

ارائه‌ی چهارچوب واحد برای تفسیر رفتار حالت بحرانی ماسه‌های رس‌دار

امید نعیمی فر (دانشجوی دکتری)

سید شهاب‌الدین یثربی* (دانشیار)

دانشکده‌ی هندی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۵)
دربی ۲ - ۳۲، شماره ۱/۲، ص. ۳۵-۲۷

در این نوشتار، امکان ارائه‌ی یک چهارچوب واحد برای تفسیر رفتار حالت بحرانی ماسه‌های رس‌دار با استفاده از مفاهیم خط حالت پایدار، اندرکنش ماسه و ریزدانه و نسبت تخلخل هم‌ارز بررسی شده است. آزمایش‌های سه‌محوری روی ترکیبات ماسه با 25° تا 5° درصد رس با حالت خمیری متوسط انجام و با استفاده از مبانی اندرکنش ذرات و رسم خطوط حالت پایدار آنها، رابطه‌ی کاربردی و مفیدی برای محاسبه‌ی پارامتر b (میزان مشارکت ذرات ریزدانه در تماس‌های بین دانه‌ی) و نسبت تخلخل هم‌ارز پیشنهاد شده است. نتایج نشان داده است که با استفاده از رابطه‌ی پیشنهادی می‌توان خطوط حالت پایدار ترکیبات مختلف ماسه و رس را به یک خط واحد تبدیل کرد. همچنین با انجام تعداد محدودی آزمایش روی ماسه‌ی تمیز، خطوط ماسه و ترکیب آن با درصد دلخواه ریزدانه قابل پیش‌بینی است. برای اطمینان از عمومیت رابطه‌ی پیشنهادی، صحت آن با استفاده از نتایج پژوهش‌های دیگر سنجیده و تأیید شده است.

واژگان کلیدی: خط حالت پایدار، سه‌محوری، نسبت تخلخل هم‌ارز، پارامتر b .

۱. مقدمه

پس از زلزله‌هایی مثل نورتریج^۱ (۱۹۹۴)، کوکائیلی^۲ (۱۹۹۹)، چی‌چی^۳ (۱۹۹۹)، این مسئله درک‌ناون توجه قرار گرفت، که علاوه بر ماسه‌های تمیز و ماسه‌های سیلت‌دار، ماسه‌های رس‌دار نیز می‌توانند پدیده‌هایی مانند روان‌گرایی از خود بروز دهند و لذا رس و چسبندگی آن نمی‌تواند مانع از بروز رفتارهای ناپایدار در آنها شود.^[۱] پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه بیشتر در تأثیر درصد ریزدانه و یا تأثیر حالت خمیری متمرکز بوده‌اند.

در پژوهشی در سال ۲۰۰۷، با انجام آزمایش‌های برش پیچشی سیکلیک روی ماسه و بنتونیت با روش ریزش خشک نتیجه‌گیری شده است که اضافه‌شدن ۷٪ بنتونیت، موجب تسریع در روند افزایش فشار آب حفره‌ی می‌شود؛ در حالی که ادامه‌ی افزایش درصد بنتونیت به ۱۵٪، موجب بالارفتن مجدد مقاومت می‌شود.^[۲] نتیجه‌ی مشابهی نیز در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۳ گزارش شده است.^[۳] همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۰۸، این نتیجه به دست آمد که با افزایش درصد رس کاتولن، به تدریج رفتار اتساعی نمونه محو می‌شود و در درصد رس ۲۰ و ۳۰، از ابتدا فشار آب حفره‌ی مثبت است.^[۴]

برخی پژوهشگران نیز در پژوهش خود در سال ۲۰۰۶ بیان کرده‌اند که با گذشتن PI از ۷٪، رفتار مصالح از حالت ماسه‌ی و احتمال روان‌گرایی به رفتار رس‌مانند و عدم احتمال روان‌گرایی در اثر افزایش فشار آب حفره‌ی تبدیل می‌شود.^[۵]

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۹/۱۶، اصلاحیه: ۱۳۹۳/۳/۱۰، پذیرش: ۱۳۹۳/۳/۲۷.

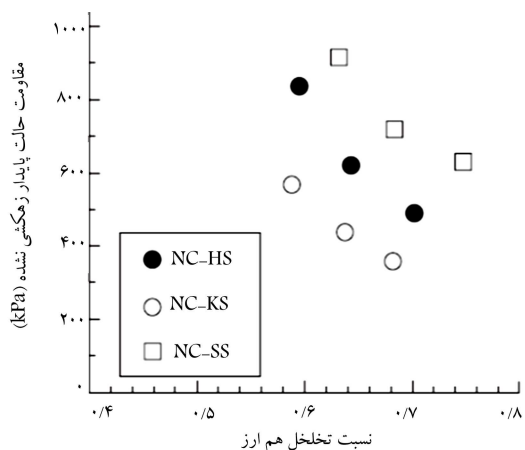
o.naeemifar@yahoo.com
shahab.yasrobi@gmail.com

پژوهشگران دیگری (۲۰۰۷) نیز با جمع‌بندی نتایج آزمایش‌های مختلف مشخص کردند که با افزایش PI مصالح مورد آزمایش تا حدود ۱۳٪، مقاومت در مقابل روان‌گرایی کاهش می‌یابد، اما در ادامه، مقاومت مصالح روند افزایشی نامحسوسی را پیدا می‌کند.^[۷]

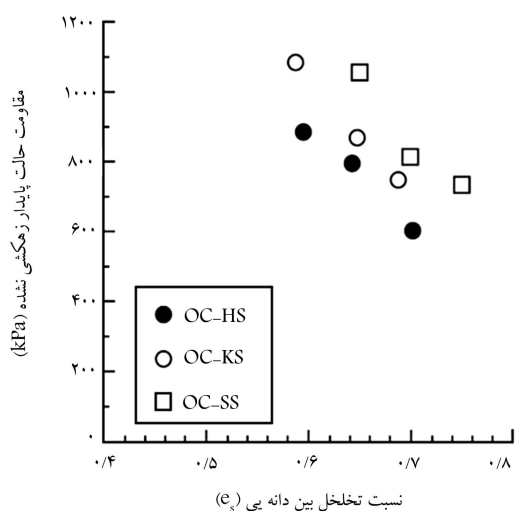
همچنین در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۲، با انجام آزمایش‌های سیکلیک کنترل تنش روی ترکیبات ماسه با 10° از رس‌های مختلف با مقادیر حالت خمیری ۸، ۱۸، ۵۰ و ۳۷۷ درصد نتیجه‌گیری شده است که هر چه حالت خمیری رس مورد استفاده در درصد ریزدانه‌ی ثابت افزایش می‌یابد، مقادیر مقاومت در مقابل روان‌گرایی کاهش می‌یابد. ضمناً با افزایش چگالی، این روند کاهش‌ی تشدید می‌شود.^[۸]

نتایج تعداد زیادی از پژوهش‌ها به این موضوع منتهی شده است که با افزایش ریزدانه، عموماً پتانسیل بروز رفتارهای ناپایدار افزایش پیدا می‌کند و سپس با گذشتن ریزدانه از یک حد معین، روند مشاهده‌شده بر عکس می‌شود و مجدداً نمونه به سمت پایداری حرکت می‌کند. درصد ریزدانه‌ی بی که باعث تغییر در روند رفتار می‌شود، به نام حد آستانه نامیده می‌شود. حد آستانه، در حقیقت درصد ریزدانه‌ی بی است که با گذشتن از آن، بافت غالب نمونه از حالت ماسه‌ی بی به حالت رسی تغییر پیدا می‌کند. یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار در رفتار نمونه، که در پژوهش‌های گذشته عموماً از آن به‌عنوان معیاری برای نشان‌دادن تراکم نمونه استفاده شده است، نسبت تخلخل است.

