

بررسی اثر دانه بندی و خواص خمیری بر مشخصات تراکم خاکهای رسی

سید شهاب الدین یثربی

استادیار

گروه خاک و پی دانشکده فنی مهندسی،

دانشگاه تربیت مدرس

رامین اسفندی

دانشجوی کارشناسی ارشد

خاک و پی، شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس

چکیده

ارتباط بین خصوصیات خمیری خاک های رسی (حد روانی، حد خمیری، نشانه خمیری)، انرژی تراکم و مشخصات تراکم خاک ها (درصد رطوبت بهینه و حداکثر دانسیته خشک) از مسایل مورد بحث مکانیک خاک است. بدین منظور خاک های رسی با خواص خمیری مختلف از نقاط مختلف استان های آذربایجان و گرگان تهیه شده است. خاک های تهیه شده با سه روش تراکم (پروکتور استاندارد، پروکتور اصلاح شده و ۱۵ ضربه ای) متراکم شده و نحوه تغییر مشخصات تراکم خاک های رسی با تغییر خواص خمیری، دانه بندی و میزان انرژی تراکم بررسی شده است. سپس با تولید خاک حاوی درصد ریزدانه ثابت از تمام خاک های جمع آوری شده، اثر تغییر درصد ریزدانه بر مشخصات تراکم رسها بررسی شده است. در ادامه یک آنالیز رگرسیونی بین پارامترهای تراکم و خواص خمیری و درصد ریزدانه خاک انجام شده است. همچنین با بررسی اثر افزایش انرژی تراکم بر بهبود حداکثر دانسیته خشک قابل استحصال در تراکم خاک های رسی نتیجه گیری شده است که اثر افزایش انرژی تراکم در بهبود حداکثر دانسیته خشک خاک های با نشانه خمیری بالا بیشتر از خاک های با نشانه خمیری پایین است.

کلمات کلیدی

تراکم، نشانه خمیری، انرژی تراکم، دانه بندی، خاک رسی

Abstract

Correlation between plasticity index (LL, PL and PI), compaction effort and compaction characteristics are the most important topics encountered in the soil mechanic.

Clays with different plastic properties are collected from different regions in Azarbaijan and Gorgan.

Provided soils have been compacted with different compaction methods (Standard proctor, Modified proctor and reduced proctor). Then changes in the compaction characteristics due to variation of plastic properties and compaction effort have been investigated.

Man made clayey soils produced from natural collected soils. These soils had constant fine grain percent. The effect of fine grains on compaction characteristics has been studied in these samples.

In this research it has been concluded that increasing of compaction effort has different effect on improving of maximum dry density. Soils with high PI more affected with compaction effort than low PI clays.

Then after with a mathematical analysis a simple correlation between plastic property, fine grains percent and compaction characteristics has been established.

Key words

Compaction, Plasticity index, Compaction effort, Clay soils

تراکم یکی از روش‌های بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها است. این روش اولین بار در سال ۱۹۲۰ توسط پروکتور در پروژه‌های سدسازی لوس آنجلس مورد توجه قرار گرفت. از آن تاریخ به بعد در مورد تراکم و تاثیر عوامل مختلف در مشخصات تراکم و همچنین اثر تراکم بر روی خواص خاکهای متراکم شده، تحقیقات مختلف و زیادی انجام شده است. بطوری که روز به روز کارایی روش مذکور در بهبود خواص مهندسی خاکها بیشتر مشخص شده است. در این راستا، تراکم خاکهای رسی با توجه به اهمیت خاصی که در پروژه‌های عمرانی از جمله هسته سدهای خاکی و دیواره مخازن دفع زباله‌های خطرناک دارند، بیشتر قابل توجه است.

تغییر مشخصات رفتاری خاک با درصد رطوبت نیز از دیرباز مورد توجه بوده است. بطوری که اولین بار اتربرگ خاک شناس سوئدی در اوایل دهه ۱۹۰۰ به بررسی این موضوع پرداخت و درصد رطوبت نظیر مرزهای تغییر حالت خاک را با ارایه روش‌های اندازه‌گیری آنها تعریف کرد و این مرزها به نام حدود اتربرگ نامیده شدند {۴}. در این تحقیق سعی شده است ارتباط این دو آزمایش مهم و متداول مهندسی عمران (تراکم و حدود اتربرگ) در سطوح مختلف انرژی تراکم مورد بررسی قرار گیرد.

مروری بر کارهای قبلی به انجام رسیده

عموماً با افزایش پلاستیسیته خاک (که با حدود اتربرگ مشخص می‌شود)، درصد رطوبت بهینه تراکم افزایش می‌یابد و دانسیته خشک حداکثر قابل استحصال کاهش می‌یابد. اداره نیروی دریایی آمریکا (USNAVY 1962) برای تخمین درصد رطوبت بهینه و دانسیته خشک حداکثر خاک‌ها روابط زیر را ارایه کرده است:

$$\omega_{opt} = 6.77 + 0.43LL - 0.21PI\% \quad (1)$$

$$\gamma_{max} = 20.48 - 0.13LL + 0.05PI \quad (KN/M^3) \quad (2)$$

که LL حد روانی و PI نشانه خمیری خاک است.

هاموند (۱۹۸۰) برای خاک‌های Block Cotton (رس سیلتی) غنا روابط زیر را برای تعیین درصد رطوبت بهینه تراکم ارایه کرد {۲}.

$$\omega_{opt} = 0.96PL - 7.7 \quad (3)$$

$$= 6.4 + (\text{درصد ریزدانه}) * 0.15 \quad (4)$$

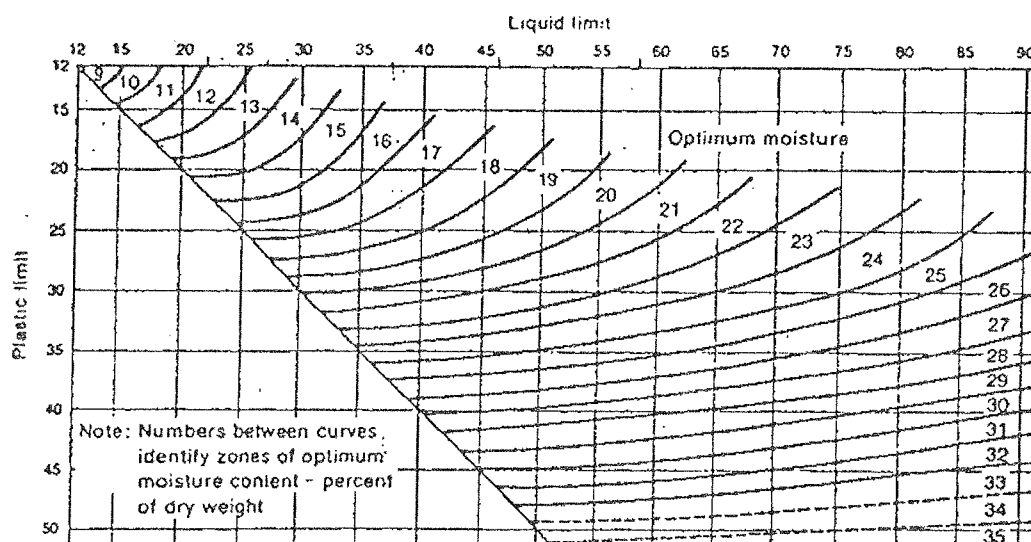
باولز نیز در این زمینه فعالیت کرده است که شکل (۱) ماحصل مطالعات این محقق است. در این چارت رطوبت بهینه خاکها در آزمایش تراکم پروکتور استاندارد بر اساس حد خمیری و حدروانی ارایه شده است. وی بیان کرده است که در صورتی که حدود اتربرگ خاک‌ها به صورت دقیق مشخص شود، این چارت درصد رطوبت بهینه تراکم را با اختلاف ± 2 درصد ارایه می‌دهد {۳}.

