توسعهٔ طبقه‌بندی خاک‌ها براساس نتایج آزمایش CPTu برای برخی نواحی جنوب ایران

اکبر چشمی*، زهرا عزالدین؛
دانشگاه تهران، پردیس علوم، دانشکدهٔ زمین شناسی،
کاظم مرادی هرسینی، مهندسین مشاور سازه‌پردازی ایران

تاریخ: دریافت ۹۳/۵/۲۵ پذیرش ۹٤/۵/۳۱

چکیده

طبقه‌بندی خاک از بحث‌های مهم در پژوهش‌های ژئوتکنیک است، از این رو، ارزیابی روش‌های موجود برای طبقه‌بندی خاک، در نواحی مختلف حائز اهمیت است. برای طبقه‌بندی خاک از نتایج آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی استفاده می‌شود. اخذ نمونه و انجام آزمایش‌های شناسایی، روشی آزمایشگاهی برای طبقه‌بندی خاک است. استفاده از نتایج آزمایش نفوذ مخروط با اندازه‌گیری فشار آب منفذی (CPTu[1]) روشی برجا برای شناسایی و طبقه‌بندی خاک است که به‌دلیل سرعت و دقت زیاد امروزه کاربرد وسیعی در بررسی‌های ژئوتکنیک پیدا کرده است. محققان مختلف با استفاده از پارامترهایی که در آزمایش CPTu اندازه‌گیری می‌شود، نمودارهای متفاوتی برای طبقه‌بندی خاک پیشنهاد کرده‌اند. در این تحقیق، به‌منظور بررسی میزان کارایی این روش‌ها، از نتایج ۵۸ آزمایش CPTu مربوط به چهار ناحیه در جنوب ایران استفاده شده و خاک با روش‌های مبتنی بر CPTu طبقه‌بندی شده، سپس با نتایج ۳۷۲ آزمایش دانه‌بندی آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که نمودار پیشنهادی روبرتسون[2] (۱۹۹۰) که برمبنای Q_t، F_t و B_q است، بهترین تطابق را با نتایج آزمایش دانه‌بندی در مناطق بررسی شده دارد. سپس براساس داده‌های به‌دست آمده از تحقیق، نمودار اصلاح شده‌ای برای طبقه‌بندی خاک‌های نواحی جنوبی ایران بر مبنای متغیرهای R_f و q_t-u_0/σ'_v، پیشنهاد شده که تطابق ۹۰٪ با نتایج آزمایش‌های دانه‌بندی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: آزمایش نفوذ مخروط، طبقه‌بندی خاک، خاک‌های جنوب ایران

* **نویسنده مسئول** a.cheshomi@ut.ac.ir

1. Cone Penetration Test with pore pressure measurement
2. Robertson

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3587]

مقدمه

اولین گام در بررسی‌های محلی، تعیین پروفیل زیرسطحی زمین است. تشخیص نوع خاک به‌وسیله آزمایش‌های آزمایشگاهی اگرچه دقیق است، اما زمان‌بر و نسبتاً پرهزینه است، به همین دلیل امروزه استفاده از آزمایش‌های برجا و روش‌های غیرمستقیم گسترش بیش‌تری یافته است. آزمایش CPTu، یکی از رایج‌ترین آزمایش‌های برجاست که مزایای زیادی نسبت به روش‌های سنتی از قبیل حفاری و نمونه‌برداری دارد. برای انجام این آزمایش نیاز به حفاری اکتشافی نبوده و آزمایشی ساده، تکرارپذیر و نسبتاً کم‌هزینه است. علاوه بر این، به‌دلیل تولید داده‌های پیوسته درک دقیق‌تری از شرایط زیرسطحی به‌دست می‌دهد. در این آزمایش، مخروطی با زاویه راسی ٦٠ درجه و با سرعت ثابت ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه، با فشار هیدرولیکی مداوم به داخل زمین رانده می‌شود و به‌صورت پیوسته مقاومت نوک (q_c)، اصطکاک جداره (f_s) و فشار آب منفذی در طی نفوذ (u_2) اندازه‌گیری می‌شود. این پارامترها مبنایی برای ارائهٔ روش‌های مختلف برای تعیین ویژگی‌های مهندسی خاک‌های زیرسطحی منجمله طبقه‌بندی خاک هستند.

محققان مختلف با توجه به نوع مخروط و پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایش، نمودارهای متفاوتی را برای طبقه‌بندی خاک پیشنهاد کرده‌اند که به‌طور خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است.

ژانگ و تومی [۱۵] با استفاده از روش‌های آماری و زیرمجموعه فازی، روشی را برای طبقه‌بندی خاک از نتایج آزمایش CPT پیشنهاد کردند. حجازی و همکاران [١٦] تجزیه و تحلیل آماری (آنالیز خوشه‌ای) را پیشنهاد کردند و کروپ و گریفین [۱۷] توانایی مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی مبتنی بر رگرسیون (ANN) را در پیش‌بینی ترکیب خاک از نتایج CPT بررسی کردند. یونگ و همکاران [۱۸] و کتین و اوزن [۱۹] تعیین نوع خاک مبتنی بر CPTu را با استفاده از روش احتمالاتی ارائه کردند. روبرتسون [۲۰]، ضمن بروزرسانی نمودار روبرتسون و همکاران [۹] نتایج آن‌را با نمودار روبرتسون [۱۱] مقایسه کردند. کای و همکاران [۲۱] نمودارهای طبقه‌بندی خاک مبتنی بر CPT را با استفاده از نتایج آزمایش‌های CPTu انجام شده روی رسوبات رسی در ایالت جیانگسوی چین، مقایسه کردند و به این

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3587]

نتیجه رسیدند که روش روبرتسون و همکاران [۹] در ۸۵٪ موارد با نتایج طبقه‌بندی متحد (USCS) مطابقت دارد. بول [۲۲] با استفاده از شاخص نوع رفتار خاک (I_c) نمودار جدیدی ارائه داد که خاک‌ها را در هفت گروه طبقه‌بندی می‌کند. عباس‌زاده شهری و همکاران [۲۳] هشت روش طبقه‌بندی خاک مبتنی بر آزمایش CPTu را، به‌منظور تعیین دقیق‌ترین روش در تعیین پروفیل خاک در جنوب غربی سوئد، به‌کار گرفتند و به این نتیجه رسیدند که روش روبرتسون و همکاران [۹] بیش‌ترین دقت را در تعیین نوع خاک دارد.

در این تحقیق با استفاده از نتایج ۵۸ آزمایش CPTu و ۳۷۲ آزمایش دانه‌بندی در چهار ناحیه در دشت خوزستان و سواحل جنوبی ایران به بررسی کارایی روش‌های ارائه شدهٔ محققان قبلی، در تشخیص پروفیل خاک پرداخته شده و ضمن تعیین بهترین نمودار از نقطه نظر تطابق با داده‌های آزمایشگاهی در تحقیق حاضر، نمودار اصلاح شده‌ای برای طبقه‌بندی خاک‌های جنوب ایران بر مبنای نتایج آزمایش CPTu پیشنهاد شده است.

معرفی مناطق بررسی شده

در این پژوهش از نتایج آزمایش‌های انجام شده در چهار ناحیه در جنوب ایران استفاده شده [۲٤]، [۲۵]، [۲٦]، [۲۷]، موقعیت جغرافیایی مناطق بررسی شده روی نقشه ایران در شکل ۱ نشان داده شده، مختصات جغرافیایی و تعداد آزمایش‌های انجام شده در هر ناحیه در جدول ۲ ارائه شده است.

طبقه‌بندی خاک براساس نتایج آزمایش دانه‌بندی

تعداد آزمایش‌های دانه‌بندی انجام شده در هر ناحیه در جدول ۲ ارائه شده است. این آزمایش‌ها براساس استاندارد ASTM D422 [۲۸]، انجام شده است. فراوانی هر دسته از رسوبات در نواحی بررسی شده در شکل ۲ نشان داده شده است.

