دانشکده فنی و مهندسی
دانشگاه تربیت معلم تهران

پایان نامه کارشناسی ارشد

مهندسی عمران - مکانیک خاک و پی

عنوان

ارزیابی تاثیرات دانه بندی بر رفتار برشی خاکهای مخلوط شن وماسه‌ای

تحقیق و نگارش
بهروز مسعودی

استاد راهنما
دکتر امیر حمیدی

زمستان ۱۳۸۹

فهرست مطالب

فصل اول - کلیات

۱-۱- مقدمه..... ۲

۱-۲- تعریف مسئله و اهداف تحقیق..... ۳

۱-۳- فرضیات و هدف ۵

فصل دوم-مرور متون فنی پیشین

۲-۱- مقدمه..... ۱۰

۲-۲- تحقیقات بولتون وهمکاران (۱۹۶۸)..... ۱۰

۲-۳- مطالعات لده و همکاران (۱۹۹۶) ۱۱

۲-۳-۱- مشخصات نمونه‌ها و دستگاه‌های آزمایش ۱۱

۲-۳-۲- تحلیل نتایج ونمودارهای حاصله ۱۲

۲-۴- مطالعات تواناياگام و همکاران ۱۸

۲-۵- تحقیقات کوکوشو و همکاران (۲۰۰۴)..... ۱۹

۲-۵-۱- خاک آزمایش شده و مشخصات فیزیکی آن ۱۹

۲-۵-۲- رفتار زهکشی خاک‌های رودخانه ای ۲۱

۲-۵-۳- رفتار جریانی خاک در شرایط زهکشی نشده‌ی پس از روان‌گرایی ۲۱

۲-۶- مطالعات کونزا و همکاران (۲۰۰۴)..... ۲۳

۲-۶-۱- مصالح آزمایش..... ۲۴

۲-۶-۲- آزمایش در نسبت تخلخل مخلوط ثابت ($e_{composite}$) ۲۵
۲-۶-۳- آزمایش در نسبت تخلخل ماتریس ثابت (e_{sand}) ۲۶
۲-۶-۴- آزمایش در تراکم نسبی ثابت ۲۸
۲-۷- مطالعات حمیدی و همکاران (a-۲۰۰۹) ۳۲
۲-۷-۱- آماده کردن نمونه ۳۳
۲-۷-۲- اثر اندازه‌ی شن بر مقاومت برشی مخلوط‌های شن- ماسه ۳۳
۲-۷-۳- اثر اندازه‌ی شن بر زاویه‌ی اصطکاک داخلی مخلوط‌های شن- ماسه ۳۷
۲-۷-۴- اثر شکل شن بر مقاومت برشی مخلوط‌های شن- ماسه ۳۸
۲-۷-۵- اثر شکل بر زاویه‌ی اصطکاک مخلوط‌های شن- ماسه ۴۲
۲-۸- تحقیقات حمیدی و همکاران (b-۲۰۰۹) ۴۵
۲-۸-۱- مصالح مورد استفاده در آزمایش ۴۶
۲-۸-۲- اثر میزان شن بر مقاومت برشی ۴۹
۲-۸-۳- تاثیر تراکم نسبی بر مقاومت برشی مخلوط شن و ماسه ۵۲
۲-۸-۴- مقایسه اثرات تراکم نسبی و میزان شن بر مقاومت برشی مخلوط ۵۵
۲-۸-۵- اتساع مخلوط‌های شن- ماسه ۵۹

فصل سوم- نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها

۳-۱- مقدمه ۶۳
۳-۲- دانه بندی نمونه ۶۴
۳-۳- جمع‌آوری وتهیه مصالح مورد استفاده در آزمایش‌ها ۶۶

۳-۳-۱- شستن و خشک کردن مصالح ۶۶
۳-۴- روش انجام آزمایش‌ها و متغیرهای تحقیق ۷۰
۳-۴-۱- آزمایش تعیین نسبت تخلخل ماکزیمم و مینیمم ۷۲
۳-۴-۲- آماده سازی نمونه..... ۷۴
۳-۴-۳- کار با دستگاه برش مستقیم..... ۷۵
۳-۴-۴- مزایا ومعایب آزمایش برش مستقیم..... ۷۶
۳-۵- محاسبه مقدار شکست ذرات ۷۷
۳-۶- آزمایش برش مستقیم ۷۹
۳-۶-۱- اساس آزمایش ۸۰
۳-۶-۲- شرایط بارگذاری نمونه ۸۱
۳-۶-۳- روش اعمال بار ۸۱
۳-۶-۴- قسمت‌های مختلف دستگاه برش بزرگ مقیاس ۸۲

فصل چهارم-تفسیر نتایج آزمایش‌ها

۴-۱- مقدمه..... ۸۸
۴-۲- نسبت تخلخل حداکثر و حداقل مخلوط..... ۸۹
۴-۳- بررسی عوامل موثر بر مقاومت برشی..... ۹۰
۴-۳-۱- مقاومت مخلوط در تراکم‌های نسبی و سربارهای متفاوت ۹۰
۴-۳-۲- مقایسه مقاومت سه نوع خاک در تراکم‌ها وسربارهای ثابت..... ۹۷