روش تحقیق

مطالعه اثر خواص خمیری و انرژی تراکم بر روی مشخصات تراکم خاکهای رسی در چهار مرحله به شرح زیر صورت گرفته است :

الف - در مرحله اول سه نمونه مختلف خاک رسی از نقاط مختلف آذربایجان و یک نقطه از گرگان جمع‌آوری شد و نمونه‌های جدید (جهت دسترسی به محدوده وسیعتر نشانه خمیری) تولید شدند. آزمایش‌های شناسایی (دانه‌بندی، هیدرومتری، حدود اتربرگ و G_s) بر روی کلیه نمونه‌ها انجام شد. در ادامه نمونه‌های مورد آزمایش با سه روش مختلف تراکم، متراکم شده‌اند. سه روش تراکم مورد استفاده در این تحقیق عبارتند از تراکم پروکتور استاندارد، پروکتور اصلاح شده و پروکتور ۱۵ ضربه‌ای. آزمایش تراکم پروکتور ۱۵ ضربه‌ای نظیر پروکتور استاندارد است، با این تفاوت که در آن به جای ۲۵ ضربه در هر لایه، ۱۵ ضربه زده می‌شود و انرژی تراکم در آن حدود نصف پروکتور استاندارد است. منحنی‌های دانه‌بندی این نمونه‌ها در شکل (۲) نشان داده شده است.

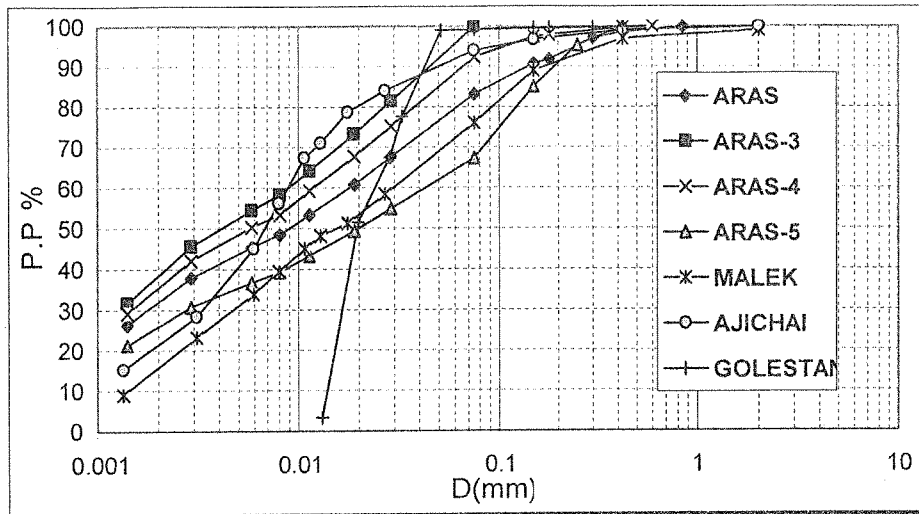
نمونه ARAS از محل منبع قرضه سد ارسباران در کلیبر - استان آذربایجان شرقی - تهیه شده است و نمونه‌های ARAS-3,4,5 با تغییر در میزان عبوری ازالک نمره ۲۰۰ از این خاک تولید شده‌اند. نمونه‌های MALEK و AJICHAH از منبع قرضه سد ملکیان در استان آذربایجان شرقی (به ترتیب ۱۵ و ۲۵ کیلومتری تبریز در جاده تبریز - اهر) تهیه شده و نمونه GOLESTAN مربوط به منبع قرضه سد گلستان است. بر روی کلیه نمونه‌های تهیه شده آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ، G_s و آزمایش‌های تراکم استاندارد، تراکم اصلاح شده و ۱۵ ضربه‌ای صورت گرفته است. نتایج این آزمایش‌ها در جدول‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است. مبنای تمام آزمایش‌ها استاندارد ASTM بوده است.



شکل (۱) رابطه بین درصد رطوبت بهینه و حدود اتربرگ خاکها (۵).

جدول (۱) نتایج آزمایش‌های شناسایی انجام شده بر روی مصالح اخذ شده از استانهای آذربایجان و گرگان.

نام نمونه	LL	PL	PI	P.P ₂₀₀	طبقه بندی	G_s
ARAS	۴۵/۱	۲۵/۱	۲۰	۸۳/۱۳	CL	۲/۶
ARAS-3	۵۹/۶	۲۸/۸	۳۰/۸	۱۰۰	CH	۲/۶۳
ARAS-4	۵۷/۷	۳۲/۳	۲۵/۴	۹۲/۴	CH	۲/۶۳
ARAS-5	۳۶/۶	۲۲/۱	۱۴/۵	۶۷/۳۷	CL	۲/۶۵
MALEK	۲۶	۱۵/۸	۱۰/۲	۷۶	CL	۲/۶۸
AJICHAH	۳۷/۳	۲۱/۸	۱۵/۵	۹۴	CL	۲/۷
GOLESTAN	۲۸/۲	۱۷/۵	۱۰/۷	۹۹/۲	CL	۲/۷



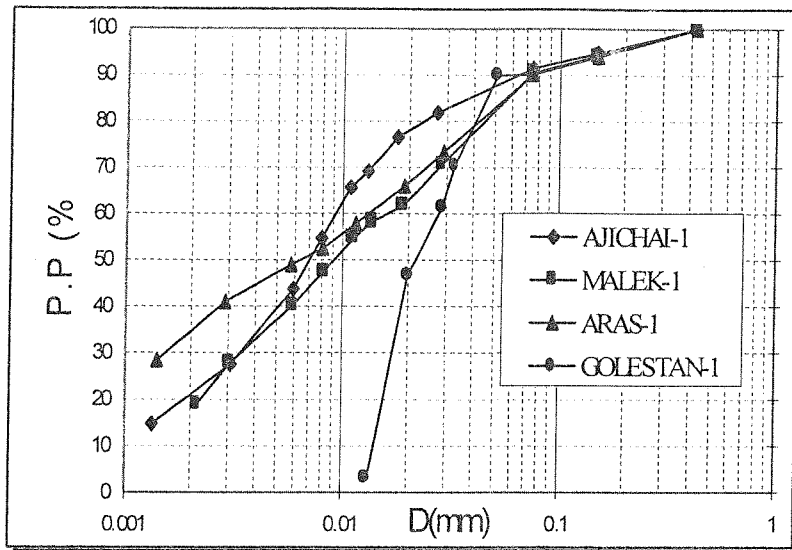
شکل (۲) منحنی دانه‌بندی مصالح اخذ شده از استان‌های آذربایجان و گرگان.

ب - در مرحله دوم، یا ایجاد دو گروه دانه‌بندی ثابت (دارای درصد ریزدانه ثابت و اختلاط آن با یک نوع ماسه ریز با نسبت‌های مختلف) اثر دانه‌بندی و تغییر مرجع رس در مشخصات تراکم بررسی شده است. نمونه‌های 1-AJICHAI، 1-MALEK، ARAS-3 و 1-GOLESTAN دارای دانه‌بندی ثابت ۹۰-۱۰ (۱۰ درصد ماسه ریز و ۹۰ درصد عبوری از الک ۲۰۰) و نمونه‌های 2-AJICHAI، 2-MALEK، 2-ARAS و 2-GOLESTAN دارای دانه‌بندی ثابت ۶۰-۴۰ (۴۰ درصد ماسه ریز و ۶۰ درصد عبوری از الک ۲۰۰) بوده‌اند. بخش ریزدانه نمونه‌های 1-AJICHAI و 2-AJICHAI از خاک مرجع نظیر نمونه AJICHAI، نمونه‌های 1-MALEK و 2-MALEK از خاک مرجع نمونه MALEK، نمونه‌های 1-ARAS و 2-ARAS از خاک منبع نمونه ARAS و نمونه‌های 1-GOLESTAN و 2-GOLESTAN از خاک منبع نمونه GOLESTAN تهیه شده‌اند. منحنی‌های دانه‌بندی این نمونه‌ها در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است. بر روی نمونه‌های تولید شده در این مرحله فقط آزمایش تراکم پروکتور استاندارد انجام شده است و نتایج حاصل از آزمایش‌های تراکم و شناسایی بر روی این نمونه‌ها در جدول (۳) ارائه شده است.

