

بررسی اندرکنش بین دانه ای برای رسیدن به حالت پایدار هم ارز

امید نعیمی فرا^۱، سید شهاب الدین یثربی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران (ژئوتکنیک)- دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست- دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

*Yasrobis@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۶/۲۲]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۱/۲۹]

چکیده- امکان ایجاد خط حالت پایدار هم‌ارز برای رسیدن به یک چهارچوب واحد برای تفسیر رفتار حالت بحرانی ماسه‌های رس‌دار بررسی شده است. در این راستا بحث چگونگی اندرکنش ماسه و ریزدانه و شکل مشارکت ریزدانه‌ها در تماس‌های بین دانه‌ای برای رسیدن به مقدار نسبت تخلخل هم‌ارز مورد توجه قرار گرفته است. با انجام آزمایش‌های سه‌محوری سیکلیک روی ترکیب ماسه با درصد‌های مختلف از ریزدانه خمیری، محاسبه تغییرات مقاومت روانگرایی برای ترکیب مختلف، بررسی مدل تماس بین دانه‌ها و سپس آنالیز ریاضی نتایج، رابطه کاربردی و مفیدی برای ارزیابی میزان مشارکت ریزدانه‌ها در تماس‌های بین دانه‌ای و در نتیجه مقدار نسبت تخلخل هم‌ارز پیشنهاد شده است. علاوه بر افزایش ناپایداری ترکیب با افزایش درصد ریزدانه خمیری، نتایج همچنین نشان داده است که با استفاده از رابطه پیشنهادی می‌توان خطوط حالت پایدار ترکیبات مختلف ماسه و رس را به یک خط واحد هم‌ارز تبدیل کرد. به این ترتیب با انجام تعداد محدودی آزمایش روی ماسه تمیز، خطوط حالت پایدار ماسه و رس را به یک خط واحد دلخواه از ریزدانه قابل پیشبینی است. برای اطمینان از عمومیت رابطه پیشنهادی، صحت آن با استفاده از نتایج پژوهش‌های دیگر سنجیده و تایید شده است.

واژگان کلیدی: خط حالت پایدار، سه محوری سیکلیک، نسبت تخلخل هم ارز

۱- مقدمه

بحث بالا با استفاده از آزمایش‌های استاتیکی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان مثال حائری و حمیدی در ۲۰۰۵ بحث وقوع روانگرایی را با استفاده از روش حالت پایدار بررسی کردند [۷]. همچنین یثربی در ۱۳۷۶ علاوه بر بحث درصد ریزدانه‌ها، تاثیر شکل و تیزگوشگی یا گردگوشگی ریزدانه‌ها را نیز مورد بررسی قرار داد [۸]. نتایج تعداد زیادی از پژوهش‌ها به این موضوع منتهی شده است که با افزایش ریزدانه عموماً پتانسیل بروز رفتارهای ناپایدار افزایش پیدا کرده و سپس با گذشتن ریزدانه از یک حد آستانه دوباره نمونه به سمت پایداری حرکت می‌کند. حد آستانه در حقیقت درصد ریزدانه‌ای است که با گذشتن از آن بافت غالب نمونه از حالت ماسه‌ای به حالت رسی تغییر پیدا می‌کند.

پدیده‌هایی مانند روانگرایی مربوط به بروز حالت بحرانی در ماسه، بروز رفتارهای ناپایدار و رخداد کرنش‌های قابل توجه در نهشته‌های ماسه‌ای است. حالت بحرانی زمانی رخ می‌دهد که ماسه در تنش برشی ثابت و بدون تغییر قابل توجه در مقدار تنش یا فشار آب حفره‌ای به تغییر شکل خود ادامه می‌دهد. پژوهش‌های انجام شده در زمینه رفتارهای ناپایدار ماسه‌های رس‌دار بیشتر روی تاثیر درصد ریزدانه و یا تاثیر پلاستیسیته متمرکز بوده است. شهرور در ۲۰۰۳، بولانگر در ۲۰۰۶، گرتچو در ۲۰۰۷، ماه‌صالح در ۲۰۰۷، درخشندی در ۲۰۰۸ و پارک و کیم در ۲۰۱۲ از جمله پژوهشگرانی بوده‌اند که در این زمینه پژوهش انجام داده‌اند [۶، ۵، ۴، ۳، ۲، ۱].

بسته به میزان مشارکت ریزدانه‌ها، تنها درصدی از آن‌ها را می‌توان جزئی از فضای خالی فرض کرد و بقیه در محل تماس بین دانه‌های درشت تر قرار می‌گیرند. اگر درصد مشارکت ریزدانه‌ها در تماس‌های بین دانه‌ای را با پارامتر b نشان دهیم، می‌توان برای این حالت نسبت تخلخل بین دانه‌ای را به شکل مناسب‌تری با رابطه (۲) نشان داد:

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

نسبت تخلخل بین دانه‌ای در این حالت معمولاً نسبت تخلخل هم ارز (Equivalent Void Ratio) نامیده می‌شود.

اکنون سوال اساسی موجود این است که چگونه باید میزان مشارکت ریزدانه‌ها را در تماس‌های بین دانه‌ای در درصد‌های مختلف ریزدانه محاسبه کرد.

نی و همکاران در ۲۰۰۴ نتایج شکل (۱) را برای مقایسه تغییرات مقاومت زهکشی نشده با نسبت تخلخل بین دانه‌ای برای ماسه تمیز و ترکیبات آن با رس کائولینیت و سیلیس ارائه کردند [۱۱]. در شکل (۲) همان نتایج قبلی این بار با استفاده از نسبت تخلخل هم‌ارز ارائه شده است. برای ترکیبات ماسه با کائولینیت مقدار b برابر با $0/8-$ و برای سیلیس برابر با $0/7$ فرض شده است. مشاهده می‌شود که همه نتایج این بار روی یک خط قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر نوع و درصد ریزدانه تاثیری در جابه‌جایی خط مورد نظر نداشته است.

همچنین نشان داده شد که به صورت مشابه و فرض مقدار b برابر با $0/25$ می‌توان خطوط حالت پایدار ناشی از نتایج زلاتوویچ و ایشیهارا (۱۹۹۵) را نیز به یک خط مستقل از درصد ریزدانه تبدیل کرد [۱۱].

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

یکی از پارامترهای تاثیرگذار در رفتار نمونه که در پژوهش‌های گذشته عموماً از آن به عنوان معیاری برای نشان دادن تراکم نمونه استفاده شده است، نسبت تخلخل است. آنچه در حقیقت رفتار نمونه را تعیین می‌کند، میزان تماس‌های بین دانه‌ها و موقعیت آن‌ها نسبت به یکدیگر است. اما نمی‌توان انتظار داشت که نسبت تخلخل بتواند به شکل مناسبی بیانگر مقدار و توزیع تماس‌های بین دانه‌ای در تمام طول مرحله برش باشد. در ترکیب ماسه و ریزدانه هرچند ممکن است نسبت تخلخل ثابت بماند، ولی بسته به اینکه ریزدانه‌ها در نقاط تماس بین درشت دانه‌ها قرار گیرند و یا در فضاهای خالی بین آنها قرار گیرند، نقش متفاوتی خواهند داشت بنابراین رفتار متفاوتی هم مورد انتظار خواهد بود. این موضوع نکته‌ای است که تاکنون کمتر در ضمن پژوهش‌ها به آن توجه شده است.

