

ارزیابی نتایج آزمایش CPTu در تشخیص پروفیل خاک (مطالعه موردی)

زهرا عزالدین^{1*}، اکبر چشمی²، کاظم مرادی هرسینی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تهران

2- استادیار دانشکده زمین شناسی، دانشگاه تهران

3- دکترای زمین شناسی مهندسی، مهندسین مشاور سازه پردازی ایران

Zahra.ezzedin@ut.ac.ir

چکیده

از آنجا که تشخیص نوع خاک یکی از بخشهای اصلی در شناساییهای محلی است، ارزیابی کاربرد ابزارهای موجود برای تعیین نوع خاک، بسیار مهم است. برای تشخیص خاک آزمایشهای برجا و آزمایشگاهی وجود دارد. اخذ نمونه و انجام آزمایشهای شناسایی، روشی آزمایشگاهی برای طبقه بندی خاک است. در کنار این روش استفاده از آزمایش نفوذ مخروط با اندازه گیری فشار آب منفذی (CPTu) روشی برجا برای شناسایی و طبقه بندی خاک میباشد که بدلیل ساده بودن، سرعت و دقت بالا امروزه کاربرد وسیعی در مطالعات ژئوتکنیک پیدا کرده است. انجام این آزمایش در مصالح ریزدانه و ماسه ای امکان پذیر است؛ لیکن در مصالح درشت دانه دارای محدودیتهایی میباشد. طبقه بندی خاک در آزمایشگاه براساس اندازه دانه ها صورت میگیرد حال آنکه طبقه بندی خاک با توجه به نتایج آزمایش CPTu بر مبنای رفتار خاک میباشد. روشهای متعددی برای تشخیص پروفیل خاک بر مبنای نتایج آزمایش CPTu وجود دارد. روش ارائه شده توسط روبرتسون (Robertson, 1990) یکی از معروفترین آنهاست. در این مقاله نتایج آزمایشهای آزمایشگاهی انجام شده بر روی 359 نمونه خاک که مربوط به 4 ناحیه در جنوب کشور میباشد، با نتایج بدست آمده از روش روبرتسون مقایسه شده است. نتایج مقایسه نشان میدهد نمودار پیشنهاد شده توسط روبرتسون برای مصالح رسی و ماسه ای از دقت بیشتری نسبت به مصالح سیلتی برخوردار است، علاوه بر آن، نمودار مبتنی بر نسبت اصطکاکی، نسبت به نمودار مبتنی بر فشار منفذی، با دقت بیشتری پروفیل خاک را تشخیص میدهد.

کلمات کلیدی: CPTu، پیروکون، طبقه بندی خاک، روبرتسون (1990)

1- مقدمه

اولین گام در بررسیهای محلی تعیین پروفیل زیرسطحی مصالح است. تشخیص نوع خاک بوسیله آزمایشهای آزمایشگاهی اگرچه دقیق، اما زمان بر و پرهزینه است، به همین دلیل امروزه استفاده از آزمایشهای برجا و روشهای غیرمستقیم گسترش بیشتری یافته است. یکی از این آزمایشهای برجا، آزمایش مخروط نفوذ همراه با اندازه گیری فشار منفذی است که پیروکون یا CPTu نامیده میشود و به علت سرعت و دقت قابل قبول، صرفه زمانی و اقتصادی و ارائه پروفیل پیوسته ای از شرایط زیرسطحی، به تکنیکی بسیار رایج در کارهای تحقیقی و بررسی های ژئوتکنیکی تبدیل شده است. در این آزمایش، مخروطی با زاویه راسی 60 درجه و با سرعت ثابت 20 میلیمتر بر ثانیه، با فشار هیدرولیکی مداوم به داخل زمین رانده می شود و به صورت پیوسته مقاومت نوک (q_c)، اصطکاک جداره (f_s) و فشار آب منفذی در طی نفوذ (u_2) اندازه گیری می شود. این پارامترها مبنایی برای ارائه روشهای مختلف جهت تعیین ویژگی های مهندسی مصالح زیرسطحی می باشند. یکی از این ویژگی ها تشخیص نوع مصالح است.