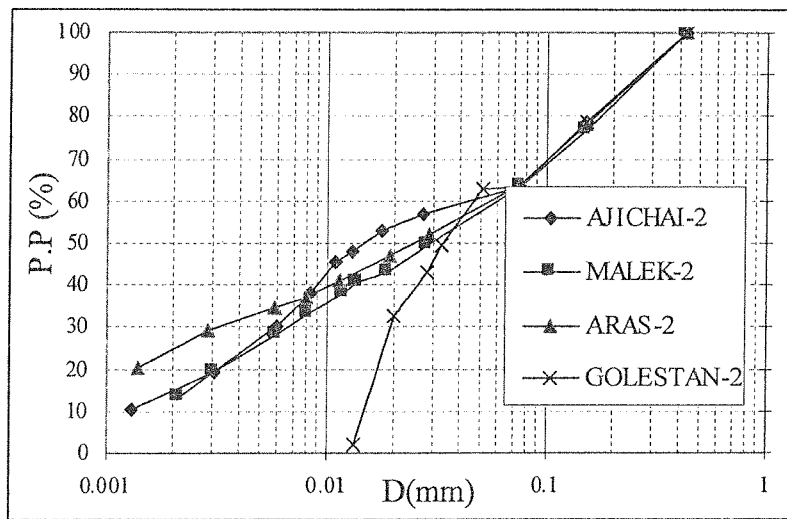
ج - در مرحله سوم مطالعات، یک آنالیز ریاضی رگرسیونی بین خواص خمیری و درصد ریزدانه خاک رس و خواص تراکم در آزمایش پروکتور استاندارد انجام شده است و دقت پیش‌بینی رابطه بدست آمده با سایر روابط موجود بررسی شده است. سپس جهت بررسی صحت رابطه بدست آمده نمونه‌های مختلف رسی نواحی مختلف کشور که در جامعه آماری استخراج رابطه دخیل نبوده‌اند، استفاده شده است. جزئیات مربوط به این داده‌ها در جدول شماره (۴) ارائه شده است.

جدول (۲) نتایج حاصل از آزمایش‌های تراکم انجام شده بر روی مصالح اخذ شده از استان‌های آذربایجان و گرگان.

نام نمونه	تراکم ۱۵ ضربه ای		تراکم استاندارد		تراکم اصلاح شده	
	ω_{opt} %	$\gamma_{d max}$ (KN/m^3)	ω_{opt} %	$\gamma_{d max}$ (KN/m^3)	ω_{opt} %	$\gamma_{d max}$ (KN/m^3)
ARAS	۱۹/۵	۱۵/۸۸	۱۸/۵	۱۶/۵۵	۱۴/۵	۱۸/۴۱
ARAS-3	۲۴/۳	۱۵/۲۷	۲۲/۱	۱۵/۹۴	۱۵/۹	۱۸/۰۹
ARAS-4	۲۳/۲	۱۵/۲۳	۲۲/۶	۱۵/۷۶	۱۷/۸	۱۷/۸۱
ARAS-5	۱۸/۵	۱۶/۸۹	۱۷/۷	۱۷/۳۴	۱۲/۴	۱۹/۴۴
MALEK	۱۵/۲	۱۸/۳۰	۱۳/۷	۱۹/۲۳	۱۰/۶	۲۰/۶۴
AJICHAI	۱۹	۱۷/۰۰	۱۷/۵	۱۷/۷	۱۵	۱۹/۰۰
GOLESTAN	۱۵/۹	۱۸/۲۸	۱۴/۷	۱۸/۶۵	۱۱/۷	۲۰/۲۳



شکل (۳) منحنی دانه بندی نمونه‌ها با دانه بندی ۱۰-۹۰ (حاوی ۶۰٪ ریزدانه).



شکل (۴) منحنی دانه بندی ۴۰-۶۰ (حاوی ۶۰٪ ریزدانه).

نمونه‌های AB-1 تا AB-16 از دشت عباس در استان خوزستان، نمونه‌های ARS-1 تا ARS-11 از منبع قرضه سد ارسباران، نمونه‌های HRS-1 تا HRS-6 از منبع قرضه سد هرزه ورز هریس در استان آذربایجان شرقی و نمونه‌های SOM-1 تا SOM-3 از منبع قرضه سد صومعه علیا تهیه شده است.

جدول (۳) نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های با دانه بندی ۱۰-۹۰ و ۴۰-۶۰.

نام نمونه	LL	PL	PI	P.P ₂₀₀	طبقه بندی	G _s	تراکم استاندارد	
							$\omega_{opt} \%$	$\gamma_{dmax} (KN/m^3)$
AJICHAI-1	۳۴/۸	۱۹/۹	۱۴/۹	۹۱/۵	CL	۲/۷۳	۱۵/۷	۱۸/۳۰
MALEK-1	۲۸/۵	۱۹	۹/۵	۹۰/۵	CL	۲/۷۴	۱۴/۱	۱۸/۶۹
ARAS-1	۵۲/۶	۲۹/۵	۲۳/۱	۹۰/۱	CH	۲/۷	۲۱/۹	۱۵/۹
GOLESTAN-1	۲۵/۵	۱۸	۷/۵	۹۰/۱	CL	۲/۷۱	۱۳/۱	۱۸/۷۵
ADJICHAL-2	۲۴/۴	۱۵/۶	۸/۸	۶۳/۵	CL	۲/۷۲	۱۳/۶	۱۹/۰۵
MAKEK-2	۲۲/۷	۱۶/۲	۶/۵	۶۳/۳	CL-ML	۲/۷۵	۱۲/۷	۱۹/۶۵
ARAS-2	۳۹/۵	۲۰/۵	۱۹	۶۴	CL	۲/۶۳	۱۷	۱۷/۳۹
GOLESTAN-2	۲۱	۱۴/۸	۶/۲	۶۳/۲	CL-ML	۲/۶۵	۱۰/۳	۱۹/۳۵

بررسی اثر نشانه خمیری بر حداکثر دانسیته خشک

در شکل (۵) تغییر دانسیته خشک حداکثر حاصل از تراکم نمونه‌های شکل (۲) در برابر حد روانی، حد خمیری و نشانه خمیری نشان داده شده است. در هر نمودار با استفاده از نرم افزار EXCEL بهترین منحنی ممکن از نقاط نظیر هر روش تراکم (پروکتور استاندارد، اصلاح شده و ۱۵ ضربه‌ای) برآزش شده است. رسم بهترین منحنی ممکن بر اساس روش خطای کمترین مربعات و آنالیز رگرسیون انجام شده است. با ملاحظه شکل (۵) مشخص می‌شود که دانسیته خشک حاصل از تراکم هر سه روش تراکم با افزایش حد روانی، حد خمیری و نشانه خمیری به صورت غیرخطی کاهش یافته است. شیب منحنی تغییرات دانسیته خشک حداکثر با حد روانی، حد خمیری و نشانه خمیری در قسمت‌های اولیه منحنی زیاده‌تر و حساسیت دانسیته خشک حداکثر نسبت به تغییر این پارامترها بیشتر است.

با افزایش مقدار این پارامترها تغییرات دانسیته خشک حداکثر کمتر، به یک مقدار تقریباً ثابت میل می‌کند. به طوری که در حدود روانی بالاتر از ۴۵، حد خمیری بالاتر از ۲۵ و نشانه خمیری بیشتر از ۲۰ این تغییرات روند کمتری دارند. ملاحظه شکلها همچنین نشان می‌دهد که منحنی‌های حاصل از روش‌های مختلف تراکم روندی مشابه دارند.