با توجه به مشکلات فوق، توانایاگام و همکاران در ۲۰۰۰ و ۲۰۰۲ نظریه‌ای ارائه کردند که بر اساس آن نسبت تخلخل در هر درصد مشخص از ریزدانه باید بر اساس میزان واقعی تماس‌های بین‌دانه‌ای مشخص شود [۹ و ۱۰]. میزان تماس‌های بین دانه‌ای نیز بر اساس مقدار درصد ریزدانه‌ها و نیز موقعیت قرارگیری آن‌ها نسبت به درشت دانه‌ها قابل تعیین است. اگر e نسبت تخلخل کلی نمونه و f_c درصد ریزدانه موجود باشد، نسبت تخلخل اسکلت ماسه یا نسبت تخلخل بین دانه‌ای (Inter granular void ratio) را برای درصد ریزدانه کمتر از حد آستانه می‌توان با رابطه (۱) نشان داد:

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

رابطه بالا زمانی بهترین کارایی را خواهد داشت که تمامی ریزدانه‌ها در فضای خالی بین درشت دانه‌ها قرار گرفته 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 درشت دانه‌ها قرار می‌گیرند پس درصد مشارکت آن‌ها در رفتار نمونه بیشتر خواهد شد. بدیهی است که در این حالت

قابل توجه و یا مقادیر منفی برای **b** اشاره کرد که دارای مفهوم فیزیکی نیست.

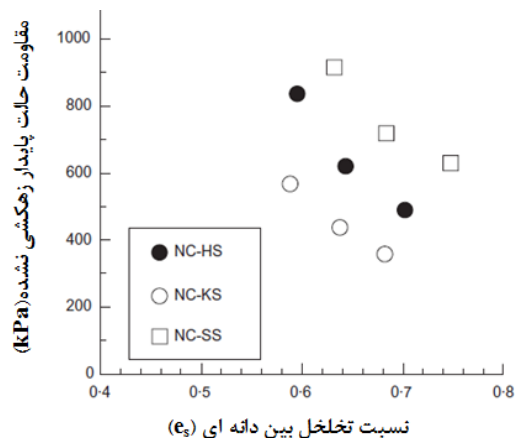
نکته دوم آنکه در نتایج ارائه شده تاکنون خطوط حالت پایدار با استفاده از آزمایش‌های زیاد به دست آمده و سپس با استفاده از پارامتر **b** مناسب روی هم منطبق شده اند، در حالی که اگر بتوان رابطه‌ای برای محاسبه پارامتر **b** ارائه کرد، می‌توان بدون انجام آزمایش زیاد، خطوط حالت پایدار را از یکدیگر نتیجه‌گیری کرد. از این‌رو حالت مناسب‌تر وقتی به وجود می‌آید که بتوان یک رابطه مناسب برای محاسبه پارامتر **b** ارائه کرد، به شکلی که برای تمامی حالات قابل استفاده باشد.

پژوهش‌ها نشان می‌دهد که علاوه بر درصد ریزدانه عوامل دیگری نیز روی مقدار پارامتر **b** تاثیرگذار است که از جمله آن‌ها می‌توان به نوع دانه‌بندی ذرات درشت دانه و ریزدانه اشاره کرد. به ویژه در مورد ریزدانه‌های خمیری، چسبندگی باعث می‌شود که تمایل بیشتری به درگیری با یکدیگر و با ذرات درشت تر به وجود آید بنابراین مشارکت بیشتری نیز در تعیین چگونگی تماس بین ذرات دانه‌ها را انتظار داریم. بنابراین تخمین درست پارامتر **b** برای ترکیبات ماسه و ریزدانه خمیری اهمیت خاصی پیدا می‌کند.

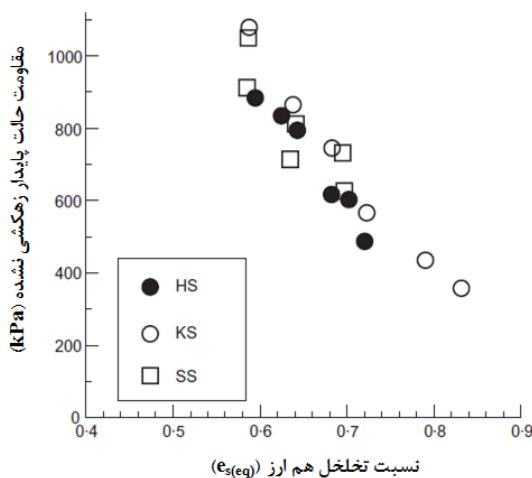
در ادامه با انجام آزمایش‌های مناسب تلاش شده است تا امکان ارائه یک رابطه مناسب برای محاسبه مقدار **b** و نیز شکل کاربرد آن بررسی شود.

۲- مشخصات مصالح

برای مصالح ماسه‌ای این آزمایش‌ها از ماسه استاندارد سیلیسی شکسته فیروزکوه استفاده شده است که به اختصار ماسه ۱۶۱ نامیده می‌شود. این ماسه دارای رنگ زرد متمایل به طلایی بوده و مشخصات بیشتر آن در جدول (۱) آمده است. ریزدانه خمیری مورد استفاده، رس مصنوعی با نام تجاری SI است که مشخصات بیشتر آن در جدول (۲) آمده است. در شکل (۳) منحنی‌های دانه‌بندی مصالح مورد استفاده ارائه شده است.



شکل (۱) تغییرات مقاومت زهکشی نشده با نسبت تخلخل بین دانه‌ای برای ترکیبات ماسه با رس کائولینیت و سیلیس [۱۱]



شکل (۲) تغییرات مقاومت زهکشی نشده با نسبت تخلخل بین دانه‌ای هم ارز [۱۱]

در بیشتر پژوهش‌های انجام شده برای تمامی درصد‌های ریزدانه یک مقدار واحد **b** را توصیه کرده‌اند، البته یانگ و همکاران در ۲۰۰۶ برای ریزدانه زیر ۲۰ درصد مقدار **b** برابر با ۰/۲۵ و برای ریزدانه بالای ۳۰ درصد مقدار **b** برابر با ۰/۴ را پیشنهاد داده‌اند [۱۲].

در نتایج ارائه شده تا کنون باید به دو نکته توجه کرد: اول آنکه تعیین پارامتر **b** با استفاده از یک آنالیز می‌تواند منجر به نتایج غیر واقعی در تخمین مقدار **b** شود که می‌توان به دست آمدن مقادیر کم برای درصد ریزدانه‌های

جدول (۱) مشخصات ماسه ۱۶۱

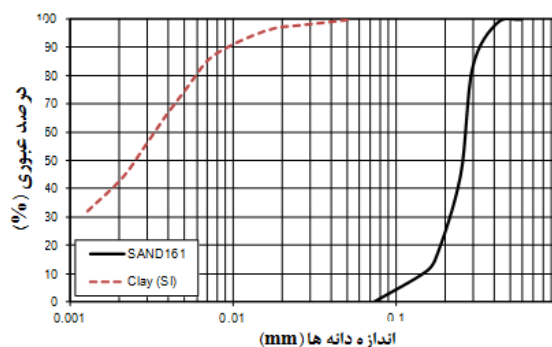
ویژگی‌ها	Sand 161
چگالی ویژه (G_s)	2.66
نسبت تخلخل بیشینه	0.928
نسبت تخلخل کمینه	0.583
D_{50} (mm)	0.26
D_{10} (mm)	0.15
درصد ریزدانه	0

متناظر با دانسیته ۸، ۲۷، ۴۵ و ۶۱ درصد در ماسه تمیز است.