¹ Cone Penetration Test

این مقاله به مقایسه طبقه بندی مصالح مبتنی بر اندازه دانه ها با طبقه بندی مصالح مبتنی بر رفتار آنها پرداخته است. بدین منظور 358 نمونه خاک در آزمایشگاه با توجه به اندازه دانه ها به روش متحد طبقه بندی گردیده، سپس با توجه به پارامترهای اندازه گیری شده از آزمایش نفوذ مخروط در صحرا و با استفاده از روش روبرتسون (Robertson, 1990) این نمونه ها در محل براساس رفتار نیز طبقه بندی گردیده اند. آنگاه این دو طبقه بندی با همدیگر مقایسه شده اند.

2- سوابق تحقیق

بگمن (Begemann, 1965) نشان داد که خاک های درشت دانه عموماً دارای مقادیر بزرگتری از مقاومت نوک (q_c) و اصطکاک جداره (f_s)، نسبت به خاک های ریزدانه هستند. علاوه بر آن نوع خاک تابعی از نسبت بین اصطکاک جداره و مقاومت نوک است (نسبت اصطکاک یا R_f). پس از بگمن محققان دیگر نمودارهای متفاوتی را برای تعیین پروفیل خاک بر مبنای داده های CPT مکانیکی ارائه کردند (Sanglerat, 1974)، (Schmertmann, 1978)، (Searle, 1979).

داگلاس و السن (Douglas & Olsen, 1981) اولین کسانی بودند که نموداری برای طبقه بندی خاک بر مبنای مخروط نفوذ الکتریکی پیشنهاد کردند. پس از آن جونز و راست (Jones & Rust, 1982) نموداری را بر مبنای داده های پیزوکون و بر حسب مقاومت نوک کلی اندازه گیری شده ($q_c - \sigma_{v0}$) و فشار منفذی اضافی در طی نفوذ (Δu) ارائه کردند. (q_c مقاومت نوک اندازه گیری شده و σ_{v0} تنش روباره کل در عمق مورد نظر می باشد).

روبرتسون و همکاران (Robertson et al, 1986) نموداری بر مبنای پیزوکون با مقاومت نوک تصحیح شده نسبت به فشار منفذی ارائه کردند. مقاومت نوک تصحیح شده یا q_t با رابطه (1) تعریف میشود:

$$q_t = q_c + u_2(1-a) \quad (1)$$

که در آن: q_c مقاومت نوک اندازه گیری شده، u_2 فشار منفذی اندازه گیری شده در قاعده مخروط و a نسبت سطح خالص¹ می باشد. این نسبت تابعی از شکل، اندازه و محل قرار گرفتن فیلتر فشار منفذی بوده و با رابطه (2) تعریف می شود:

$$a = A_N/A_T \quad (2)$$

که در آن: A_N مساحت قاعده مخروط منهای مساحت فیلتر متخلخل و A_T مساحت قاعده مخروط می باشد. این نمودار شامل مناطق شماره گذاری شده ای است که انواع خاک را در 12 منطقه جدا می کند. سپس روبرتسون (Robertson, 1990) طبقه بندی اصلاح شده ای را ارائه کرد که در آن، خاکها در 9 منطقه مجزا شده اند. این نمودار از پارامترهای نرمال شده استفاده می کند. این نرمال سازی برای خنثی کردن تاثیر تنش روباره بر روی مقاومت نوک اندازه گیری شده، پیشنهاد شده است. در نمودارهای پیشنهادی روبرتسون مقاومت مخروط نرمال شده، Q_t ، در یک نمودار در مقابل نسبت اصطکاک نرمال شده، F_t ، و در نمودار دیگر در مقابل نسبت فشار منفذی، B_q ، رسم شده است (شکل 2a و 2b) که این پارامترها با روابط 3، 4 و 5 تعریف می شوند:

$$Q_t = (q_t - \sigma_v) / \sigma'_v \quad (3)$$

$$F_t = f_s / (q_t - \sigma_v) \quad (4)$$

$$B_q = (u_2 - u_0) / (q_t - \sigma_v) \quad (5)$$

¹ Net Area Ratio

که در آن: Q_t مقاومت نوک نرمال شده، q_t مقاومت نوک تصحیح شده نسبت به فشار منفذی در قاعده مخروط، σ_v تنش روباره کل، σ'_v تنش روباره موثر، F_t نسبت اصطکاکی نرمال شده، f_s اصطکاک جداره، B_q نسبت فشار منفذی، u_2 فشار منفذی اندازه گیری شده در قاعده مخروط و u_0 فشار منفذی هیدروستاتیک می باشد.