بررسی اثر خواص خمیری بر رطوبت بهینه تراکم

در شکل (۶) تغییرات درصد رطوبت بهینه حاصل از تراکم نمونه‌های شکل (۲) در برابر حد روانی، حد خمیری و نشانه خمیری نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود درصد رطوبت بهینه تراکم با افزایش حد روانی و حد خمیری به صورت خطی افزایش می‌یابد. در حالی که افزایش درصد رطوبت با نشانه خمیری به صورت خیرخطی است. این موضوع بیانگر آن است که با افزایش نشانه خمیری حساسیت درصد رطوبت بهینه نسبت به تغییرات نشانه خمیری کمتر می‌شود (شکل ۶ - ج). همچنین با ملاحظه شکل (۶) مشخص می‌شود که تغییرات درصد رطوبت بهینه با حد روانی، حد خمیری و نشانه خمیری با افزایش انرژی تراکم بیشتر می‌شود. همانطور که ملاحظه می‌گردد، بین منحنی‌های حاصل از تراکم اصلاح شده و استاندارد و ۱۵ ضربه‌ای تفاوت قابل ملاحظه‌ای وجود دارد که این اختلاف با افزایش حد روانی، حد خمیری و نشانه خمیری افزایش می‌یابد. از این امر می‌توان نتیجه گرفت که جهت کاهش درصد رطوبت بهینه تراکم و بالا بردن کارایی در خاکهای با نشانه خمیری بالا افزایش انرژی تراکم روش بسیار موثری است.

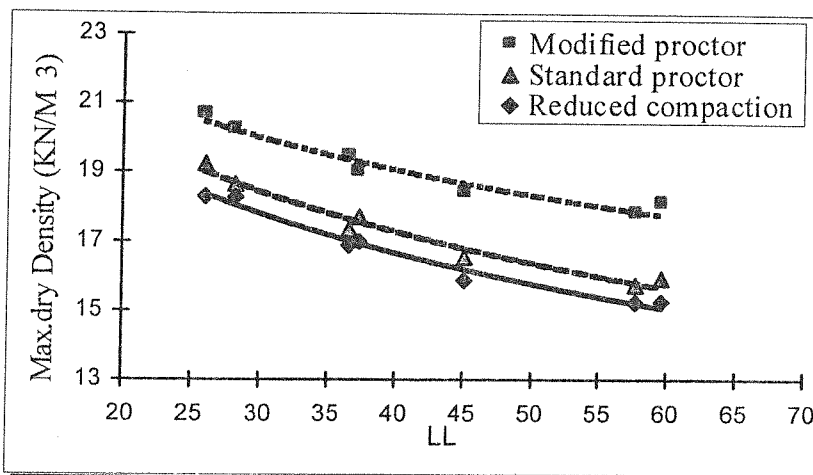
بررسی اثر بخش ریزدانه و مرجع رس بر مشخصات تراکم خاکهای رسی

همان طور که گفته شد نمونه‌های GOLESTAN-1, ARAS-1, MALEK-1, AJICHAH-1 دارای درصد ریزدانه و درشت دانه ثابت هستند و بخش درشت دانه آنها از یک نوع ماسه ریز تشکیل شده است. درصد ریزدانه در این نمونه‌ها ۹۰ درصد است (دانه‌بندی ۹۰-۱۰). اختلاف این نمونه‌ها با همدیگر فقط در خواص بخش ریزدانه و مرجع رسی آنهاست. با ملاحظه جدول (۳) مشخص می‌شود که در این سری نمونه‌ها با تغییر مرجع زمین شناسی رس نشانه خمیری نمونه‌ها از ۷/۵ تا ۲۳/۱ تغییر کرده است. با تغییر مرجع رس در این نمونه‌ها درصد رطوبت بهینه از ۱۳/۱ تا ۲۱/۹ درصد و دانسیته خشک حداکثر از ۱۵/۹ تا ۱۸/۷۵ کیلونیوتن بر مترمکعب تغییر کرده است.

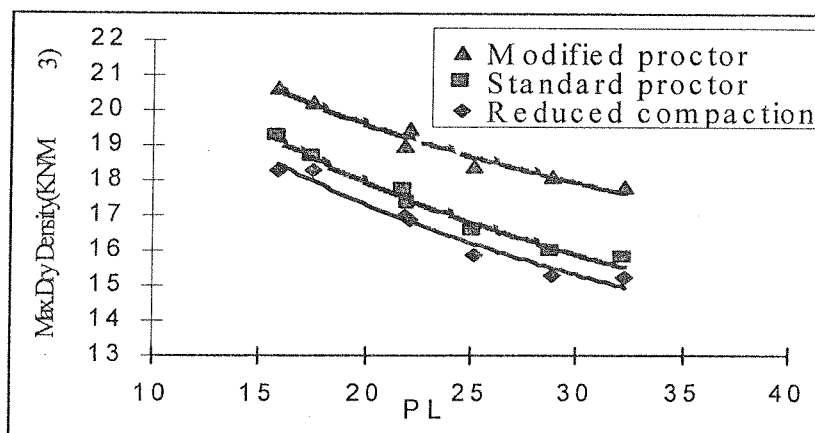
در مورد نمونه‌های GOLESTAN-2, ARAS-2, MALEK-2, AJICHAH-2 که دارای درصد ریزدانه ۶۰ درصد می‌باشند (دانه‌بندی ۶۰-۴۰) نشانه خمیری از ۶/۵ تا ۱۹ در نوسان بوده است. تغییرات درصد رطوبت بهینه از ۱۰/۳ تا ۱۷ درصد و تغییر دانسیته خشک حداکثر از ۱۷/۳۹ تا ۱۹/۳۵ کیلونیوتن بوده است.

با توجه به نتایج بدست آمده ملاحظه می‌شود که درصد رطوبت بهینه تراکم با تغییر خواص رس در نمونه‌های با دانه‌بندی ۹۰-۱۰ حدود ۶۸ درصد و در نمونه‌های ۶۰-۴۰، ۶۵ درصد تغییر کرده است. این مقادیر در مورد دانسیته خشک حداکثر نمونه‌های ۹۰-۱۰ به ۱۸ درصد و در مورد نمونه‌های ۶۰-۴۰ به ۱۱ درصد می‌رسد. نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در یک درصد ریزدانه ثابت با تغییر مرجع رس و خواص خمیری آن مشخصات تراکم خاکهای رسی بدون بررسی و در نظر گرفتن

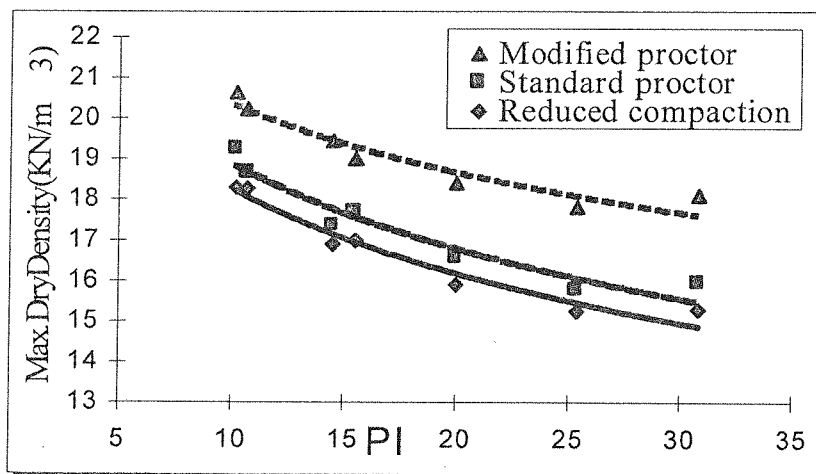
مرجع زمین شناسی و بر اساس درصد ریزدانه آنها ممکن نیست. در شکل (۷) تغییر درصد رطوبت بهینه تراکم نمونه‌های کلیه نمونه‌ها در برابر درصد ریزدانه رسم شده است. در این شکل همچنین رابطه ارایه شده توسط آقای هاموند (۴) در مورد خاکهای Black Cotton نیز نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود پراکندگی قابل توجهی بین نتایج وجود دارد و رابطه هاموند تقریباً حد بالای نتایج است.