پس از ساخت نمونه، گاز دی اکسید کربن از آن عبور داده شده و سپس جریان آب بدون هوا از پایین به بالای نمونه برقرار شده است. در مرحله بعد، برای رسیدن به اشباع کامل پس فشار از بالا و پایین نمونه به آن اعمال شده است. پس از تحکیم نمونه با فشار موثر تحکیمی مورد نظر، بارگذاری مورد نظر روی نمونه آغاز شده و فشار آب حفره‌ای، نیروی محوری و میزان کرنش نمونه با سنسورهای مربوطه قرائت شده و به وسیله دیتالاگر به کامپیوتر منتقل شده است. در آزمایش‌ها سه محوری سیکلیک عموماً یکی از معیارهای رسیدن ضریب فشار آب حفره‌ای به یک ($ru=1$) و یا رسیدن کرنش محوری با دامنه دوپل به ۵ درصد یا کرنش محوری با دامنه تک به ۲/۵ درصد به عنوان معیار گسیختگی نمونه و پایان آزمایش فرض می‌شود. در آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش عموماً معیارهای یاد شده با یکدیگر و در فواصل کوتاهی از هم اتفاق افتاده است.

جدول (۲) ویژگی‌های ریزدانه خمیری مورد استفاده

نوع رس	(LL%)	(PL%)	(PI%)	G_s
رس SI	50	28	22	2.55



شکل (۳) منحنی‌های دانه‌بندی مصالح مورد استفاده

۴- نتایج

در این بخش نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها انجام شده در این پژوهش ارائه شده است. در ابتدا نمونه‌ای از نمودارهای آزمایش‌ها سیکلیک و نمودارهای CSR-N ترکیبات مختلف به منظور بررسی عوامل مختلف تاثیر گذار روی رفتار آنها مورد بررسی قرار گرفته است. سپس بر اساس این نتایج و تعداد قابل توجهی از آزمایش‌ها انجام شده در تراکم، فشار همه جانبه و درصد ریزدانه‌های مختلف، خطوط حالت پایدار ماسه و ترکیبات آن با درصد‌های مختلف از رس به دست آورده شده‌اند. در قسمت بعد عوامل موثر بر اندرکنش بین ریزدانه‌ها و درشت دانه‌ها و پارامتر b بررسی شده و به همراه نتایج آزمایش‌ها برای رسیدن به یک رابطه مناسب برای محاسبه مقدار پارامتر b مورد استفاده قرار گرفته است. در پایان علاوه بر کنترل کارکرد رابطه پیشنهادی برای آزمایش‌های این پژوهش، از نتایج آزمایش‌های انجام شده در

۳- روند آزمایش‌ها

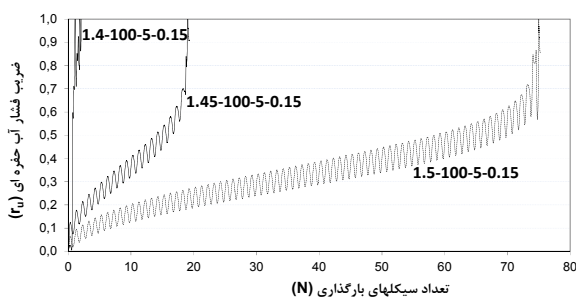
آزمایش‌های انجام شده از نوع سه محوری سیکلیک کنترل تنش بوده است. CSR یا نسبت تنش تناوبی مورد استفاده در آزمایش‌ها متغیر بوده و با انجام چند آزمایش با CSRهای مختلف روی نمونه‌های مشابه امکان گسیختگی و ایجاد ناپایداری در نمونه در تعداد سیکل‌های مختلف فراهم شده است. در تمامی آزمایش‌ها نمونه‌ها دارای ۵ سانتی‌متر قطر و ۱۰ سانتیمتر طول بوده‌اند. نمونه‌سازی آزمایش‌ها با روش تراکم مرطوب انجام شده است و دو فشار همه‌جانبه ۱۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به منظور در اختیار داشتن محدوده وسیعی از تراکم در نمودارها، نمونه‌ها با وزن مخصوص خشک اولیه ۱/۴، ۱/۴۵، ۱/۵ و ۱/۵۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب ساخته شده‌اند. این وزن مخصوص

تنها پس از حدود ۵ سیکل بارگذاری ناپایدار شده و ضریب فشار آب حفره‌ای آن بیشتر از یک شده است. با توجه به این که فشار همه جانبه مورد استفاده در آزمایش‌ها برابر با ۱۰۰ کیلوپاسکال است، این موضوع نشان می‌دهد، که اضافه فشار آب حفره‌ای به وجود آمده در نمونه بالا بیش از ۱۰۰ کیلوپاسکال است.

با توجه به قسمت (ب)، مشاهده می‌شود که همه نمونه‌ها دارای ۵ درصد ریزدانه بوده و تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند. نمونه‌ها با وزن مخصوص خشک ۱/۵، ۱/۴۵ و ۱/۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب آزمایش شده‌اند که به ترتیب تحت اثر حدود ۷۰، ۲۰ و ۲ سیکل بارگذاری با CSR برابر با ۰/۱۵ روانگرا یا ناپایدار شده‌اند. این موضوع دوباره نشان می‌دهد که در ماسه‌های حاوی ریزدانه نیز تا چه حد تراکم نمونه روی مقاومت سیکلیک آن تاثیرگذار است.

به منظور بررسی تاثیر درصد ریزدانه روی رفتار تناوبی ماسه مورد آزمایش، در شکل (۵) نمودارهای تغییرات نسبت تنش تناوبی (CSR) در مقابل تعداد سیکل بارگذاری (N) برای ترکیب‌های مختلف ماسه و رس رسم شده است.

همان‌گونه که انتظار می‌رود، با کاهش نسبت تنش وارد شده تعداد سیکل لازم برای رسیدن به ناپایداری افزایش خواهد یافت. برای بررسی بهتر تاثیر درصد ریزدانه، سایر پارامترهای تاثیرگذار در نمودارها ثابت نگه داشته شده‌اند و نتایج ارائه شده مربوط به آزمایش‌هایی است که فقط درصد ریزدانه آنها متغیر است.



ب) ترکیبات ماسه رسدار

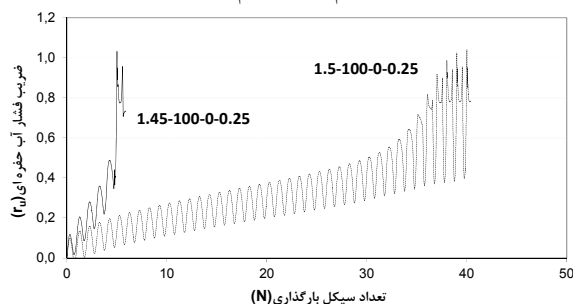
پژوهش‌های سایر پژوهشگران برای صحت سنجی رابطه پیشنهادی استفاده شده است.