باتوجه به شکل ۲ الف، عمده رسوبات موجود در ناحیه ۱ از نوع CL است که حد روانی آن بین ۵۰-۲۵ درصد و شاخص خمیری آن بین ۲۵-۱ درصد است. هم‌چنین رسوباتی از نوع CH، ML، MH، CL-ML و SM با فراوانی کم‌تر از رس‌های لاغر در این ناحیه مشاهده شده

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3587]

است.

در ناحیه ۲ با توجه به شکل ۲ ب، اکثر خاک‌ها از نوع رسوبات رسی و سیلتی با طبقه‌بندی CL و ML است و به‌مقدار کم‌تری CH، CL-ML و رسوبات ماسه‌ای با طبقه‌بندی SM وجود دارند. محدوده تغییرات حد روانی و شاخص خمیری در رس‌های لاغر به‌ترتیب بین ۴۸-۲۵ و ۲۳-۹ درصد است.

با توجه به شکل ۲ ج در ناحیهٔ ۳، رسوبات سیلتی با طبقه‌بندی ML فراوانی چشم‌گیری دارند و تعداد نمونه‌های ماسه‌ای (SM, SC-SM)، گراولی (GM, GC-GM) و رسی (CL, CL-ML) کم‌تر است.

در ناحیه ٤ با توجه به شکل ۲ د رسوباتی از نوع SM، ML و CL بخش عمده‌ای از خاک‌ها را شامل می‌شوند و مخلوط‌های رسی (CH, CL-ML) و ماسه‌ای (SP, SP-SM) به‌مقدار کم‌تری در بین رسوبات قرار گرفته‌اند.

طبقه‌بندی خاک براساس نتایج آزمایش CPTu

طبقه‌بندی خاک‌ها براساس آزمایش CPTu مبتنی بر رفتار آن‌هاست، زیرا در آزمایش CPTu پاسخ ذرات خاک به نفوذ مخروط، اندازه‌گیری می‌شود و با توجه به پارامترهای حاصل از آزمایش و نمودارهای تجربی که محققان مختلف ارائه کرده‌اند (جدول ۱)، نوع خاک تعیین می‌شود.

برای مقایسهٔ نتایج آزمایش CPTu و دانه‌بندی آزمایشگاهی، نوع خاک با استفاده از نتایج آزمایش CPTu (پارامترهای q_c ، f_s و u_2) و روش‌های مختلف مبتنی بر CPTu، که در جدول ۱ ارائه شده است، تعیین شده و با نتایج آزمایش‌های دانه‌بندی انجام شده روی نمونه‌های اخذ شده در نزدیک‌ترین گمانه مجاور، در همان عمق، مقایسه شده است. مثلاً در شکل ۳ پروفیل‌های مربوط به مقادیر مقاومت نوک، اصطکاک جداره، فشار منفذی اضافی و نسبت اصطکاکی برای یک آزمایش CPTu در ناحیهٔ ۱ رسم شده و با استفاده از روش روبرتسون [۱۱] نوع رسوبات زیر سطحی تعیین شده، سپس با نتایج دانه‌بندی نمونه‌ها مقایسه شده و

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3587]

روی نمودار مربوط نشان داده شده است. این فرایند با استفاده از روش‌ها و نمودارهای مختلف، برای ۵۸ آزمایش CPTu انجام شده تکرار شده که در ادامه به توضیح آن‌ها می‌پردازیم. در هر نمودار، رنگ نقاط نشان‌گر طبقه‌بندی آزمایشگاهی خاک برای آن نمونه است درحالی که مکان آن نقطه روی نمودار نوع خاک پیش‌بینی شده با روش مبتنی بر CPTu را نشان می‌دهد.

۱. روش داگلاس و السن [۵]

شکل ٤ طبقه‌بندی خاک به‌روش داگلاس و السن [۵] و مقایسهٔ آن با نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. این روش مبتنی بر اندازه‌گیری مقاومت نوک و نسبت اصطکاکی است، مقاومت نوک مستقیماً از آزمایش اندازه‌گیری شده و نسبت اصطکاکی (R_f) از رابطهٔ ۱ به‌دست می‌آید.

$$R_f = \frac{f_s}{q_c} * 100 \quad (۱)$$

درصد انطباق این روش با نتایج دانه‌بندی، در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به داده‌های جدول به این نتیجه می‌رسیم که نمودار مذکور، برای داده‌های تحقیق حاضر، خاک را کمی درشت‌دانه‌تر از آن‌چه که از نتایج آزمایش دانه‌بندی به‌دست می‌آید، پیش‌بینی می‌کند.

۲. روش جونز و راست[۷]

شکل ۵ طبقه‌بندی خاک در این روش را نشان می‌دهد. مبنای این روش مقاومت مخروط خالص (q_c-σ_v) در مقابل فشار منفذی اضافی (Δu) است. این دو متغیر از روابط ۲ و ۳ تعیین می‌شوند.

$$\Delta u = u_2 - u_0 \quad (۲)$$

$$\sigma_v = \sum h_i . \gamma_i \quad (۳)$$

u_2 فشار منفذی اندازه‌گیری شده در عمق مورد نظر که هم‌زمان با انجام آزمایش اندازه‌گیری می‌شود، u_0 فشار منفذی هیدروستاتیک برجا در عمق موردنظر، σ_v تنش عمودی کل، h_i ضخامت لایه و γ_i وزن مخصوص خاک است. در جدول ۳ درصد انطباق نتایج به‌دست آمده از این روش با آزمایش دانه‌بندی ارائه شده است. بر این اساس، این نمودار خاک‌های موجود

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3587]

در تحقیق حاضر را ریزدانه‌تر از آن چه که از آزمایش دانه‌بندی به‌دست می‌آید، پیش‌بینی کرده است.

۳. روش روبرتسون و همکاران [۹]

در این روش برای طبقه‌بندی خاک دو نمودار پیشنهاد شده است. یکی از مقاومت نوک تصحیح شده (q_t) و نسبت اصطکاکی (R_f)، و دیگری از q_t و پارامتر فشارمنفذی (B_q) استفاده می‌کند (شکل ٦). این دو پارامتر براساس روابط ٤ و ٦ تعیین می‌گردند.

$$q_t = q_c + u_2(1-a) \quad (٤)$$

در رابطه ٤، a نسبت سطح خالص[1] است. این پارامتر در حقیقت عاملی است که نشان‌دهندهٔ تأثیر فشار آب منفذی بر سطوح مقطع ابتدایی و انتهایی غلاف اصطکاکی و تأثیر آن بر پارامترهای اندازه‌گیری شده است. این مقدار از رابطهٔ (٥) محاسبه می‌شود.

$$a = \frac{A_N}{A_T} \quad (٥)$$

که A_N مساحت قاعده مخروط منهای مساحت فیلتر متخلخل و A_T مساحت قاعده مخروط است.

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_v} \quad (٦)$$

در رابطه ٦، u_2 فشار منفذی اندازه‌گیری شده در عمق موردنظر، u_0 فشار منفذی هیدروستاتیک برجا در عمق موردنظر، q_t مقاومت نوک تصحیح شده و σ_v تنش عمودی کل است.

مقایسهٔ نتایج آزمایش دانه‌بندی آزمایشگاهی با روش مذکور در شکل ٦ نشان داده شده، درصد انطباق آن با نتایج دانه‌بندی در جدول ۳ ارائه شده است. این روش در خاک‌های ماسه‌ای نتایج بسیار خوبی را ارائه می‌کند و به‌ترتیب در سیلت‌ها و رس‌ها دقت تشخیص نوع خاک کاهش می‌یابد.

