فوق، برنامه‌ای با ابزار ویژوال بیسیک^۱ در نرم‌افزار اکسل نوشته شد که در ابتدا با مقادیر اولیه فرضی برای پارامترها، تابع گمپرتز را تا یافتن حداقل خطای برازش آزمون می‌نماید و پس از همگرایی پارامترها، با محاسبه تابع انحنا (رابطه ۴)، نقطه بیشینه انحنا را مشخص می‌کند. شکل ۵ توابع برازش شده گمپرتز بر داده‌های حاصل از آزمون فشار تک‌محوری محصور در دو نوع بافت خاک را نشان می‌دهد.

مدل‌های رگرسیونی

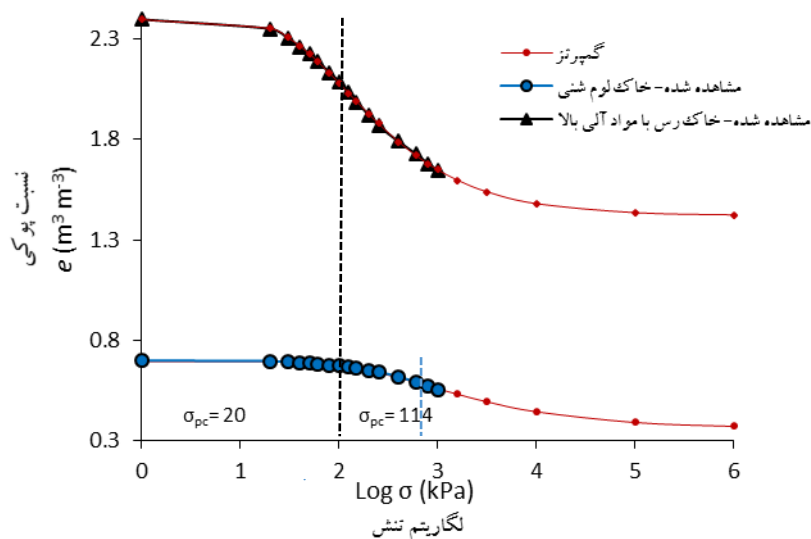
مدل‌های پیش‌بینی رگرسیونی با استفاده از روش گام به گام در نرم‌افزار SAS برازش داده شد. معیار ورود متغیر در مدل‌ها سطح معنی‌داری $P < 0.1$ انتخاب شد (۳۶-۳۵). بر این اساس، متغیرهای انتخاب شده در مدل‌های پیش‌بینی، قوی‌ترین آنها در کاهش خطای پیش‌بینی بودند.

نادری بلداجی و همکاران: بررسی ارتباط بین مقاومت...



شکل (۴) روش ترسیمی کاساگرانده برای تعیین تنش پیش تراکم (۲۰). نواحی تغییر شکل برگشت پذیر، گذار و ماندگار به طور تقریبی نشان داده شده‌اند.

Figure(4) The graphical method of Casagrande for estimating the precompression stress. The zones of recoverable, transition and plastic deformations are approximately shown.



شکل (۵) برازش تابع سیگموئیدی گمپرتز بر داده‌های آزمایشی لگاریتم تنش - نسبت پوکی حاصل از آزمون فشار تک-محوری محصور در دو نوع بافت خاک.

Figure(5) The fitness of sigmoidal Gompertz function on the experimental data of logarithm stress-void ratio resulted from confined uniaxial compression of samples from two soil textures.

خطی روابطی برای پیش‌بینی پارامترهای تابع گمپرتز از مشخصه‌های فیزیکی و بافت خاک بررسی گردید که در جدول ۳ نشان داده شده‌اند. برای b هیچ گونه تابع معنی‌داری یافت نشد. مشخص است که c و m تحت تاثیر محتوای رس و مواد آلی خاک نیز می‌باشند. نتایج این بخش از مطالعه نشان داد که تابع گمپرتز بخوبی مشخصه تنش - نسبت پوکی در انواع خاک را توجیه می‌نماید و پارامترهای آن ارتباط قوی با مشخصه‌های فیزیکی خاک دارند.