(الف)



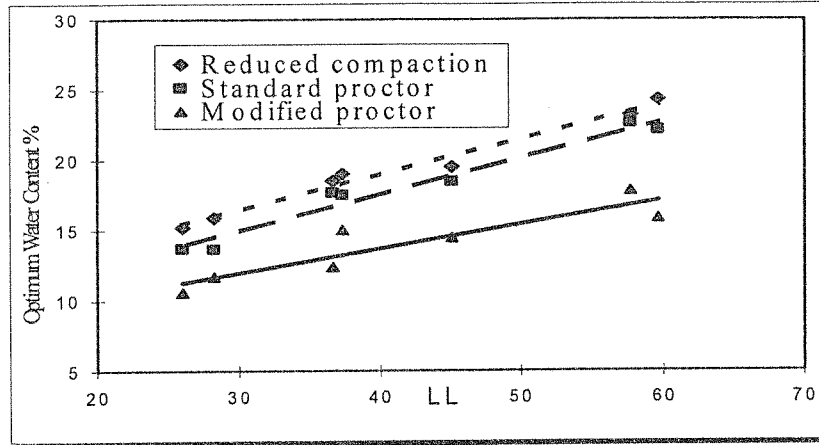
(ب)



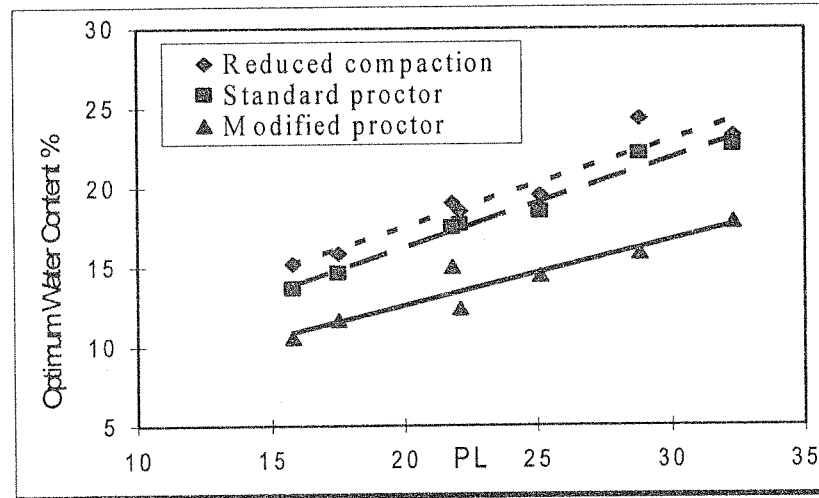
(ج)

شکل (۵) تغییرات دانسیته خشک حداکثر در برابر الف - حد روانی ب - حد خمیری، ج - نشانه خمیری.

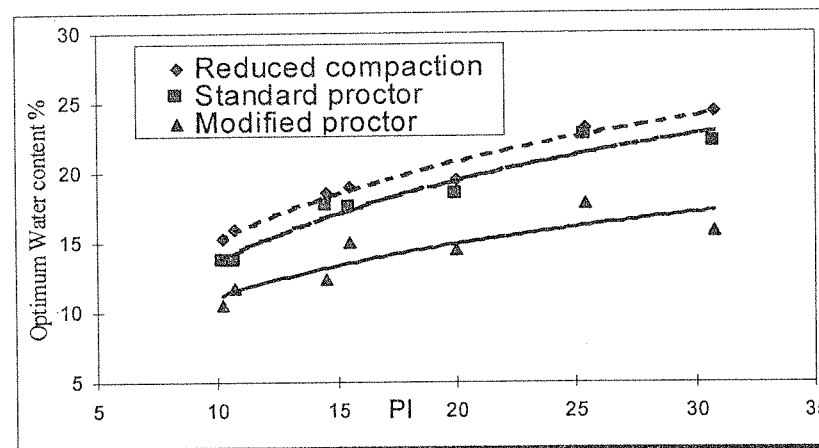
بدین ترتیب ملاحظه می‌شود که اثر درصد ریزدانه بر روی مشخصات تراکم به خواص خمیری آنها وابسته بوده و ارتباط مستقیمی بین درصد ریزدانه و مشخصات تراکم خاکهای رسی مختلف وجود ندارد.



(الف)



(ب)

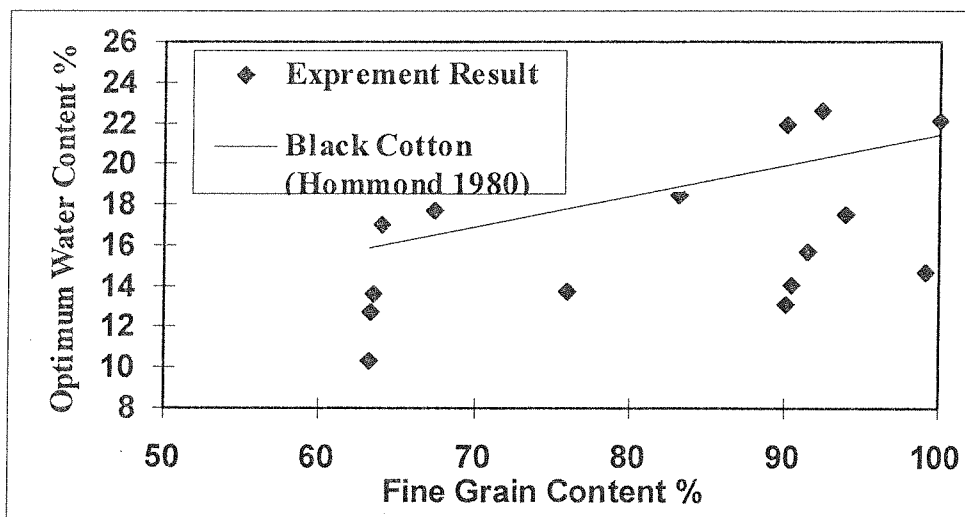


(ج)

شکل (۶) تغییرات درصد رطوبت بهینه در برابر الف - حد روانی، ب - حد خمیری، ج - نشانه خمیری.

جدول (۴) نتایج آزمایشهای تراکم پروکتور استاندارد.

