

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شریف

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه به عنوان تحقق بخشی از شرایط دریافت درجه کارشناسی ارشد

گرایش مهندسی زلزله

بررسی تجربی و مدلسازی تحلیلی سطح مشترک آجر و ملات های مختلف

نگارش

نیما عظیمی رسکتی

استاد راهنما

وهب توفیق

شهریور ۱۳۹۶



دانشگاه صنعتی شریف

دانشکده مهندسی عمران

عنوان:

بررسی تجربی و مدل سازی تحلیلی اندرکنش آجر و ملات

توسط:

نیما عظیمی رستکی

امضاء کنندگان زیر، متن پایان نامه را مطالعه کرده و منطبق بر ضوابط تحصیلات تکمیلی دانشگاه صنعتی شریف، آن را برای دریافت درجه کارشناسی ارشد مورد تأیید قرار دادند.

امضاء: و

استاد راهنما: آقای دکتر وهب توفیق

امضاء:

استاد ممتحن داخل دانشکده: آقای دکتر محسن قائمیان

امضاء:

استاد مدعو: آقای دکتر محمد محسن توفیق

تاریخ: ۹۶/۱۰/۱۸



اظهار نامه

(اصالت متن و محتوای پایان نامه کارشناسی ارشد)

عنوان پایان نامه:

.....

نام استاد راهنما: نام استاد راهنمای همکار: نام استاد مشاور:

این جانب اظهار می دارم:

- ۱- متن و نتایج علمی ارائه شده در این پایان نامه اصیل بوده و منحصرأ توسط این جانب و زیر نظر استادان (راهنما، همکار و مشاور) نام برده شده در بالا تهیه شده است.
- ۲- متن پایان نامه به این صورت در هیچ جای دیگری منتشر نشده است.
- ۳- متن و نتایج مندرج در این پایان نامه، حاصل تحقیقات این جانب به عنوان دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی شریف است.
- ۴- کلیه مطالبی که از منابع دیگر در این پایان نامه مورد استفاده قرار گرفته، با ذکر مرجع مشخص شده است.

نام دانشجو:

تاریخ

امضا

نتایج تحقیقات مندرج در این پایان نامه و دستاوردهای مادی و معنوی ناشی از آن (شامل فرمول ها، توابع کتابخانه ای، نرم افزارها، سخت افزارها و مواردی که قابلیت ثبت اختراع دارد) متعلق به دانشگاه صنعتی شریف است. هیچ شخصیت حقیقی یا حقوقی بدون کسب اجازه از دانشگاه صنعتی شریف حق فروش و ادعای مالکیت مادی یا معنوی بر آن یا ثبت اختراع از آن را ندارد. همچنین کلیه حقوق مربوط به چاپ، تکثیر، نسخه برداری، ترجمه، اقتباس و نظائر آن در محیط های مختلف اعم از الکترونیکی، مجازی یا فیزیکی برای دانشگاه صنعتی شریف محفوظ است. نقل مطالب با ذکر ماخذ بلامانع است.

نام دانشجو:

تاریخ

امضا

نام استادان راهنما:

تاریخ

امضا

تقدیم به :

پدر و مادرم که همواره کمک حال و پشتیبان من بوده‌اند.

تشکر و قدردانی

در ابتدا از خداوند منان به دلیل قرار گیری در جایگاه فعلی شکر و سپاس می‌گویم. بی شک قرار گیری در جایگاه فعلی بدون عنایت خداوند امکانپذیر نبود.

در تمامی مراحل آماده سازی و نگارش این پایان نامه افراد زیادی بنده را کمک و راهنمایی کردند که امکان حضور اسامی تمامی این عزیزان وجود نخواهد داشت. لذا پیشاپیش از دوستانی که از آنها یادی نشده پوزش می‌طلبم.

در ابتدا قصد دارم از پدر و مادر مهربانم که در تمامی مراحل زندگی پشتیبان و مشوق من بوده‌اند تشکر و قدردانی ویژه‌ای به عمل آورم.