توجه به این نکته نیز حائز اهمیت است که ارتباط قوی همزمان بین θ ، CC و OM به خاطر اثر متقابل θ (یا به طور معکوس ρ_d) با CC و OM می‌باشد؛ زیرا خاک با محتوای رس و مواد آلی بیشتر، ظرفیت نگهداشت آب زیادتری دارد. همچنین معمولاً یک ارتباط قوی بین CC و OM در اغلب خاک‌ها مشاهده می‌شود (در این مطالعه $r=0.73$ به دست آمد). به طور کلی m بیانگر $\log \sigma$ در نقطه تقعر منحنی گمپرتز می‌باشد (۲۷) که در اینجا از ۲/۰۵ تا ۲/۹ تغییر کرد. قوی‌ترین همبستگی بین m و ρ_d یافت شد (جدول ۲). با استفاده از رگرسیون چند متغیره

جدول (۲) ماتریس همبستگی پارامترهای تابع گمپرتز با مشخصه‌های فیزیکی خاک

Table(2) Correlation matrix of Gompertz parameters with soil physical characteristics

OM (Organic matter)	CC (Clay content)	e_0 (Initial void ratio)	ρ_d (Bulk density)	θ (Soil moisture)	m	c	b	a	پارامتر (Parameter)
								1	a
							1	0.24 ^a 0.12 ^b	b
						1	0.7 0.63	0.86 <0.0001	c
					1	0.29 0.06	-0.73 <0.0001	-0.55 <0.0001	m
				1	-0.48 <0.0001	0.86 <0.0001	0.18 0.24	0.99 <0.0001	θ
			1	-0.98 <0.0001	0.58 <0.0001	-0.85 <0.0001	-0.25 0.1	-0.99 <0.0001	ρ_d
		1	-0.99 <0.0001	0.99 <0.0001	-0.56 <0.0001	0.86 <0.0001	0.25 <0.0001	1 <0.0001	e_0
	1	0.8 <0.0001	-0.82 <0.0001	0.81 <0.0001	-0.51 <0.001	0.5 <0.001	0.14 0.36	0.81 <0.0001	CC
	0.73 <0.0001	0.95 <0.0001	-0.93 <0.0001	0.97 <0.0001	-0.46 0.01	0.86 <0.0001	0.19 0.21	0.95 <0.0001	OM
1									

^a ضریب همبستگی پیرسون (r)، ^b سطح معنی‌داری (P)

^a Pearson coefficient of correlation (r), ^b the level of significance (P)

جدول (۳) معادلات رگرسیونی برای پیش‌بینی پارامترهای تابع گمپرتز (a, b, c, m) از رطوبت (θ)، چگالی ظاهری (ρ_d)، نسبت پوکی اولیه (e_0)، محتوای رس (CC) و مواد آلی (OM)

Table(3) Regression models for prediction of the Gompertz parameters (a, b, c, m) from soil moisture (θ), bulk density (ρ_d), initial void ratio (e_0), clay content (CC) and organic matter (OM)

P	RMS E	R ²	معادله (Equation)	پارامتر (Parameter)
<0.0001	0	1	$a = e_0$	a
<0.0001	0.06	0.87	$c = 1.15 + 0.79 \theta - 0.00095 CC - 0.49 \rho_d$	c
<0.0001	0.16	0.68	$m = 3.77 - 3.94 e_0 + 11.1 \theta - 0.36 \rho_d - 0.0009 CC - 0.0001 (OM \times CC)$	m