روبرتسون و همکاران (Robertson et al, 1986) و روبرتسون (Robertson, 1990) تاکید کردند که نمودارهای مبتنی بر CPT، نوع رفتار خاک¹ را پیش بینی می کنند نه اندازه دانه ها را، زیرا مخروط به رفتار مکانیکی بر جای خاک پاسخ می دهد و به طور مستقیم به معیارهای طبقه بندی خاک بر مبنای توزیع اندازه ذرات و خمیری خاک (مانند روش طبقه بندی متحده) مربوط نمی گردد. توزیع اندازه ذرات و حدود اتربرگ بر روی نمونه های خاک دستخوردده اندازه گیری می شود. خوشبختانه، معیار طبقه بندی خاک بر مبنای توزیع اندازه ذرات و خاصیت خمیری، اغلب به صورت کاملاً معقولی با رفتار بر جای خاک مرتبط می گردد و بنابراین، معمولاً سازگاری خوبی بین طبقه بندی به روش متحده و SBT مبتنی بر CPT وجود دارد.

3- بحث

در این مقاله از نتایج آزمایشهای نفوذ مخروط انجام شده در 4 ناحیه در جنوب کشور استفاده شده است. در شکل 1 موقعیت جغرافیایی محل های مذکور نشان داده شده است. در جدول 1 نیز تعداد آزمایشهای انجام شده در هر ناحیه نشان داده شده است.



شکل 1- موقعیت جغرافیایی نواحی مورد بررسی بر روی نقشه ایران

جدول 1- اطلاعات مربوط به تعداد نمونه ها و نوع مصالح موجود در هر ناحیه

نوع و درصد مصالح موجود در هر ناحیه											تعداد آزمایشهای CPTu	تعداد آزمایشهای دانه بندی	
GC-GM	GM	SC-SM	SP-SM	SP	SM	MH	ML	CL-ML	CH	CL			
-	-	-	-	-	0.9	1.8	12.6	3.6	3.6	77.5	22	111	ناحیه 1
-	-	-	2.9	1.5	44.1	-	19.1	1.5	1.5	29.4	13	68	ناحیه 2
8.8	1.75	1.75	-	-	8.8	-	57.9	19.2	-	1.75	9	57	ناحیه 3
-	-	-	-	-	8.1	-	35	8.9	0.8	47.2	13	123	ناحیه 4
1.4	0.3	0.3	0.5	0.3	12.8	0.5	28.7	7.5	1.7	46	57	359	مجموع

روش انجام کار به شرح زیر می باشد:

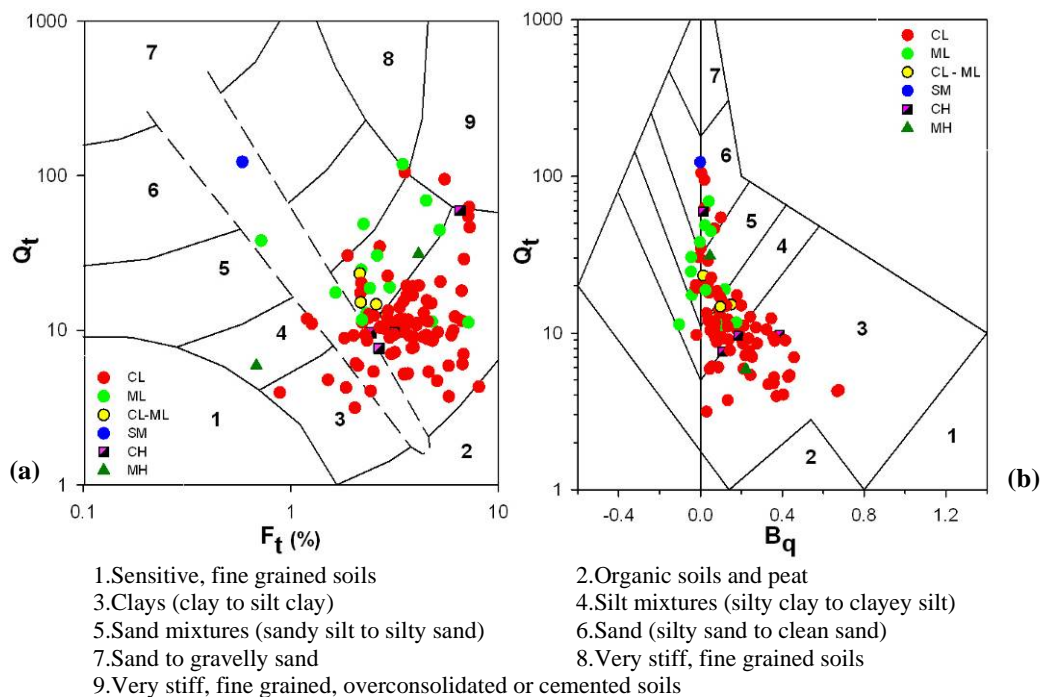
- مقادیر Q_t ، F_t و B_q با استفاده از نتایج آزمایش نفوذ مخروط برای عمق هایی که نمونه گیری انجام شده است، با توجه به روابط 3، 4 و 5 تعیین گردیده است.