از جناب آقای محمدی مسئول آزمایشگاه خاک دانشگاه صنعتی شریف و تمامی کارمندان دانشکده مهندسی عمران که در این مدت کار در آزمایشگاه، زحمات زیادی بر آنها بوده تشکر و قدردانی می‌شود.

از کارخانه سیمان خاش به دلیل در اختیار قرار دادن پوزولان تفتان، شرکت فرآورده‌ها به دلیل فراهم آوردن ژل میکرو سیلیس و جناب دکتر الوانچی از دانشکده عمران به دلیل در اختیار گذاشتن بودجه آزمایشگاهی‌شان تشکر به عمل می‌آید.

از جناب مهندس امین سلطانیان به دلیل کمک‌های صادقانه و راهنمایی‌های ارزشمندشان در مراحل از کار نیز تقدیر به عمل می‌آید.

در انتها بر خود لازم می‌دانم که تشکر و سپاسگذاری خود را از استاد راهنمای خود جناب دکتر وهب توفیق که در طول دو سال و اندی همکاری قبول زحمت نموده و سرپرستی پایان‌نامه اینجانب را بر عهده گرفته‌اند، تشکر به عمل بیاورم.

چکیده

با توجه به استفاده از مصالح بنایی در کشور، تلاش جهت بهبود خواص سازه‌های ساخته شده توسط این روش هدف اصلی این پژوهش می‌باشد. قوی بودن پیوند بین آجر و ملات نقش مهمی را در این زمینه ایفا می‌کند. با توجه به اینکه عمده شکست‌ها در هنگام زلزله در این سیستم شکست برشی می‌باشد، در بیشتر موارد جداشدگی دو جسم در سطح مشترک آن‌ها، دلیل اصلی شکست برشی این سیستم می‌باشد. با توجه به نرخ شکل‌پذیری پایین ملات سیمانی و نرخ بالای دی‌اکسید کربن تولید شده توسط سیمان، در این پژوهش تلاش‌هایی برای افزایش میزان شکل‌پذیری و همچنین کاهش دی‌اکسید کربن صورت پذیرفت. بدین منظور از پوزولان طبیعی تفتان و خاکستر پوسته برنج با ترکیبات متفاوت در ساخت ملات‌ها استفاده گردید. در این راستا دو عدد آجر توسط ملات بین‌شان به یکدیگر چسبانده شده و پس از عمل‌آوری مورد تست برشی قرار گرفتند. انجام تست با تغییراتی که در دستگاه برش مستقیم داده شد، برای ۹ نوع ملات مختلف و با بارهای نرمال مختلف صورت پذیرفت. همچنین برای دو نمونه از ملات‌ها اثر افزایش مقاومت در طول زمان و زیاد شدن سن نمونه نیز محاسبه گردیده است. نتایج بدست آمده حاکی از اثر مثبت ملات‌های حاوی خاکستر پوسته برنج بر شکل‌پذیری ملات می‌باشد. به گونه‌ای که استفاده از این ملات‌ها، میزان شکل‌پذیری را نسبت به ملات سیمانی، دو تا سه برابر می‌کند. همچنین با در نظر گیری اثر محیط زیستی این مواد و همچنین اثر آن بر کاهش هزینه ملات، توجیه استفاده از آن دو چندان می‌گردد. در ادامه به محاسبه پارامترهای مدل HISS دسای که پرداخته شده و در ادامه با بدست آوردن پارامترهای فوق مدل‌سازی بر روی نمونه انجام شده و به مقایسه نتایج مدل‌سازی با آزمایشات انجام شده پرداخته شده است.