$$\sigma_{pc} = 137.7 - 118.5 e_0 + 83.8 (e_0 \times \theta)$$

$$R^2 = 0.49, RMSE = 15.2 \text{ kPa}, P < 0.0001 \quad (۶)$$

در نتایج دیگر محققان عمدتاً σ_{pc} بر حسب تابعی از e_0 بحث شده است که با σ_{pc} همبستگی منفی دارد (۱۲)، (۲۷، ۳۷)؛ برای مثال کلر و همکاران^۲ (۲۷) رابطه‌ای را برای σ_{pc} بر حسب e_0 در خاک‌های سوند ارائه نمودند که با نتایج این مطالعه (جدول ۴) توافق نزدیکی دارد. شکل (۶)، σ_{pc} را تابعی از PR و CI نشان می‌دهد. σ_{pc} همبستگی‌های نسبتاً مشابه با PR و CI (در عمق m ۰/۲۵) نشان می‌دهد. پراکندگی نقاط در روابط تا حدودی زیاد می‌باشد. در توجیه این پراکندگی توجه به این نکته ضروری است که در آزمون تک‌محوری محصور اساساً نمونه خاک در حین فشردگی دچار گسیختگی نمی‌شود؛ بلکه با افزایش تراکم مستحکم‌تر می‌گردد. لذا برخی محققان بر این اعتقادند که هیچ معیار گسیختگی (تسلیم) برای فشار تک‌محوری محصور قابل تعریف نمی‌باشد (۲۷). در بحث مقایسه PR (یا CI) با σ_{pc} ، طبق برخی نظریه‌های نفوذپذیری خاک^۳ مانند نظریه گسترش حفره^۴ (۳۸)، با ورود یک مخروط و ایجاد سوراخ در خاک، در ابتدا رفتار تغییر شکل خاک اطراف جسم نفوذ کننده الاستیک و سپس دچار تسلیم می‌شود و با گسیختگی، قطر سوراخ به اندازه قطر مخروط افزایش می‌یابد. از این نقطه نظر، مقاومت نفوذ اساساً در تعادل با تنش تسلیم در خاک

ارتباط مقاومت نفوذسنج، تنش پیش‌تراکم و مشخصه‌های خاک

نتایج نشان داد که PR بین ۰/۳۵-۱/۶۵ MPa، CI بین ۱/۰۷-۳/۲۴ MPa و σ_{pc} بین ۹۸/۵-۲۱ kPa در بافت‌های مختلف تغییر کرده است. با توجه به محدوده تغییرات σ_{pc} و کلاس‌های ارائه شده توسط هورن و فلیگ^۱ (۲۳) برای استحکام خاک، ظرفیت باربری خاک‌های آزمون شده، پایین می‌باشد، جدول ۴ ماتریس همبستگی بین مقاومت نفوذسنج (PR و CI)، تنش پیش‌تراکم (σ_{pc}) و خصوصیات فیزیکی خاک را نشان می‌دهد. واضح است که با افزایش رطوبت، σ_{pc} ، PR و CI کاهش یافته است. σ_{pc} قوی‌ترین همبستگی را با چگالی ظاهری و نسبت پوکی اولیه (e_0) خاک نشان داد. همبستگی‌های منفی بین σ_{pc} و محتوای رس (CC) و مواد آلی (OM) در توافق با یافته‌های دیگر محققان نیز می‌باشد که تنش پیش‌تراکم معمولاً در خاک‌های رسی و آلی پایین‌تر است (۲ و ۲۵). این نتیجه عمدتاً به خاطر اثر متقابل بافت با رطوبت می‌باشد که در خاک‌های رسی و آلی، محتوای رطوبت نیز بالاتر است. رابطه (۶) قوی‌ترین مدل رگرسیونی برای پیش‌بینی σ_{pc} از خصوصیات فیزیکی را ارائه می‌دهد. روابط حاصله بیانگر آن است که σ_{pc} بیشتر با e_0 و اثر متقابل e_0 با θ توجیه می‌شود (۲۷).