۴-۳-۳- تاثیر سربار و تراکم بر مقاومت برشی مخلوط ۱۰۲

۴-۳-۴- تاثیر سربار و تنش ماکزیمم در مصالح ساخته شده..... ۱۰۳

۴-۳-۵- بررسی شکست ذرات پس از انجام آزمایش..... ۱۰۶

فصل پنجم-تفسیر نتایج آزمایش‌ها

۵-۱- مقدمه..... ۱۰۸

۵-۲- خلاصه‌ی نتایج ۱۰۸

۵-۳- برنامه مطالعات آتی در ادامه این تحقیق..... ۱۱۰

منابع ۱۱۲

۱–۱ – مقدمه

با گذشت زمان وتوسعه جوامع انسانی، روند سازندگی وآبادانی کره خاک جلوه‌های ویژه‌ای به خود گرفته و با پیشرفت روزافزون دانش بشری، امکان استفاده هر چه بیشتر از سطحی ترین وجوان ترین بخش از کره زمین، یعنی خاک فراهم آمده است ودر جهان روزانه شاهد افتتاح هزاران پروژه عمرانی می‌باشیم که هر یک به نوبه خود به نحوی با خاک و ویژگی‌های آن در ارتباط هستند. دانش مکانیک خاک، علم بررسی شناخت ویژگی‌های مکانیکی خاک از طریق مشاهده وآزمون رفتار طبیعی آن ونیز سنجش عکس‌العمل‌ها در برابر بارگذاری وتغییر در طبیعت خاک براثر انجام فعالیت‌های عمرانی گوناگون می‌باشد. در این میان آزمایش‌های مکانیک خاک جایگاه تعیین پارامترهای مورد نیاز مکانیک خاک و بازوی توانمند مهندسان در پروژه‌های عمرانی وتحقیقاتی می‌باشد. در همه مسائل مربوط به پایداری خاک از قبیل طراحی پی‌ها، دیوارهای حائل و خاکریزها، داشتن اطلاعات کافی راجع به مقاومت خاک ضروری بوده ودقت در انجام آزمایش باعث عدم ایجاد خرابی‌های غیر قابل جبران می‌شود.پاره ای از این مواردکه دلیل براین مدعا می‌باشند عبارتند از:

- در طراحی پی ها به دلیل ایجاد تنش بیش از حد در خاک باعث گسیختگی برشی خاک می‌شود که این امر لزوم تخمین صحیح ظرفیت باربری خاک را بیان می نماید.
- افزایش فشار جانبی خاک در دیوارهای حایل در هنگام زلزله باعث کاهش مقاومت برشی خاک پشت دیوار شده و عاملی برای خرابی دیوار محسوب می‌گردد.
- در شیروانی‌های خاکی لغزش وقتی رخ می دهد که نیروهای رانش (ناشی از مولفه وزن) برنیروهای مقاوم (ناشی از مقاومت برشی خاک در سطح لغزش) غلبه نماید جهت کنترل این امر می‌بایست تنشهای برشی ایجاد شده در امتداد بحرانی ترین ومحتمل ترین سطح لغزش محاسبه شده و با مقاومت برشی خاک مقایسه گردد.

با توجه به موارد ذکر شده اهمیت مقاومت برشی خاک در مهندسی ژئوتکنیک آشکار میگردد لذا برای تعیین پارامترهای مقاومتی خاک انجام آزمایش های آزمایشگاهی ضروری بوده ولی به علت ابعاد بزرگ نمونه های واقعی، استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی بزرگ مقیاس، اجتناب ناپذیر می باشد.

آزمایش های آزمایشگاهی سه محوری قطر بزرگ و برش مستقیم بزرگ مقیاس دو آزمایش اصلی جهت تعیین پارامتر های مقاومتی خاک در اثر بارگذاری های استاتیکی محسوب شده و با توجه به شرایط ساخت و بارگذاری متفاوت نمونه ها و نتایج اندازه‌گیری شده پارامترهای مقاومتی و رفتار مصالح در دو آزمون با یکدیگر تفاوت دارند. بنابراین با توجه به اینکه در این تحقیق آزمایش ها توسط دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس انجام می‌شود نتایج حاصله تفاوت اندکی بادستگاه سه محوری نشان داده و قابل مقایسه نمی‌باشند.

۱-۲- تعریف مسئله و اهداف تحقیق

اندازه‌گیری و تعیین مقاومت خاک‌ها بویژه برای خاک‌های شن و ماسه ای که در مباحث پایداری خاک اهمیت و کاربرد زیادی دارد، جزء مباحث پیچیده مطرح در مکانیک خاک می‌باشد. مقاومت خاک در قسمتهای مختلف منحنی موهر-کولمب که معرف معیار گسیختگی مصالح است، اسامی مختلفی دارد که شامل مقاومت کششی، مقاومت برشی و مقاومت فشاری می‌باشد. لیکن می‌توان گفت که مقاومت برشی خاک، عمده ترین عامل در تعیین رفتار خاک‌ها می‌باشد. مقاومت برشی خاک، مقاومت داخلی در واحد سطح آن است، یعنی مقاومتی که خاک می‌تواند برای تاب آوردن در برابر گسیختگی و لغزش در امتداد هر صفحه دلخواه خود بسیج کند. گسیختگی حالتی است که برای جسم تعریف می‌شود. این پدیده ممکن است ناشی از افزایش تنش یا تغییر شکل یا انرژی جذب شده توسط جسم باشد. گسیختگی ممکن است بصورت شکستگی ویا بصورت جریان خمیری باشد که در حالت اخیر با تنش ثابت تغییر شکل‌های زیادی در جسم ایجاد می‌شود.

تاکنون تحقیقات متعددی برای تبیین رفتار برشی مخلوط‌های شن و ماسه ای انجام شده است اما برخی تناقض‌ها بین نتایج محققان مختلف دیده می‌شود. نیاز به یک مدل جامع و کارآمد که محدودهٔ گسترده‌ای از خاک‌ها را تحت گسترهٔ خود قرار دهد نیز احساس می‌شود. همان‌طور که قبلاً ذکر شد عوامل متعددی بر مقاومت برشی مخلوط‌های شن و ماسه مؤثر است به‌طوری که بررسی همهٔ عوامل مؤثر بر مقاومت برشی این نوع مخلوط‌ها نیاز به زمان زیادی دارد. مقاومت

برشی خاک های حاوی درشت دانه توسط فراگاتزی و همکاران[1] (۱۹۹۰) بوسیلهٔ مدل ماتریس و شناوری دانه‌های درشت در مخلوط ماسه اهمیت بخصوصی پیدا کرده است بطوری‌که در تحقیقات چند دهه‌ی اخیر نیز بحث و بررسی های بسیاری در این مورد انجام شده است. برمبنای این مطالعات تحقیقاتی نیزدر دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت معلم تهران توسط حمیدی و همکاران از سال ۱۳۸۵ تا کنون صورت گرفته است. یزدانجو (۱۳۸۶) به بررسی آزمایشگاهی رفتار مکانیکی مخلوط‌های شن و ماسه‌ی بد دانه بندی شده در درصدهای شن پایین تر از حد شناوری پرداخته و تاثیر درصد شن و تراکم نسبی بر رفتار برشی مخلوط را بررسی نمود. سلیمی (۱۳۸۶) با انجام آزمایش برش مستقیم بر مخلوط‌های بد دانه بندی شده از شن و ماسه، تاثیرات شکل و اندازه درشت دانه شنی بر رفتار برشی مخلوط را ارزیابی نمود. علیزاده (۱۳۸۸) نیز مشخصه‌های مقاومتی و تغییر شکلی خاک را در شرایط غیرشناوری شن دانه ها به‌طور کامل بررسی نمود. همچنین حمیدی و همکاران (۲۰۰۹) ارتباط مقاومت برشی و اتساع را در مخلوطهای شن و ماسه ای در سربارهای فراتر از آستانه خرد شدگی دانه ها ارزیابی نموده و به نتایجی نیز دست یافتند.