٤. روش سنست و همکاران [۱۰]

نمودار استفاده شده برای طبقه‌بندی خاک در این روش در شکل ۷ نشان داده شده است. در این روش از دو متغیر q_t و B_q استفاده شده که نحوهٔ محاسبهٔ آن‌ها مطابق روابط ٤ و ٦

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3587]

است. درصد انطباق نتایج حاصل از این روش با نتایج آزمایش دانه‌بندی در جدول ۳ آمده است. در این نمودار به محدودهٔ مربوط به ماسه‌ها فضای بیش‌تری اختصاص یافته است و ماسه‌ها با دقت بیش‌تری نسبت به رس‌ها و سیلت‌ها طبقه بندی شده‌اند.

۵. روش روبرتسون [۱۱]

این روش اصلاحی بر نمودار روبرتسون و همکاران [۹] است و از پارامترهای اصلاح شده (Q_t, F_t, B_q) استفاده شده است. B_q از رابطهٔ (٦) تعیین می‌شود و مقادیر Q_t و F_t به‌ترتیب از روابط ۷ و۸ محاسبه می‌شوند.

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_v}{\sigma_v'} \quad (۷)$$

$$F_t = \frac{f_s}{q_t - \sigma_v} \quad (۸)$$

Q_t مقاومت نوک نرمال شده، σ'_v تنش عمودی مؤثر، F_t نسبت اصطکاکی نرمال شده و f_s اصطکاک جانبی است.

در شکل ۸، مقایسه نتایج دانه‌بندی آزمایشگاهی و نمودارهای پیشنهادی روبرتسون نشان داده شده است. در جدول ۳، درصد تطابق دو روش برای خاک‌های مختلف ارائه شده است. با توجه به نتایج می‌توان دریافت، استفاده از پارامترهای اصلاح شده باعث افزایش دقت در تشخیص نوع خاک‌ها شده است. هم‌چنین در هر دو نمودار اصلاح شده و اصلاح نشده روبرتسون، هنگامی که از فشار منفذی برای پیش‌بینی نوع خاک استفاده می‌شود، نتایج ضعیف‌تری در مقایسه با نمودارهای مبتنی بر اصطکاک جانبی حاصل می‌شود. که می‌تواند به‌دلیل اشباع نبودن و هواگیری فیلتر فشار منفذی در هنگام انجام آزمایش باشد.

٦. روش جفری و دویس [۱۲]

در این روش از دو متغیر $Q_t(1-B_q)$ و F_t استفاده شده است. این پارامترها از روابط (٦، ۷ و ۸) تعیین می‌شود. در شکل ۹ مقایسهٔ نتایج دانه‌بندی با روش مذکور نشان داده شده است. میزان دقت این روش در طبقه‌بندی انواع رسوبات در مقایسه با نتایج آزمایش دانه‌بندی در جدول ۳ ارائه شده است. در این روش ماسه‌ها با دقت بسیار خوبی طبقه‌بندی شده‌اند، هرچند

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3587]

رسوبات سیلتی و رسی نیز انطباق قابل قبولی دارند.

۷. روش اسلامی و فلنیوس [۱۳]

متغیرهای لازم برای این روش اصطکاک جانبی (f_s) و مقاومت مخروط مؤثر (q_E) است. مقاومت مخروط مؤثر از رابطهٔ (۹) تعیین می‌شود.

$$q_E = q_t - u_2 \quad (۹)$$

در شکل ۱۰ مقایسهٔ نتایج دانه‌بندی و روش مذکور ارائه شده است. درصد انطباق این روش با نتایج دانه‌بندی آزمایشگاهی در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به این‌که در این روش تفکیک بین سیلت‌ها صورت نگرفته، به‌نظر می‌رسد انطباق بیش‌تری با نتایج آزمایش دانه‌بندی دارد.

۸. روش اشنایدر و همکاران [۱٤]

اشنایدر و همکاران [۱٤] از متغیرهای Qt و $\Delta u_2/\sigma'v$ برای طبقه‌بندی استفاده کرده‌اند. مقادیر Qt و Δu_2 از روابط (۲ و ۷) تعیین می‌شود. در شکل ۱۱ مقایسه نتایج دانه‌بندی و روش مذکور ارائه شده است. با توجه به این نمودار اکثر نمونه‌های سیلتی و رسی در محدوده تعیین شده قرار نگرفته‌اند و همراه هم در یک منطقه تجمع پیدا کرده‌اند ولی نمونه‌های ماسه‌ای به منطقه تعیین شده نزدیک‌ترند و جای‌گیری بهتری دارند. این روش در خاک‌های ماسه‌ای بهتر جواب می‌دهد در حالی که خاک‌های سیلتی و رسی را به‌خوبی از یک‌دیگر تفکیک نمی‌کند.

پیشنهاد طبقه‌بندی جدید

با استفاده از داده‌های موجود در این پژوهش، نمودار جدیدی برای طبقه‌بندی خاک‌های مناطق جنوبی ایران پیشنهاد شده است. نمودار مذکور با در نظر گرفتن متغیرهای اندازه‌گیری شده در آزمایش نفوذ مخروط، عوامل مؤثر بر آزمایش و میزان انطباق روش‌های قبلی با داده‌های این پژوهش پیشنهاد شد. در نمودار پیشنهادی از R_f و q_t-u_0/σ'_v استفاده شد. زیرا اولا انطباق روش‌های قبلی مبتنی بر این متغیرها با داده‌های تحقیق حاضر بیش‌تر بوده است (با توجه به جدول ۳)، ثانیاً با در نظر گرفتن این متغیرها ضمن وارد کردن همه متغیرهای

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3587]

اندازه‌گیری شده در آزمایش، اثر عوامل مختلف مؤثر بر نتایج آزمایش لحاظ شده است. به‌نحوی که نسبت اصطکاکی (R_f) اثر مقاومت نوک (q_c) و اصطکاک جداره (f_s) را لحاظ کرده و مقاومت نوک تصحیح شده (q_t) تأثیر هم‌زمان مقاومت نوک، فشار آب منفذی (u_2)، محل و اندازه فیلتر متخلخل (نسبت سطح خالص، a) را وارد نمودار کرده است. تأثیر فشار مؤثر روباره (σ'_v) و فشار هیدرواستاتیک (u_0) نیز به‌طور مستقیم وارد نمودار شده است. بر اساس نمودار پیشنهادی خاک‌ها در ۵ منطقه جانمایی شده‌اند. در شکل ۱۲ نمودار پیشنهادی در تحقیق حاضر، به همراه نتایج به‌دست آمده از آزمایش دانه‌بندی که روی آن قرار گرفته، نشان داده شده است. در این نمودار بیش از ۹۰٪ رس‌ها و سیلت‌ها، که شامل رس‌های لاغر و چاق، سیلت، سیلت رسی و سیلت ماسه‌ای هستند، جای‌گیری خوبی دارند و تمامی نمونه‌های ماسه‌ای و رس‌های سیلتی (CL-ML) به درستی پیش‌بینی شده‌اند.

بحث

در جدول ۳ با توجه به فراوانی خاک‌های بررسی شده در تحقیق حاضر، درصد انطباق روش‌های مبتنی بر آزمایش نفوذ مخروط و آزمایش دانه‌بندی در چهار گروه خاکی (ماسه‌ای، رسی لاغر و چاق، رس‌های سیلتی و مخروط‌های سیلتی) مقایسه شده است. با توجه به جدول مشاهده می‌شود به‌جز روش جونز و راست [۷]، بقیهٔ روش‌ها، قادرند ماسه‌ها را به‌خوبی پیش‌بینی نمایند. به‌عبارت دیگر رفتار ماسه‌ها در حین انجام آزمایش به‌گونه‌ای است که امکان تشخیص و طبقه‌بندی آن‌ها را در اکثر روش‌ها فراهم می‌کند. تشخیص رس‌های چاق و لاغر، رس‌های سیلتی و مخلوط‌های سیلتی دقت پایین‌تری نسبت به خاک‌های ماسه‌ای دارند. لیکن دقت تشخیص در مخلوط‌های سیلتی از خاک‌های رسی و رسی سیلتی کم‌تر است. بنابراین بهترین دقت در خاک‌های ماسه‌ای، سپس رسی و رسی سیلتی و بعد مخلوط‌های سیلتی است. با توجه به میزان نفوذ مخروط (۲ سانتی‌متر در ثانیه) به‌نظر می‌رسد که حین نفوذ مخروط در خاک‌های رسی، شرایط زهکشی نشده و در خاک‌های ماسه‌ای زهکشی شده است. با توجه به اندازه دانه‌ها در خاک‌های سیلتی، احتمالاً شرایط حاکم نه به‌صورت زهکشی کامل و نه

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3587]

زهکش نشده است و این مسئله می‌تواند دلیل کم بودن دقت این روش‌ها در شناسایی این‌گونه خاک‌ها باشد.