شایان ذکر است در برخی نمودارهای ارائه شده هر ترکیب با علامتی مانند A-B-C-D مشخص شده است که در آن A نشانگر وزن مخصوص خشک نمونه بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب، B فشار همه جانبه بر حسب کیلو پاسکال، C درصد ریزدانه نمونه و D نشانگر CSR اعمال شده در بارگذاری است. هر جا که یکی از این پارامترها متغیر بوده است، از علامت نمونه حذف شده است.

۴-۱- بررسی تاثیر تراکم و درصد ریزدانه خمیری روی رفتار تناوبی ماسه

در شکل (۴) نمونه‌ای از نمودارهای آزمایش‌های سه محوری سیکلیک ارائه شده است؛ این شکل نشان دهنده تغییرات فشار آب حفره‌ای در مقابل تعداد سیکل بارگذاری برای ترکیبات مختلف ماسه تمیز و نیز ماسه دارای ۵ درصد رس می‌باشد. برای نمونه، ترکیب 1.5-100-0-0.25 نشان دهنده نمونه ماسه تمیز می‌باشد که با وزن مخصوص خشک ۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و فشار همه جانبه ۱۰۰ کیلو پاسکال تحت بارگذاری سیکلیک با CSR برابر با ۰/۲۵ قرار گرفته است.

می‌توان مشاهده کرد که در قسمت (الف) هردو نمونه و بارگذاری اعمال شده روی آن‌ها کاملاً مشابه بوده و فقط تراکم آنها متفاوت است. با توجه به شکل، در حالی که نمونه دارای تراکم ۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب تا حدود ۴۰ سیکل در مقابل بارگذاری اعمال شده مقاومت کرده است، نمونه دارای تراکم ۱/۴۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب



الف) ترکیبات ماسه تمیز

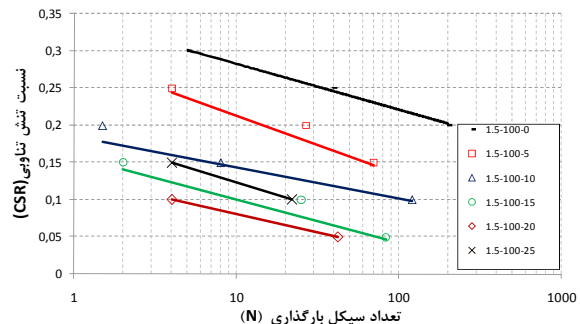
شکل (۴) مقایسه تغییرات فشار آب حفره‌ای بر اثر بارگذاری سیکلیک در ماسه تمیز و ماسه رسدار

با رسم نمودار مشابه شکل (۵) برای تمام ترکیب‌ها، CSR مربوط به N برابر با ۱۵ سیکل استخراج شود. در این مطالعه، با رسم نمودارهایی مشابه با شکل (۵) برای تمام ترکیب‌های مورد آزمایش، مقاومت روانگرایی یا CSR متناظر با ۱۵ سیکل استخراج شده و بر مبنای اعداد به دست آمده نمودار شکل (۶) نتیجه‌گیری شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نمودار شکل (۶) نشان دهنده تغییرات مقاومت روانگرایی در مقابل نسبت تخلخل نمونه است. به این ترتیب با داشتن نسبت تخلخل اولیه هر ترکیب مقدار مقاومت روانگرایی آن از روی نمودار قابل پیش‌بینی است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با کاهش نسبت تخلخل بعد از تحکیم، مقاومت روانگرایی ترکیب افزایش خواهد یافت.

همان‌گونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، با افزایش درصد رس تا ۲۰ درصد، خطوط به سمت پایین حرکت کرده است. با گذشت درصد ریزدانه از ۲۰ درصد، خط حالت پایدار دوباره به سمت بالا حرکت کرده است بنابراین خط مربوط به ترکیب ماسه و ۲۵ درصد رس بالاتر از خط ماسه و ۲۰ درصد رس قرار گرفته است. این موضوع نشان می‌دهد که اولاً افزایش درصد رس تا حدود ۲۰ درصد موجب افزایش پتانسیل رفتارهای ناپایدار و یا پتانسیل روانگرایی شده است. به عبارت دیگر در یک نسبت تخلخل ثابت ترکیب دارای ریزدانه بیشتر در CSR کمتری ناپایدار خواهد شد.

دوم، با گذشتن درصد رس از ۲۰، رفتار نمونه تغییر کرده و خط حالت پایدار دوباره به سمت بالا و پایداری بیشتر حرکت کرده است. بنابراین با جمع بندی نتایج ارائه شده می‌توان یک حد آستانه در حدود ۲۰ درصد را برای ترکیب‌های مورد آزمایش در نظر گرفت که با گذشتن درصد ریزدانه از آن بافت غالب از حالت ماسه‌ای به حالت رسی تبدیل می‌شود.

با توجه به شکل (۵)، با افزایش درصد ریزدانه نمودارها به سمت پایین حرکت می‌کنند. به عبارت دیگر در یک تعداد سیکل ثابت، هرچه درصد ریزدانه ترکیب بیشتر شده است، نسبت تنش تناوبی (CSR) کمتری برای رسیدن به ناپایداری لازم است.

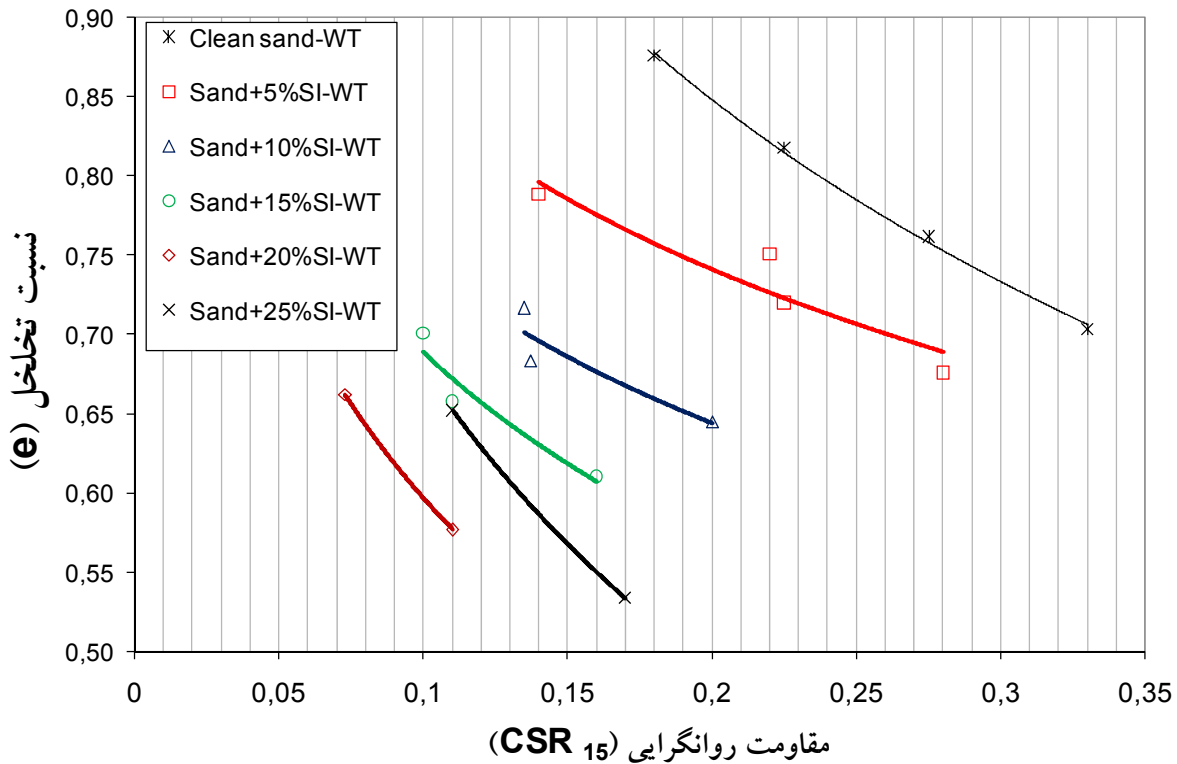


شکل (۵) نمودار CSR-N برای ترکیب‌های مختلف ماسه و ریزدانه خمیری (تراکم $1/5 \text{ gr/cm}^3$ و فشار همه جانبه 100 kPa)