¹ Soil Behaviour Type (SBT)

- با استفاده از نمودار روبرتسون (Robertson, 1990) که برحسب F_t و Q_t است (در این مقاله نمودار A نامیده می شود- شکل 2a) و نمودار روبرتسون که برحسب B_q و Q_t است (در این مقاله B نامیده می شود- شکل 2b) و با در نظر گرفتن مقادیر استخراج شده از آزمایش نفوذ مخروط، نوع خاک بر اساس رفتار مشخص شده است.
- با توجه به آزمایش دانه بندی انجام شده بر روی نمونه اخذ شده از همان عمق (نمونه از گمانه ای که در مجاورت نقطه آزمایش حفاری شده، برداشت شده است)، نمونه بر اساس اندازه دانه در سیستم طبقه بندی متحد، طبقه بندی شده است.
- مکان هر یک از نقاط روی مناطق 9 گانه نمودار، نوع خاک پیش بینی شده بر مبنای $CPTu$ را نشان می دهد و رنگ این نقاط، طبقه بندی خاک در آزمایشگاه را مشخص می سازد.

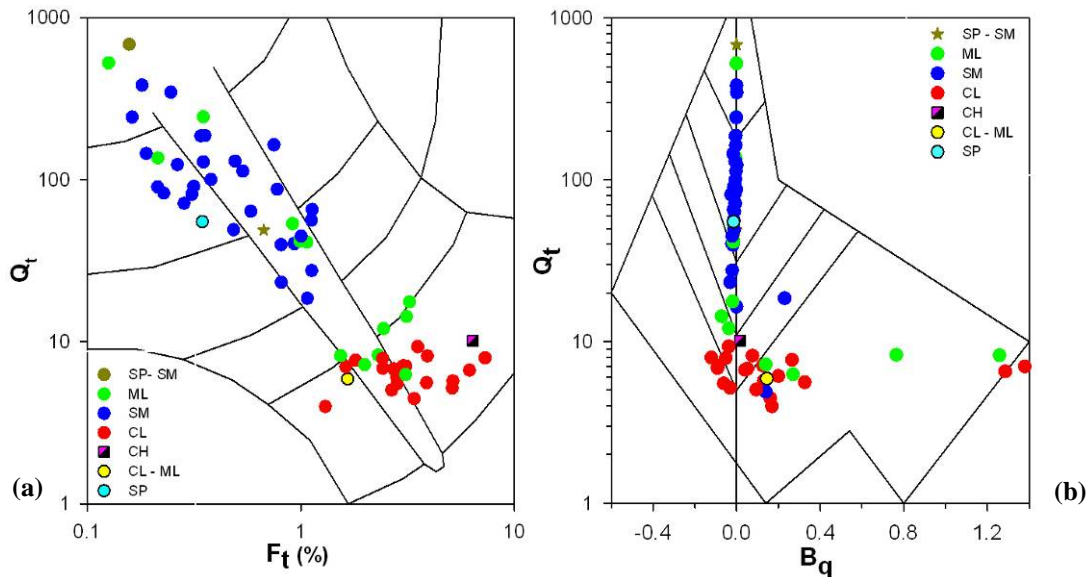
اطلاعات و نتایج بدست آمده از هر یک از این چهار ناحیه به شرح زیر است:

1 ناحیه 1: همان طور که در شکل 2a دیده می شود، 85% CL ها و 70% ML ها و 100% بقیه مصالح جایگیری خوبی در نمودار دارند ولی در نمودار B (شکل 2b)، میزان این تطابق کاهش یافته و حدود 40% از مصالح CL و ML موجود، در منطقه درست در نمودار قرار گرفته اند.