2- Keller et al.
3- Soil penetrability
4- Cavity expansion

1- Horn & Fleige

بلادرنگ و در حال حرکت در خاک‌های مختلف بدست آورد.

$$\sigma_{pc} = 44.8 + 39.51 PR - 51.9 \theta \quad (7)$$

$$R^2 = 0.59, RMSE = 13.7 \text{ kPa}, P < 0.0001$$

$$\sigma_{pc} = 41.6 + 17.9 CI - 51.6 \theta \quad (8)$$

$$R^2 = 0.51, RMSE = 15 \text{ kPa}, P < 0.0001$$

همبستگی بین PR و CI در شکل ۸ نشان داده شده است. مشخص است که CI از PR با مرتبه تقریباً ۱/۵ بزرگتر می‌باشد. تفاوت در مقادیر PR و CI در برخی مطالعات قبلی با تفاوت در جهت متفاوت نفوذ و ناهمسانی خصوصیات مکانیکی خاک در جهت عمودی و افقی توجیه شده است (۹، ۱۹). مشاهده شد که این رابطه تا حد کمی تحت تاثیر محتوای رس خاک می‌باشد، به نحوی که با اضافه نمودن متغیر CC ضریب تبیین به ۰/۶۸ افزایش یافت.

می‌باشد (با فرض ساده رفتار الاستیک-پلاستیک ایده آل برای خاک)؛ با این حال، تفاوت در رفتار تسلیم و گسیختگی خاک اطراف مخروط در حال نفوذ و آزمون فشار تک محوری محصور می‌تواند یک عامل مهم در ضعف ارتباط بین PR و σ_{pc} باشد. از این منظر، نیاز است تا به کمک مطالعات بیشتر با انواع روش‌های فشرده‌گی خاک در آزمایشگاه (برای مثال فشرده‌گی نیمه محصور در مقابل محصور) و یا روش‌های مزرعه‌ای مانند نشست صفحه ارتباط بین مقاومت نفوذسنج و ظرفیت باربری خاک را بررسی نمود.

با توجه به شکل ۶، مشخص است که ارتباط بین PR و σ_{pc} کمی قوی‌تر از بین CI و σ_{pc} می‌باشد. تحلیل رگرسیون چند متغیره نشان داد که محتوای رطوبت به طور معنی‌داری رابطه بین PR و σ_{pc} ، CI را بهبود بخشد (روابط ۷ و ۸). شکل ۷ برآورد σ_{pc} با استفاده از رابطه ۷ را نشان می‌دهد. رابطه بین PR و σ_{pc} تحت تاثیر بافت خاک قرار نداشت که این امر نشان می‌دهد تنها با اندازه‌گیری همزمان PR و θ می‌توان تخمین نسبتاً دقیقی از σ_{pc} به صورت

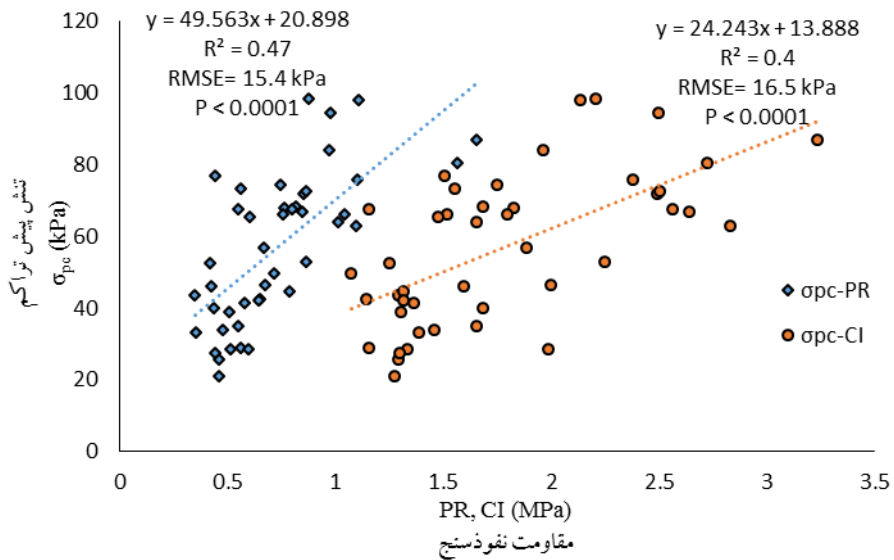
جدول (۴) ماتریس همبستگی PR، CI و σ_{pc} با مشخصه‌های فیزیکی و بافت خاک