نکته قابل توجه آن است که با عبور درصد ریزدانه از ۲۰ درصد روند بالا حالت معکوس به خود گرفته، به طوری که خط مربوط به ترکیب ماسه با ۲۵ درصد ریزدانه بالاتر از خط مربوط به ترکیب ماسه با ۲۰ درصد ریزدانه و حتی ۱۵ درصد ریزدانه قرار گرفته است.

۴-۲- خطوط حالت پایدار و تغییرات مقاومت روانگرایی ماسه و ترکیب‌های آن

به منظور لحاظ کردن کلیه پارامترهای تاثیر گذار مانند تراکم و فشار هه جنبه می‌توان بر اساس تعداد قابل توجه آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، خطوط حالت پایدار را در فضای e-CSR رسم کرد. لازم است توجه شود که CSR مورد استفاده در رسم نمودار مقدار نسبت تنش تناوبی لازم برای رسیدن نمونه‌ها به ناپایداری در ۱۵ سیکل است که معمولاً به نام مقاومت روانگرایی شناخته می‌شود. برای به دست آوردن این عدد لازم است هر ترکیب کمینه در دو CSR مختلف آزمایش شود و سپس



شکل (۶) خطوط حالت پایدار ترکیب‌های مختلف ماسه و رس بر اساس نتایج آزمایش‌های سیکلیک

بسیار کمی از b برای درصد ریزدانه‌های زیاد پیشنهاد شده است و برعکس. همچنین می‌توان به دست آمدن مقادیر منفی برای پارامتر b اشاره کرد که دارای مفهوم فیزیکی نیست.

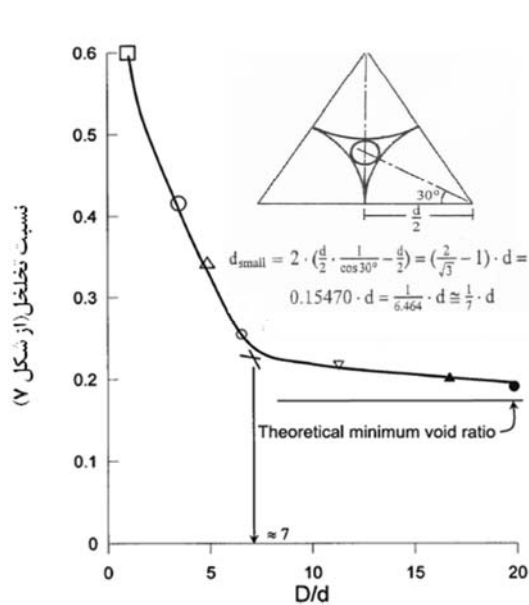
برای پیدا کردن رابطه مناسب برای پارامتر b ، باید شکل قرارگیری ریزدانه‌ها در بین درشت دانه‌ها و عوامل موثر بر آن مورد بررسی قرار گیرد. همچنین لازم است تا چگونگی تغییرات پارامتر b با پارامترهای تاثیرگذار روی آن مانند نسبت قطر دانه‌ها و نیز درصد ریزدانه موجود به دست آورده شود. لید و همکاران در ۱۹۹۸ بر اساس مطالعات مک‌گیری در ۱۹۶۱ در مورد خصوصیات مکانیکی و تراکمی دانه‌های کروی، نمودار شکل (۷) قسمت (الف) را ارائه کرده‌اند که نشانگر تغییرات نسبت تخلخل با درصد ریزدانه و نسبت قطر دانه‌های درشت به ریز است [۱۳] [۱۴]. شکل (۷) قسمت (ب) نیز بر اساس نمودار قسمت (الف) رسم شده است. با توجه به این شکل، می‌توان نکات زیر را نتیجه گیری کرد:

۳-۴- تحلیل و محاسبه پارامتر b

همان‌گونه که در بخش مقدمه اشاره شد، با توجه به مشکلات موجود در مورد استفاده از پارامتر نسبت تخلخل (e) و نیز با توجه به بحث حد آستانه، توانایاگام و همکاران در ۲۰۰۰ و ۲۰۰۲ نظریه‌ای ارائه کردند که بر اساس آن نسبت تخلخل در هر درصد مشخص از ریزدانه باید بر اساس میزان واقعی تماس‌های بین‌دانه‌ای و میزان مشارکت ریزدانه‌ها مشخص شود.

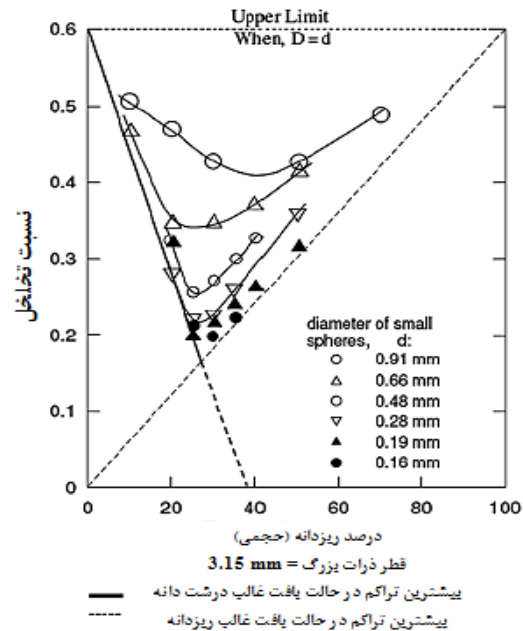
بر اساس نتایج آزمایش‌ها انجام شده، در این بخش تلاش خواهد شد تا روشی مناسب برای محاسبه پارامتر b ارائه شود، به گونه‌ای که هم مقادیر آن متناسب با مقدار درصد ریزدانه باشد و هم مقدار e_{eq} به دست آمده بتواند منجر به ارائه خط حالت پایدار واحد شود.