با توجه به اینکه بررسی مطالعات محققین پیشین در زمینهٔ موضوع مورد طرح بدون شک یکی از مهم ترین بخش‌های هر سمینار به حساب می آید. پس از بررسی این مطالعات آشکار گردید که تحقیقات کمتری بر مشخصه‌های مقاومتی و تغییر شکلی خاک‌های شن وماسه ای در شرایط خوب دانه بندی شده، انجام شده است. به همین دلیل تصمیم براین شد که در این پایان نامه اولاً به جمع بندی و مطالعه تحقیقات انجام شده تاکنون در این زمینه پرداخته، وثانیاً توجه ویژه ای نیز بررفتار برشی این مخلوط‌ها در حالت خوب دانه بندی شده گردد. هدف نهایی دراین پایان نامه براین موضوع استوار است که تحقیق به صورت آزمایشگاهی انجام شده و تاثیرسه نوع دانه بندی بر رفتار برشی خاک‌های مخلوط شن و ماسه خوب دانه بندی شده به صورت دقیق ارزیابی گردد. تابتوان دانه بندی جایگزین برای درشت دانه های شن و ماسه ای که انجام آزمایش برروی این مصالح بدون دستگاه‌های بزرگ مقیاس مقدور نمی‌باشد تعیین نمود.

[1] Fragaszy et al.

۱-۳- فرضیات و هدف

معمولاً خاک در تغییر شکل‌های بزرگ گسیخته می‌شود. در این تغییر شکل‌ها فرضیات پایه الاستیسیته کاربرد ندارد. در این حالت باید از قواعد تئوری پلاستیسیته استفاده کرد. در تئوری پلاستیسیته مقاومت خاک تنها به تنش‌های قائم یا تنش-های برشی حداکثر مربوط نمی‌شود. بلکه گسیختگی خاک در مجموعه‌ای از ترکیب این تنش‌ها اتفاق میافتد، این مجموعه شامل تعداد زیادی از نقاط به صورت (τ وσ) است که می‌توانند گسیختگی در خاک را بوجود آورند. رابطه ای که بین τ وσ در لحظه گسیختگی وجود دارد را معیار گسیختگی می‌نامند . معمولاً معیار مقاومت خاک، مقاومت برشی آن است چرا که مقاومت کششی خاک بسیار ناچیز و قابل صرف نظر کردن است و مقاومت فشاری آن بحرانی نیست. رفتار مصالح تابعی از متغیرهای متعددی است که نمی توان از هیچ یک از آن ها صرف نظر کرد، بنابراین انجام آزمایش‌های مکانیکی در شرایطی منطبق بر شرایط سازه اصلی، ضروری به نظر می‌رسد.

حال با توجه به تأثیر اندازهٔ نمونه در تعیین ویژگی‌های رفتاری خاک‌های مخلوط، معمولاً اندازه‌ی دانه ها به $\frac{۱}{۶}$ ابعاد نمونهٔ مورد آزمایش محدود می‌گردد. با توجه به این محدودیت، ارزیابی رفتار تنش- کرنش خاک‌های مخلوط درشت دانه با اندازه‌ی دانه های یک سانتیمتر یا بیشتر، نیاز به دستگاه‌های آزمایشگاهی با ابعاد نمونهٔ بزرگ خواهد داشت که موجب بروز پاره ای مشکلات می گردد. در مطالعات قبلی صورت گرفته در این خصوص در پاره‌ای موارد نیز نتایج متناقض مشاهده می شود. براساس برخی مشاهدات، مقاومت سه محوری استاتیکی خاک های مخلوط شن و ماسه با افزایش مقدار شن در دانسیته‌ی نسبی مخلوط یکسان کاهش یافته ولی مقاومت سه محوری تناوبی آن با افزایش مقدار درشت دانه افزایش می یابد. این در حالی است که بر اساس پاره ای نتایج، مقاومت برش مستقیم این نوع خاک در شرایط استاتیکی با ازدیاد درصد درشت دانه افزایش می یابد.

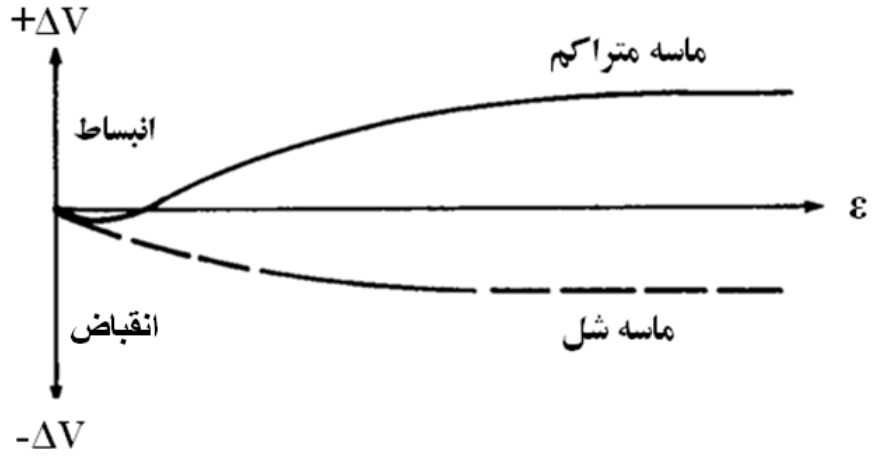
اکثر مدل های رفتاری ارائه شده برای تبیین رفتار برشی خاک های مخلوط شن و ماسه برای خاک‌های بدون ذرات درشت دانه ارائه شده و تأثیر درشت دانه به دلیل مشکلات آزمایشگاهی، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر تأثیر مقدار ذرات درشت دانه، دانسیته‌ی نسبی مخلوط، توزیع اندازه‌ی دانه ها یا ضریب یکنواختی خاک، شکل و اندازه‌ی ذرات درشت دانه و همچنین تنش نرمال روی خاک نیز بر مقاومت برشی مخلوط تأثیرگذار است.