Table(4) Correlation matrix between PR, CI and σ_{pc} and soil physical characteristics and soil texture

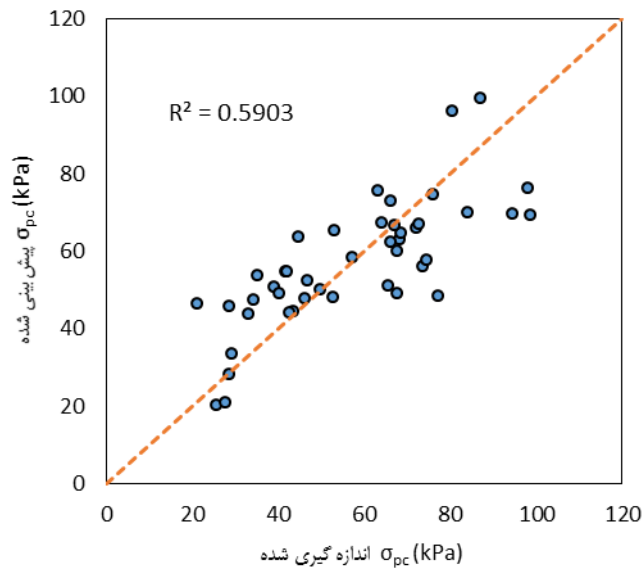
CC	OM	e_0	ρ_d	θ	σ_{pc}	CI	PR	پارامتر
							1	PR
						1	0.78 ^a <0.0001 ^b	CI
					1	0.63 <0.0001	0.69 <0.0001	σ_{pc}
				1	-0.58 <0.0001	-0.44 <0.01	-0.37 0.01	θ
			1	-0.98 <0.0001	0.66 <0.0001	0.51 <0.001	0.45 <0.01	ρ_d
		1	-0.99 <0.0001	0.99 <0.0001	-0.63 <0.0001	-0.48 <0.01	-0.42 <0.01	e_0
	1	0.95 <0.0001	-0.93 <0.0001	0.97 <0.0001	-0.54 <0.0001	-0.4 <0.01	-0.34 0.02	OM
1	0.73 <0.0001	0.8 <0.0001	-0.82 <0.0001	0.81 <0.0001	-0.57 <0.0001	-0.5 <0.001	-0.033 0.03	CC

^a ضریب همبستگی پیرسون (r)، ^b سطح معنی‌داری (P)

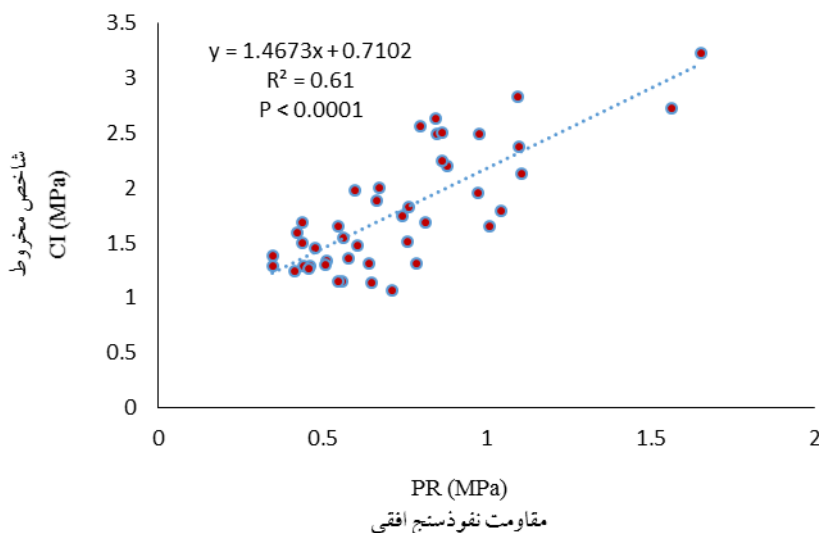
^a Pearson coefficient of correlation (r), ^b the level of significance (P)