$\gamma_{d\max}$	ω_{opt}	P.P ₂₀₀	PI	PL	LL	طبقه‌بندی	نام نمونه	ردیف
۱۶/۳۵	۲۲/۷	۹۱	۲۰/۱	۲۹/۶	۴۹/۷	CL	AB-1	۱
۱۵/۶۵	۲۴/۷	۹۲	۳۰/۱	۳۵/۴	۶۵/۵	CH	AB-2	۲
۱۷	۲۱/۲	۹۱	۲۱/۶	۳۰/۸	۵۲/۴	CH	AB-3	۳
۱۶/۶	۲۲	۹۴	۱۶	۳۴/۲	۵۰/۲	CH	AB-4	۴
۱۶/۴۵	۲۲	۸۶	۱۷/۳	۳۰/۴	۴۷/۷	CL	AB-5	۵
۱۹/۱	۱۳	۶۱	۷/۴	۱۹/۶	۲۷	CL	AB-6	۶
۱۷/۹	۱۶/۷	۶۵/۷	۱۲/۷	۲۳/۳	۳۶	CL	AB-7	۷
۱۹/۸	۱۰/۵	۷۶	۸/۸	۱۶/۴	۲۵/۲	CL	AB-8	۸
۱۸/۵	13/6	۷۲/۷	۱۶/۸	۱۹/۲	۳۶	CL	AB-9	۹
۱۸/۵	۱۳/۱	۸۰	۱۴/۲	۱۹/۴	۳۳/۶	CL	AB-10	۱۰
۱۹/۱	۱۳/۲	۵۴	۱۳/۴	۱۷/۸	۳۱/۲	CL	AB-11	۱۱
۱۶	۲۰/۵	۹۴	۲۳/۴	۲۵/۳	۴۸/۷	CL	AB-12	۱۲
۱۹/۳	۱۲/۵	۵۳	۸/۱	۱۸/۸	۲۶/۹	CL	AB-13	۱۳
۱۵/۵	۲۱	۸۹/۷	۲۱	۲۷	۴۸	CL	ARS-1	۱۴
۱۵/۵	۲۳	۹۴/۳	۲۴	۲۷	۵۱	CH	ARS-2	۱۵
۱۴/۶	۲۰	۹۶/۵	۳۴	۲۸	۶۲	CH	ARS-3	۱۶
۱۶	۲۲	۸۵/۷	۱۹	۲۷	۴۶	CL	ARS-4	۱۷
۱۵/۶	۲۲	۹۰/۵	۲۱	۲۷	۴۸	CL	ARS-5	۱۸
۱۸/۲	۱۵/۸	۸۳	۲۴/۵	۲۱/۸	۴۶/۳	CL	HRS-1	۱۹
۱۷/۷	۱۷/۳	۹۴	۲۶/۵	۲۴/۵	۵۱	CH	HRS-2	۲۰
۱۷/۶	۱۸	۹۸	۲۷/۷	۲۵	۵۲/۷	CH	HRS-3	۲۱
۱۷/۵	۱۸	۹۳	۲۹	۲۵	۵۴	CH	HRS-4	۲۲
۱۷/۸	17/7	۹۲	۲۷/۴	۲۴/۹	۵۲/۳	CH	HRS-5	۲۳
۱۶/۶	۲۱/۵	۸۲	۲۱/۴	۲۳/۹	۴۵/۳	CL	SOM-1	۲۴
۱۷/۹	۱۶/۸	۶۹	۱۵/۳	۲۲/۹	۳۸/۲	CL	SOM-2	۲۵
۱۷/۳	۱۸/۱	۸۰	۲۴/۵	۲۱/۵	۴۶	CL	SOM-3	۲۶



شکل (۷) تغییر درصد رطوبت بهینه تراکم با درصد ریزدانه.

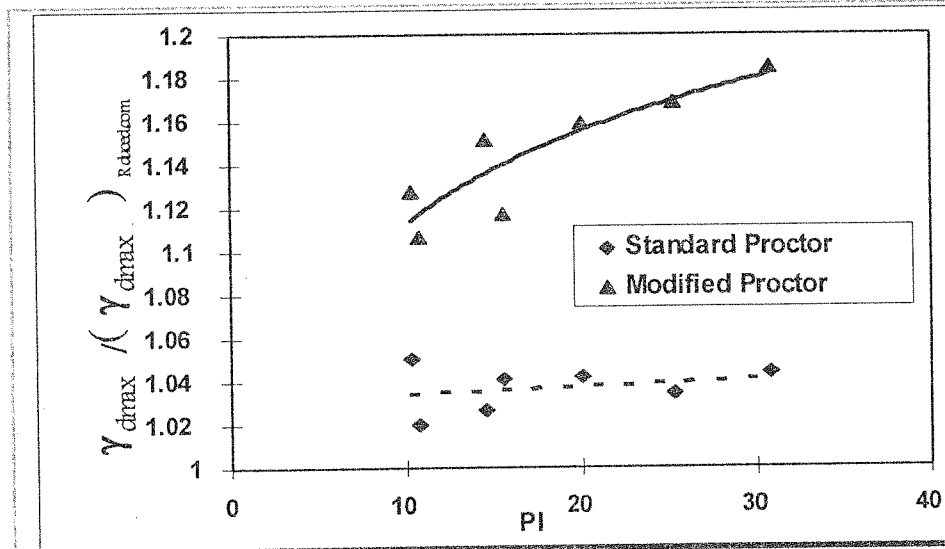
بررسی اثر انرژی تراکم بر مشخصات تراکم خاک های رسی با نشانه خمیری مختلف

افزایش انرژی تراکم باعث افزایش دانسیته خشک حداکثر حاصل از تراکم می شود. در این قسمت تاثیر انرژی تراکم بر افزایش دانسیته خشک حداکثر خاک های رسی با نشانه خمیری مختلف مورد بررسی قرار می گیرد.

نمونه های شکل (۲) با نشانه خمیری بین ۱۰ تا ۳۰، تحت سه روش، تراکم شده اند. انرژی تراکم در هر یک از روش های پروکتور استاندارد، اصلاح شده و ۱۵ ضربه ای به ترتیب ۶۰۸/۵۱، ۲۸۰۵/۲، ۳۶۵/۱ کیلو ژول بر مترمکعب است.

در شکل (۸) دانسیته خشک حداکثر حاصل از تراکم پروکتور اصلاح شده و استاندارد هر یک از نمونه های مذکور نسبت به دانسیته خشک تراکم ۱۵ ضربه ای هر نمونه نرمالیزه شده و تغییرات آن نسبت به نشانه خمیری نشان داده شده است. محور قائم در این نمودار بیانگر این است که دانسیته خشک حداکثر حاصل از تراکم پروکتور اصلاح شده و با استاندارد چند برابر دانسیته خشک حداکثر حاصل از تراکم ۱۵ ضربه ای همان خاک است.

همان طور که در این شکل دیده می شود دانسیته خشک حداکثر حاصل از تراکم پروکتور استاندارد ۱/۰۲ تا ۱/۰۵ برابر دانسیته خشک حداکثر تراکم ۱۵ ضربه ای است و تقریباً مستقل از تغییرات نشانه خمیری است. لیکن بررسی نتایج حاصل از تراکم پروکتور اصلاح شده نشان می دهد که افزایش دانسیته خشک حداکثر حاصل از این روش تراکم به نشانه خمیری خاک بستگی دارد و با افزایش نشانه خمیری خاک، افزایش بیشتری در دانسیته خشک حداکثر (به ازای افزایش یکسان انرژی تراکم از تراکم پروکتور ۱۵ ضربه ای تا اصلاح شده) ایجاد شده است.



شکل (۸) تغییرات نسبت دانسیته خشک حداکثر حاصل از تراکم پروکتور اصلاح شده و با استاندارد به دانسیته خشک حداکثر تراکم ۱۵ ضربه ای در برابر نشانه خمیری.

در شکل (۹) دانسیته خشک حداکثر حاصل از روش های مختلف تراکم (نمونه های شکل ۲) در برابر انرژی تراکم و به صورت لگاریتمی رسم شده است. همان طور که در این شکل ملاحظه می شود، نقاط حاصل از روش های مختلف تراکم کم و بیش بر یک خط راست قرار گرفته است و خطوط نظیر خاک های با نشانه خمیری بالا دارای شیب تندتری نسبت به خاکهای با نشانه خمیری پایین است. این موضوع بیانگر این است که تغییرات دانسیته خشک حداکثر حاصل از تراکم با لگاریتم انرژی تراکم خطی است و افزایش انرژی تراکم در خاک های با نشانه خمیری بالا بهبود نسبی بیشتری در دانسیته خشک حداکثر قابل استحصال ایجاد می کند.

جستجوی یک رابطه ریاضی بین خواص خمیری و مشخصات تراکم خاک های رسی

در بخش های قبل ملاحظه شد که مشخصات تراکم خاک رسی به خواص خمیری بخش ریزدانه بستگی دارد. در این

قسمت یک آنالیز رگرسیونی چند گانه بین این پارامترها انجام شده است. این آنالیز با استفاده از نرم افزار EXCEL و داده‌های جدولهای (۱) و (۳) انجام گردیده است. نتایج حاصل از این آنالیز در مورد آزمایش تراکم پروکتور استاندارد به شرح زیر می‌باشد.

