

مکیده:

سالیان متمادی است که معمول‌ترین روش کنترل تراکم خاک، انجام آزمایش تراکم و اندازه‌گیری دانسیته می‌باشد. در این تحقیق، به منظور سنجش جایگاه روش جاری، رفتار مکانیکی و از جمله تغییر شکل پذیری خاک‌های مختلف با درصد تراکم یکسان بررسی می‌شود. برای این منظور ۱۵ نمونه خاک مختلف طبق آزمایش پروکتور، به میزان ۱۰۰٪ متراکم شده، سپس تحت تحکیم تک بعدی قرار گرفتند و در هر تراز تنش مدول ادنومتر محاسبه و با یکدیگر مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که تحت تنش‌های یکسان، تفاوت عمده‌ای در تغییر شکل پذیری خاک‌های مختلف با درصد تراکم‌های برابر، وجود دارد، به طوری که اختلاف مدول در تنش‌های کمتر از 400 kPa ، در مورد نمونه‌های رسی به ۳ برابر و در مورد نمونه‌های ماسه‌ای به ۷ برابر می‌رسد. به نظر می‌رسد این اختلاف ناشی از مجموعه عواملی هم‌چون بافت خاک، خواص ایندکس، تخلخل خاک و اندازه حفرات باشد. صرف‌نظر از مکانیسم عمل، نتایج بیانگر

لزوم تغییر نگرش در استانداردهای موجود در کنترل تراکم و جایگزینی سنجش خصوصیات مکانیکی هم‌چون مدول خاک به جای دانسیته خشک می‌باشد تا در عمل از بروز تغییر شکل‌های نامطلوب در یک توده خاک متشکل از خاک‌های مختلف، هر چند با درصد تراکم‌های یکسان، جلوگیری شود.

کلمات کلیدی: آزمایش تراکم، تحکیم، تغییر شکل پذیری، خاک متراکم، سختی

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین مسائل در ساخت انواع سازه‌های خاکی از قبیل جاده‌ها، باند‌های پرواز، پل‌ها و دیوارهای حایل، تراکم لایه‌های خاک است. عمده‌ترین اهداف تراکم عبارتند از: افزایش ظرفیت باربری از طریق افزایش مقاومت برشی، کاهش نشست از طریق افزایش صلبیت و کاهش نفوذ پذیری و پتانسیل تورم از طریق کاهش نسبت تخلخل. سالیان متمادی است که معمول‌ترین روش برای اندازه

بررسی تغییر شکل پذیری خاک‌های با تراکم نسبی یکسان و ارزیابی اعتبار مهندسی آزمایش تراکم

جمشید صدر کریمی، دانشیار گروه ژئوتکنیک، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز
شیوا سیدی، کارشناس ارشد ژئوتکنیک، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز





گیری و کنترل تراکم، دستیابی به درصد معینی از تراکم، از طریق مقایسه دانسیته خشک در محل با ماکزیمم دانسیته خشک آزمایشگاهی است. ولی دانسیته خشک و رطوبت بهینه، به تنهایی، لزوماً بیانگر خصوصیات مکانیکی خاک نمی باشند، این نکته ای است که در اغلب عملیات خاکی به دلیل سهولت کاربرد این روش در کنترل تراکم، مورد توجه قرار نگرفته و نتیجه آن دست نیافتن به اهداف مورد نظر پس از ساخت و تحمیل هزینه های اضافی به پروژه ها می باشد. طی عمل تراکم، تخلخل خاک در اثر خروج هوا کاهش می یابد. آزمایش تراکم و تئوری آن، نخستین بار توسط پروکتور ارائه شد. در این آزمایش، رابطه درصد رطوبت و دانسیته خشک خاک بررسی شده و اثر رطوبت در بین دانه ها به صورت غشای آب و روغن کاری بیان شده است [۱].