آنچه در حقیقت رفتار نمونه را تعیین می‌کند، میزان تماس بین دانه‌ها و موقعیت آنها نسبت به یکدیگر است. هنگامی که نیرویی به نمونه وارد می‌شود، تمامی دانه‌ها



شکل ۱. تغییرات مقاومت زهکشی نشده با نسبت تخلخل بین دانه‌یی برای ترکیب‌های عادی تحکیم‌یافته‌ی ماسه با کائولینیت و سیلیس.^[۱۲]



شکل ۲. تغییرات مقاومت زهکشی نشده با نسبت تخلخل بین دانه‌یی برای ترکیب‌های پیش تحکیم‌یافته‌ی ماسه با کائولینیت و سیلیس.^[۱۲]

با رس کائولینیت و سیلیس در حالت عادی تحکیم‌یافته ارائه کرده‌اند. شکل ۲، نیز به‌طور مشابه روند تغییرات ترکیب‌های موردنظر را در حالت پیش تحکیم‌یافته نشان می‌دهد.^[۱۲] در شکل‌های مذکور، حروف H، K و S به ترتیب نشان‌گر ماسه‌ی تمیز، ترکیب کائولینیت و ترکیب سیلیس هستند. ضمناً نمادهای NC و OC هم حالت عادی و پیش تحکیم‌یافته را نشان می‌دهند. در شکل ۳، نتایج شکل‌های ۱ و ۲ هم‌زمان با هم و با استفاده از مفهوم نسبت تخلخل هم‌ارز ارائه شده است. برای ترکیب‌های عادی تحکیم‌یافته‌ی ماسه با کائولینیت مقدار b برابر با ۰/۸- و برای سیلیس برابر با ۰/۷ فرض شده است. در مورد ترکیب‌های پیش تحکیم‌یافته نیز برای ماسه با کائولینیت مقدار b برابر با صفر و برای سیلیس برابر با ۰/۷۵ فرض شده است. مشاهده می‌شود که همه‌ی نتایج مربوط به ترکیب‌های عادی تحکیم‌یافته و پیش تحکیم‌یافته روی یک خط قرار گرفته است. به عبارت دیگر، نوع و درصد ریزدانه تأثیری در جابه‌جایی خط موردنظر نداشته است.

نتیجه‌ی به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که اگر مقدار مناسب برای b ، که نشانگر درصد مشارکت ریزدانه‌ها در تماس‌های بین دانه‌یی است، انتخاب شود، می‌توان اثر نوع و مقدار ریزدانه را از نمودارهای به‌دست‌آمده حذف کرد.

سهام یکسانی را در تحمل نیروی وارده نخواهند داشت، چرا که اندازه‌ها و موقعیت متفاوتی دارند. بعضی دانه‌ها تحت اثر نیرو جابه‌جا و تغییر موقعیت می‌دهند، بدون آنکه در تحمل نیروی وارده نقش خاصی داشته باشند. در چنین شرایطی با توجه به اینکه نمونه زهکشی نمی‌شود، نسبت تخلخل آن ثابت مانده است، ولی وضعیت تماس‌های بین دانه‌یی آن به مقدار قابل توجهی تغییر کرده است. بنابراین نمی‌توان انتظار داشت که نسبت تخلخل بتواند به نحو مناسبی بیان‌گر مقدار و توزیع تماس‌های بین دانه‌یی در تمام طول مرحله‌ی برش باشد.

همچنین در ترکیب ماسه و ریزدانه نیز هر چند ممکن است نسبت تخلخل ثابت بماند، ولی بسته به اینکه ریزدانه‌ها در نقاط تماس بین درشت‌دانه‌ها و یا در فضاهای خالی بین آنها قرار گیرند، نقش متفاوتی خواهند داشت و لذا رفتار متفاوتی هم مورد انتظار خواهد بود.

با توجه به مطالب ذکرشده و مشکلات استفاده از نسبت تخلخل کلی (e) به منظور پیش‌بینی رفتار ماسه، در برخی پژوهش‌ها نشان داده شده است که استفاده از خطوط حالت پایدار براساس نسبت تخلخل کلی و نیز محاسبه‌ی پارامترهای حالت مانند پارامتر حالت ψ (بین و جفریز (۱۹۸۵))، توأم با مشکلاتی است. مثلاً روند منطقی مورد انتظار برای افزایش تراکم‌پذیری با افزایش پارامتر حالت ψ مشاهده نمی‌شود.^[۹]

با توجه به مشکلات مذکور، برخی پژوهشگران در سال‌های ۲۰۰۲ و ۲۰۰۰ نظریه‌یی ارائه کرده‌اند که براساس آن نسبت تخلخل در هر درصد مشخص از ریزدانه باید براساس میزان واقعی تماس‌های بین‌دانه‌یی مشخص شود.^[۱۱] میزان تماس‌های بین‌دانه‌یی نیز براساس مقدار درصد ریزدانه‌ها و نیز موقعیت قرارگیری آنها نسبت به درشت‌دانه‌ها قابل تعیین است. اگر e نسبت تخلخل کلی نمونه و f_c درصد ریزدانه‌ی موجود باشد، نسبت تخلخل اسکلت ماسه یا نسبت تخلخل بین دانه‌یی^۴ را برای درصد ریزدانه‌ی کمتر از حد آستانه می‌توان با رابطه‌ی ۱ نشان داد:

$$e_s = \frac{e + f_c}{1 - f_c} \quad (1)$$

رابطه‌ی ۱ زمانی بهترین کارایی را خواهد داشت که تمامی ریزدانه‌ها در فضای خالی بین درشت‌دانه‌ها قرار گیرند و هیچ مشارکتی در تعیین تماس‌های بین ذرات درشت‌تر نداشته باشند. زمانی که درصد ریزدانه‌ها افزایش می‌یابد، به تدریج تعداد بیشتری از ریزدانه‌ها در فضای بین درشت‌دانه‌ها قرار می‌گیرند و لذا درصد مشارکت آنها در رفتار نمونه بیشتر خواهد شد. بدیهی است که در این حالت بسته به میزان مشارکت ریزدانه‌ها، فقط درصدی از آنها را می‌توان جزئی از فضای خالی فرض کرد و بقیه در محل تماس بین دانه‌های درشت‌تر قرار می‌گیرند. اگر درصد مشارکت ریزدانه‌ها در تماس‌های بین دانه‌یی را با پارامتر b نشان دهیم، می‌توان برای این حالت نسبت تخلخل بین دانه‌یی را به شکل مناسب‌تری با رابطه‌ی ۲ نشان داد:

$$e_s = e_{s(eq)} = \frac{e + (1 - b)f_c}{1 - (1 - b)f_c} \quad (2)$$

نسبت تخلخل بین دانه‌یی در این حالت معمولاً نسبت تخلخل هم‌ارز^۵ نامیده می‌شود. با توجه به اینکه عمده‌ی رفتارهای ناپایداری مرتبط با حالتی است که درصد ریزدانه کمتر از حد آستانه است، سؤال اساسی موجود این است که چگونه باید میزان مشارکت ریزدانه‌ها را در تماس‌های بین دانه‌یی در درصد‌های مختلف ریزدانه محاسبه کرد.

Ni و همکاران در پژوهش خود (۲۰۰۴)^[۱۲]، شکل ۱ را برای تغییرات مقاومت زهکشی نشده در مقابل نسبت تخلخل بین دانه‌یی برای ماسه‌ی تمیز و ترکیبات آن

پیدا کردن مقدار مناسب برای هر دسته از ترکیبات می‌تواند منجر به نتایج غیرواقعی در تخمین مقدار b شود، که می‌توان به نتیجه‌گیری مقادیر کم برای درصد ریزدانه‌های قابل توجه و یا مقادیر منفی برای b اشاره کرد که مفهوم فیزیکی ندارند. همچنین در نتایج ارائه‌شده‌ی تاکنون، خطوط حالت پایدار با استفاده از آزمایش‌های زیاد به‌دست آمده و سپس با استفاده از پارامتر b مناسب روی هم منطبق شده‌اند، در حالی که اگر بتوان رابطه‌ی برای محاسبه‌ی پارامتر b ارائه کرد، می‌توان بدون انجام آزمایش‌های زیاد، خطوط حالت پایدار را از یکدیگر نتیجه‌گیری کرد. از این رو حالت مناسب‌تر وقتی به وجود می‌آید که بتوان یک رابطه‌ی مناسب برای محاسبه‌ی پارامتر b ارائه کرد، به نحوی که برای تمامی حالات قابل استفاده باشد.

به‌طور کلی تحقیقات نشان می‌دهند که علاوه بر درصد ریزدانه، عوامل دیگری نیز در مقدار پارامتر b تأثیرگذار هستند، که از جمله‌ی آنها می‌توان به مقدار حد آستانه و نیز نوع دانه‌بندی ذرات درشت‌دانه و ریزدانه اشاره کرد.