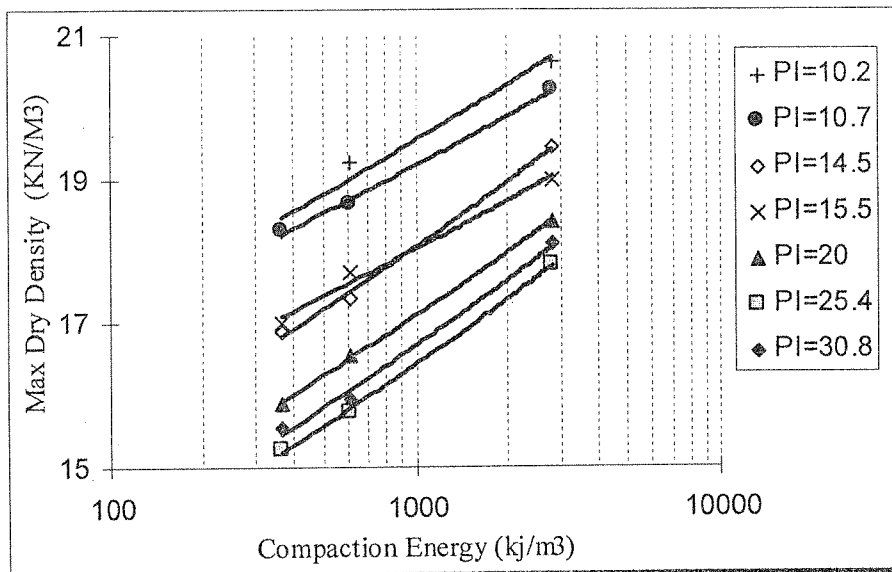
$$\omega_{opt} = 0.395LL - 0.186PI + 4.872 \% \quad R^2=0.96 \quad (5)$$

$$\gamma_{dmax} = 1.489Ln(PI) - 6.202Ln(LL) + 0.0088Fc + 35.248 \quad (KN/m^3) \quad R^2=0.97 \quad (6)$$

که در رابطه فوق F_c درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ است. در رابطه (۵) ضریب درصد ریزدانه صفر به دست آمده است و در رابطه (۶) این مقدار برابر ۰/۰۰۸۸ است. بدین ترتیب ملاحظه می‌شود که تاثیر درصد ریزدانه بر درصد رطوبت بهینه به صورت تاثیر آن بر خواص خمیری خاک رس است ولی در مورد حداکثر دانسیته خشک حاصل از تراکم به صورت عامل مستقلی می‌تواند باعث حداکثر اختلافی به اندازه $0.44 = 0.0088 \times 50$ کیلو نیوتن بر مترمکعب شود (حداقل درصد ریزدانه خاک رس ۵۰ درصد و حداکثر ۱۰۰ درصد می‌باشد). جدول (۶) مقادیر تخمینی درصد رطوبت و دانسیته خشک حداکثر روابط مختلف موجود در رابطه بدست آمده را نشان داده است. در جدول (۷) حداکثر میانگین خطای تخمینی درصد رطوبت بهینه و حداکثر دانسیته خشک تراکم روابط مختلف موجود و رابطه بدست آمده ارائه شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود در مورد درصد رطوبت بهینه تراکم، رابطه بدست آمده ضمن هم خوانی نسبتاً خوبی که با چارت ارائه شده توسط باولز داشته با متوسط خطای ۰/۵ درصد و حداکثر خطای ۱/۷ درصد توانسته است درصد رطوبت بهینه تراکم را تخمین بزند که نسبت به روابط ارائه شده توسط هاموند و اداره نیروی دریایی آمریکا خیلی بهتر بوده است. در باره حداکثر دانسیته خشک نیز متوسط خطای تخمین ۰/۱۸ و حداکثر خطا ۰/۴۷ کیلو نیوتن بر مترمکعب بوده است که دقت مناسب و قابل قبولی بوده و تخمین بهتری نسبت به رابطه اداره نیروی دریایی آمریکا ارائه کرده است.

جدول (۶) مقادیر تخمینی درصد رطوبت بهینه و حداکثر دانسیته خشک روابط مختلف موجود.

نام نمونه	% درصد رطوبت بهینه تراکم پروکتور استاندارد						دانسیته خشک حداکثر تراکم استاندارد KN/m ³		
	نتیجه آزمایش	رابطه ارائه شده	باولز	هاموند (۳)	هاموند (۴)	US.NAVY	نتیجه آزمایش	رابطه ارائه شده	US.NAVY
ARAS	۱۸/۵	۱۹	۱۹	۱۶/۴	۲۰	۲۲	۱۶/۵۵	۱۶/۸۱	۱۵/۶۲
ARAS-1	۲۱/۹	۲۱/۴	۲۲	۲۰/۶	۱۹/۹	۲۴/۵	۱۵/۹	۱۶/۰۷	۱۴/۸
ARAS-2	۱۷	۱۷	۱۷	۱۲	۱۶	۱۹/۸	۱۷/۳۹	۱۷/۳۵	۱۶/۳
ARAS-3	۲۲/۱	۲۲/۷	۲۲/۵	۱۹/۹	۲۱/۴	۲۵/۹	۱۵/۹۴	۱۵/۸	۱۴/۲۷
ARAS-4	۲۲/۶	۲۳	۲۴	۲۳/۳	۲۰/۳	26/۲	۱۵/۷۶	۱۵/۶۵	۱۴/۲۵
ARAS-5	۱۷/۷	۱۶/۷	۱۷	۱۳/۵	۱۴/۶	۱۹/۵	۱۷/۳۴	۱۷/۴۴	۱۶/۴۵
MALEK	۱۳/۷	۱۳/۳	۱۳	۷/۵	۱۷/۸	۱۵/۸	۱۹/۲۳	۱۹/۱۱	۱۷/۶۱
MALEK-1	۱۴/۱	۱۴/۴	۱۵	۱۰/۵	۲۰	۱۷	۱۸/۶۹	۱۸/۵۵	۱۷/۲۵
MALEK-2	۱۲/۷	۱۲/۷	۱۳	۷/۹	۱۵/۹	۱۵/۲	۱۹/۶۵	۱۹/۱۸	۱۷/۸۵
AGICHAI	۱۷/۵	۱۶/۸	۱۷	۱۳/۲	۲۰/۵	۱۹/۶	۱۷/۷	۱۷/۶۴	۱۶/۴۱
AGICHAI-1	۱۵/۷	۱۵/۹	۱۶	۱۱/۴	۲۰/۱	۱۸/۶	۱۸/۳	۱۷/۹۹	۱۶/۷
AGICHAI-2	۱۳/۶	۱۲/۹	۱۳	۷/۳	۱۵/۹	۱۵/۴	۱۹/۰۵	۱۹/۱۸	۱۷/۷۵
GOLESTAN	۱۴/۷	۱۴/۱	۱۴	۹/۱	۲۱/۲۸	۱۶/۶	۱۸/۶۵	۱۸/۸۶	۱۷/۳۵
GOLESTAN-1	۱۳/۱	۱۳/۶	۱۴	۹/۶	۱۹/۹	۱۶/۲	۱۸/۷۵	۱۸/۸۸	۱۷/۵۴
GOLESTAN-2	۱۰/۳	۱۲	۱۲	۶/۵	۱۵/۹	۱۴/۵	۱۹/۳۵	۱۹/۵۹	۱۸/۰۶



شکل (۹) دانسیته خشک حداکثر حاصل از روشهای مختلف تراکم (نمونه شکل ۲) در برابر انرژی تراکم.