با مقایسهٔ روش‌های مختلف ملاحظه می‌شود که در خاک‌های رسی و رسی سیلتی و مخلوط‌های سیلتی نمودار مبتنی بر نسبت اصطکاکی نرمال شده روبرتسون [۱۱]، پیش‌بینی بهتر و دقیق‌تری از پروفیل زیرسطحی در مناطق بررسی شده در مقایسه با سایر روش‌ها نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

مقایسهٔ نتایج حاصل از طبقه‌بندی خاک با نتایج آزمایش CPTu در تعیین نوع خاک، نشان دهنده قابل اعتماد بودن نتایج این آزمایش در تشخیص خاک برای خاک‌های مناطق جنوبی ایران است. از بین روش‌های پیشنهاد شده محققان مختلف، نمودار روبرتسون [۱۱] پیش‌بینی بهتر و دقیق‌تری از پروفیل زیرسطحی ارائه می‌کند، در حالی که نمودارهای جونز و راست [۷] و اشنایدر و همکاران [۱٤] تفکیک خوبی را در رسوبات سیلتی و رسی نشان نمی‌دهد. هم‌چنین، نمودار مبتنی بر مقاومت نوک نرمال شده روبرتسون (شکل ۸ الف)، داده‌ها را با دقت بیش‌تری نسبت به نمودار مبتنی بر فشار آب منفذی (شکل ۸ ب) طبقه‌بندی می کند این امر می‌تواند ناشی از خطاهای احتمالی در اندازه‌گیری فشار منفذی باشد.

به‌طور کلی، ماسه‌ها تقریباً در تمام نمودارهای طبقه‌بندی خاک به‌خوبی پیش‌بینی شده‌اند در حالی که، تطابق نتایج آزمایش‌های CPTu و دانه‌بندی در سیلت‌ها و مخلوط‌های سیلتی دقت کم‌تری نسبت به رسوبات رسی و ماسه‌ای دارد، این امر می‌تواند ناشی از شرایط زهکشی در خاک‌های سیلتی باشد. بنابراین، هنگام شناسایی خاک‌های سیلتی با این نمودار، باید دقت بیش‌تری لحاظ شود.

با اعمال تغییراتی در نمودار روبرتسون، نمودار اصلاح شده جدیدی برای تشخیص پروفیل زیرسطحی خاک در مناطق جنوبی ایران مبتنی بر مناطق بررسی شده، ارائه شده است. براساس این نمودار، بیش از ۹۰٪ رس‌ها و سیلت‌ها، و تمامی نمونه‌های ماسه‌ای و رس‌های سیلتی به درستی قابل تعیین هستند و می‌تواند برای طبقه‌بندی خاک‌های نواحی جنوبی ایران استفاده شود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3587]

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از مؤسسهٔ مهندسین مشاور ساحل و شرکت مهندسین مشاور سازه‌پردازی ایران که همکاری‌های لازم را در جمع‌آوری اطلاعات و داده‌های اولیه به‌عمل آوردند، تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

1. Begemann H.K.S.Ph. "The friction jacket cone as an aid in determining the soil profile", Proceeding of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, 1 (1965) 17-20.
2. Sanglerat G., Nhim T.V., Sejourne M., Andina R., "Direct soil classification by static penetrometer with special friction sleeve", Proceedings of the First European Symposium on Penetration Testing, ESOPT-1, 2.2, Stockholm (1974) 337-344.
3. Schmertmann J.H., "Guidelines for cone test, performance, and design", Federal Highway, administration, Report FHWA-TS-78209, Washington, 145 (1978).
4. Searle, I.W., "The interpretation of Begemann friction jacket cone results to give soil types and design parameters", Proceedings of 7th European Conference on Soil Mechanic and Foundation Engineering, ECSMFE, Brighton (1979) 2265-270.
5. Douglas B.J., Olsen R.S., "Soil classification using electric cone penetrometer", American Society of Civil Engineers, ASCE, Proceedings of Conference on Cone Penetration Testing and Experience, St. Louis, October 26-30 (1981) 209-227.
6. Vos J.D., "The practical use of CPT in soil profiling", Proceedings of the Second European Symposium on Penetration Testing, ESOPT-2, 2, Amsterdam, May 24-27 (1982) 933-939.
7. Jones G.A., Rust E., "Piezometer penetration testing, CUPT", Proceedings

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3587]

of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, ESOPT-2, 2, Amsterdam, May 24-27 (1982) 607-614.

8. Robertson P.K., Campanella R.G., "Interpretation of cone penetrometer tests, Part I sand", Canadian Geotechnical Journal, 20(4) (1983) 718-733.
9. Robertson P.K., Campanella R.G., Gillespie D., Grieg J., "Use of piezometer cone data", Proceedings of American Society of Civil Engineers, ASCE, In-Situ 86 Specialty Conference, (1986) 1263-1280. Edited by S. Clemence, Blacksburg, June 23-25 Geotechnical Special Publication GSP No. 6.
10. Senneset K., Sandven R., Janbu N., "Evaluation of soil parameters from piezocone test", In-situ Testing of Soil Properties for Transportation, Transportation Research Record, No. 1235, Washington, D.C., (1989) 24-37.
11. Robertson P.K., "Soil classification using the cone penetration test", Canadian Geotechnical Journal, 27 (1) (1990) 151-158.
12. Jefferies M.G., Davies M.P., "Soil classification using the cone penetration test: Discussion", Canadian Geotechnical Journal, 28 (1) (1991) 173-176.
13. Eslami A., Fellenius B.H., "Pile capacity by direct CPT and CPTu methods applied to 102 case histories". Canadian Geotechnical Journal, 34 (6) (1997) 880-898.
14. Schneider J.A., Randolph M.F., Mayne P.W., Ramsey N.R., "Analysis of factor influencing soil classification using normalized piezocone tip resistance and pore pressure parameters", J. Geotech and Geoenv. Eng., ASCE, Vol. 134 (11) (2008) 569-1586.
15. Zhang Z., Tumay M.T., "Statistical to fuzzy approach toward CPT soil classification.Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3587]

125 (3) (1999) 179-186.

16. Hegazy A., Yasser, Mayne P.W., "Objective site characterization using clustering of piezocone data", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 128 (12) (2002) 986-996.

17. Kurup P.U., Griffin E.P., "Prediction of soil composition from CPT data using general regression neural network", Journal of Computing in Civil Engineering 20 (4) (2006) 281-289.

18. Jung B.C., Gardoni P., Biscontin G., "Probabilistic soil identification based on cone penetration tests", Geotechnique 58 (7) (2008) 591-603.

19. Cetin K.O., Ozan C., "CPT-based probabilistic soil characterization and classification", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 135 (1) (2009) 84-107.

20. Robertson P.K., "Soil behaviour type from the CPT: an update. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing", CPT'10, Huntington Beach, CA, USA (2010) 2-56.

21. Cai G., Liu S., Puppala A.J., "Comparison of CPT charts for soil classification using PCPT data: example from clay deposits in Jiangsu Province, China", Engineering geology 121 (1-2) (2011) 89-96.