ضرورت بحث انجام‌شده زمانی بیشتر می‌شود که توجه کنیم که ریزدانه‌های خمیری به خاطر چسبندگی خود تمایل بیشتری به درگیری با یکدیگر و با ذرات درشت‌تر دارند و لذا مشارکت بیشتری نیز در تعیین نحوه‌ی تماس بین درشت‌دانه‌ها خواهند داشت. بنابراین تخمین درست پارامتر b برای ترکیبات ماسه و ریزدانه‌ی خمیری اهمیت خاصی پیدا می‌کند.

در ادامه با انجام آزمایش‌های مناسب تلاش شده است تا امکان ارائه‌ی یک رابطه برای محاسبه‌ی مقدار b و نیز نحوه‌ی کاربرد آن بررسی شود.

۲. مشخصات مصالح

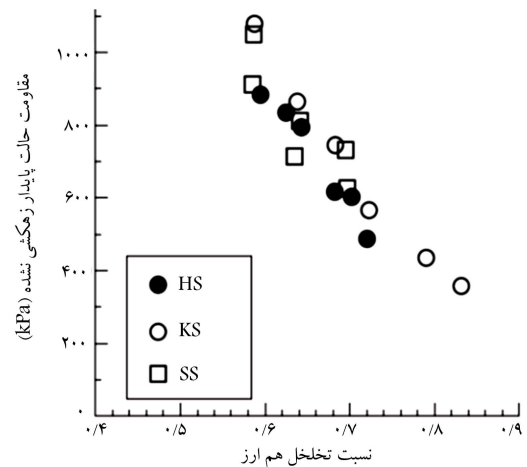
برای مصالح ماسه‌ی این آزمایش‌ها از ماسه‌ی استاندارد سیلیسی شکسته‌ی فیروزکوه استفاده شده است، که به اختصار ماسه‌ی ۱۶۱ نامیده می‌شود. این ماسه رنگ زرد متمایل به طلایی دارد و مشخصات بیشتر آن در جدول ۱ ارائه شده است. ریزدانه‌ی خمیری مورد استفاده، رس مصنوعی با نام تجاری SI است، که مشخصات بیشتر آن در جدول ۲ مشاهده می‌شود. در شکل ۵، منحنی‌های دانه‌بندی مصالح مورد استفاده ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات ماسه‌ی ۱۶۱.

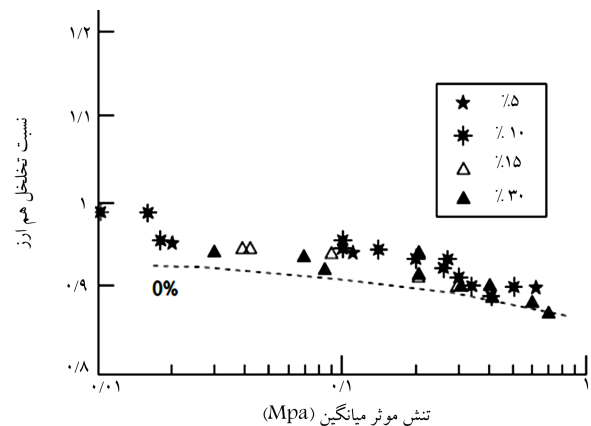
خاصیت	ماسه‌ی ۱۶۱
چگالی ویژه (G_s)	۲٫۶۶
نسبت تخلخل بیشینه	۰٫۹۲۸
نسبت تخلخل کمینه	۰٫۵۸۳
D_{50} (mm)	۰٫۲۶
D_{10} (mm)	۰٫۱۵
درصد ریزدانه	۰
ضریب یکنواختی (C_u)	۱٫۸۰
ضریب انحنا (C_c)	۱٫۱۹

جدول ۲. مشخصات ریزدانه‌ی خمیری مورد استفاده.

نوع رس	PI (%)	PL (%)	LL (%)	G_s
رس SI	۲۲	۲۸	۵۰	۲٫۵۵



شکل ۳. تغییرات مقاومت زهکشی‌نشده با نسبت تخلخل بین دانه‌ی هم‌ارز برای ترکیب‌های عادی و پیش‌تحکیم‌یافته‌ی ماسه با کاتولینیت و سیلیس. [۱۲]



شکل ۴. مقادیر زلاتوویچ و ایشیهارا (۱۹۹۵) با استفاده از نسبت تخلخل هم‌ارز و پارامتر b برابر با ۰٫۲۵. [۱۳]

Ni و همکاران (۲۰۰۴) [۱۲] همچنین نشان داده‌اند که به‌صورت مشابه با استفاده از نسبت تخلخل هم‌ارز و فرض مقدار b برابر با ۰٫۲۵ می‌توان خطوط حالت پایدار ناشی از نتایج زلاتوویچ و ایشیهارا (۱۹۹۵) [۱۳] را به یک خط مستقل از درصد ریزدانه تبدیل کرد (شکل ۴).

چنانچه برای این خطوط از نسبت تخلخل معمولی استفاده کنیم، افزایش درصد ریزدانه منجر به پایین‌رفتن خطوط خواهد شد، در حالی که رسم خطوط با استفاده از نسبت تخلخل اسکلت ماسه و بدون در نظر گرفتن پارامتر b منجر به بالا رفتن خطوط با افزایش درصد ریزدانه خواهد شد.

نتایج فوق نشان می‌دهد که با استفاده از یک آنالیز و فرض مقدار مناسب برای b می‌توان اثر درصد و نوع ریزدانه را از خطوط حالت پایدار یا سایر نمودارهای رسم‌شده حذف کرد.

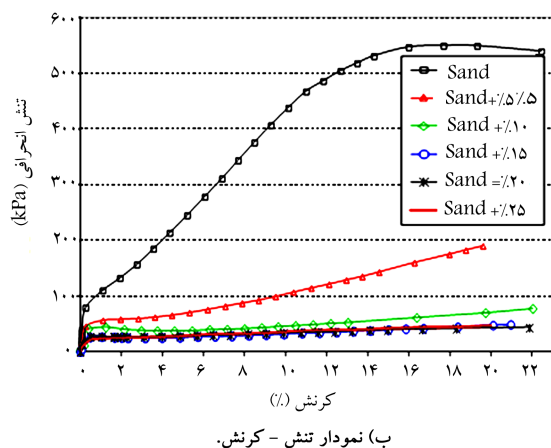
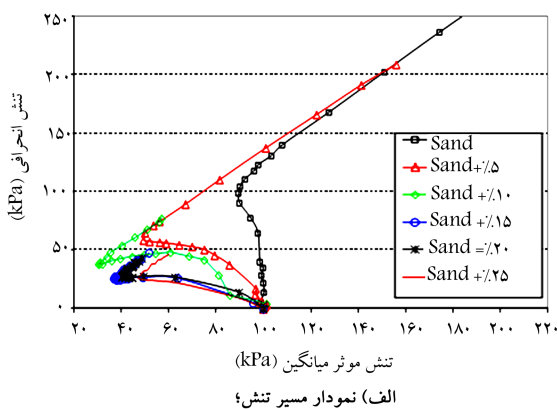
در بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده برای تمامی درصد‌های ریزدانه یک مقدار واحد b را توصیه کرده‌اند، البته Yang و همکاران در (۲۰۰۶) برای ریزدانه‌ی زیر ۲۰٪، مقدار b برابر با ۰٫۲۵ و برای ریزدانه‌ی بالای ۳۰٪، مقدار b برابر با ۰٫۴ را پیشنهاد داده‌اند. [۱۴]

با وجود نتایج به‌دست‌آمده در مورد مقدار پارامتر b و تأثیر آن در محاسبه‌ی نسبت تخلخل هم‌ارز، به نظر می‌رسد که تعیین آن با استفاده از تحلیل برگشتی و

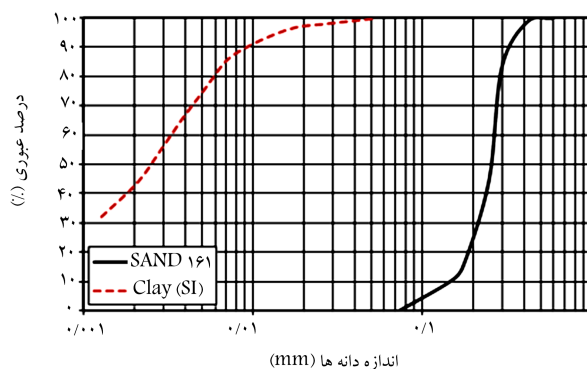
در پژوهش دیگری با مصالح و روش نمونه‌سازی متفاوت نیز برای صحت‌سنجی رابطه‌ی پیشنهادی استفاده شده است.