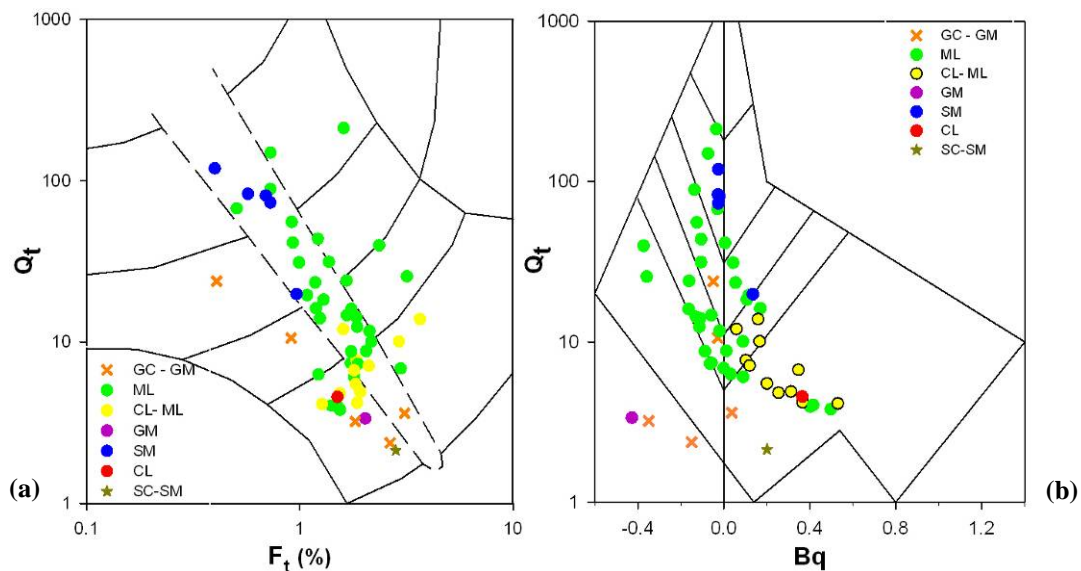
شکل 2 - ترسیم نتایج بدست آمده از ناحیه 1 بر روی نمودار (Robertson, 1990)

2 ناحیه 2: از شکل 3a نتیجه می شود که در نمودار A تمامی نمونه های CL و SM جایگیری خوبی دارند و 40% ML ها در مکان مربوط به خود قرار گرفته اند، ولی در نمودار B، این تطابق به حدود 75% در CL ها، 87% در SM ها و 16% در ML ها کاهش یافته است (شکل 3b).



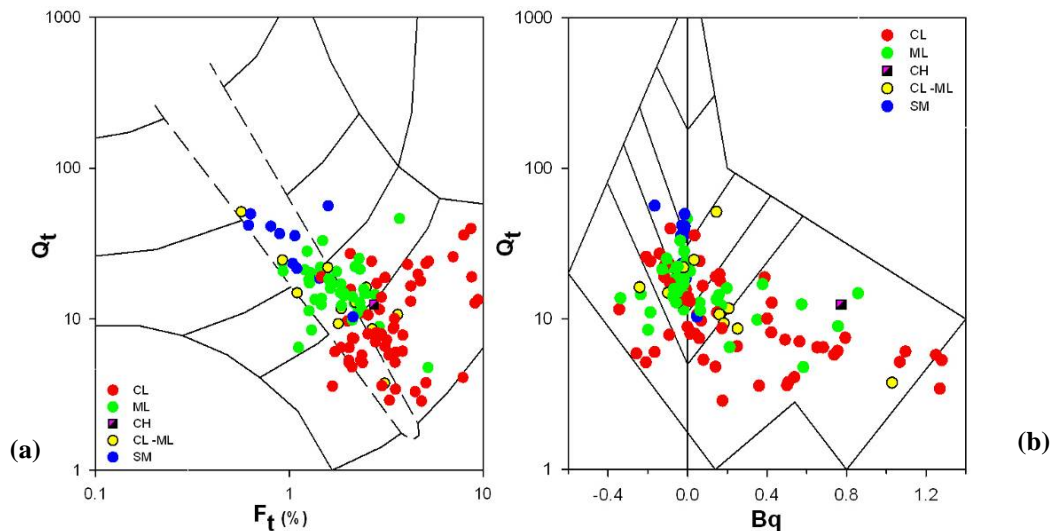
شکل 3- ترمیم نتایج بدست آمده از ناحیه 2 بر روی نمودار Robertson, (1990)