22. Bol E., "The influence of pore pressure gradients in soil classification during piezocone penetration test", Engineering Geology 157 (2013) 69-78.

23. Abbaszadeh Shahri A., Malehmir A., Juhlin C., "Soil classification analysis based on piezocone penetration test data-A case study from a quick-clay landslide site in southwestern Sweden. Engineering Geology 189 (2015) 32-47.

۲٤. مهندسین مشاور ساحل، *گزارش مطالعات ژئوتکنیک بندر شهید رجایی* (۱۳۸۵).

۲۵. مهندسین مشاور ساحل ، *گزارش مطالعات ژئوتکنیک بندر تنبک* (۱۳۸٦).

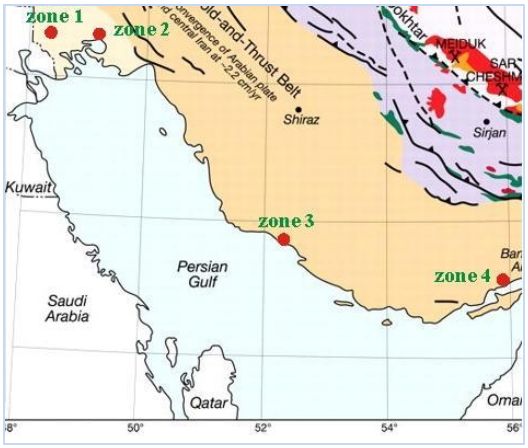
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.2.6]

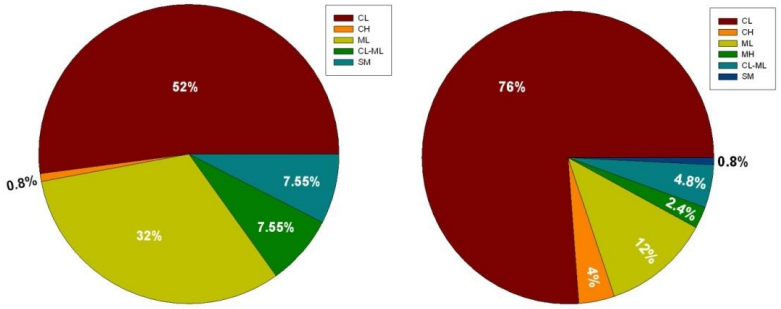
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3587]

۲۶. مهندسین مشاور ساحل، *گزارش مطالعات ژئوتکنیک بندر ماهشهر* (۱۳۸۷).
۲۷. مهندسین مشاور سازه‌پردازی، *گزارش‌های داخلی مربوط به نتایج آزمایش‌های نفوذ مخروط* (۱۳۸۸).
28. ASTM D422, "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils" (1990).

ضمایم:



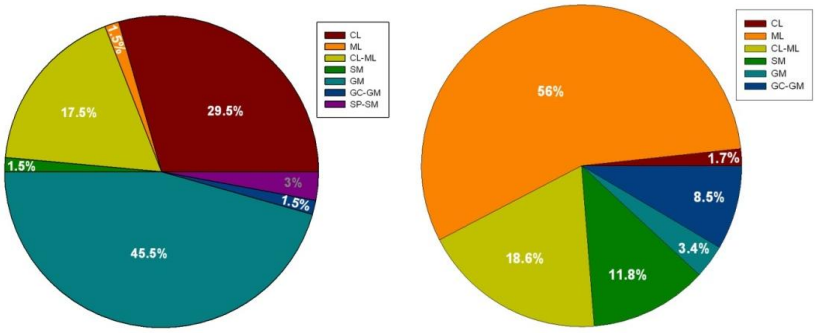
شکل ۱. موقعیت نواحی بررسی شده



ب الف

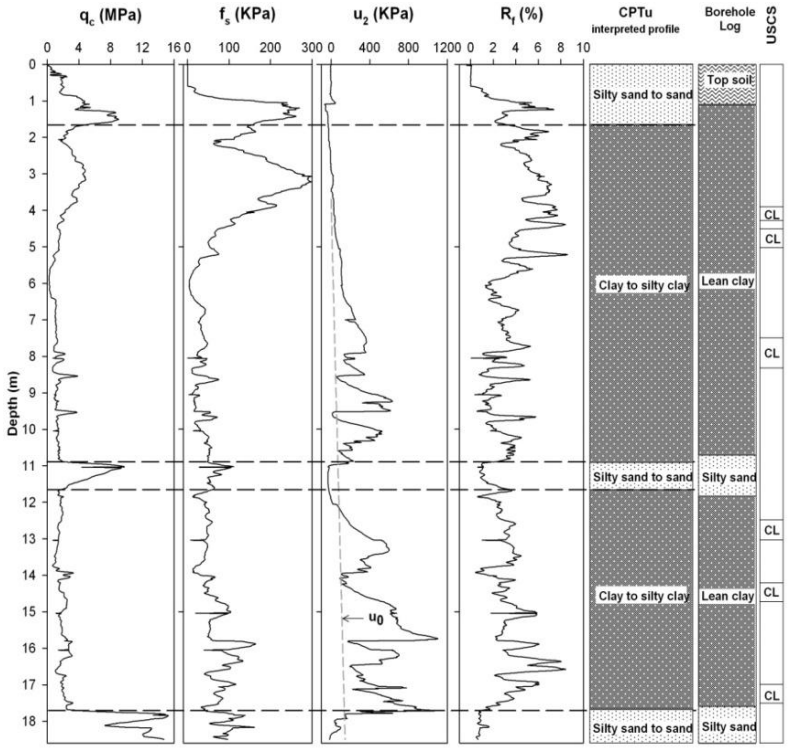
شکل ۲. فراوانی هر دسته از رسوبات در نواحی بررسی شده بر اساس نتایج آزمایش دانه‌بندی، الف) ناحیه ۱، ب) ناحیه ۲،

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3587]



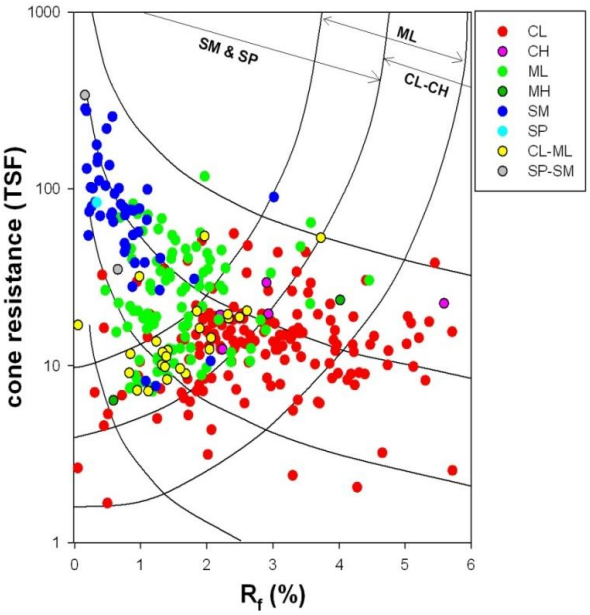
د ج

شکل ۲. فراوانی هر دسته از رسوبات در نواحی بررسی شده بر اساس نتایج آزمایش دانه‌بندی، ج) ناحیه ۳ و د) ناحیه ٤