کلمات کلیدی: مصالح بنایی؛ آجر؛ ملات؛ سطح مشترک؛ مقاومت برشی پیوند؛ مصالح دوست‌دار محیط

زیست

فهرست مطالب

ب	تشکر و قدردانی
ت	چکیده
أ	فهرست مطالب
ج	فهرست جدول‌ها
خ	فهرست شکل‌ها
۱	معرفی پژوهش
۱-۱	۱-۱ مقدمه.....
۱-۲	۱-۲ مقدمه‌ای بر انواع سازه‌های بنایی.....
۱-۳	۱-۳ مقدمه‌ای بر ملات‌های ساختمانی.....
۱-۴	۱-۴ طرح مسئله.....
۱-۴-۱	۱-۴-۱ گردآوری منابع.....
۱-۴-۲	۱-۴-۲ بررسی و مقایسه مطالعات ارائه شده پیشین.....
۱-۴-۳	۱-۴-۳ بررسی مدل بکار رفته در پژوهش و تحلیل و بدست آوردن پارامترهای مدل.....
۱-۴-۴	۱-۴-۴ بررسی نتایج حاصل از آزمایشگاه و مقایسه با نتایج مدل‌سازی.....
۱-۴-۵	۱-۴-۵ جمع بندی و ارائه گزارش نهایی.....
۱-۵	۱-۵ اهداف تحقیق.....
۵	فصل ۲ مبانی نظری و پیشینه پژوهش
۵-۱	۲-۱ مقدمه.....

- ۲-۲ مبانی نظری سطح مشترک ۷
- ۲-۲-۱ معیارهای موثر بر سطح مشترک ۷
- ۲-۳ پیشینه سازه‌های بنایی ۸
- ۲-۴ پیشینه استفاده از پوزولان ۱۰
- ۲-۵ پیشینه پژوهش رفتار سطح مشترک آجر و ملات و تست‌های انجام شده ۱۲
- ۲-۶ مدل‌های رفتاری در سطوح مشترک ۱۶
- ۲-۶-۱ روند کلی مطالعات سطح مشترک ۱۶
- ۲-۶-۲ رویکردهای مدلسازی سطح مشترک ۱۷
- ۲-۶-۳ دسته‌بندی مدل‌های رفتاری سطح مشترک ۱۸
- ۲-۷ نتیجه‌گیری ۱۹

فصل ۳ روش پژوهش

- ۲۰
- ۳-۱ مقدمه ۲۰
- ۳-۲ آزمایشات تجربی ۲۰
- ۳-۲-۱ ویژگی مصالح مورد استفاده ۲۰
- ۳-۲-۲ ترکیبات شیمیایی و سطح مخصوص مصالح مورد استفاده ۲۵
- ۳-۲-۳ چگونگی تولید خاکستر پوسته برنج ۲۸
- ۳-۲-۴ طرح اختلاط و شیوه ساخت ملات سیمانی ساده ۳۰
- ۳-۲-۵ طرح اختلاط دیگر ملات‌های استفاده شده ۳۲
- ۳-۲-۶ ویژگی‌های مقاومتی ملات مورد استفاده ۳۶
- ۳-۲-۷ محاسبه بار نرمال‌های مختلف اعمالی ۴۰