۱.۴. بررسی تأثیر ریزدانه‌ی خمیری در مشخصات رفتاری

در شکل ۶، تأثیر افزایش درصد ریزدانه‌ی خمیری مورد استفاده در ماسه نشان داده شده است. نمودارهای ارائه‌شده شامل تغییرات به وجودآمده در نمودارهای تنش - کرنش و نیز مسیر تنش مربوط به ترکیباتی هستند که فشار همه‌جانبه و تراکم یکسان دارند. مشاهده می‌شود که با افزایش اولیه‌ی درصد رس تا حدود ۵٪، نمودار تنش - کرنش دچار یک تغییر کاملاً محسوس شده است، به طوری که مقدار مقاومت حالت پایدار آن بیشتر از ۶۰٪ نسبت به مقدار مقاومت ماسه‌ی تمیز گاهش داشته است. با ادامه‌ی افزایش درصد رس، روند کاهش مقاومت‌ها تعدیل و نمودارهای مربوط به درصد‌های بالاتر به تدریج به هم نزدیک‌تر شده‌اند. با گذشت درصد رس از ۲۰٪، روند تغییرات معکوس شده و نمودار تنش - کرنش ترکیب ماسه با ۲۵٪ رس بالاتر از نمودار ترکیب ماسه با ۲۰٪ رس قرار گرفته است. وجود چنین حد آستانه‌یی در سایر ترکیب‌های مورد آزمایش در این پژوهش نیز مشاهده شده است. مشابه روند فوق در نمودارهای مسیر تنش نیز مشاهده می‌شود، به طوری که ماسه‌ی تمیز یک رفتار سخت‌شوندگی کامل را نشان داده است، اما افزایش درصد رس منجر به تغییر رفتار به سمت نرم‌شوندگی‌های قابل توجه و نیز بروز رفتار شبه‌پایدار شده است.



شکل ۶. بررسی تأثیر درصد ریزدانه‌ی خمیری در مشخصات رفتاری ماسه (فشار همه‌جانبه: ۱۰۰ کیلوپاسکال، وزن مخصوص خشک: ۱٫۷۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب).



شکل ۵. منحنی‌های دانه‌بندی مصالح مورد استفاده.

۳. روند آزمایش‌ها

آزمایش‌های انجام‌شده از نوع سه محوری استاتیکی است و برش به صورت کنترل کرنش با سرعت معادل ۰٫۷ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است. نمونه‌ها به قطر ۵ سانتی‌متر و به طول ۱۰ سانتی‌متر بوده‌اند. فشار همه‌جانبه‌ی مورد استفاده در آزمایش‌ها نیز ۱۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال بوده است.

نمونه‌سازی آزمایش‌ها با روش ریزش خشک انجام شده است. در این روش خاک از یک قیف با دهانه‌ی حدود ۱۲ میلی‌متر به درون قالب ریخته شده است. به منظور جلوگیری از جداشدگی دانه‌ها، ارتفاع سقوط برابر صفر در نظر گرفته‌شده و در صورت نیاز به تراکم بیشتر در طول ساخت نمونه، از اعمال ضربات با الگوی متقارن به قالب استفاده شده است.

نمونه‌ها با وزن مخصوص خشک اولیه‌ی ۱٫۴، ۱٫۴۵، ۱٫۵، ۱٫۵۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب ساخته شده‌اند. این وزن مخصوص متناظر با چگالی ۸، ۲۷، ۴۵ و ۶۱ درصد در ماسه‌ی تمیز هستند. با توجه به خروج آب و کاهش حجم نمونه در حین تحکیم، مقدار نسبت تخلخل نهایی بعد از تحکیم با اندازه‌گیری حجم آب خروجی در حین تحکیم به دقت اندازه‌گیری شده است.

پس از ساخت نمونه، گاز دی‌اکسیدکربن از آن عبور داده شده و سپس جریان آب بدون هوا از پایین به بالای نمونه برقرار شده است. در مرحله‌ی بعد برای رسیدن به اشباع کامل، پس‌فشار از بالا و پایین نمونه به آن اعمال شده است. پس از تحکیم نمونه با فشار مؤثر تحکیمی موردنظر، بارگذاری نمونه آغاز و فشار آب حفزه‌یی، نیروی محوری و میزان کرنش نمونه با حسگرهای مربوط قرائت و توسط دیتا لاگر به رایانه منتقل شده است.

۴. نتایج

در این بخش نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انجام‌شده در این پژوهش ارائه شده است. در ابتدا نمونه‌یی از نمودارهای تنش - کرنش و مسیر تنش ترکیب‌های مختلف ماسه و رس در شرایط مشابه با هم مقایسه شده است. سپس براساس نتایج آزمایش‌های انجام‌شده در تراکم‌ها و فشارهای همه‌جانبه‌ی مختلف، خطوط حالت پایدار ماسه و ترکیبات آن با رس رسم و بررسی شده است. در قسمت بعد عوامل مؤثر در پارامتر b بررسی و به همراه نتایج آزمایش‌ها برای رسیدن به یک رابطه‌ی مناسب برای محاسبه‌ی مقدار b استفاده شده است. نهایتاً علاوه بر کنترل کارکرد رابطه‌ی پیشنهادی برای آزمایش‌های این پژوهش، از نتایج آزمایش‌های انجام‌شده

۲.۴. خطوط حالت پایدار ماسه و ترکیب‌های آن

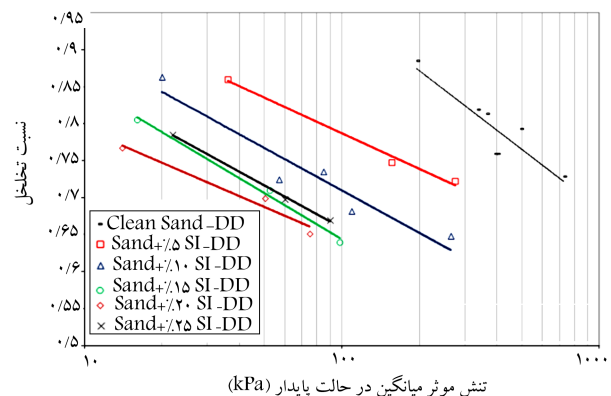
خطوط حالت پایدار، نشان‌دهنده‌ی وضعیت نمونه‌های مورد آزمایش در حالت پایدار است. خط حالت پایدار معمولاً در فضای نیمه لگاریتمی نسبت تخلخل در مقابل تنش مؤثر میانگین رسم می‌شود. براساس میانی حالت بحرانی خاک، نمونه‌هایی که در بالای این خط قرار دارند، تمایل به ایجاد رفتارهای سست و بروز رفتارهای نرم‌شوندگی با کرنش دارند؛ در حالی که نمونه‌هایی که در زیر این خط قرار می‌گیرند، تمایل به بروز رفتارهای سخت‌شوندگی با کرنش دارند. بر همین اساس حرکت خطوط حالت پایدار به سمت پایین به منزله‌ی افزایش پتانسیل روان‌گرایی تلقی می‌شود. در شکل ۷، خطوط حالت پایدار ماسه‌ی تمیز و ترکیبات آن با ۵ تا ۲۵ درصد رس نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش درصد رس تا ۲۰٪، خطوط حالت پایدار به سمت پایین حرکت کرده است. با گذشت درصد ریزدانه از ۲۰٪، خط حالت پایدار مجدداً به سمت بالا حرکت کرده و لذا خط حالت پایدار مربوط به ترکیب ماسه و ۲۵٪ رس بالاتر از خط ماسه و ۲۰٪ رس قرار گرفته است. این موضوع نشان می‌دهد که افزایش درصد رس تا حدود ۲۰٪ موجب افزایش پتانسیل رفتارهای ناپایدار و یا پتانسیل روان‌گرایی شده است. با گذشتن درصد رس از ۲۰٪، رفتار نمونه تغییر یافته و خط حالت پایدار مجدداً به سمت بالا و پایداری بیشتر حرکت کرده است. بنابراین می‌توان یک حد آستانه در حدود ۲۰٪ برای ترکیبات مورد آزمایش در نظر گرفت که با گذشتن درصد ریزدانه از آن، بافت غالب از حالت ماسه‌یی به حالت رسی تبدیل شود.