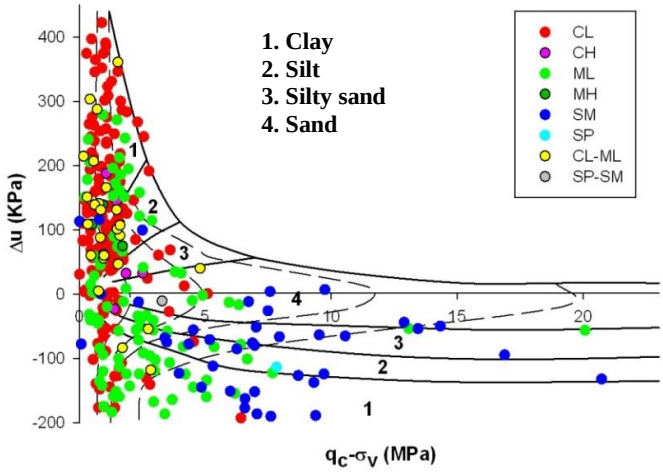


شکل ۱. نتایج آزمایش C12 در ناحیهٔ ۱ و پروفیل زیر سطحی پیش‌بینی شده به‌وسیلهٔ روش روبرتسون [۱۱] . به‌همراه نتایج آزمایش‌های دانه‌بندی گمانه BH48، که در مجاورت آزمایش نفوذ حفر شده است. مقایسه این نتایج هماهنگی خوبی را بین طبقه‌بندی آزمایشگاهی و برجا نشان می‌دهد

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3587]

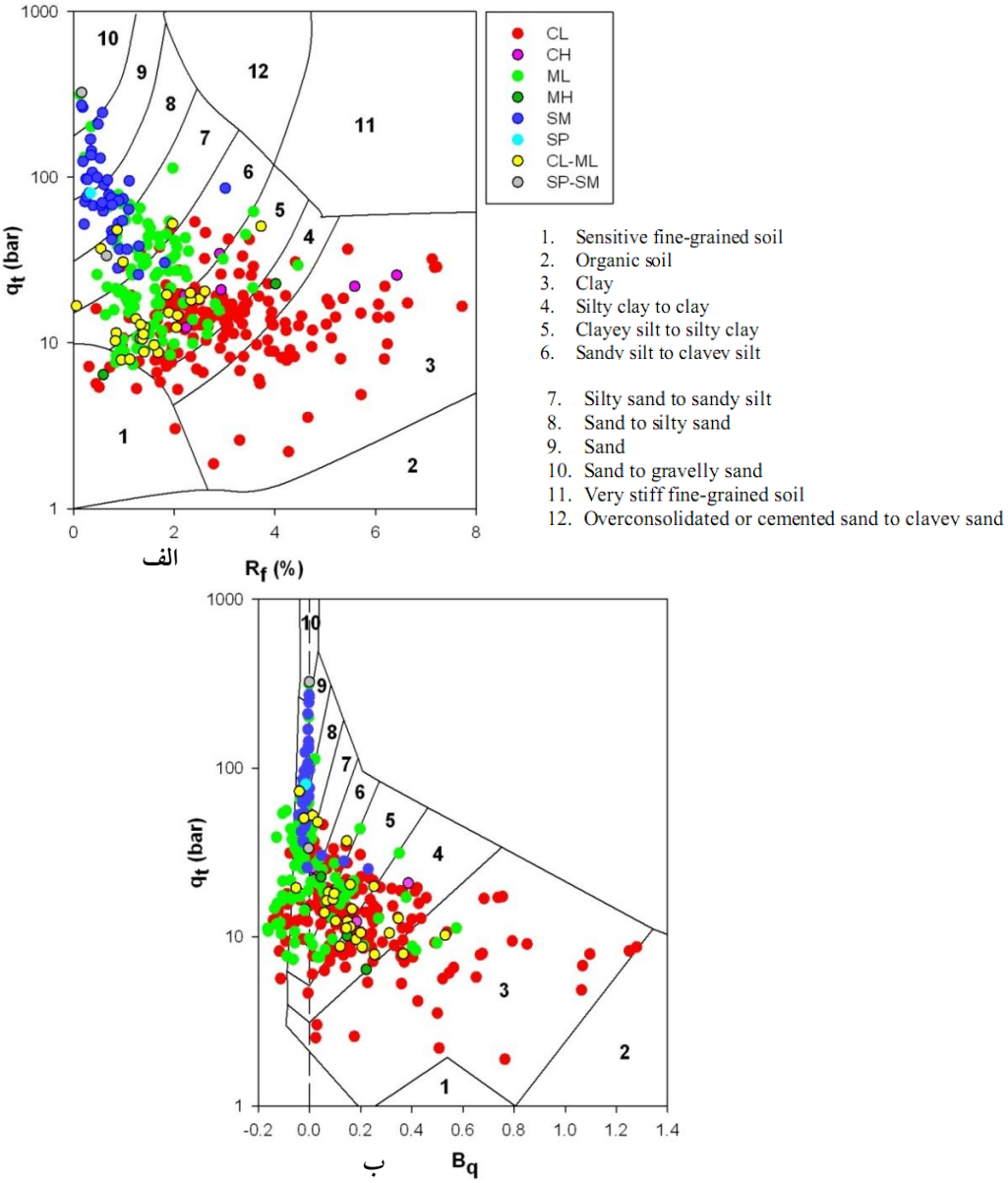


شکل ۲. مقایسه طبقه‌بندی خاک برمبنای نمودار داگلاس و السن [۵] و آزمایش دانه‌بندی در تحقیق حاضر



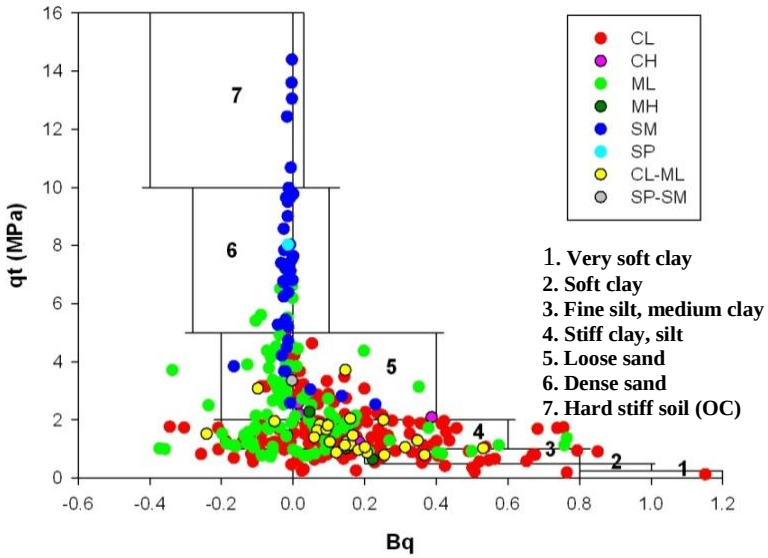
شکل ۳. طبقه‌بندی خاک با استفاده از روش جونز و راست [۷] و مقایسهٔ آن با نتایج آزمایش دانه‌بندی در تحقیق حاضر

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3587]

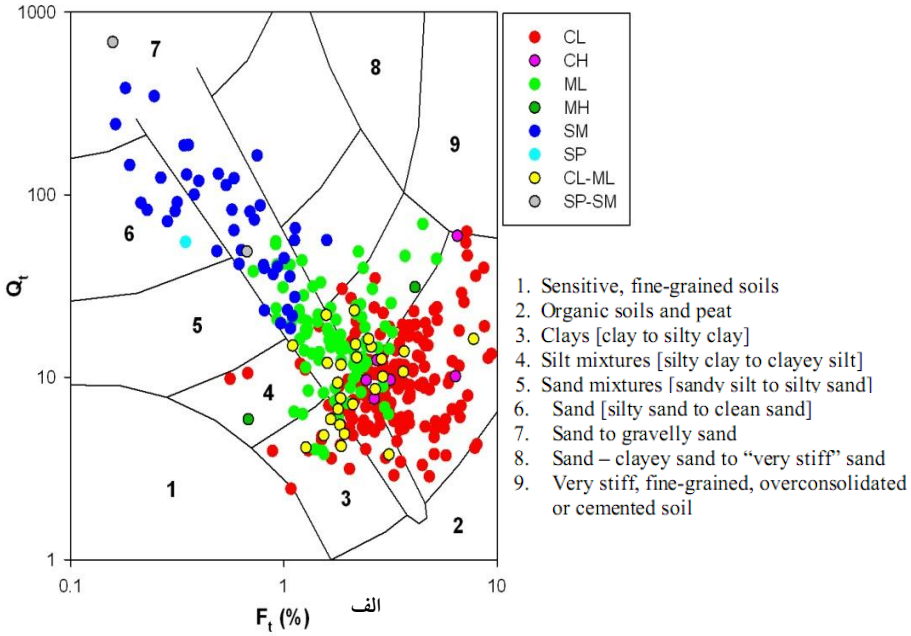


شکل ٤. طبقه‌بندی خاک با استفاده از روش روبرتسون و همکاران [۹] و مقایسهٔ آن با نتایج آزمایش دانه‌بندی در تحقیق حاضر