با انجام آزمایش های برشی بوسیلهٔ دستگاه برش مستقیم بزرگ مقیاس ۳۰۰mm ×۳۰۰mm×۱۷۰mm بر روی نمونه های بازسازی شده در تراکم های نسبی مختلف و همچنین مخلوط آن با درصدهای مختلف شن و ماسه در فشارهای مختلف سربار، می توان تأثیر مخلوط‌های شن وماسه در حالت خوب دانه بندی شده، دانسیته‌ی مخلوط و فشار سربار را بررسی کرد.

همچنین با آزمایش برروی مخلوط شن و ماسه خوب دانه بندی شده در تراکم های نسبی مختلف، می توان مقاومت برشی معادل خاک حاوی ذرات درشت دانه و ریزدانه را در فشارهای مختلف سربار به دست آورد.

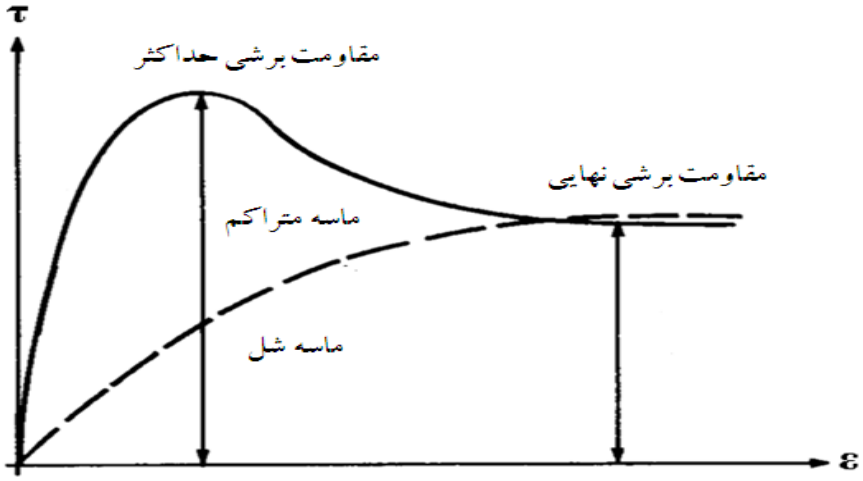
هدف از انجام آزمایش برش مستقیم در بسیاری از آزمایش‌ها تعیین چسبندگی وزاویه اصطکاک داخلی خاک در حالت زهکشی شده وزهکشی نشده می‌باشد. اما از این آزمایش مطالب دیگری نیز در باره‌ی رفتار خاک می‌توان دریافت.

شکل (۱-۱)منحنی تغییر ارتفاع (یا تغییر حجم) نمونه در برابر کرنش را در یک آزمایش برش مستقیم که بر روی دو نمونه ماسه انجام شده است نشان می‌دهد.همانطور که در شکل مشاهده می‌شود یکی از نمونه ها ماسه متراکم و دیگری ماسه شل می‌باشد مشاهده می‌شود که ماسه شل در حین آزمایش منقبض می‌شود وماسه متراکم بعد از آن‌که کمی منقبض شد، شروع به اتساع می‌کند.



شکل(۱-۱)تغییر حجم نمونه در حین آزمایش برش مستقیم

در شکل (۱-۲) تغییرات تنش برشی در برابر کرنش رسم شده است. مشاهده می‌شود که در ماسه متراکم بعد از آن‌که مقاومت برشی به حداکثر خود رسید دچار افت شده و به یک مقدار نهایی می‌رسد ولی در ماسه شل مقاومت برشی دارای مقدار حداکثر نیست و روند آن همواره صعودی است.



شکل (۱-۲) تغییرات تنش برشی در برابر کرنش در آزمایش برش مستقیم

از جمله فرضیات دیگری که میتوان در آزمایش برش مستقیم به آن اشاره کرد عبارت‌اند از:

- در خاک‌های درشت دانه مانند شن وماسه که منافذ آن‌ها زیاد است فشار آب به سرعت تخلیه می‌گردد. بنابراین در این خاک‌ها همواره شرایط زهکشی شده وجود دارد ولی در خاک‌های رسی به دلیل آن‌که خروج آب نیازمند زمان زیادی است برای آن‌که شرایط زهکشی فراهم شود باید بار به آهستگی وارد گردد وزمان زیادی برای آزمایش صرف شود.
- آزمایش برش مستقیم را می‌توان با سرعت تنش ثابت یا با سرعت کرنش ثابت انجام داد به این معنا که میزان افزایش تنش یا کرنش در واحد زمان را می‌توان به کمک ابزار کامپیوتری موجود در دستگاه کنترل کرد وبه دلخواه این مقدار را ثابت نگاه داشت.

- در آزمایش با کنترل تغییر شکل می‌توان هم مقاومت برشی حداکثر و هم مقاومت برشی نهایی را به دست آورد ولی در آزمایش باکنترل تنش فقط مقاومت برشی حداکثر به‌دست می‌آید در عوض آزمایش با کنترل تنش نتایج واقع بینانه تری از وضعیت خاک به دست می دهد.
- نتایج آزمایش برش مستقیم برای خاک‌های دانه ای بیش از نتایج بر روی خاک‌های چسبنده واقعی می‌باشد.
- صفحه برش در خاک از پیش تعیین شده و اجباری است به عبارت دیگر خاک نمی‌تواند آزادانه و در راستای دلخواه گسیخته شود وگسیختگی در فصل مشترک دو جعبه وبه صورت کاملاً اجباری به وجود می‌آید از طرفی زهکشی نمونه غیرقابل کنترل است و فشار آب در داخل نمونه قابل اندازه گیری نیست وفرض ثابت بودن توزیع تنش عملاً برقرار نیست وتنش در کناره ها بیش از قسمت‌های وسط است.
- در خاک‌های ماسه‌ای، لای غیرآلی و رس عادی تحکیم یافته، مقدار چسبندگی در آزمایش زهکشی شده برابر صفر می‌باشد. در حالیکه این مقدار برای رس‌های بیش تحکیم یافته بزرگ‌تر از صفر است و مقدار زاویه اصطکاک داخلی خاک‌های رسی در حالت زهکشی شده با افزایش اندیس خمیری کاهش می یابد.