۳.۴. محاسبه‌ی پارامتر b

همان‌طور که اشاره شده است، با توجه به مشکلات موجود در مورد استفاده از پارامتر نسبت تخلخل (e) و نیز با توجه به بحث حد آستانه، برخی پژوهشگران در پژوهش‌هایی در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۲ نظریه‌یی ارائه کرده‌اند که براساس آن نسبت تخلخل در هر درصد مشخص از ریزدانه باید براساس میزان واقعی تماس‌های بین دانه‌یی و میزان مشارکت ریزدانه‌ها مشخص شود. [۱۱، ۱۲]

براساس نتایج آزمایش‌های انجام‌شده، در این بخش تلاش خواهد شد تا روشی مناسب برای محاسبه‌ی پارامتر b ارائه شود، به طوری که هم مقادیر آن متناسب با مقدار درصد ریزدانه باشد و هم مقدار e_{eq} به دست آمده بتواند منجر به ارائه‌ی خط حالت پایدار واحد شود.

قبلاً اشاره شده است که پژوهشگران مختلفی تلاش کرده‌اند تا پارامتر b را به صورت یک آنالیز به دست آورند، به طوری که همه‌ی نقاط حالت پایدار حاصل از



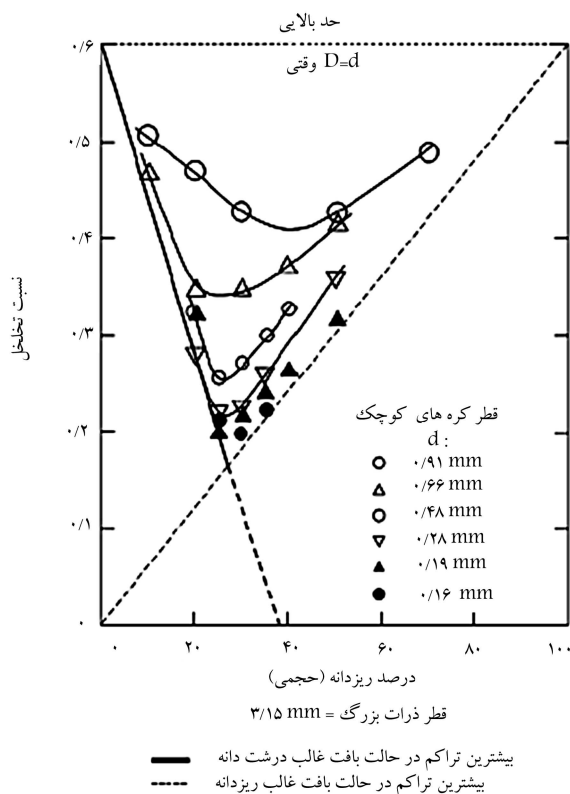
شکل ۷. خطوط حالت پایدار ماسه و ترکیبات آن با رس در فضای نیمه لگاریتمی.

آزمایش روی ترکیب‌های با درصد ریزدانه‌های مختلف روی یک خط قرار گیرند و روند یکسانی را نشان دهند. نتایج به دست آمده در مورد پارامتر b عمدتاً اشکالاتی دارند که از جمله‌ی آنها می‌توان به عدم تناسب مقدار پیشنهادی برای b با مقدار درصد ریزدانه‌ی موجود اشاره کرد، به طوری که گاهی مقادیر بسیار کمی از b برای درصد ریزدانه‌های زیاد و بر عکس پیشنهاد شده است. همچنین می‌توان به مقادیر منفی به دست آمده برای پارامتر b اشاره کرد، که مفهوم فیزیکی ندارند. برای پیدا کردن رابطه‌ی مناسب برای پارامتر b ، باید نحوه‌ی قرارگیری ریزدانه‌ها در بین درشت‌دانه‌ها و عوامل مؤثر در آن مورد بررسی قرار گیرد. همچنین لازم است تا نحوه‌ی تغییرات پارامتر b با پارامترهای تأثیرگذار در آن مانند نسبت قطر دانه‌ها و نیز درصد ریزدانه‌ی موجود به دست آورده شود.

Lade و همکاران (۱۹۹۸)، [۱۵] براساس مطالعات McGeary (۱۹۶۸)، [۱۶] در مورد خصوصیات مکانیکی و تراکمی دانه‌های کروی، نمودار شکل ۸ را ارائه کرده‌اند، که نشان‌گر تغییرات نسبت تخلخل با درصد ریزدانه و نسبت قطر دانه‌های درشت به ریزاست و شکل ۹ نیز براساس نمودار شکل ۸ رسم شده است. با توجه به شکل ۹، می‌توان این نکات را نتیجه‌گیری کرد:

-- اگر نسبت قطر دانه‌ها ($\frac{D}{d}$)، بزرگ‌تر از حدود ۷ باشد، تقریباً بیشتر دانه‌های ریز در بین دانه‌های درشت تر قرار می‌گیرند و آنها را بر می‌کنند، لذا نسبت تخلخل به حالت کمیته‌ی آن نزدیک می‌شود.

-- اگر نسبت ($\frac{D}{d}$) کوچک‌تر از حدود ۴٫۷ باشد، تعداد قابل توجهی از ریزدانه‌ها در محل تماس‌های بین دانه‌یی قرار می‌گیرند و لذا نسبت تخلخل به شدت زیاد می‌شود. در این حالت به علت نزدیک شدن قطر دانه‌ها به هم، بیشتر دانه‌های



شکل ۸. تأثیر درصد ریزدانه و نسبت قطر در نسبت تخلخل ترکیب درشت‌دانه و ریزدانه. [۱۵]

با در نظر گرفتن همه‌ی نکات ذکر شده و براساس نتایج آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، رابطه‌ی ۳ برای محاسبه‌ی پارامتر b پیشنهاد می‌شود:

$$b = m \cdot \left[\frac{r}{k} \cdot \left(\frac{F_c}{F_{th}} \right) \right]^n \cdot \left(\frac{F_c}{F_{th}} \right)^{(k)} \quad (3)$$

که در آن، F_c درصد ریزدانه؛ F_{th} درصد ریزدانه‌ی حد آستانه؛ $r = X^{-1} = \frac{d_b}{D_{1.1}}$ ؛ $k = 1/PI$ و m و n نیز دو ثابت تجربی هستند. برای محاسبه‌ی این پارامترها، می‌توان با استفاده از مقادیر مختلف آنها مقدار نسبت تخلخل هم‌ارز را با استفاده از رابطه‌ی ارائه شده و سایر پارامترهای به دست آورده شده محاسبه و خطوط حالت پایدار را رسم کرد. با توجه به هدف اصلی رابطه‌ی ارائه شده که به دست آوردن یک روند یکسان برای ترکیبات مختلف ماسه و ریزدانه است، مقدار پارامترهای مناسب زمانی به دست خواهند آمد که خطوط حالت پایدار ترکیبات مختلف ماسه و ریزدانه را بر هم منطبق کند. در این پژوهش مقدار پارامتر m برابر با ۰٫۶ و مقدار پارامتر n برابر با ۰٫۵ به دست آمده است. این تذکر لازم است که تخمین اولیه‌ی این دو پارامتر براساس ایجاد رابطه‌ی مطلوب بین b و نسبت X تخمین زده شده است.

در رابطه‌ی ۳، قسمت اول باعث ایجاد شکل کلی نمودار $b - X$ می‌شود و قسمت دوم نیز موجب افزایش کارایی رابطه و نیز تأثیر بهتر پارامتر PI می‌شود. همچنین براساس رابطه‌ی به دست آمده، زمانی که درصد ریزدانه کم می‌شود، مقدار پارامتر b هم به سمت صفر میل می‌کند، که منطقی است.