بررسی صحت رابطه به دست آمده در باره خاک های مناطق دیگر کشور

در این قسمت روابط (۵) و (۶) به دست آمده درباره خاک های مناطق دیگر کشور (جدول ۴)، بررسی می شود. نتایج این بررسی در جدول (۸) نشان داده شده است. با ملاحظه این جدول ملاحظه می شود که روابط ارایه شده ضمن اینکه نسبت به روابط دیگر موجود تخمین بهتری داشته است، از نظر دقت تخمین نیز در سطح مناسب و قابل قبولی بوده است. به طوری که حداکثر خطای تخمین درصد رطوبت بهینه تراکم سه و متوسط خطای تخمین ۱/۷ درصد بوده است و نتایج حاصل از چارت آقای باولز نیز همخوانی خوبی دارد.

جدول (۷) متوسط و حداکثر خطای تخمین در مورد خاک های جدول (۲) و (۳).

پارامتر	نام روش	متوسط خطای تخمین	حداکثر خطای تخمین
درصد رطوبت بهینه تراکم استاندارد %	U.S.NAVY	۲/۸	۴/۲
	Black Cotton(3)	۳/۹	۶/۳
	Black Cotton(4)	۳/۶	۶/۸
	Bowles	۰/۷	۱/۷
	رابطه ارایه شده در این تحقیق	۰/۵	۱/۷
دانسیته خشک حداکثر KN/m ³	U.S.NAVY	۱/۳	۱/۸
	رابطه ارایه شده در این تحقیق	۰/۱۸	۰/۴۷

جدول (۸) متوسط و حداکثر خطای تخمینی در مورد خاک های جدول (۴).

پارامتر	نام روش	متوسط خطای تخمین	حداکثر خطای تخمین
درصد رطوبت بهینه تراکم استاندارد %	U.S.NAVY	۳/۶	۶/۳
	Black Cotton(3)	۲/۶	۶/۳
	Black Cotton(4)	۲/۴	۷/۳
	Bowles	۱/۶	۳
	رابطه ارایه شده در این تحقیق	۱/۷	۳
دانسیته خشک حداکثر KN/m ³	U.S.NAVY	۱/۶	۲/۷۵
	رابطه ارایه شده در این تحقیق	۰/۷۷	۱/۴

در مورد دانسیته خشک حداکثر حاصل از تراکم نیز حداکثر خطای تخمین ۱/۴ و متوسط خطای تخمینی ۰/۷۷ کیلو نیوتن بر مترمکعب بوده که دقت مناسب و قابل قبولی است.

در مقایسه جدول (۷) و (۸) ملاحظه می‌شود که خطای تخمین روابط مختلف و همچنین رابطه بدست آمده در باره خاک های جدول (۴) بیشتر شده است که علت آن را می‌توان به تغییر مرجع زمین شناسی خاکهای مورد مطالعه با نتایج جمع‌آوری شده نسبت داد. همچنین دقت بکار رفته در تعیین حدود اتربرگ خاک نیز می‌تواند تعیین کننده باشد. چرا که نتایج مورد استفاده جهت استخراج رابطه طی یک پروژه تحقیقاتی بدست آمده و در انجام آزمایش ها دقت بیشتری شده است.

نتیجه گیری

- ۱- درصد رطوبت بهینه تراکم خاک های رسی با افزایش حد روانی و حد خمیری به صورت خطی افزایش و با افزایش نشانه خمیری به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد.
- ۲- دانسیته خشک حداکثر حاصل از تراکم خاکهای رسی با افزایش حد خمیری، حد روانی و نشانه خمیری به صورت غیرخطی کاهش می‌یابد. کاهش دانسیته خشک حداکثر با تغییر این پارامترها در حد روانی بیشتر از ۴۵، حد خمیری بیشتر از ۲۵ و نشانه خمیری بیشتر از ۲۰ روند کمتری نسبت به مقادیر کمتر از این حدود دارد.
- ۳- در یک درصد ریزدانه ثابت با تغییر مرجع زمین شناسی خاک های رسی (شامل تغییر نوع کانی رسی، کاتیون قابل معاوضه، املاح شیمیایی موجود و...) تغییرات وسیعی در دانسیته خشک حداکثر و درصد رطوبت بهینه تراکم می‌تواند ایجاد شود. پس مرجع رسی و خواص آن تاثیر مهمی بر مشخصات تراکم خاکهای رسی دارد.
- ۴- درصد رطوبت بهینه و حداکثر دانسیته خشک حاصل از تراکم پروکتور استاندارد و با استفاده از روابط زیر قابل تخمین است.

$$\omega_{opt} = 0.395LL - 0.186PI + 4.872 \quad \% \quad R^2=0.96$$

$$\gamma_{dmax} = 1.489Ln(PI) - 6.202Ln(LL) + 0.088Fc + 35.248 \quad (KN/m^3) \quad R^2=0.97$$

این تخمین در مراحل پیش طراحی و یا در آزمایشگاه جهت دست یابی به یک منحنی تراکم مناسب (نقطه مناسب شروع آزمایش ۴ درصد زیر رطوبت بهینه تراکم) می‌تواند مفید باشد. در مورد درصد رطوبت بهینه تراکم چارت ارائه شده توسط باولز (شکل ۱) نیز تخمینهای خوب و قابل قبولی ارائه می‌دهد.

۱- افزایش انرژی تراکم در خاک های رسی با نشانه خمیری بالا باعث افزایش بیشتری در دانسیته خشک قابل استحصال نسبت به خاکهای با نشانه خمیری پایین می‌شود. این امر می‌تواند ناشی از این موضوع باشد که در خاکهای با نشانه خمیری بالا، نیروی چسبندگی زیاد بین ذرات در انرژیهای تراکم پایین باعث می‌شود تا خاک نتواند به دانسیته‌های بالاتر دست یابد. لیکن با افزایش انرژی تراکم و غلبه کامل به این نیروها تغییرات قابل توجهی در دانسیته خشک حداکثر حاصل از تراکم ایجاد می‌شود. لذا اجرای خاکریزهای رسی با نشانه خمیری بالا تحت انرژیهای تراکمی به اندازه کافی زیاد پیشنهاد می‌شود.

۲- اثر درصد ریزدانه بر روی درصد رطوبت بهینه به صورت تغییر خواص خمیری خاک رس است ولی تأثیر آن بر حداکثر دانسیته خشک حاصل از تراکم به صورت عامل مستقلى مطرح است.

۳- در خاک های رسی با نشانه خمیری بالا افزایش انرژی تراکم تأثیر نسبی بیشتری بر کاهش درصد رطوبت بهینه تراکم خاکهای رسی با نشانه خمیری پایین دارد. به همین لحاظ توصیه می‌گردد در مواردی که اجرای خاکریزهای رسی با نشانه خمیری بالا در درصد رطوبت‌های پایین مورد نیاز است انرژی تراکم افزایش داده شود.

فهرست علائم

PI: نشانه خمیری	D(m): قطر ذرات خاک بر حسب میلیمتر
PL: حد خمیری	G _s : چگالی نسبی خاک
	LL: حد روانی خاک

فهرست علایم یونانی

γ_{dmax} : حداکثر دانسیته خشک .

ω_{opt} : درصد رطوبت بهینه

مراجع

- [1] F.H. Chen ,Foundation on Expansive Soils, Elsevier Scientific Publishing Company ,1975.
- [2] Hausman monanfred. R, "Engineering Principle of Ground Modification", Mcgraw-Hill,1990
- [3] Bowles. Joseph .E , "Engineering Properties of soils and Their measurement " , Mc Graw-Hill , 1982
- [4] حشمتی رفسنجانی، علی اکبر، "بررسی خواص خاکهای واگرا در ایران و مطالعه موردی سد ۱۵ خرداد"، دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۶۷
- [5] اسفندی، رامین، "بررسی اثر نشانه خمیری بر روی مشخصات تراکم خاکهای رسی"، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۷۹. پایان نامه کارشناسی ارشد.