در راستای آزمایشات پروکتور، Hogentogler و Buchanan تحقیقاتی بر مبنای نظریه وی انجام دادند [۲]. سپس اثر فشار آب و فشار هوای حفره ای طی عمل تراکم، توسط Hilf و Olson بررسی شد [۳] و نهایتاً تأثیر ریز ساختار خاک در فرآیند تراکم، توسط Lambe ارائه گردید [۴]. اگر چه هریک از این نظریات، ویژگی های خاصی از مکانیسم تراکم خاک را بیان می کنند ولی تئوری لمب (Lambe) برای توجیه رفتار خاک های رسی متراکم، روش مناسب تری می باشد. طبق این نظریه، خاک های رسی متراکم در رطوبت های کم تر از رطوبت بهینه، دارای ساختار مجتمع و در رطوبت های بیش تر از رطوبت بهینه دارای ساختار پراکنده می باشند، به همین علت یک خاک رس با دانسیته مشخص، در وضعیت خشک تر از رطوبت بهینه، مقاومت بیشتر و نفوذ پذیری بالاتری نسبت به همان رس در وضعیت مرطوب تر از رطوبت بهینه دارد. افزایش انرژی تراکم نیز سبب تغییر ساختار خاک رس می گردد از این رو مقاومت بعضی از رس ها، در اثر انرژی تراکم بیش از حد معین (overcompaction)، کاهش می یابد [۵].

تحقیقات Whitman و Lambe، Hilf، Mitchel، نشان می دهد که بافت و ساختار خاک در قابلیت فشرده شدن (compressibility) رس های متراکم نیز تأثیر گذار است به طوری که یک رس تراکم یافته در وضعیت خشک تر از رطوبت بهینه، سخت تر از همان رس تراکم یافته در وضعیت مرطوب تر از رطوبت بهینه می باشد [۶] و [۷]. در مورد خاک های ماسه ای، در مطالعات قبلی، قابلیت فشرده شدن و مقاومت برشی ماسه، مستقل از بافت و درصد رطوبت و منحصر به درصد تراکم و نسبت تخلخل فرض می شد [۸]، اما تحقیقات جدید در این زمینه، بیانگر رفتار سخت تر ماسه در وضعیت خشک تر از رطوبت بهینه نسبت به وضعیت مرطوب تر از رطوبت بهینه تحت درصد تراکم های یکسان می باشد [۹].

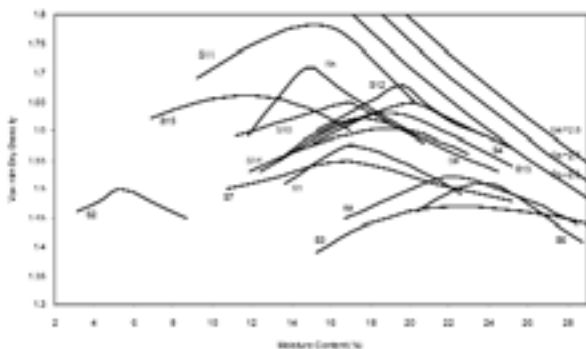
با توجه به این نتایج، در سال های اخیر، مطالعات جدید آزمایشگاهی برای بررسی رفتار مکانیکی خاک های متراکم و کنترل میزان تراکم خاک صورت گرفته و دستگاه های جدیدی، بر اساس

خصوصیات مطلوب مهندسی خاک هم چون مدول خاک و سختی آن، در عمل مورد آزمایش قرار گرفته اند که از آن جمله می توان به دستگاه سنجش سختی خاک اشاره کرد [۱۰]. هرچند که این تحقیقات هنوز ادامه دارند ولی به نظر می رسد برای دستیابی به اهداف تراکم، ارزیابی مدول و تغییر شکل پذیری خاک ها روش مناسب تری باشد [۹] و [۱۰]. در این تحقیق نیز به منظور سنجش اعتبار نتایج آزمایش تراکم در ارزیابی رفتار مکانیکی خاک های متراکم شده، تغییر شکل پذیری خاک های مختلف تحت درصد تراکم یکسان بررسی می شود.

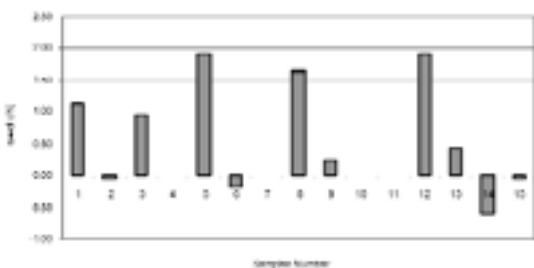
۲- روش آزمایش و نتایج

به منظور مقایسه قابلیت فشرده شدن خاک های متراکم، ۱۵ نمونه خاک مختلف، طبق روش پروکتور استاندارد (Standard Proctor) به میزان ۱۰۰٪ متراکم شدند. سپس هر کدام تحت آزمایش تورم و تحکیم تک بعدی قرار گرفته و خواص مکانیکی نمونه ها تحت تراز های تنش یکسان با یکدیگر مقایسه شدند.