شکل (۶) تنش پیش تراکم (σ_{pc}) تابعی از مقاومت نفوذسنج افقی (PR) و شاخص مخروط (CI).
Figure(6) Precompression stress (σ_{pc}) as functions of horizontal penetrometer resistance (PR) and cone index (CI).



شکل (۷) برآورد تنش پیش تراکم از PR و θ (رابطه ۷).
Figure(7) Estimation of precompression stress from PR and θ (Eq. 7).



شکل (۸) CI تابعی از PR در بافت‌های مختلف خاک.
Figure(8) CI as a function of PR in different soil textures.

بافت خاک (محتوای رس) بر این رابطه مشاهده نشد؛ لذا اندازه‌گیری همزمان مقاومت نفوذسنج افقی و محتوای رطوبت با سامانه‌های حسگر مرکب می‌تواند ابزاری مفید جهت پیش‌بینی تنش پیش‌تراکم و تهیه نقشه‌های ترافیک‌پذیری خاک باشد. نکته حائز اهمیت این‌که ظرفیت باربری خاک بشدت تحت تاثیر رطوبت خاک است و اندازه‌گیری تنش پیش‌تراکم در رطوبت مزرعه در زمان‌های متفاوت نیاز به تصحیح اثر رطوبت جهت استفاده از اطلاعات برای مدیریت تردد در زمان دیگر دارد. مطالعات بیشتر در شرایط رطوبت کنترل شده در زمان آزمون فشار تک‌محوری می‌تواند در توجیه ارتباط بین σ_{pc} و PR کمک کند.

نتیجه‌گیری

اندازه‌گیری مزرعه‌ای و مقایسه مقاومت نفوذسنج افقی (PR)، شاخص مخروط (CI)، تنش پیش‌تراکم (σ_{pc}) و خصوصیات فیزیکی خاک در عمق ۰/۲۵ m نشان داد که مشخصه فشردگی خاک (منحنی تنش - نسبت پوکی) بیشتر تحت کنترل نسبت پوکی اولیه و رطوبت خاک می‌باشد، به طوری که با کاهش نسبت پوکی اولیه، تنش پیش‌تراکم و مقاومت به فشردگی افزایش می‌یابند. این نتیجه را می‌توان با تعداد بیشتر نقاط تماس بین ذرات و افزایش اصطکاک بین ذرات و انرژی بیشتر برای جابجایی ذرات و آب به دلیل کاهش فضاهای خالی با کاهش نسبت پوکی توجیه نمود. نتایج همبستگی نسبتاً قوی بین σ_{pc} و PR (همچنین بین σ_{pc} و CI) را با لحاظ اثر رطوبت نشان داد؛ ولی تاثیری از نوع