مقدار حد آستانه نیز با توجه به نتایج آزمایش‌ها قابل تعیین است. رهنما و همکاران (۲۰۰۸) با بررسی نتایج پژوهش‌های مختلف و حد آستانه‌ی به دست آمده در آنها، رابطه‌ی ۴ را برای محاسبه‌ی حد آستانه از روی نسبت تخلخل و نسبت قطر دانه‌ها ارائه کرده‌اند: [۱۷، ۱۸]

$$f_{th} = 0.14 \left(\frac{1}{1 + e^{\alpha - \beta X}} + \frac{1}{X} \right) \quad (4)$$

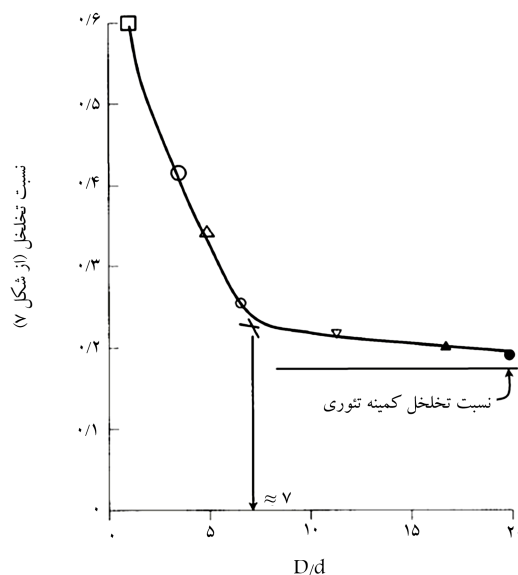
که در آن، α و β ضرایبی هستند که شکل لازم برای تغییرات درصد ریزدانه‌ی حد آستانه را در مقابل نسبت قطر دانه‌ها تأمین می‌کنند. با انتخاب این ضرایب برابر صفر، مقدار حد آستانه برابر با ۲۱٪ به دست آمده است که با نتایج به دست آمده از آزمایش‌های این پژوهش مطابقت دارد.

با استفاده از رابطه‌ی ارائه شده برای محاسبه‌ی پارامتر b ، در شکل ۱۰ تغییرات b در مقابل X برای درصد ریزدانه‌های مختلف و در شکل ۱۱ روند نرمالیزه شده‌ی آن نسبت به درصد ریزدانه ارائه شده است. شکل ۱۲ نیز نشان‌گر تغییرات پارامتر b در مقابل درصد ریزدانه براساس نتایج آزمایش‌های این پژوهش است.

مشاهده می‌شود که نمودارهای به دست آمده تغییرات و روند مورد نظر را دارند، به عنوان مثال با افزایش نسبت قطر دانه‌ها مقدار b با تابع مورد نظر کاهش می‌یابد و با افزایش درصد ریزدانه، مقدار b هم افزایش می‌یابد. لزوم وجود این روند و تغییرات در نکات قبلی توضیح داده شده است.

۴.۴. بررسی صحت روابط ارائه شده و امکان تولید خط حالت پایدار واحد

برای بررسی کارکرد رابطه‌ی پیشنهادی، نقاط حالت پایدار ارائه شده با استفاده از پارامتر b پیشنهادی و نسبت تخلخل هم‌ارز مجدداً رسم و در شکل ۱۳ ارائه شده‌اند. برای هر نقطه‌ی موجود روی خطوط حالت پایدار، پارامتر b و سپس نسبت تخلخل هم‌ارز متناظر با آن محاسبه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در شکل ۱۳ علاوه بر نقاط حالت پایدار مربوط به نسبت تخلخل هم‌ارز، خطوط حالت پایدار



شکل ۹. تأثیر درصد ریزدانه و نسبت قطر در نسبت تخلخل ترکیب درشت دانه و ریزدانه. [۱۵]

ریز در محل تماس‌های دانه‌های درشت و نه در بین آنها قرار می‌گیرند، لذا نسبت تخلخل به سرعت افزایش می‌یابد.

در این پژوهش در راستای ارائه‌ی یک رابطه‌ی مناسب برای محاسبه‌ی پارامتر b ، این نکات مورد توجه قرار گرفته است:

- تغییرات b و نسبت تخلخل در مقابل $(\frac{D}{d})$ باید به یکدیگر شبیه باشند، چرا که افزایش نسبت تخلخل نشان‌دهنده‌ی این است که دانه‌های ریز کمتری در فضای خالی بین درشت‌دانه‌ها قرار گرفته‌اند و بیشتر آنها در تماس‌های بین دانه‌ی مشارکت دارند. در این حالت طبعاً پارامتر b هم افزایش یافته است. به همین ترتیب عواملی که منجر به کاهش نسبت تخلخل شوند، منجر به کاهش پارامتر b نیز خواهند شد.
- ماهیت ذرات رسی و چسبندگی آنها موجب می‌شود که افزایش جزئی در درصد رس موجب تغییرات محسوس در بافت نمونه و در نوع رفتار شود. بنابراین پارامتر b باید به نحوی ارائه شود که با افزایش اولیه‌ی درصد رس، مقدار آن افزایش محسوسی پیدا کند و در ادامه روند افزایشی آن کندتر شود. به عبارت ساده‌تر، تغییرات آن باید با نتایج به دست آمده در مورد تغییرات رفتاری و نمودارهای ارائه شده برای تنش - کرنش و مسیر تنش مطابقت کند.
- رابطه‌ی ارائه شده برای b ، باید از لحاظ ریاضی ساده باشد، به طوری که امکان تعمیم و گسترش آن به سایر نتایج موجود در مورد خاک‌ها وجود داشته باشد.
- رابطه‌ی ارائه شده باید در برگزیده‌ی کلیه‌ی عوامل تأثیرگذار در مشخصات رفتاری ماسه‌های رس‌دار باشد، که از آن جمله می‌توان به مقدار شاخص حالت خمیری، نسبت قطر دانه‌های درشت به دانه‌های ریز و نیز حد آستانه‌ی به دست آمده اشاره کرد.

- با توجه به اینکه هدف نهایی از به دست آوردن پارامتر b ، به دست آوردن نسبت تخلخل هم‌ارز و آنگاه به دست آوردن خط حالت پایدار واحد برای همه‌ی ترکیبات ماسه با درصد‌های مختلف از ریزدانه است، رابطه‌ی ارائه شده باید تمامی نقاط حالت پایدار را روی یک روند واحد مستقل کند.

درصدهای مختلف ریزدانه با استفاده از نسبت تخلخل معمولی نیز مجدداً ارائه شده‌اند.

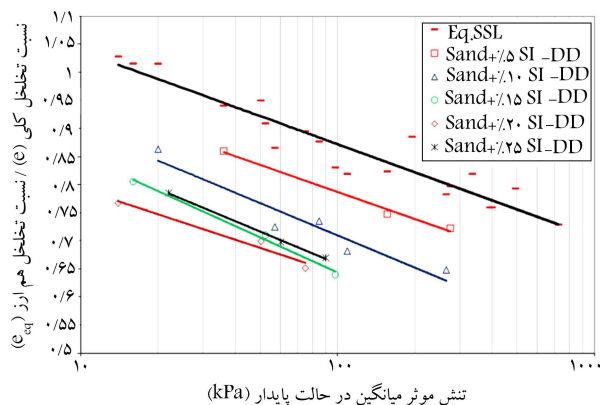
می‌توان مشاهده کرد که تمامی نقاطی که مربوط به نسبت تخلخل هم‌ارز هستند و درصد ریزدانه‌ی زیر حد آستانه دارند، روند یکسانی را نشان می‌دهند که منطبق بر روند به‌دست‌آمده برای ماسه‌ی تمیز است. بدیهی است که در مورد ماسه‌ی تمیز با توجه به صفر بودن پارامتر b ، نقاط حالت پایدار با استفاده از نسبت تخلخل معمولی و نسبت تخلخل هم‌ارز یکی خواهند شد.

این موضوع نشان می‌دهد که رابطه‌ی ارائه‌شده برای پارامتر b می‌تواند منجر به تولید یک خط حالت پایدار واحد برای کلیه‌ی ترکیب‌های ماسه و ریزدانه‌ی مورد آزمایش در زیر حد آستانه شود. این خط حالت پایدار واحد در شکل ۱۴ به نحو مناسب‌تری ارائه شده است.