پیش‌تر اشاره شد که به دست آوردن پارامتر b به صورت یک آنالیز دارای اشکالاتی است، که از جمله آن‌ها می‌توان به عدم تناسب مقدار پیشنهاد شده برای b با مقدار درصد ریزدانه موجود اشاره کرد، به گونه‌ای که گاهی مقادیر



ب) نمودار نرمالیزه شده

شکل (۷) تاثیر درصد ریزدانه و نسبت قطر روی نسبت تخلخل ترکیب درشت دانه و ریزدانه [۱۳]



الف) تغییرات نسبت تخلخل با درصد ریزدانه و نسبت قطر

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 می شود که افزایش جزئی در درصد رس موجب تغییرات محسوس در بافت نمونه و در نوع رفتار شود. بنابراین پارامتر **b** باید به شکلی ارائه شود که با افزایش اولیه درصد رس، مقدار آن افزایش محسوسی پیدا کند و در ادامه روند افزایشی آن کندتر شود. به عبارت ساده تر، تغییرات آن باید با نتایج به دست آمده در مورد تغییرات رفتاری و نمودارهای ارائه شده برای تنش کرنش و مسیر تنش مطابقت کند.

- رابطه ارائه شده برای **b**، باید از لحاظ ریاضی ساده بوده، به گونه ای که امکان تعمیم و گسترش آن به سایر نتایج موجود در مورد خاک ها وجود داشته باشد.

- رابطه ارائه شده باید در برگیرنده کلیه عوامل تاثیر گذار روی مشخصات رفتاری ماسه های رس دار باشد که از آن جمله می توان به مقدار شاخص پلاستیسیته، نسبت قطر

- اگر نسبت قطر دانه ها ($\frac{D}{d}$)، بزرگ تر از حدود ۷ باشد، تقریباً بیشتر دانه های ریز در بین دانه های درشت تر قرار می گیرند و آنها را پر می کنند، پس نسبت تخلخل به حالت کمینه آن نزدیک می شود.

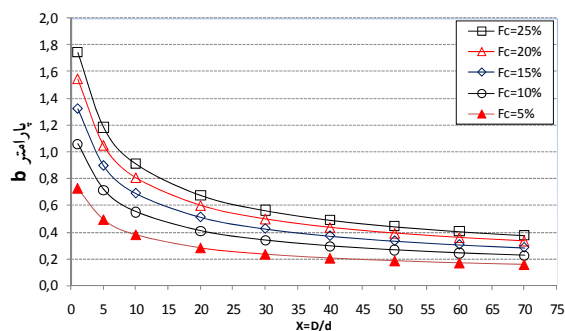
- اگر نسبت ($\frac{D}{d}$) کوچک تر از حدود ۴/۷ باشد، تعداد قابل توجهی از ریزدانه ها در محل تماس های بین دانه ای قرار گرفته بنابراین نسبت تخلخل به شدت زیاد می شود. در این حالت به علت نزدیک شدن قطر دانه ها به هم، دانه های ریز بیشتر در محل تماس های دانه های درشت قرار می گیرند و نه در بین آنها، پس نسبت تخلخل به سرعت افزایش می یابد.

در این پژوهش در راستای ارائه یک رابطه مناسب برای محاسبه پارامتر **b**، نکات زیر مورد توجه قرار گرفته است:

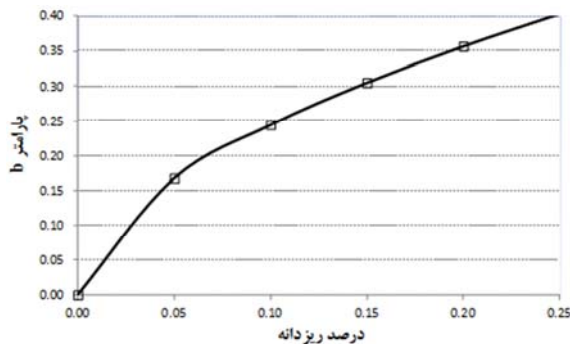
- تغییرات **b** و نسبت تخلخل در مقابل $\frac{D}{d}$ باید به یکدیگر شبیه باشند، چرا که افزایش نسبت تخلخل نشان دهنده این است که دانه های ریز کمتری در فضاهای خالی بین درشت دانه ها قرار گرفته اند و بیشتر آنها در تماس های بین دانه ای مشارکت دارند. در این حالت طبعاً

با استفاده از رابطه ارائه شده برای محاسبه پارامتر b ، در شکل (۸) تغییرات b در مقابل X برای درصد ریزدانه‌های مختلف ارائه شده است. شکل (۹) نیز نشانگر تغییرات پارامتر b در مقابل درصد ریزدانه بر اساس نتایج آزمایش‌های این پژوهش است.

مشاهده می‌شود که نمودارهای به دست آمده تغییرات و روند مورد نظر را دارد، برای نمونه با افزایش نسبت قطر دانه‌ها مقدار b با تابع مورد نظر کاهش پیدا می‌کند و با افزایش درصد ریزدانه مقدار b هم افزایش می‌یابد. لزوم وجود این روند و تغییرات در نکات قبلی توضیح داده شد.



شکل (۸) تغییرات پارامتر b در مقابل X برای درصد ریزدانه‌های مختلف



شکل (۹) تغییرات پارامتر b در مقابل درصد ریزدانه بر اساس نتایج آزمایش‌ها این تحقیق و رابطه پیشنهادی

۴-۴- بررسی صحت روابط ارائه شده و امکان

تولید خط حالت پایدار هم ارز

برای بررسی کارکرد رابطه پیشنهادی، خطوط ارائه شده در شکل (۶) با استفاده از پارامتر b پیشنهادی و نسبت تخلخل هم ارز مجدداً محاسبه و در شکل (۱۰) ارائه شده است. برای هر نقطه موجود روی خطوط، پارامتر b و سپس نسبت تخلخل هم ارز متناظر با آن محاسبه شده

دانه‌های درشت به دانه‌های ریز و نیز حد آستانه به دست آمده اشاره کرد.

• با توجه به اینکه هدف نهایی از به دست آوردن پارامتر b به دست آوردن نسبت تخلخل هم ارز و آنگاه به دست آوردن خط حالت پایدار واحد برای همه ترکیب‌های ماسه با درصد‌های مختلف از ریزدانه است، رابطه ارائه شده باید تمامی نقاط حالت پایدار را روی یک روند واحد منتقل کند.

با در نظر گرفتن همه نکات فوق و بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش و نیز بررسی ریاضی روابط مختلف، رابطه (۳) برای محاسبه پارامتر b پیشنهاد می‌شود:

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

در رابطه بالا:

F_c : درصد ریزدانه

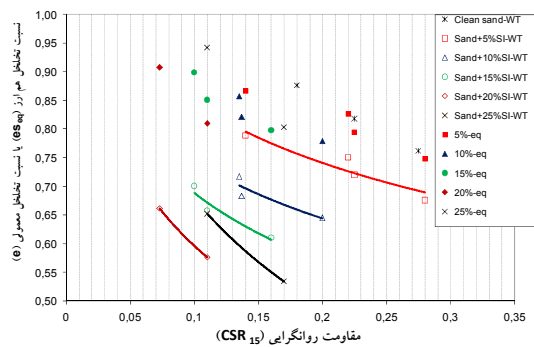
F_{th} : درصد ریزدانه حد آستانه

$$r = X^{-1} = \frac{d_{50}}{D_{10}}$$

$$k = 1 / PI$$

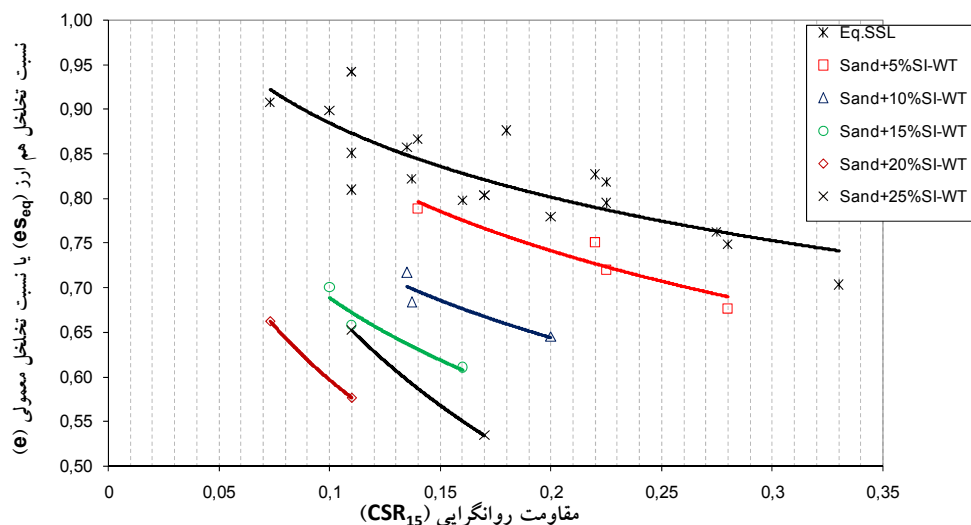
m و n نیز دو ثابت تجربی است. با توجه به هدف اصلی رابطه ارائه شده که به دست آوردن یک روند یکسان برای ترکیب‌های مختلف ماسه و ریزدانه است، مقدار پارامترهای مناسب زمانی به دست خواهند آمد که خطوط حالت پایدار ترکیبات مختلف ماسه و ریزدانه را بر هم منطبق کند. در این پژوهش مقدار پارامتر m برابر با $0/6$ و مقدار پارامتر n برابر با $0/5$ به دست آمده است. شایان ذکر است تخمین اولیه این دو پارامتر بر اساس ایجاد رابطه مطلوب بین b و نسبت X تخمین زده شده است.

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



شکل (۱۰) نقاط مربوط به مقاومت روانگرایی با استفاده از نسبت تخلخل هم ارز

این موضوع نشان می‌دهد که رابطه ارائه شده برای پارامتر **b** می‌تواند منجر به تولید یک روند واحد برای همه‌ی ترکیب‌های ماسه و ریزدانه مورد آزمایش در زیر حد آستانه شود. این خط واحد در شکل (۱۱) به شکل مناسبتری ارائه شده است.



شکل (۱۱) مقایسه خط حالت پایدار نسبت تخلخل هم‌ارز با خطوط حالت پایدار درصد‌های مختلف ریزدانه با استفاده از نسبت تخلخل معمولی

ترکیب‌های مختلف ماسه و ریزدانه ارائه شده است. در این شکل همچنین نقاط هم‌ارز نیز با استفاده از رابطه پیشنهادی در این مقاله محاسبه و رسم شده‌اند. مشاهده می‌شود که با وجود تغییر قابل توجه در نوع و جنس مصالح استفاده از رابطه پیشنهادی موجب شده است تا تمامی نقاط مربوط به آزمایش‌های مختلف روی یک خط قرار گیرند و روند یکسانی را نشان دهند (خط Eq.SSL). نمونه‌ی دیگر، در شکل (۱۳) نتایج پژوهش نعیمی فر و یثربی در ۲۰۱۲ که با استفاده از آزمایش‌های استاتیکی

است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در شکل (۱۰) علاوه بر نقاط حالت پایدار مربوط به نسبت تخلخل هم ارز، خطوط درصد‌های مختلف ریزدانه با استفاده از نسبت تخلخل معمولی نیز دوباره ارائه شده‌اند.

می‌توان دید که تمامی نقاطی که مربوط به نسبت تخلخل هم ارز، و دارای درصد ریزدانه زیر حد آستانه است، روند یکسانی را نشان می‌دهند که منطبق بر روند به دست آمده برای ماسه تمیز است. بدیهی است که در مورد ماسه تمیز با توجه به صفر بودن پارامتر **b**، نقاط حالت پایدار با استفاده از نسبت تخلخل معمولی و نسبت تخلخل هم ارز یکی خواهند شد.

۴-۵- صحت‌سنجی رابطه پیشنهادی با استفاده از

نتایج پژوهش‌های گذشته

در این بخش بر اساس نتایج به دست آمده در پژوهش‌های گذشته رابطه پیشنهادی مورد درستی آزمایشی قرار گرفته است. اولین پژوهش مربوط به پلیتو و مارتین در ۲۰۰۱ است که با استفاده از آزمایش‌های سیکلیک روی ماسه موتتری ($d_{50}=0.033$) و ریزدانه‌های یاتسویل ($D_{10}=0.31$) انجام شده است [۱۵] [۱۶]. در شکل (۱۲) نمودار تغییرات خطوط مربوط به مقاومت روانگرایی برای

مورد استفاده و حتی روش نمونه‌سازی و نوع بارگذاری نیز به شکل قابل توجهی با این پژوهش متفاوت است.

۴-۶- کاربرد خط حالت پایدار واحد

بر اساس آنچه گفته شد، متوان دید که با استفاده از رابطه پیشنهادی می‌توان خطوط حالت پایدار مربوط به ماسه و ترکیب آن با درصد‌های مختلف از رس را تبدیل به یک خط حالت پایدار کرد که متناظر با خط حالت پایدار ماسه تمیز است. به این ترتیب می‌توان:

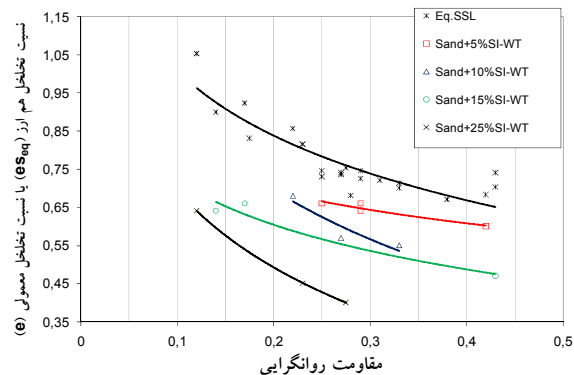
- با انجام آزمایش روی ماسه تمیز که به مراتب می‌تواند آسان‌تر و با زمان و هزینه کمتری انجام شود، خط حالت پایدار آن را به دست آورد و سپس با استفاده از رابطه پیشنهادی، آنرا به خط حالت پایدار ترکیب ماسه و درصد دلخواه از رس تبدیل کرد.