۲-۱- مقدمه

با توجه به اینکه در انجام تحقیق وپژوهش علمی مطالعه تحقیقات صورت گرفته‌ی قبلی امری ضروری می‌باشد لذا در این بخش به بررسی مطالعات قبلی صورت گرفته در زمینه‌ی مقاومت برشی مخلوط‌های شن و ماسه می‌پردازیم. بدلیل آن‌که منحنی دانه بندی و توزیع اندازه‌ی دانه ها، شکل و اندازه‌ی ذرات، بزرگترین و کوچکترین اندازه‌ی ذرات و تیزگوشه و گردگوشه بودن آن‌ها و همچنین ابعاد دستگاه و شیوه‌ی انجام آزمایش، تراکم نمونه‌های مخلوط و درصد شن تأثیر مهمی بر مقاومت برشی مخلوط‌های شن و ماسه می‌گذارند لذا به‌طور نسبتاً کامل به شرح این جزئیات در مطالعه هریک از محققین قبلی پرداخته می‌شود.

۲-۲- تحقیقات بولتون وهمکاران[1] (۱۹۸۶)

بولتون (۱۹۸۶) تحقیقاتی در زمینه ارتباط مقاومت برشی و اتساع را در خاک‌های ماسه ای فاقد شن بررسی نمود، وی با جمع آوری اطلاعات آزمایشگاهی از ۱۷ نمونه ماسه‌ای در دانسیت های نسبی و فشاردورگیرهای مختلف در آزمایش برش مستقیم بیان داشت که زاویه اصطکاک ماکزیمم خاک ماسه‌ای $(\varphi_{\max})$ تابعی از وضعیت بحرانی یا زاویه اصطکاک در حجم ثابت (φ_{cv}) که خود تابعی از کانی خاک و ماکزیمم زاویه‌ی اتساع $(\psi_{\max})$ که وابسته به دانسیته نسبی و فشار دورگیر است که در معادله‌ی زیر نشان داد.

$$\varphi_{\max} = \varphi_{cv} + 0.8\psi_{\max} \qquad (۱-۲)$$

بولتون (۱۹۸۶) گرایش ذره به خرد شدن در تنش‌های کمتر از ۱۵۰ کیلوپاسکال را مشاهده نکرد و محسوس ندانست و اتساع در این تنش را فقط به عنوان تابعی از دانسیته‌ی نسبی دانست،که این باعث شد تا متغیرها را به $(\varphi_{\max})$ ، (φ_{cv}) و $(\psi_{\max})$ و (D_r) کاهش دهد تا بتواند معادلات تجربی خود را ارائه نماید، همچنین شاخصی را به عنوان شاخص اتساع یا شاخص تردی بیان کرد.

$$I_R = D_r(10 - \ln(P')) - 1 \qquad (۲-۲)$$

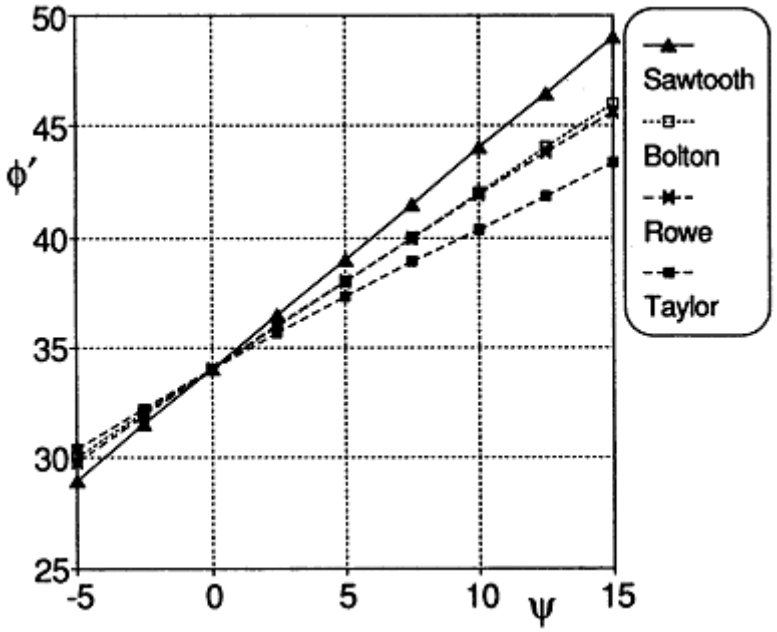
$$I_R \geq 0 \qquad I_R = 5D_r - 1$$

[1] Bolton et al.

$$\varphi_{\max} = \varphi_{cv} + 0.8\psi_{\max} = 5I_R \qquad (۳-۲)$$

که در آن (P') فشار همه جانبه بر حسب kPa و (D_r)، دانسیته نسبی است.

آزمایش برش مستقیم روی مصالح درشت دانه تفسیر خوبی با قانون جریان دارد تیلور[1] (۱۹۴۸) و راو[2] (۱۹۶۲) قانون های تئوریکی جریان را بیان کردند که در شکل زیر مقایسه‌ای از قوانین جریان آمده است.



شکل ۲-۱: مقایسه قوانین جریان(سیمونی و هولزبای ۲۰۰۶)

۲-۳- مطالعات لده و همکاران[3] (۱۹۹۶)

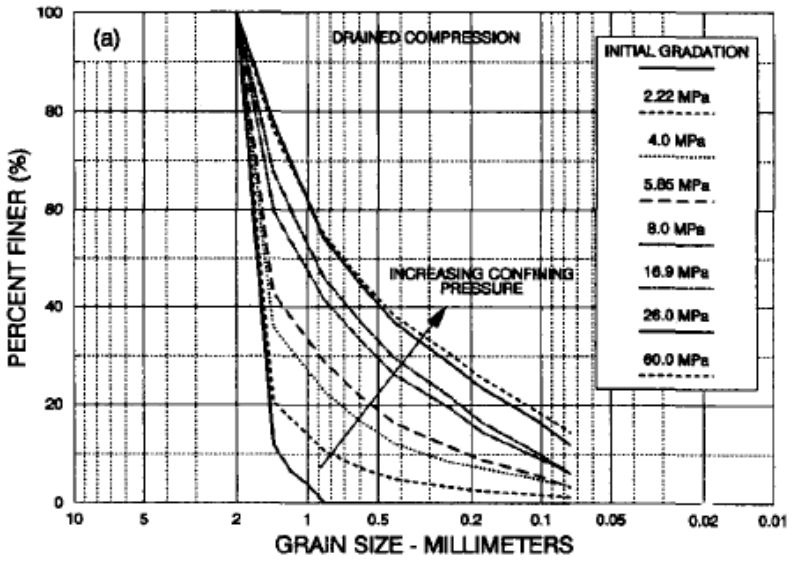
۲-۳-۱- مشخصات نمونه ها و دستگاه های آزمایش