.....	۳-۲-۸ ساخت نمونه‌های آجری.....	۴۱
.....	۳-۲-۹ انجام تست بر روی نمونه‌ها.....	۴۴
.....	۳-۳ مدل سازی.....	۴۹
.....	۳-۳-۱ مقدمه.....	۴۹
.....	۳-۳-۲ استفاده از مفهوم سطح مشترک.....	۵۰
.....	۳-۳-۳ پارامترهای الاستیک برای مدل HISS.....	۵۲
.....	۳-۳-۴ پارامترهای الاستوپلاستیک برای مدل HISS.....	۵۶
.....	۳-۳-۵ محاسبه زاویه اصطکاک و چسبندگی.....	۵۹
.....	۳-۳-۶ تعیین پارامترهای q و γ	۶۰
.....	۳-۳-۷ محاسبه پارامتر n	۶۲
.....	۳-۳-۸ تعیین مقادیر α ، a و b	۶۳
.....	۳-۳-۹ برنامه کامپیوتری جهت بدست آوردن نمودار تنش-جابجایی.....	۶۵
.....	فصل ۴ تجزیه و تحلیل یافته‌ها	۶۸
.....	۴-۱ مقدمه.....	۶۸
.....	۴-۲ نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی.....	۶۸
.....	۴-۲-۱ بررسی اثر سن نمونه‌های ساخته شده از ملات سیمانی ساده و پوزولانی.....	۷۱
.....	۴-۲-۲ تجزیه و تحلیل نتایج بدست آمده از تستهای اثر افزایش سن.....	۷۵
.....	۴-۲-۳ بررسی نمونه‌های ساخته شده با ملات‌های مختلف در سن ۲۸ روز.....	۷۵
.....	۴-۲-۴ تجزیه و تحلیل نتایج بدست آمده از تست‌های ۲۸ روزه بر ملات‌های مختلف.....	۸۲
.....	۴-۳ پارامترهای مدل.....	۸۳

۴-۴ مقایسه مدل‌سازی و نتایج تجربی ۹۲

۴-۴-۱ تجزیه و تحلیل نتایج بدست آمده از بخش مدل‌سازی و مقایسه با نمونه

آزمایشگاهی ۹۳

۹۵ فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱ نتیجه‌گیری ۹۵

۵-۱-۱ نتایج حاصل از تست بر روی نمونه‌های ۹۵

۵-۲ پیشنهادها ۹۷

۹۸ مراجع

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۳ مشخصات فیزیکی و مقاومتی آجر استفاده شده.....	۲۱
جدول ۲-۳ نتایج آزمایش دانه بندی بر روی ماسه مورد استفاده.....	۲۲
جدول ۳-۳ آزمایش درصد رطوبت بر روی ماسه.....	۲۳
جدول ۴-۳ نتایج تست XRF درصد مواد بدست آمده از آزمایشگاه.....	۲۶
جدول ۵-۳ نتایج بدست آمده از تست کربن.....	۲۷
جدول ۶-۳ نتایج تست XRF اصلاح شده؛ درصد مواد تشکیل دهنده خاکستر، بدست آمده از آزمایشگاه.....	۲۷
جدول ۷-۳ نتایج بدست آمده از آزمون BET.....	۲۸
جدول ۸-۳ طرح اختلاط ملات سیمانی ساده.....	۳۲
جدول ۹-۳ طرح اختلاط ملات پوزولانی ۱۵٪.....	۳۳
جدول ۱۰-۳ طرح اختلاط ملات پوزولانی ۲۵٪.....	۳۳
جدول ۱۱-۳ طرح اختلاط ملات پوزولانی ۱۵٪ بدون میکروسیلیس.....	۳۴
جدول ۱۲-۳ طرح اختلاط ملات پوزولانی ۲۵٪ بدون میکروسیلیس.....	۳۴
جدول ۱۳-۳ طرح اختلاط ملات خاکستر پوسته برنج ۱۵٪ نوع I.....	۳۴
جدول ۱۴-۳ طرح اختلاط ملات خاکستر پوسته برنج ۲۵٪ نوع I.....	۳۵
جدول ۱۵-۳ طرح اختلاط ملات خاکستر پوسته برنج ۱۵٪ نوع II.....	۳۵
جدول ۱۶-۳ طرح اختلاط ملات خاکستر پوسته برنج ۲۵٪ نوع II.....	۳۶
جدول ۱۷-۳ نتایج تست مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های استوانه‌ای.....	۳۸
جدول ۱۸-۳ نتایج تست مقاومت کششی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای.....	۴۰
جدول ۱۹-۳ محاسبه بار نرمال اعمالی در ردیف‌های مختلف دیوار.....	۴۱
جدول ۲۰-۳ درصد رطوبت آجر با گذشت زمان و در محیط آزمایشگاه.....	۴۲
جدول ۲۱-۳ پارمترهای ثابت مدل HISS- δ_0	۵۲
جدول ۲۲-۳ ثابت‌های مواد برای سطح مشترک آجر و ملات سیمانی ساده.....	۶۵
جدول ۱-۴ ثابت‌های مواد برای سطح مشترک آجر و ملات سیمانی ساده.....	۸۳
جدول ۲-۴ ثابت‌های مواد برای سطح مشترک آجر و ملات پوزولانی ۱۵٪.....	۸۴