منابع

1. Alexandrou, A. and Earl, R. 1998. The relationship among the pre-compaction stress, volumetric water content and initial dry bulk density of soil. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 71: 75–80.
2. Arvidsson, J. and Keller, T. 2004. Soil precompression stress I. A survey of Swedish arable soils. *Soil and Tillage Research*, 77: 85-95.
3. ASTM D2216-10. 2016. Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010, www.astm.org.
4. Berisso, F.E., Schjønning, P., Lamandé M., Weisskopf, P., Stettler, M. and Keller, T. 2013. Effects of the stress field induced by a running tyre on the soil pore system. *Soil and Tillage Research*, 131: 36–46.
5. Burger, N., Lebert, M. and Horn, R. 1988. Prediction of the compressibility of arable lands. In: Drescher, J., Horn, R., De Boodt, M. (Eds.), *Impact of Water and External Forces on Soil Structure*. Catena, Supplement 11. Catena, Cremligen-Destedt, pp. 141–151.
6. Canarache, A., Horn, R. and Colibas, I. 2000. Compressibility of soils in a long term field experiment with intensive deep ripping in Romania. *Soil and Tillage Research*, 56: 185–196.
7. Casagrande, A. 1936. The determination of pre-consolidation load and its practical significance. In *Proceedings of the international conference of soil mechanics and foundation engineering*, Cambridge, MA, 22-26 June (Vol. 3); (pp. 60-64).
8. Chukwu, E. and Bowers Jr., C.G. 2005. Instantaneous multiple-depth soil mechanical impedance sensing from a moving vehicle. *Transactions of the ASABE*, 48 (3): 885–894.
9. Chung, S.O. and Sudduth, K.A. 2006. Soil failure models for vertically operating and horizontally operating strength sensors. *Transactions of the ASABE*, 49 (4): 851–863.
10. Chung, S.O., Sudduth, K.A. and Hummel, J.W. 2006. Design and validation of an on-the go soil strength profile sensor. *Transactions of the ASABE*, 49 (1): 5–14.
11. Chung, S.O., Sudduth, K.A., Plouffe, C. and Kitchen, N.R. 2008. Soil bin and field tests of an on-the-go soil strength profile sensor. *Transactions of the ASABE*, 51(1): 5–18.
12. Da Veiga, M., Horn, R., Reinert, D.J. and Reichert, J.M. 2007. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil as affected by long-term tillage systems. *Soil and Tillage Research*, 92: 104-113.
13. Eriksson, J. 1982. Soil compaction and root environment. Report 126. Division of Agricultural Hydrotechnics, Department of Soil Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden, 138 pp.

14. Flint, A.L. and Flint, L.E. 2002. Particle density. p. 229-240. In J.H. Dane and G.C. Topp, (eds.) Method of Soil Analysis, Part 4: Physical Methods. SSSA Book Series No. 5. SSSA, Madison, WI.
15. Gompertz, B. 1825. On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies. *Philosophical Transactions of Royal Society of London*, 115: 513–585.
16. Gregory, A.S., Whalley, W.R., Watts, C.W., Bird, N.R.A., Hallett, P.D. and Whitmore, A.P. 2006. Calculation of the compression index and precompression stress from soil compression test data. *Soil and Tillage Research*, 89: 45-57.
17. Hamza, M.A. and Anderson, W.K. 2005. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, 82: 121-145.
18. Heege, H.J. 2013. Precision in Crop Farming. Site Specific Concepts and Sensing Methods: Applications and Results. Springer Netherlands. DOI 10.1007/978-94-007-6760-7.
19. Hemmat, A. and Adamchuk, V.I. 2008. Sensor systems for measuring soil compaction: Review and analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 63: 89-103.
20. Hemmat, A., Tahmasebi, M., Vafaeian, M. and Mosaddeghi, M.R. 2009. Relationship between pre-compaction stress and shear strength under confined and semi-confined loadings for a sandy loam soil. *Biosystems Engineering*, 102: 219-226.
21. Hemmat, A., Khorsandi, A. and Shafaie, V. 2012. Soil failure mode in front of a multiple tip horizontally-operated penetrometer. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 36: 476–485.
22. Hemmat, A., Yaghoubi-Taskoh, M., Masoumi, A. and Mosaddeghi, M.R. 2014. Relationships between rut depth and soil mechanical properties in a calcareous soil with unstable structure. *Biosystems Engineering*, 118: 147-155.
23. Horn, R. and Fleige, H. 2003. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. *Soil and Tillage Research*, 73: 89-99.
24. Horn, R., Fleige, H., Richter, F-H., Czyz, E.A., Dexter, A., Diaz-Pereira, E., Dumitru, E., Enache, R., Mayol, F., Rajkai, K., de la Rosa, D. and Simota, C. 2005. SIDASS project: Part 5: Prediction of mechanical strength of arable soils and its effects on physical properties at various map scales. *Soil and Tillage Research*, 82(1): 47-56.
25. Keller, T. and Arvidsson, J. 2007. Compressive properties of some Swedish and Danish structured agricultural soils measured in uniaxial compression tests. *European Journal of Soil Science*, 58: 1373–1381.