لده(۱۹۹۶) با استفاده از آزمایش‌های سه محوری با فشارهای محدود کننده بالا در محدوده ۰/۵ تا ۷۰ مگا پاسکال بر روی ماسه های متراکم کامبریا، شکست ذرات را مورد مطالعه قرار داده است. این آزمایش‌ها شامل آزمایش‌های سه محوری زهکشی شده و زهکشی نشده و در دو حالت فشاری و کششی می‌باشد. پس از آزمایش آنالیز الک کردن بعد از خشک کردن انجام شده تا توزیع دانه‌بندی بعد از برش را به‌دست آورند.

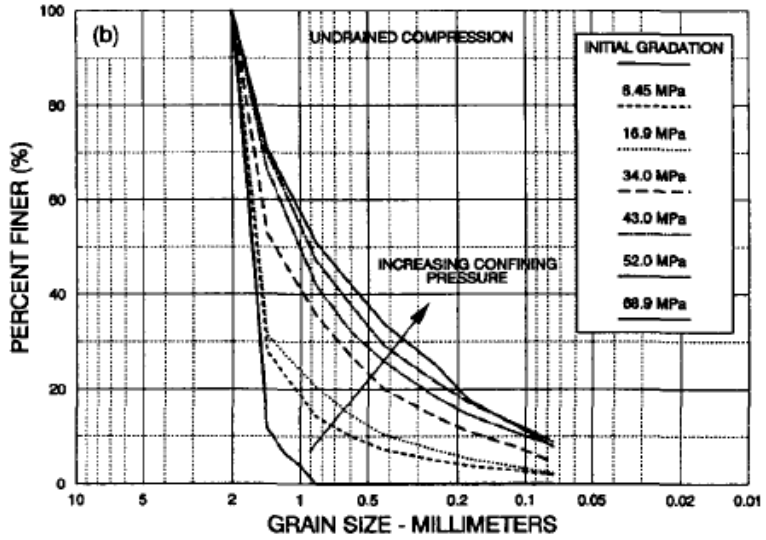
[1] Tylor
[2] Rowe
[3] Lade et al.

۲-۳-۲ تحلیل نتایج و نمودار های حاصله

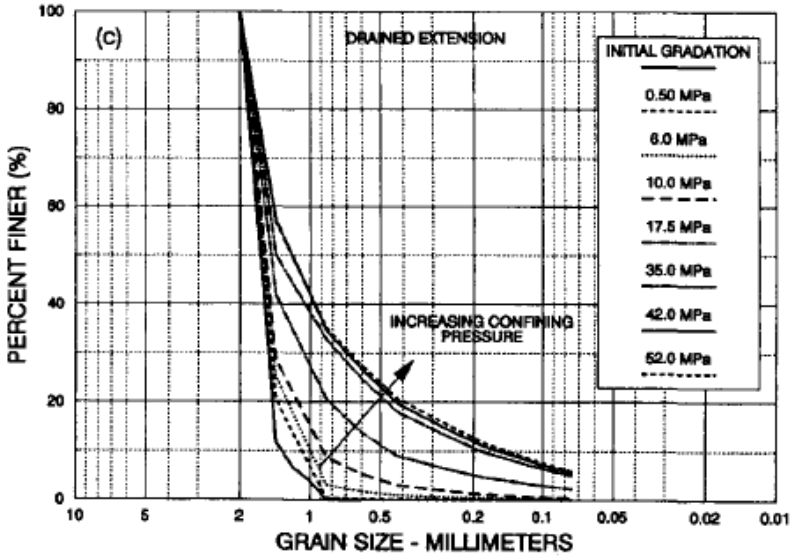
این نتایج در شکل‌های (۲-۲)، (۲-۳)، (۲-۴) و (۲-۵) آمده‌اند. ثابت بودن منحنی‌ها در حالت‌های مختلف رفتار ثابت این مصالح را بیان می‌کند. قابل ذکر است که منحنی‌های مذکور هم‌دیگر را قطع نمی‌کنند و این بیان کننده‌ی سطح پایین پراکندگی در داده‌ها است. همچنین پیدا است که با افزایش فشار محدود کننده میزان شکست ذرات افزایش می یابد و مصالح بعد از برش به سمت مصالح خوب دانه بندی شده میل می‌کنند. فشارهای محدود کننده‌ی یکسان برای آزمایش‌های زهکشی شده، میزان شکست ذرات کمتر از آزمایش‌های زهکشی نشده است. آزمایش‌های زهکشی نشده در فشارهای بالا و در فاز برش شکست ذرات زیادی در مقایسه با آزمایش‌های زهکشی شده در فشار محدود کننده یکسان از خود نشان نمی‌دهند و دلیل آن این است که میانگین تنش عمودی موثر در آزمایش‌های زهکشی نشده بخاطر افزایش فشار آب حفره ای کمتر است. همچنین شکست ذرات در آزمایش‌های سه‌محوری کششی کمتر از فشاری است.