- 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 به دست آورد. برای این کار ابتدا خط حالت پایدار موجود را باید به خط حالت پایدار ماسه تمیز تبدیل کرد و سپس از روی آن خط حالت پایدار هر ترکیب دلخواه دیگر را بدست آورد. یادآوری می‌شود که با استفاده از خطوط حالت پایدار ماسه و ترکیبات آن با ریزدانه و تغییرات پارامترهای تاثیرگذار 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 ψ (بین و جفریز-۱۹۸۵) [۱۸] را از روی خطوط حالت پایدار محاسبه کرد و با توجه به تغییرات آنها تغییرات پتانسیل روانگرایی را مورد بررسی قرار داد.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

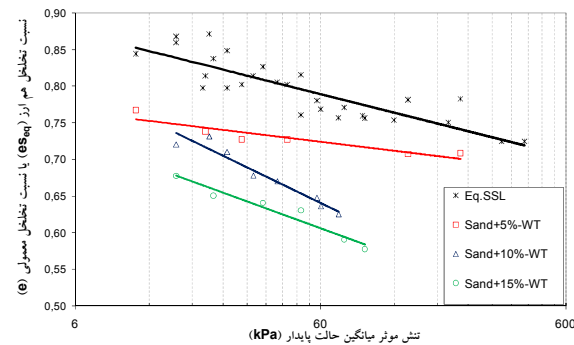
در راستای به‌دست آوردن یک چهارچوب واحد برای تفسیر رفتار حالت بحرانی خاک، تعداد زیادی آزمایش سه محوری سیکلیک روی ترکیبات ماسه با ۰ تا ۲۵ درصد رس، فشار همه جانبه ۱۰۰ و ۳۰۰ کیلو پاسکال و تراکم

روی ماسه ۱۶۱ و ریزدانه با شاخص خمیری حدود ۱۱ درصد و با استفاده از روش نمونه‌سازی تراکم مرطوب انجام شده، ارائه شده است [۱۷]. همچنین، نسبت تخلخل هم ارز همه نقاط با استفاده از رابطه پیشنهادی محاسبه شده و با عنوان خط حالت پایدار هم‌ارز (خط Eq.SSL) در شکل (۱۳) ارائه شده است.



شکل (۱۲) بررسی خط حالت پایدار هم ارز بر اساس نتایج

(پلیتو و مارتین-۲۰۰۱) [16][15]



شکل (۱۳) بررسی خط حالت پایدار هم ارز بر اساس نتایج

(نعیمی فر و یثربی-۲۰۱۲) [17]

با توجه به تفاوت‌های رفتاری زیاد در روش‌های نمونه‌سازی ریزش خشک و تراکم مرطوب و نیز نوع بارگذاری سیکلیک و استاتیکی، نتایج پژوهش بالا نیز می‌تواند به عنوان یک معیار بسیار مناسب برای درستی آزمایشی رابطه پیشنهادی استفاده کرد.

می‌توان مشاهده کرد که با وجود تغییر در نوع روش نمونه‌سازی و نوع مصالح، باز هم تمامی نقاط مربوط به ماسه تمیز و نیز ترکیبات رس‌دار تقریباً یک روند واحد را نشان می‌دهند (Eq.SSL). این موضوع نشان دهنده کارایی بالا و صحت کاربرد رابطه پیشنهادی در حالتی است که مصالح

۷- مراجع

- [1] Gratchev I. B. et al, "Undrained cyclic behavior of bentonite-sand mixtures and factors affecting it" *Geotech Geol Eng* 25, pp 349-367, 2007
- [2] Bouferra.R . Shahroui.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*
- [3] M. Derakhshandi, et al, "The effect of plastic fines on the pore pressure generation characteristics of saturated sands" *Soil Dyn Earthquake Eng* 28, pp 376 - 386, 2008
- [4] Boulanger RW, Idriss IM., Liquefaction susceptibility criteria for silts and clays. *J Geotech Geoenviron Eng ASCE*;132(11):1413-26, 2006
- [5] Salah Sadek & Maha Saleh , "The effect of carbonaceous fines on the cyclic resistance of poorly graded sands" *Geotech Geol Eng*) 25:257-264, 2007
- [6] Park, Sung-Sik, Kim, Young-Su, Liquefaction Resistance of Sands Containing Plastic Fines with Different Plasticity, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000806. 2012
- [7] Haeri, S.M., Hamidi, A. (2005), Steady state and liquefaction characteristics of gravelly sands, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 23, No. 2, pp. 141-156.
- [8] Yasrobi, S. S. (1997) "Investigating the Effects of Content and Shapes of Fines on Steady State Behavioural Properties of Saturated Sands to Assess Liquefaction Potential in Such Soils. PhD Thesis, Civil Engineering School, Sharif University of Technology
- [9] Thevanayagam, S. & Mohan, S. Intergranular state variables and stress-strain behaviour of silty sands, *Geotechnique* 50, No. 1, 1-23, 2000
- [10] Thevanayagam S, Shenthan T, Mohan S, Liang J., Undrained fragility of clean sands, silty sands, and sandy silts. *J Geotech Geoenviron Eng* 128(10):849-859, 2002
- [11] Ni, Q., Tan, T. S., Dasari, G. R. & Hight, D. W., Contribution of fines to the compressive strength of mixed soils, *Geotechnique* 54, No. 9, 561-56, 2004
- [12] 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), 102-107, 2006a
- [13] 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), 336-347, 1998
- [14] McGeary, R.K., Mechanical packing of spherical particles. *Journal of the American Ceramic Society*, 44 (10), 513-522, 1961
- [15] Polito, C., Martin, J., (2001) "Effects of nonplastic fines on the liquefaction of resistance of sands", *Journal Of Geotechnical and Geoenvironmental Eng*, 408-415
- [16] Polito, C.P., (1999) " The effects of non-plastic and plastic fines on the liquefaction of sandy soils" PHD Dissertation (Faculty of the Virginia Polytechnic Institute
- [17] Naemifar, O, Yasrobi, S. "The collapse surface characteristics of clayey sands, *Geotechnical Engineering Journal*, ICE publications, Volume 165, Issue 6, pages 379 -390, 2012
- [18] Been, G., Jefferies, M.G. "A state parameter for sands" *Geotechnique* VOL.35, No. 2, pp99-112, 1985.

متغیر $1/4$ تا $1/55$ گرم بر سانتی متر مکعب (معادل دانسیته حدود ۸ تا ۶۰ درصد) انجام شد. مهم ترین نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

❖ بر اساس نتایج آزمایش ها انجام شده، استفاده از نتایج پژوهش های گذشته و نیز بررسی ریاضی روابط مختلف، یک رابطه جدید و کاربردی برای محاسبه مقدار پارامتر b و تعیین درصد مشارکت ریزدانه ها در تعیین نوع رفتار ارائه شد. همچنین با استفاده از نتایج پژوهش های دیگری که روی مصالح متفاوت و با روش نمونه سازی متفاوت انجام شده بودند، رابطه پیشنهادی درستی آزمایی شد.

❖ تحلیل نتایج آزمایش ها نشان داد که رابطه پیشنهادی می تواند 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 می توان خط حالت پایدار یکی از ترکیب های مورد نظر را به دست آورد و سپس با استفاده از رابطه پیشنهادی آن را به خطوط حالت پایدار سایر ترکیب تبدیل کرد.

❖ نتایج آزمایش های سیکلیک و حرکت خطوط حالت پایدار نشان دهنده افزایش پتانسیل رفتارهای ناپایدار با افزایش درصد ریزدانه خمیری است. همچنین یک حد آستانه در حدود ۲۰ درصد برای ترکیبات مورد آزمایش پیشبینی شد که منجر به تغییر بافت از حالت ماسه ای به حالت رسی می شود.

۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله بر خود لازم می دانند از هیات محترم داوری به خاطر مطالعه و راهنمایی های ارزنده برای بهبود این مقاله و نیز از اعضای مجله به خاطر زحمات و پیگیری ایشان تشکر نمایند.