۵.۴. صحت‌سنجی رابطه‌ی پیشنهادی با استفاده از نتایج

آزمایش‌های پژوهش‌های پیشین

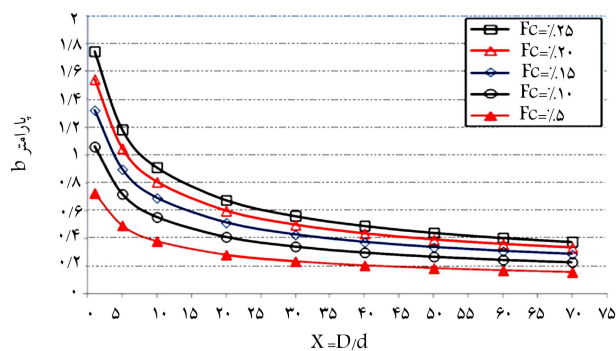
در این بخش براساس نتایج به‌دست‌آمده در یکی از پژوهش‌های پیشین (۲۰۱۲)، [۱۹] رابطه‌ی پیشنهادی مورد صحت‌سنجی قرار گرفته است. پژوهش مذکور روی ریزدانه با شاخص خمیری حدود ۱۱٪ و با استفاده از روش نمونه‌سازی تراکم مرطوب^۶ انجام شده است. با توجه به تفاوت‌های رفتاری زیاد در روش‌های نمونه‌سازی ریزش خشک و تراکم مرطوب، می‌توان از نتایج پژوهش ذکرشده، [۱۹] به عنوان یک معیار بسیار مناسب برای صحت‌سنجی رابطه‌ی پیشنهادی در این پژوهش استفاده کرد. شایان ذکر است که روش ریزش خشک معمولاً منجر به رفتارهای سخت‌شوندگی شدید با کرنش می‌شود، در حالی که روش تراکم مرطوب منجر به رفتارهای نرم‌شوندگی شدید با کرنش خواهد شد. جزئیات بیشتر از نتایج پژوهش مذکور، [۱۹] در مرجع [۲۰] نیز قابل دسترسی است. مشخصات مصالح ریزدانه‌ی مورد استفاده در پژوهش ذکرشده، [۱۹] در جدول ۳ ارائه شده است. مصالح ماسه‌ی نیز ماسه‌ی ۱۶۱ با دانه‌بندی مشابه همین پژوهش بوده است.



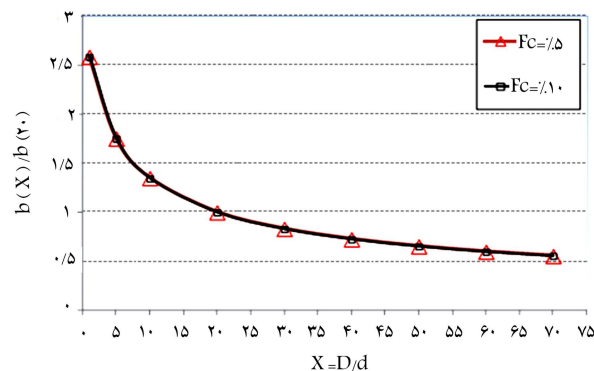
شکل ۱۴. مقایسه‌ی خط حالت پایدار نسبت تخلخل هم‌ارز با خطوط حالت پایدار درصد‌های مختلف ریزدانه با استفاده از نسبت تخلخل معمولی.

جدول ۳. مشخصات رس مورد استفاده در پژوهش انجام‌شده در سال ۲۰۱۲. [۱۹]

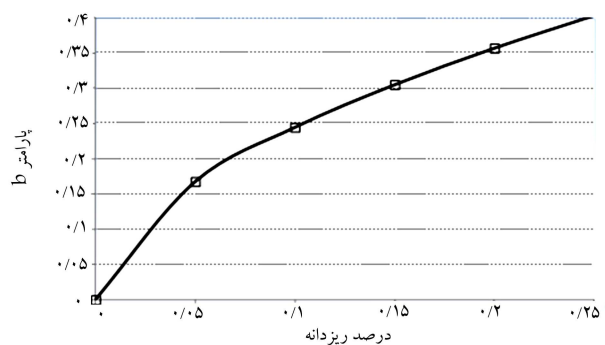
نوع رس	D_{50}	G_s	PI (%)	PL (%)	LL (%)
رس درون‌گر	۰٫۰۰۶۲	۲٫۶۴	۱۱	۱۷	۲۸



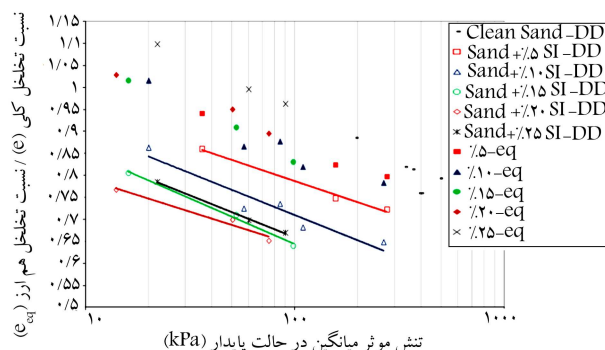
شکل ۱۰. تغییرات پارامتر b در مقابل X برای درصد ریزدانه‌های مختلف.



شکل ۱۱. تغییرات پارامتر b نرمالیزه‌شده نسبت به درصد ریزدانه در مقابل X .



شکل ۱۲. تغییرات پارامتر b در مقابل درصد ریزدانه براساس نتایج آزمایش‌های این پژوهش و رابطه‌ی پیشنهادی.



شکل ۱۳. نقاط حالت پایدار درصد‌های مختلف ریزدانه با استفاده از نسبت تخلخل معمولی و نسبت تخلخل هم‌ارز.

• با انجام آزمایش روی ماسه‌ی تمیز که به مراتب می‌تواند آسان‌تر و با زمان و هزینه‌ی کمتری انجام شود، خط حالت پایدار آن را به‌دست آورد و سپس با استفاده از رابطه‌ی پیشنهادی، آن را به خط حالت پایدار ترکیب ماسه و درصد دلخواه از رس تبدیل کرد.

• مشابه حالت فوق، می‌توان از روی خط حالت پایدار یک ترکیب دلخواه از ماسه و رس، خط حالت پایدار ترکیبات دیگر ماسه و رس را به‌دست آورد. برای این کار ابتدا خط حالت پایدار موجود را باید به خط حالت پایدار ماسه‌ی تمیز تبدیل کرد و سپس از روی آن خط حالت پایدار هر ترکیب دلخواه دیگر را به‌دست آورد.

• به جای انجام آزمایش‌های مختلف روی ماسه و ترکیبات آن با رس، می‌توان با تعداد محدودی آزمایش خط حالت پایدار ماسه‌ی تمیز را به‌دست آورد و با استفاده از رابطه‌ی پیشنهادی آن را به خط حالت پایدار هر ترکیب دلخواه دیگر تبدیل کرد.

یادآور می‌شود که با استفاده از خطوط حالت پایدار ماسه و ترکیبات آن با ریزدانه و تغییرات پارامترهای تأثیرگذار در معادلات آنها، می‌توان تغییرات سطح فروپاشی و نیز تغییرات سطوحی مانند سطح مرزی حالت را مورد بررسی قرار داد. همچنین می‌توان پارامترهای حالت مانند پارامتر حالت b ، q ، q_0 را از روی خطوط حالت پایدار محاسبه کرد و با توجه به تغییرات آنها تغییرات پتانسیل روان‌گرایی را مورد بررسی قرار داد.

۵. نتیجه‌گیری

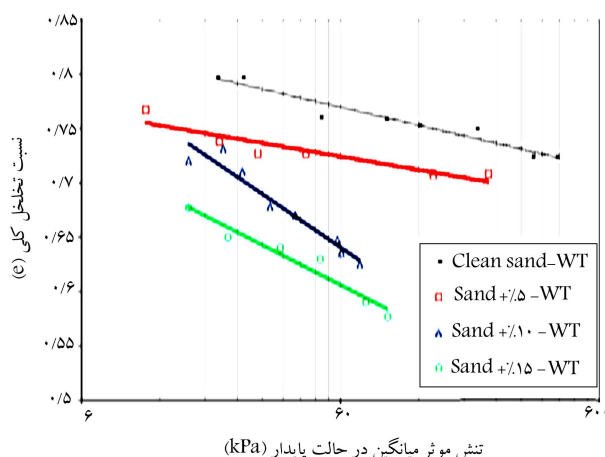
در راستای به‌دست آوردن یک چهارچوب واحد برای تفسیر رفتار حالت بحرانی خاک، تعداد زیادی آزمایش سه‌محوری روی ترکیبات ماسه با ۰ تا ۲۵ درصد رس، فشار همه‌جانبه‌ی ۱۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال و تراکم متغیر ۱/۴ تا ۱/۵۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب (معادل چگالی حدود ۸ تا ۶۰ درصد) انجام شده است. مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده به این شرح هستند:

• براساس نتایج آزمایش‌های انجام شده، استفاده از نتایج پژوهش‌های پیشین و نیز بررسی ریاضی روابط مختلف، یک رابطه‌ی جدید و کاربردی برای محاسبه‌ی مقدار پارامتر b و تعیین درصد مشارکت ریزدانه‌ها در تعیین نوع رفتار ارائه شده است. همچنین با استفاده از نتایج پژوهش‌های دیگری که روی مصالح متفاوت و با روش نمونه‌سازی متفاوت انجام شده‌اند، رابطه‌ی پیشنهادی صحت‌سنجی شده است.