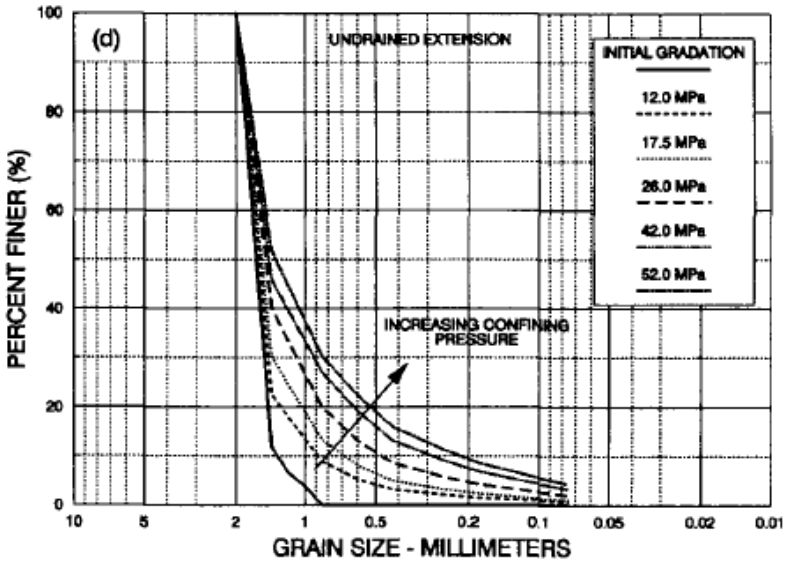
شکل۲-۲: تغییرات منحنی‌های توزیع دانه‌بندی برای آزمایش‌های سه محوری فشاری زهکشی شده در فشارهای بالا با فشار محدود کننده بر روی ماسه های متراکم کامبریا (لده و همکاران ۱۹۹۶)



شکل (۲-۳) : تغییرات منحنی‌های توزیع دانه‌بندی برای آزمایش‌های سه محوری فشاری زهکشی نشده در فشارهای بالا با فشار محدود کننده بر روی ماسه‌های متراکم کامبریا (لده و همکاران ۱۹۹۶)



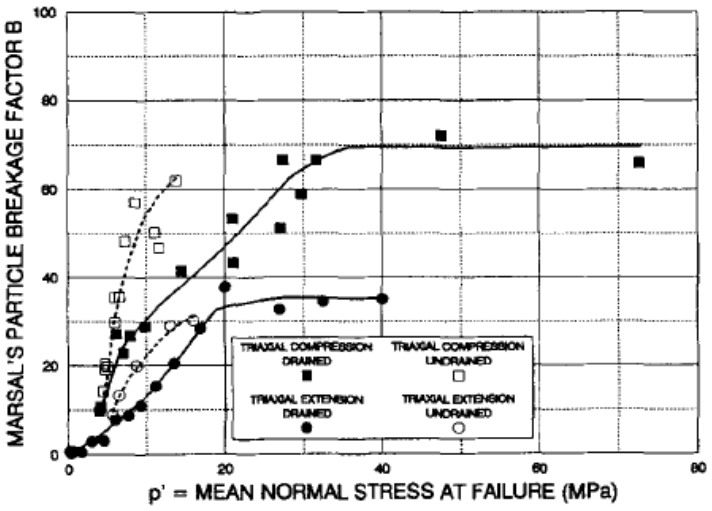
شکل (۲-۴) : تغییرات منحنی‌های توزیع دانه‌بندی برای آزمایش‌های سه محوری کششی زهکشی شده در فشارهای بالا با فشار محدودکننده بر روی ماسه‌های کامبریا (لده و همکاران ۱۹۹۶)



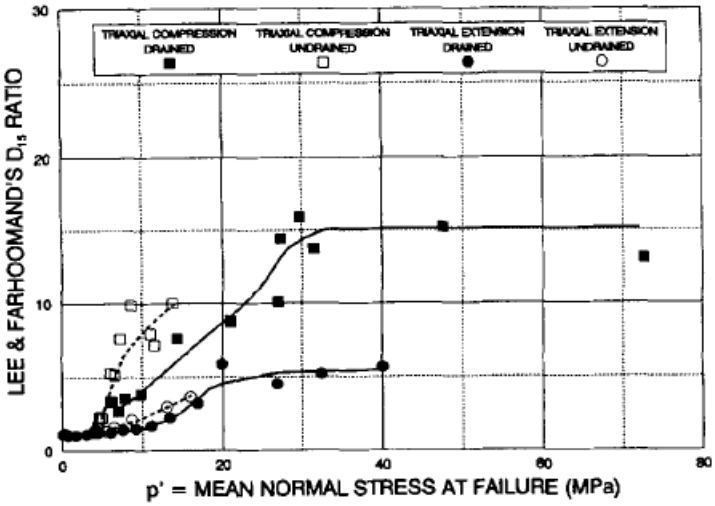
شکل (۲-۵) : تغییرات منحنی‌های توزیع دانه‌بندی برای آزمایش‌های سه محوری کششی زهکشی نشده در فشارهای بالا با فشار محدود کننده بر روی ماسه‌های متراکم کامبریا (لده و همکاران ۱۹۹۶)

چهار معیار شکست در اینجا برای آزمایش‌ها محاسبه شده است. درون یابی خطی بین اندازه‌ی الک ها در محاسبه ضریب شکست انجام شده است که این درون یابی برای پیدا کردن D_{15f} ، D_{10f} در تعداد کمی از آزمایش‌های سه محوری فشاری در فشارهای محدود کننده انجام شد. زیرا نمونه‌ها شامل مقادیر زیادی از ذرات ریزتراز الک شماره ۲۰۰ بودند. شکل های (۲-۶) و (۲-۷) نشان می دهند که میزان شکست ذرات در هر یک از آزمایشها با افزایش تنش عمودی متوسط افزایش می‌یابد و مقدار شکست ذرات در آزمایش‌های فشاری بیشتر از کششی است.

همچنین شکل‌های (۲-۶) و (۲-۷) به وضوح نشان می‌دهد که میزان شکست ذرات در آزمایش‌های فشاری زهکشی شده با افزایش تنش عمودی درهنگام گسیختگی کاهش می‌یابد. شاخص شکست ذرات در فشارهای بالا تقریبا ثابت می‌گردد. بنابراین برای هر نوع آزمایش، منحنی دانه‌بندی به منحنی دانسیته‌ی ماکزیمم تجربی برای ماسه‌های کامبریا میل می‌کند. همان‌طور که مقادیر شکست ذرات به سمت این حدود میل می‌کنند فضاهای خالی بین ذرات به مقدار زیادی کاهش پیدا کرده و ذرات متراکم‌تر شده به‌طوری که شکست ذرات فشار محدود کننده بیشتری را می‌طلبد.