ناحیه 3: همان طور که در نمودار شکل 4a و b دیده می شود، در هر دو نمودار حدود 60% ML ها، که شامل سیلت ها و سیلت های ماسه ای هستند، به درستی نوع خاک را نشان می دهند. رس های سیلتی یا CL-ML ها و SM ها نیز در هر دو نمودار جایگیری کاملاً مناسبی دارند ولی ترکیبات گراولی مانند GC-GM ها و GM ها در محدوده کاملاً نامناسبی قرار گرفته اند.



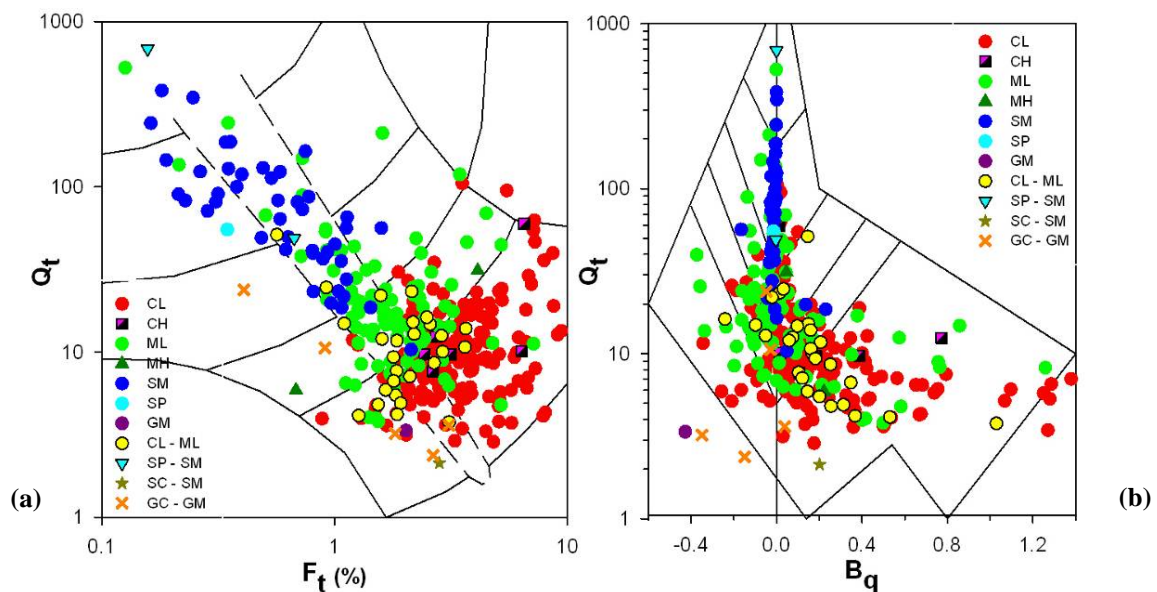
شکل 4- ترمیم نتایج بدست آمده از ناحیه 3 بر روی نمودار Robertson, (1990)

ناحیه 4: در نمودار A، حدود 90% CL ها و ML ها و حدود 80% CL-ML ها و SM ها در محدوده مناسب جای می گیرند (شکل 5a) و میزان این تطابق در نمودار B، به 55% در CL ها، 60% در ML ها، 75% در CL-ML ها و 90% در SM ها می رسد (شکل 5b).



شکل 5- ترسیم نتایج بدست آمده از ناحیه 4 بر روی نمودار Robertson, (1990)

در شکل 5a و b تمامی داده های مربوط به هر چهار ناحیه روی یک نمودار قرار گرفته اند. با بررسی این نمودار می توان دریافت که به طور کلی، خاک های رسی و ماسه ای به خوبی توسط نمودار روبرتسون (Robertson, 1990) شناسایی می شوند (حدود 75% ماسه ها و 90% رس ها)، ولی برای شناسایی خاک های سیلتی باید با احتیاط بیشتری از این نمودار استفاده کرد و در مورد خاک های گراولی نیز می توان گفت که این نمودار کاربردی ندارد. با توجه به نرخ نفوذ مخروط (2 سانتیمتر در ثانیه) به نظر میرسد که در خاکهای رسی زهکشی صورت نمیگیرد و در خاکهای ماسه ای زهکشی صورت میگیرد. با توجه به اینکه خاکهای سیلتی خاکهای حدواسط ایندو هستند احتمالاً شرایط حاکم نه بصورت زهکشی کامل و نه زهکش نشده است و شاید این مسئله دلیل عدم دقت بالای این آزمایش در شناسایی اینگونه خاکها باشد که قطعاً نیاز به تحقیقات بیشتر دارد.