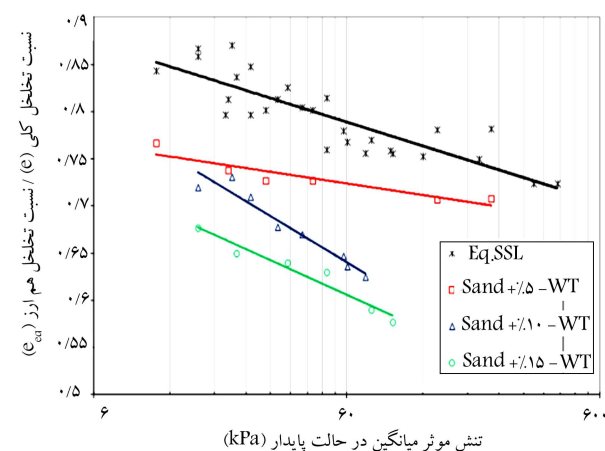
• تحلیل نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که رابطه‌ی پیشنهادی می‌تواند خطوط حالت پایدار مربوط به ترکیبات ماسه با درصد‌های مختلف از رس را به یک خط حالت پایدار واحد تبدیل کند.

• با استفاده از انجام تعداد محدودی آزمایش می‌توان خط حالت پایدار یکی از ترکیبات موردنظر را به‌دست آورد و سپس با استفاده از رابطه‌ی پیشنهادی آن را به خطوط حالت پایدار سایر ترکیبات تبدیل کرد.

• حرکت خطوط حالت پایدار، نشان‌دهنده‌ی افزایش پتانسیل رفتارهای ناپایدار با افزایش درصد ریزدانه‌ی خمیری است. همچنین یک حد آستانه در حدود ۲۰٪ برای ترکیبات مورد آزمایش پیش‌بینی شده است، که منجر به تغییر یافتن از حالت ماسه‌یی به حالت رسی می‌شود.



شکل ۱۵. خطوط حالت پایدار ماسه‌ی تمیز و ترکیبات رس دار با استفاده از نسبت تخلخل معمولی براساس نتایج [۱۹]



شکل ۱۶. خط حالت پایدار هم‌ارز ناشی از رابطه‌ی پیشنهادی براساس نتایج [۱۹]

در شکل ۱۵، خطوط حالت پایدار ماسه‌ی تمیز و ترکیبات آن با ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد ریزدانه براساس نتایج مرجع [۱۹] ارائه شده است. به منظور بررسی کاربرد رابطه‌ی پیشنهادی، نسبت تخلخل هم‌ارز همه‌ی نقاط با استفاده از رابطه‌ی پیشنهادی محاسبه و در شکل ۱۶ مجدداً ارائه شده است. می‌توان مشاهده کرد که با وجود تغییر در نوع روش نمونه‌سازی و نوع مصالح، تمامی نقاط مربوط به ماسه‌ی تمیز و نیز ترکیبات رس‌دار تقریباً یک روند واحد را نشان می‌دهند که با Eq.SSL نشان داده شده است. این موضوع نشان‌دهنده‌ی کارایی بالا و صحت کاربرد رابطه‌ی پیشنهادی در حالتی است که مصالح مورد استفاده و حتی روش نمونه‌سازی به نحو قابل توجهی با این پژوهش متفاوت باشند.

۶.۴. کاربرد خط حالت پایدار واحد

براساس آنچه گفته شده است، مشاهده شده است که با استفاده از رابطه‌ی پیشنهادی می‌توان خطوط حالت پایدار مربوط به ماسه و ترکیبات آن با درصد‌های مختلف از رس را تبدیل به یک خط حالت پایدار کرد، که متناظر با خط حالت پایدار ماسه‌ی تمیز است. به این ترتیب می‌توان:

پانوشتها

1. Northridge
2. Kokaali
3. Chi Chi
4. inter granular void ratio
5. equivalent void ratio
6. wet tamping

منابع (References)

1. Bray, J.D. and et.al. "Subsurface characterization at ground failure sites in adapazari, turkey", *Journal of Geotechnical and Geo Environmental Eng.*, **130**(7), pp. 673-685 (2004a).
2. Chu, D.B. and et.al. "Documentation of soil conditions at liquefaction and non liquefaction sites from 1999 chi-chi (Taiwan) earth quake", *Soil Dyn. Earth Quake Eng.*, **24**(9-10), pp. 647-657 (2004).
3. Gratchev, I.B., Sassa, K., Osipov, V.I., Fukuoka, H. and Wang, G. "Undrained cyclic behavior of bentonite-sand mixtures and factors affecting it", *Geotech. Geol. Eng.*, **25**(3), pp. 349-367 (2007).
4. Bouferra, R. and Shahrour, I. "Influence of fines on the resistance to liquefaction of a clayey sand", Laboratoire de Me'canique de Lille, University of Sciences and Technologies of Lille, Polytech Lille, France (2003).
5. Derakhshandi, M., Rathje, E.M., Hazirbaba, K. and Mirhosseini, S.M. "The effect of plastic fines on the pore pressure generation characteristics of saturated sands", *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, **28**(5), pp. 376-386 (2008).
6. Boulanger, R.W. and Idriss, I.M. "Liquefaction susceptibility criteria for silts and clays", *J. Geotech. Geoenviron Eng.*, *ASCE*, **132**(11), pp. 1413-26 (2006).
7. Sadek, S. and Saleh, M. "The effect of carbonaceous fines on the cyclic resistance of poorly graded sands", *Geotech. Geol. Eng.*, **25**, pp. 257-264 (2007).
8. Park, S.S. and Kim, Y.S. "Liquefaction resistance of sands containing plastic fines with different plasticity", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **139**(5), pp. 825-830 (2012).
9. Pitman, T.D., Robertson, P.K. and Segoo, D.C. "Influence of fines on the collapse of loose sands", *Canadian Geotechnical Journal*, **31**(5), pp. 728-739 (1994).
10. Thevanayagam, S. and Mohan, S. "Intergranular state variables and stress-strain behaviour of silty sands", *Geotechnique*, **50**(1), pp. 1-23 (2000).
11. Thevanayagam, S., Shenthan, T., Mohan, S. and Liang, J. "Undrained fragility of clean sands, silty sands, and sandy silts", *J. Geotech. Geoenviron Eng.*, **128**(10), pp. 849-859 (2002).
12. Ni, Q., Tan, T.S., Dasari, G.R. and Hight, D.W. "Contribution of fines to the compressive strength of mixed soils", *Geotechnique*, **54**(9), pp. 561-56 (2004).
13. Zlatovic', S. and Ishihara, K. "On the influence of non-plastic fines on residual strength", *Proc. IS-Tokyo '95, 1st Int. Conf. on Earthquake Geotech. Engng.*, Tokyo, pp. 239-244 (1995).
14. Yang, S.L., Lacasse, S. and Sandven, R.F. "Determination of the transitional fines content of mixtures of sand and non-plastic fines", *Geotechnical Testing Journal*, **29**(2), pp. 102-107 (2006a).
15. Lade, P.V., Liggio, C.D. and Yamamuro, J.A. "Effects of non-plastic fines on minimum and maximum void ratios of sand", *Geotechnical Testing Journal*, **21**(4), pp. 336-347 (1998).
16. McGeary, R.K. "Mechanical packing of spherical particles", *Journal of the American Ceramic Society*, **44**(10), pp. 513-522 (1961).
17. Rahman, M.M., Lo, S.R. and Gnanendran, C.T. "On equivalent granular void ratio and steady state behavior of loose sands with fines", *Can. Geotech.*, **45**(10), pp. 1439-1456 (2008).
18. Rahman, M.M. and Lo, S.R. "The prediction of equivalent granular steady state line of loose sand with fines", *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, **3**(3), pp. 179-190 (2008).
19. Shahaboddin, S. and Naeemifar, O. "The collapse surface characteristics of clayey sands", *Proceedings of the ICE- Geotechnical Engineering Journal*, **165**(6), pp. 379-390 (2012).
20. Naeemifar, O. and Yasrobi, S.S. "A study of effective factors on the behavioural characteristics of clayey sands", *Sharif Journal Civil Engineering*, **26-2**(3), pp. 33-44 (2011).
21. Been, G. and Jefferies, M.G. "A state parameter for sands", *Geotechnique*, **35**(2), pp. 99-112 (1985).