نتایج آزمایش های تراکم در شکل (۱) و سایر خواص ایندکس نمونه ها در جدول (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱: منحنی های تراکم نمونه های مورد آزمایش

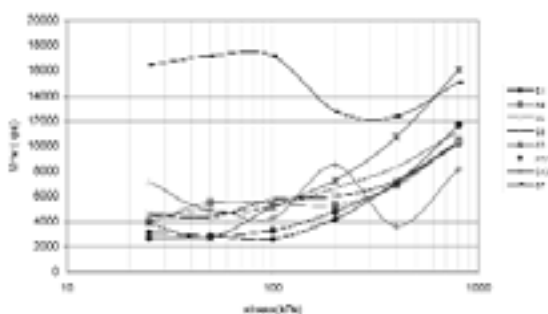


شکل ۲: میزان پتانسیل تورم در نمونه های متراکم شده

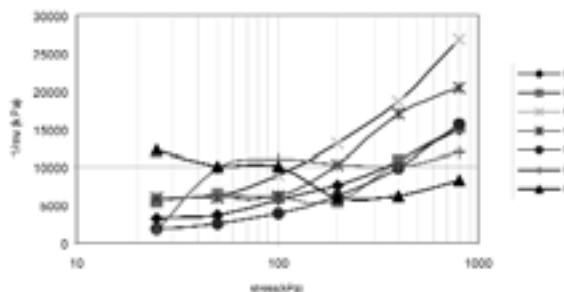
برای انجام آزمایش، ابتدا بر اساس استاندارد ASTM D 4546-90، مقدار تورم و یا جمع شدگی نمونه ها در اثر افزودن آب، به روش A تعیین شده است. همان طور که در شکل (۲) مشاهده می شود، با افزودن آب، در نمونه های ماسه ای به مقدار جزئی نشست روی داده

جدول ۱: مشخصات مهندسی خاکهای مورد آزمایش

شماره نمونه ها	علامت گروه خاک	نام گروه خاک	درصد عبوری از الک No.200	حد مایع (LL)	نشانه خمیری (PI)
CL	S1	رس لاغر ماسه دار	۶۶	۳۷	۲۱
SP	S2	ماسه بد دانه بندی شده	۶	-	-
SC	S3	ماسه رس دار	۴۵	۵۱	۳۰
CL	S4	رس لاغر همراه با ماسه	۷۳	۴۴	۲۶
CL	S5	رس لاغر ماسه دار	۶۰	۳۲	۱۶
SM	S6	ماسه لای دار	۴۵	۳۲	۸
ML	S7	لای ماسه دار	۶۸	۲۲	۳
CL	S8	رس لاغر ماسه دار	۶۷	۳۵	۱۳
CH	S9	رس چاق	۹۴	۵۵	۳۲
SM	S10	ماسه لای دار	۲۳	-	-
SM	S11	ماسه لای دار	۳۳	-	-
CL	S12	رس لاغر ماسه دار	۷۰	۳۷	۱۹
CL	S13	رس لاغر همراه با ماسه	۷۱	۳۴	۱۵
SM	S14	ماسه لای دار	۴۸	۲۶	۳
SM	S15	ماسه لای دار	۳۰	-	-



شکل ۳: تغییرات $mv/8$ در نمونه های خاکهای ریز دانه (رسی و سیلتی)



شکل ۴: تغییرات $mv/8$ در نمونه های خاکهای ماسه ای

است، در تمامی نمونه های رسی نیز، به غیر از نمونه S_4 ، تورم رخ داده است. پتانسیل تورم نمونه های رسی از 0.24 تا 0.19 ٪ متغیر می باشد. هم چنین ملاحظه می شود که افزایش دامنه خمیری لزوماً به افزایش درصد تورم منجر نمی گردد.