شکل 6- ترسیم تمامی داده ها بر روی یک نمودار

4- نتیجه گیری

- 1) امکان استفاده از نمودار روبرتسون (Robertson, 1990)، که یکی از رایج ترین روش های موجود برای طبقه بندی خاک بر مبنای نتایج آزمایش CPTu است، برای مصالح رسی و ماسه ای موجود در خاک های بخش جنوبی ایران وجود دارد.
- 2) استفاده از نمودار روبرتسون (Robertson, 1990) برای خاک های حدواسط، یعنی خاک هایی که نسبتاً نفوذپذیر هستند، مثل خاکهای سیلتی که نفوذ مخروط در آنها تحت شرایط زهکشی بخشی صورت می گیرد، دقت و موفقیت کمتری را نشان می دهد و بنابراین، هنگام شناسایی خاک های سیلتی توسط این نمودار، باید دقت بیشتری لحاظ گردد.
- 3) خاک های گراولی مانند GM و GC-GM به طور پراکنده در محدوده خاک های رسی، سیلتی و ماسه ای قرار می گیرد و به نظر می رسد این نمودار برای طبقه بندی این خاک ها کاربردی ندارد؛ البته به دلیل کم بودن تعداد نمونه های گراولی در این تحقیق این نتیجه گیری نیاز به بررسی بیشتری دارد.
- 4) به نظر می رسد نمودار مبتنی بر مقاومت نوک نرمال شده (نمودار A)، داده ها را با دقت بیشتری نسبت به نمودار مبتنی بر فشار آب منفذی (نمودار B) طبقه بندی می کند.

قدردانی

از شرکت سازه پردازی ایران و موسسه مهندسی مشاور ساحل، بویژه جناب آقای دکتر حاجی محمدی که داده های ارزشمندی را در اختیارم گذاشتند، کمال تشکر را دارم.

منابع

- Begemann, H. K. S., (1965). The friction jacket cone as an aid in determining the soil profile. Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, ICSMFE, 2, (17 – 20). Montreal, September 8 - 15.
- Sanglerat, G., Nhim, T. V., Sejourne, M., & Andina, R., (1974). Direct soil classification by static penetrometer with special friction sleeve. Proceedings of the First European Symposium on Penetration Testing, ESOPT-1, 2.2, (337–344). June 5 - 7, Stockholm.
- Schmertmann, J. H., (1978). Guidelines for cone test, performance, and design. Federal Highway Administration, Report FHWA-TS-78209, Washington, 145.
- Searle, I. W., (1979). The interpretation of Begemann friction jacket cone results to give soil types and design parameters. Proceedings of 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, ECSMFE, (2265–270). Brighton.
- Douglas, B. J. & Olsen, R. S., (1981). Soil classification using electric cone penetrometer. American Society of Civil Engineers, ASCE, Proceedings of Conference on Cone Penetration Testing and Experience, (209–227). St. Louis, October 26 - 30.
- Jones, G. A. & Rust, E., (1982). Piezometer penetration testing, CUPT. Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, ESOPT-2, 2, (607-614). Amsterdam, May 24 - 27.
- Robertson, P. K., Campanella, R. G., Gillespie, D. & Grieg, J., (1986). Use of piezometer cone data. Proceedings of American Society of Civil Engineers, ASCE, In-Situ 86 Specialty Conference, (1263–1280). Edited by S. Clemence, Blacksburg, June 23 - 25, Geotechnical Special Publication GSP No. 6.
- Lunne, T., Robertson, P. K. & Powell, J. J. M., (1997). Cone penetration testing in geotechnical practice. Blackie Academic & Professional, 312.
- Robertson, P. K., (1990). Soil classification using the cone penetration test. Canadian Geotechnical Journal, 27(1), 151–158.