شکل (۲-۶) : منحنی تغییرات فاکتور شکست مارشال، در برابر P_f'، برای آزمایش‌های سه محوری زهکشی شده و زهکشی نشده در دو حالت فشاری و کششی در ماسه‌های متراکم کامبریا (لده و همکاران ۱۹۹۶)

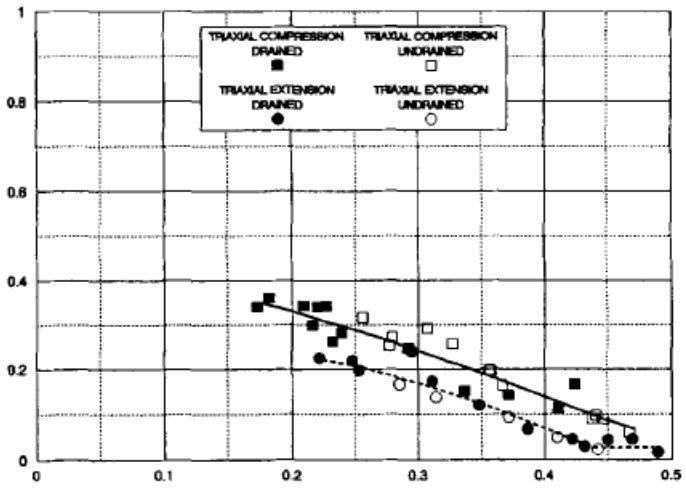


شکل (۲-۷) : منحنی تغییرات فاکتور شکست لی و فرهومند در برابر P_f'، برای آزمایش‌های سه محوری زهکشی شده و زهکشی نشده در دو حالت فشاری و کششی در ماسه‌های متراکم کامبریا (لده و همکاران ۱۹۹۶)

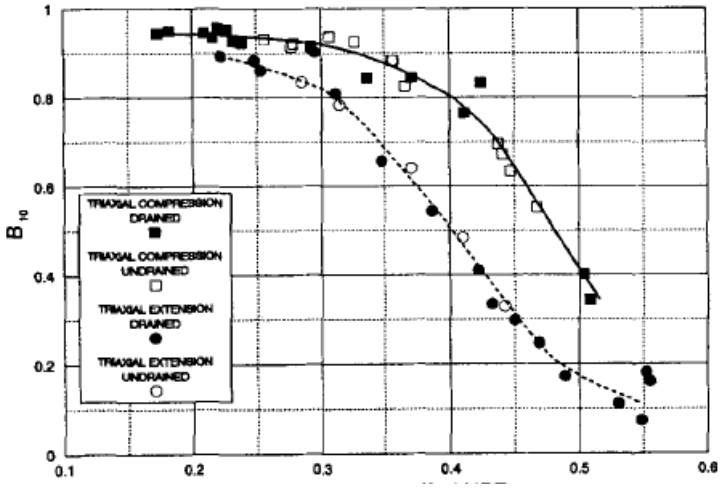
مقایسه بر اساس تنش های نرمال عمودی متوسط، نشان می دهد که میزان شکست ذرات در آزمایش‌های زهکشی نشده بیشتر از آزمایش‌های زهکشی شده (چه از نوع فشاری چه از نوع کششی) می‌باشد.

فاکتور شکست ذرات هاردین B_r، و فاکتور پیشنهاد شده توسط این محقق (B_{10}) از آزمایش‌هایی که بر روی ماسه های متراکم کامبریا انجام شده است به‌دست آورده شده است و نمودار تغییرات آن‌ها در مقابل نسبت تخلخل در هنگام

گسیختگی در شکل (۲-۸) رسم شده است. این نمودارها بیان‌گر رابطه‌ی مستقیم بین شکست ذرات با نسبت تخلخل در هنگام گسیختگی می باشند و این یک مسئله‌ی منطقی است که شکست ذرات یک عامل مهمی در تغییر حجم مصالح در فشارهای بالا می‌باشد. بنابراین نسبت‌های تخلخل مستقیماً به مقادیر شکست ذرات ارتباط پیدا می کند. شکل های (۲-۸) و (۲-۹) نشان می دهند که شکست ذرات در آزمایش‌های فشاری بیشتر از کششی است. همچنین این مقایسه نشان می دهد که مقدار شکست ذرات در آزمایش‌های زهکشی شده و زهکشی نشده تقریباً مساوی است. به هر حال نسبت تخلخل در گسیختگی نمی‌تواند یک فاکتور مؤثر باشد زیرا آزمایش‌های فشاری و کششی خطوط جداگانه ایجاد می کنند.



شکل (۲-۸) : منحنی تغییرات فاکتور شکست هاردین، در برابرنسبت تخلخل در هنگام گسیختگی، برای آزمایش‌های سه محوری زهکشی شده و زهکشی نشده در دو حالت فشاری و کششی در ماسه‌های متراکم کامبریا (لده و همکاران ۱۹۹۶)



شکل (۲-۹) : منحنی تغییرات فاکتور شکست ارائه شده در این مطالعه در برابر نسبت تخلخل، برای آزمایش‌های سه محوری زهکشی شده و زهکشی نشده در دو حالت فشاری و کششی در ماسه های متراکم کامبریا (لده و همکاران ۱۹۹۶)

شاخص شکست ذرات ارائه شده در اینجا فقط بر اساس یک اندازه‌ی معلوم الک محاسبه شده است اما نسبت قطرها که در رابطه‌ی لی و فرهومند[1] ارائه شده در اینجا بر عکس می‌شود و این‌کار به خاطر کاهش اثر خطا در اندازه‌گیری D_{10f} انجام می‌شود و مقدار این فاکتور نیز بین ۰ و ۱ قرار می‌گیرد. پراکندگی در نتایج بسیار محدود است زیرا مقادیر محاسبه شده B_{10} برای نمونه‌های بسیار خرد شده به ۱ محدود هستند. بنابراین این فاکتور شکست پایدار بوده و اثرات ناپایدار بودن از بین می‌رود.به هر حال در برخی موارد ضروری است که برای تعیین B_{10} از درون‌یابی خطی استفاده کنیم. مثلا در مواردی که بیشتر از ۱۰ درصد مصالح از الک ۲۰۰ رد شوند. این برای تعداد کمی از آزمایش‌های سه محوری زهکشی شده در فشارهای خیلی بالا بر روی ماسه‌های متراکم کامبریا لازم است. این طرح برای تعیین فاکتور شکست لی و فرهومند (۱۹۷۶) لازم است.

[1] Lee & Farhoomand