پس از تعیین تورم، آزمایش تحکیم تا تراز تنش نهایی 800 kPa انجام شده و در هر گام تنش، ضریب قابلیت فشردگی حجمی نمونه ها، mv ، محاسبه گردید. برای بررسی تغییر شکل پذیری و قابلیت فشرده شدن خاک های متراکم، مقایسه $mv/8$ یا E_0 در تحکیم تک بعدی، گزینه مناسبی می باشد:

$$m_v = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta p} = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma'(1+e_0)} = \frac{1}{E_0} \quad (1)$$

$$E_s = E_0 (1+v)(1-2v)/(1-v) \quad (2)$$

در این روابط: $e_0, \sigma', e, p, \varepsilon$ به ترتیب کرنش حجمی، تنش میانگین، نسبت تخلخل، تنش موثر نرمال و تخلخل اولیه بوده و mv ضریب قابلیت فشردگی حجمی، ضریب پواسون، E_0 مدول ادنومتري و E_s مدول الاستیسیته را نشان می دهند.

شکل های (۳) و (۴) تغییرات $mv/8$ در برابر تنش های اعمالی را، به ترتیب برای خاک های ریزدانه رسی و سیلتی (CL, CH, ML) و خاکهای ماسه ای (SM, SP, SC) نشان می دهد. با بررسی مدول های ادنومتري در هر تراز تنش، مشاهده می شود که در نمونه های رسی

(شکل ۳)، در تراز های تنش $25, 50, 100, 200, 400$ و 800 kPa نسبت سختی ماکزیمم به مینیمم به ترتیب برابر با $2/1, 2/2, 2/7, 2/1$





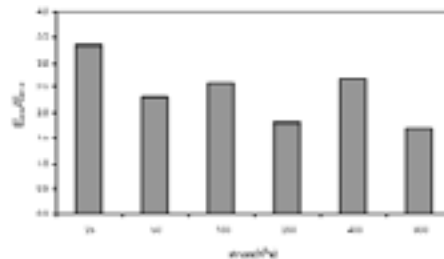
۲، ۳ و ۴ می باشد. این نسبت سختی برای نمونه های ماسه ای به ترتیب برابر با ۷/۳، ۴/۱، ۲/۷، ۲/۴، ۳ و ۳/۳ به دست می آید (شکل ۴).

در شکل (۵) نسبت میانگین مدول های ادئومتری تمامی ۱۵ نمونه مورد آزمایش به مینیمم مدول نمونه ها نشان داده شده است. مشاهده می شود که این نسبت برای ترازهای تنش $25kPa_a$ ، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ به ترتیب برابر ۳/۳، ۲/۳، ۲/۶، ۱/۸، ۲/۷ و ۱/۷ می باشد. هم چنین برای این ترازهای تنش، نسبت ماکزیمم مدول ادئومتری تمامی نمونه های مورد آزمایش به مینیمم مدول ادئومتری، محاسبه شده و در شکل (۶) و جدول (۲) نشان داده شده است. این بررسی نشان می دهد که اختلاف ماکزیمم و مینیمم سختی در نمونه ها در ترازهای تنش $25kPa_a$ ، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ به ترتیب به ۱۰، ۷/۱، ۶/۵، ۳/۱، ۵/۱ و ۳/۳ برابر می رسد.

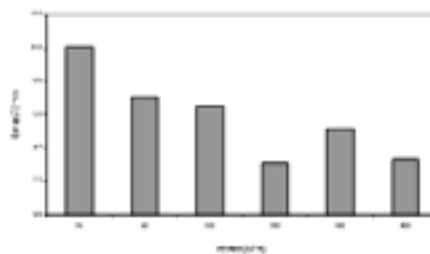
همان طور که مشاهده می شود نتایج آزمایش تورم پذیری و تحکیم، بیانگر تفاوت رفتار خاکهای متراکم با درصد تراکم یکسان می باشد. در ترازهای تنش یکسان، اختلاف قابل توجهی بین سختی نمونه ها وجود دارد که در عمل منجر به تغییر شکل ها و نشست های نابرابر می شود.