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3587]

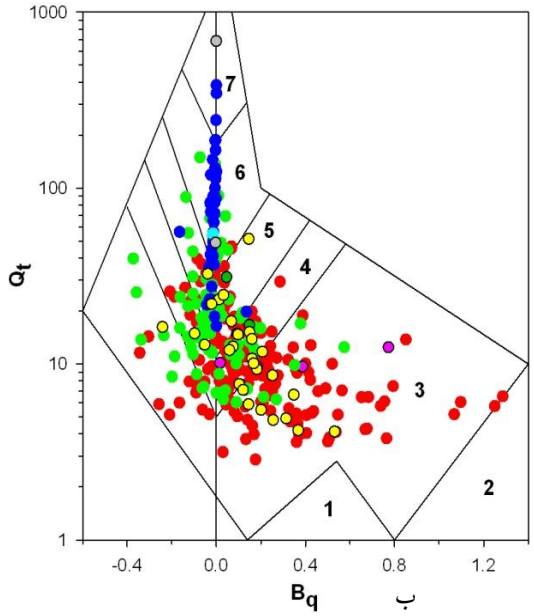


شکل ۷. طبقه‌بندی خاک با استفاده از روش سنست و همکاران [۱۰] و مقایسهٔ آن با نتایج آزمایش دانه‌بندی در تحقیق حاضر



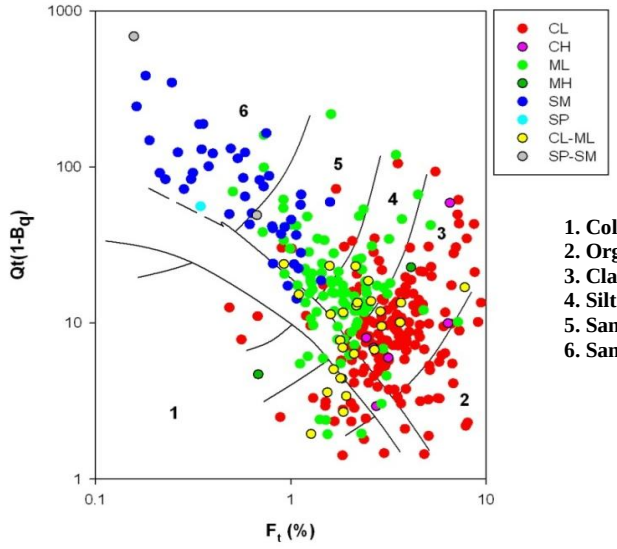
شکل ۸. طبقه‌بندی خاک با استفاده از روش روبرتسون [۱۱] و مقایسهٔ آن با نتایج آزمایش دانه‌بندی در تحقیق حاضر

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3587]



ب

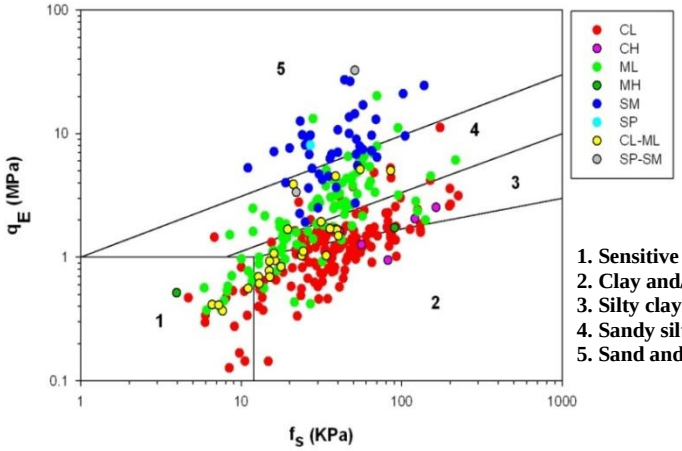
شکل ۸. طبقه‌بندی خاک با استفاده از روش روبرتسون [۱۱] و مقایسهٔ آن با نتایج آزمایش دانه‌بندی در تحقیق حاضر



1. Collapsible and sensitive soil
2. Organic soil and peat
3. Clay to silty clay
4. Silt mixtures
5. Sandy silt to silty sand
6. Sand

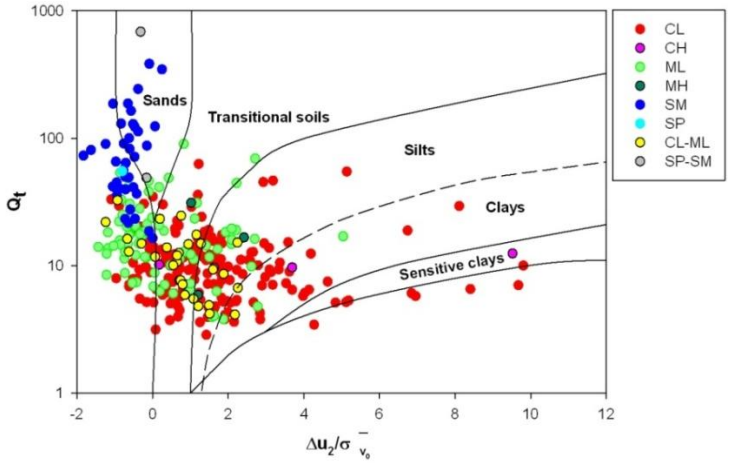
شکل ۹. طبقه‌بندی خاک با استفاده از روش جفری و دویس [۱۲] و مقایسهٔ آن با نتایج آزمایش دانه‌بندی در تحقیق حاضر

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3587]



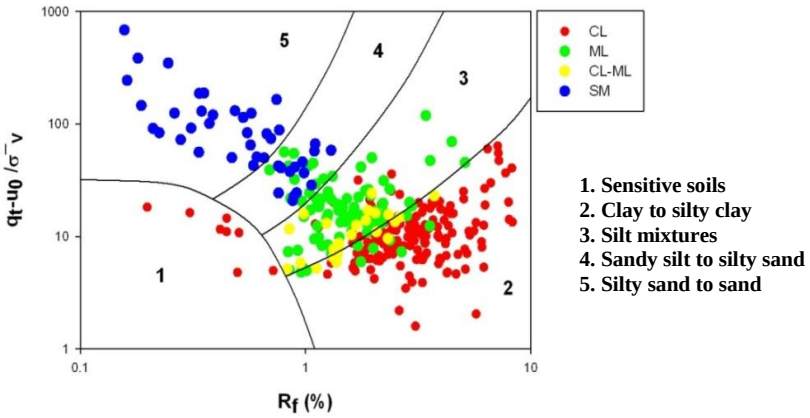
1. Sensitive and collapsible clay and/or silt
2. Clay and/or silt
3. Silty clay and/or clayey silt
4. Sandy silt and/or silty sand
5. Sand and\or sandy gravel

شکل ۱۰. طبقه‌بندی خاک با استفاده از روش اسلامی و فلنیوس [۱۳] و مقایسهٔ آن با نتایج آزمایش دانه‌بندی در تحقیق حاضر



شکل ۱۱. طبقه‌بندی خاک با استفاده از روش اشنایدر و همکاران [۱۴] و مقایسهٔ آن با نتایج آزمایش دانه‌بندی در تحقیق حاضر