26. Keller, T., Défossez, P., Weisskopf, P., Arvidsson, J. and Richard, G. 2007. SoilFlex: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. *Soil and Tillage Research*, 93: 391-411.
27. Keller, T., Lamandé, M., Schjønning, P. and Dexter, A.R. 2011. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression test. *Geoderma*, 163: 13-23.
28. Keller, T., Arvidsson, J. Schjønning, P., Lamande, M., Stettler, M. and Weisskopf, P. 2012. In situ subsoil stress-strain behaviour in relation to soil precompression stress. *Soil Science*, 177(8): 490-497.
29. Lamandé, M, Schjønning, P. and Tøgersen, F.A. 2007. Mechanical behaviour of an undisturbed soil subjected to loadings: Effects of load and contact area. *Soil and Tillage Research*, 97(1): 91-106.
30. Lamandé, M. and Schjønning, P. 2011a. Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part I: Site description, evaluation of the Söhne model, and the effect of topsoil tillage. *Soil and Tillage Research*, 114(2): 57-70.
31. Lamandé, M. and Schjønning, P. 2011b. Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part III: Effect of soil water content. *Soil and Tillage Research*, 114(2): 78-85.
32. Lebert, M. and Horn, R. 1991. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil and Tillage Research*, 19: 275-286.
33. Mosaddeghi, M.R., Hemmat, A., Hajabbasi, M.A. and Alexandrou, A. 2003. Pre-compression stress and its relation with the physical and mechanical properties of a structurally unstable soil in central Iran. *Soil and Tillage Research*, 70: 53-64.
34. Naderi-Boldaji, M., Alimardani, R., Hemmat, A., Sharifi, A., Keyhani, A., Dolatsha, N. and Keller, T. 2012. Improvement and field testing of a combined horizontal penetrometer for on-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance. *Soil and Tillage Research*, 123: 1-10.
35. Naderi-Boldaji, M., Sharifi, A., Alimardani, R., Hemmat, A., Keyhani, A., Loonstra, E.H., Weisskopf, P., Stettler, M. and Keller, T. 2013. Use of a triple-sensor fusion system for on-the-go measurement of soil compaction. *Soil and Tillage Research*, 128: 44-53.
36. Naderi-Boldaji, M., Weisskopf, P., Stettler, M. and Keller, T. 2016. Predicting the state of compactness of arable soil from on-the-go horizontal penetrometer measurements. *Soil and Tillage Research*, 159: 23-32.
37. Rücknagel, J., Hofmann, B., Paul, R., Christen, O. and Hülsbergen, K.J. 2007. Estimating precompression stress of structured soils on the basis of aggregate density and dry bulk density. *Soil and Tillage Research*, 92: 213-220.
38. Saldago, R. and Prezzi, M. 2007. Computation of cavity expansion pressure and penetration resistance in sands. *International Journal Of Geomechanics*, 7: 251-265.

39. Schulte, E.E. and Hopkins, B.G. 1996. Estimation of soil organic matter by weight Organic Matter (LOI) loss- on - ignition. Pp.21- 31. In F.R. Magdoff, M.A. Tabatabai, and E.A. Hanlon, Jr. (eds.), Soil Organic Matter: Analysis and Interpretation. Soil Science Society of America, Madison, WI.
40. Wösten, J.H.M., Lilly, A., Nemes, A. and Le Bas, C. 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. Geoderma, 90: 169–185.