جدول ۲: ماکزیمم و مینیمم مدول ادئومتری در نمونه های آزمایش

تراز تنش (kPa)	نمونه دارای Eomax	نمونه دارای Eomin
۲۵	S15 (1650 kPa)	S7 (16540 kPa)
۵۰	S14 (2430 kPa)	S7 (17210 kPa)
۱۰۰	S1 (2640 kPa)	S7 (17180 kPa)
۲۰۰	S1 (4200 kPa)	S10 (13140 kPa)
۴۰۰	S13 (3650 kPa)	S10 (18630 kPa)
۸۰۰	S3 (8180 kPa)	S10 (26690 kPa)



شکل ۵: نسبت Eomax/Emin در نمونه های آزمایش



شکل ۶: نسبت Emax/Emin در نمونه های آزمایش

یکسان سختی بیشتری نسبت به نمونه های رسی متراکم نشان می دهند هرچند که در نمونه های ماسه ای، رفتار غیر منظمی به ویژه در تنش های کمتر از $200kPa_a$ مشاهده می شود. با افزایش تنش به $400kPa_a$ در اکثر نمونه ها، سختی افزایش می یابد، به طوری که با افزایش تنش، از اختلاف سختی بین نمونه ها کاسته می شود.

با مقایسه مشخصات خاکها، رابطه معنی داری بین قابلیت فشرده شدن با خواص ایندکس و دانسیته ماکزیمم و رطوبت بهینه مشاهده نمی شود. به نظر می رسد مجموعه این عوامل همراه با بافت خاکهای متراکم شده در قابلیت فشرده شدن آنها موثر باشد.

صرف نظر از مکانیسم های تاثیر گذار، نتایج این تحقیق نشان می دهد که، تحت تنش های یکسان تفاوت عمده ای در تغییر شکل پذیری و رفتار خاکهای مختلف با درصد تراکم های برابر، وجود دارد. بنابراین کنترل درصد تراکم نسبی از طریق اندازه گیری دانسیته، به تنهایی معیار مناسبی به نظر نمی رسد زیرا درصد تراکم یکسان، لزوماً منجر به سختی و یا تغییر شکل پذیری یکسان، نمی شود. این مساله، در عملیات خاکی باعث تغییر شکل هایی به غیر از مقادیر مورد انتظار در یک خاک و نیز متفاوت از خاکهای مجاور می گردد.

از این رو، به نظر می رسد که برای دستیابی به اهداف تراکم، نگرش جدیدی در استانداردهای موجود باید اعمال شود و ارزیابی مدول و تغییر شکل پذیری جایگزین کنترل دانسیته و درصد تراکم گردد. این مساله علاوه بر حصول خواص مکانیکی مطلوب در خاکهای متراکم، صرفه جویی هزینه را نیز در انجام پروژه ها به دنبال خواهد داشت.

۴- مراجع

- 1- Proctor, R.R. (1933), "Design and construction of rolled earth dam". Eng. News Record, pp. 245-248.
- 2- Buchanan, S.J. (1942), "Soil compaction". Proc. 5th Texas Conf. Soil Mechanics.
- 3- Olson, R.E. (1963), "Effective stress theory of soil compaction". Journal of the Soil Mechanics & Foundations Division, ASCE, vol. 89, NO SM2, pp. 27-45.
- 4- Lambe, T.W. (1958), "The structure of compacted clay". Journal of the Soil Mechanics & Foundations Division, ASCE, vol. 84, NO SM2, pp. 1654-1 to 1654-34.
- 5- Lambe, T.W. (1958), "The engineering behavior of compacted clay". Journal of the Soil Mechanics & Foundations Division, ASCE, vol. 84, NO SM2, pp. 1655-1 to 1655-35.
- 6- Hilf, J. W. (1975), "Chapter 7: Compacted Fill". Foundation Engineering Handbook, H. F. Winterkorn and H. Y. Fang, eds, Van Nostrand, New York, pp. 244-311.
- 7- Lambe, T.W., and Whitman, R.V. (1969), Soil mechanics. Wiley, New York.
- 8- Mitchell, J. K., Chatoian, J. M., and Carpenter, G. C. (1976), "The influence of sand fabric on liquefaction behavior". Contract Rep. No. S76-5 to U.S army engineer waterways experiment station, Dept of Civil Engineering university of California, Berkeley, Calif.
- 9- David Carrier, W. (2000), "Compressibility of compacted a sand". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, March 2000, pp. 273-275.
- 10- Fiedler, S., Nelson, C., Berkman, E., and DiMillio, A. (1998), "Soil Stiffness Gauge for Soil Compaction Control". Public Roads, March/April 1998. Vol. 61. No.5

۳- خلاصه و نتیجه گیری

به طور کلی در اکثر موارد، نمونه های ماسه ای متراکم تحت تنشهای