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3587]



شکل ۱۲. نمودار پیشنهاد شده برای طبقه‌بندی خاک‌های جنوب ایران با استفاده از نتایج آزمایش CPTu

جدول ۱. خلاصه روش‌های موجود برای طبقه‌بندی خاک با استفاده از نتایج آزمایش CPTu

نام محقق	نوع مخروط	پارامترهای استفاده شده برای ارائه طبقه‌بندی	انواع خاک‌های پیشنهادی در مناطق مختلف نمودار	توضیحات
Begemann, 1965 [1]	مکانیکی	محور افقی: f_s (KPa) / محور عمودی: q_c (MPa)	رس، ماسه سیلتی، ماسه و شن	-
Sanglerat et al., 1974 [2]	مخروط تحقیقاتی	محور افقی: R_f (%) / محور عمودی: q_c (MPa)	رس، سیلت، ماسه	رسم q_c در مقابل R_f باعث اغراق در منطقه رس شده است.
Schmertmann, 1978 [3]	مکانیکی	محور افقی: R_f (%) / محور عمودی: q_c (MPa)	رس آلی و خاک مخلوط، رس غیرآلی و غیر حساس، رس سیلتی و ماسه‌ای، مخلوط ماسه و سیلت، ماسه، ماسه متشکل از پوسته‌های آلی و آهکی	-
Searle, 1979 [4]	مکانیکی	محور افقی: R_f (%) / محور عمودی: q_c (MPa)	تورب، رس تورب‌دار، رس چاق، رس سیلتی، سیلت رسی، سیلت ماسه‌ای رس‌دار، ماسه سیلتی رس‌دار، ماسه سیلتی، ماسه، ماسه شنی، شن	تراکم خاک، S_u و زاویG اصطکاک را نیز پیش بینی می‌کند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3587]

نام محقق	نوع مخروط	پارامترهای استفاده شده برای ارائه طبقه‌بندی	انواع خاک‌های پیشنهادی در مناطق مختلف نمودار	توضیحات
			ماسه‌ای، شن	
Douglas & Olsen, 1981 [5]	الکتریکی	محور افقی: R_f (%) محور عمودی: q_c (TSF)	CL-CH, ML, SM & SP	خاک را براساس سیستم متحده طبقه‌بندی می‌کند.
Vos. 1982 [6]	الکتریکی	R_f (%)	تورب، رس، سیلت، ماسه‌ریز، ماسه درشت و شن	مشابه با جدول پیشنهادی Begemann, 1965
Jones & Rust, 1982 [7]	پیزوکن	محور افقی: q_c-σ_v (MPa) محور عمودی: Δu (KPa)	رس، سیلت، ماسه سیلتی، ماسه	-
Robertson & Campanella, 1983 [8]	الکتریکی	محور افقی: R_f (%) محور عمودی: q_c (MPa)	تورب، رس، رس سیلتی و سیلت رسی، سیلت ماسه‌ای و سیلت، ماسه سیلتی، ماسه	شبیه به نمودار Douglas & Olsen, 1981
Robertson et al, 1986 [9]	پیزوکن	محور افقی: R_f (%) , B_q محور عمودی: q_t (Bar)	خاک حساس، خاک آلی، رس، رس سیلتی تا رس، سیلت رسی تا رس سیلتی، سیلت ماسه‌ای تا سیلت رسی، ماسه سیلتی تا سیلت ماسه‌ای، ماسه تا ماسه سیلتی، ماسه، ماسه تا ماسه شنی، خاک ریزدانه بسیارسفت، ماسه بیش تحکیم یافته یا سیمانی شده تا ماسه رسی	دو نمودار مبتنی بر نسبت اصطکاکی و فشار منفذی
Senneset et al, 1989 [10]	پیزوکن	محور افقی: B_q محور عمودی: q_t (MPa)	رس خیلی نرم، رس نرم، سیلت ریز– رس متوسط، رس سفت – سیلت، ماسه سست، ماسه متراکم، خاک سفت و سخت	–
Robertson, 1990 [11]	پیزوکن	محور افقی: F (%) , B_q محور عمودی: Q_t	خاک ریزدانه حساس، خاک آلی و تورب، رس، مخلوط سیلت، مخلوط ماسه، ماسه، ماسه تا ماسه شنی، خاک ریزدانه خیلی سخت، خاک پیش تحکیم یافته یا سیمانی شده	استفاده از پارامترهای نرمال شده در دو نمودار

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3587]

نام محقق	نوع مخروط	پارامترهای استفاده شده برای ارائه طبقه‌بندی	انواع خاک‌های پیشنهادی در مناطق مختلف نمودار	توضیحات
Jefferies & Davis, 1991 [12]	پیزوکن	محور افقی: F (%) محور عمودی: $Q_t(1-B_q)$	خاک حساس و فروریزنده، خاک آلی و تورب، رس تا رس سیلتی، مخلوط سیلت، سیلت ماسه‌ای تا ماسه سیلتی، ماسه	–
Eslami & Fellenius, 1997 [13]	پیزوکن	محور افقی: f_s (KPa) محور عمودی: q_E (MPa)	سیلت و رس حساس و فروریزنده، رس و سیلت، رس سیلتی تا سیلت رسی، سیلت ماسه‌ای تا ماسه سیلتی، ماسه، ماسه شنی	–
Schneider et al., 2008 [14]	پیزوکن	محور افقی: $\Delta u/\sigma'_v$ (KPa) محور عمودی: Q_t	خاک حساس، ر س، سیلت، خاک‌های انتقالی، ماسه زهکش شده	–

جدول ۲. موقعیت جغرافیایی نواحی بررسی شده و تعداد آزمایش‌های انجام شده در هر یک از نواحی

	مختصات جغرافیایی	محل	تعداد آزمایشهای **CPTu**	تعداد آزمایشهای دانه بندی
ناحیه ۱	"38 '74 °30 شمالی "41 '42 °48 شرقی	دشت خوزستان، ۱۰۰ کیلومتری جنوب اهواز	۲۲	۱۲٦
ناحیه ۲	"30°32'45 شمالی "49°10'49 شرقی	استان خوزستان، بندر ماهشهر	۱۳	۱۱۹
ناحیه ۳	"27°44'58 شمالی "52°8'29 شرقی	۲۵۰ کیلومتری جنوب شرقی بندر بوشهر، تنبک	۹	۵۹
ناحیه ٤	"27°5'55 شمالی "56°3'10 شرقی	۲۰ کیلومتری جنوب غربی بندر عباس، بندر شهید رجایی	١٤	٦٨
مجموع			۵۸	۳۷۲

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3587]

جدول ۳. بررسی روش های موجود برای طبقه‌بندی خاک در تعین نوع مصالح مختلف در تحقیق حاضر

نام محقق		درصدی از مصالح که به درستی تعیین شده اند			
		رس های لاغر و چاق **CL , CH**	مخلوط های سیلتی **ML , MH**	مخلوط های ماسه ای **SP , SM , SP-SM**	رس های سیلتی **CL-ML**
Douglas & Olsen, 1981		63%	50%	100%	0%
Jones & Rust, 1982		70%	27%	40%	88%
Robertson et al, 1986	q_t, R_f	50%	90%	93%	61%
	q_t, B_q	45%	67%	96%	63%
Senneset et al, 1989		70%	35%	100%	80%
Robertson, 1990	Qt, Ft	90%	87%	100%	100%
	Qt, Bq	46%	72%	100%	80%
Jefferies & Davis, 1991		73%	83%	100%	58%
Eslami & Fellenius, 1997		59%	95%*	100%	25%
Schneider et al., 2008		23%	35%	100%	78%

* این انطباق به‌دلیل وجود نداشتن مرزهای تفکیک شده و محدوده مشخصی برای ترکیبات سیلتی مختلف، در این روش است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1395.10.3.2.6]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.10.3.3587]