- جدول ۳-۴ ثابت‌های مواد برای سطح مشترک آجر و ملات پوزولانی ۱۵٪ بدون میکروسیلیس..... ۸۵
- جدول ۴-۴ ثابت‌های مواد برای سطح مشترک آجر و ملات پوزولانی ۲۵٪..... ۸۶
- جدول ۵-۴ ثابت‌های مواد برای سطح مشترک آجر و ملات پوزولانی ۲۵٪ بدون میکروسیلیس..... ۸۷
- جدول ۶-۴ ثابت‌های مواد برای سطح مشترک آجر و ملات خاکستر پوسته برنج ۱۵٪ نوع I..... ۸۸
- جدول ۷-۴ ثابت‌های مواد برای سطح مشترک آجر و ملات خاکستر پوسته برنج ۲۵٪ نوع I..... ۸۹
- جدول ۸-۴ ثابت‌های مواد برای سطح مشترک آجر و ملات خاکستر پوسته برنج ۱۵٪ نوع II..... ۹۰
- جدول ۹-۴ ثابت‌های مواد برای سطح مشترک آجر و ملات خاکستر پوسته برنج ۲۵٪ نوع II..... ۹۱

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۲ دیوار جداکننده آسیب دیده در اثر زلزله سال ۱۳۹۶ کرمانشاه- شهرستان تازه آباد (تصویر توسط نگارنده گرفته شده است).....	۶
شکل ۲-۲ برج رسکت، نمونه‌ای از سازه‌های ساخته شده توسط مصالح بنایی. این برج در ۷۰ کیلومتری جنوب ساری واقع شده است. زمان ساخت آن به قرن پنجم هجری باز می‌گردد.....	۹
شکل ۳-۲ شمایی از شیوه تست برش بکار رفته در پژوهش سارانگاپانی [۵۴].....	۱۵
شکل ۴-۲ شمایی از تست مقاومت خمشی پیوند بکار رفته در پژوهش سارانگاپانی [۵۴].....	۱۵
شکل ۱-۳ نمونه‌ای از آجر به کار رفته در پژوهش.....	۲۱
شکل ۲-۳ مقایسه حدود مجاز عبوری از هر الک برای ماسه و ماسه مورد استفاده.....	۲۳
شکل ۳-۳ پوسته برنج مورد استفاده در پژوهش.....	۲۴
شکل ۴-۳ تصویری از خاکستر پوسته برنج نوع I.....	۲۹
شکل ۵-۳ تصویری از خاکستر پوسته برنج نوع II.....	۳۰
شکل ۶-۳ میز جریان مورد استفاده در پژوهش.....	۳۱
شکل ۷-۳ نمونه‌های استوانه‌ای ساخته شده جهت تست بر روی ملات.....	۳۷
شکل ۸-۳ انواع شکست‌های موجود در تست مقاومت فشاری [۸۲].....	۳۷
شکل ۹-۳ نمونه تست شده در تست مقاومت فشاری.....	۳۸
شکل ۱۰-۳ نمونه تست شده توسط تست مقاومت کششی.....	۳۹
شکل ۱۱-۳ نمایش ردیف‌های دیوار جهت محاسبه بار نرمال.....	۴۱
شکل ۱۲-۳ چگونگی ساخت نمونه‌های بکار رفته در پژوهش.....	۴۲
شکل ۱۳-۳ شرایط نگهداری و عمل‌آوری نمونه.....	۴۳
شکل ۱۴-۳ اعمال بار بر روی نمونه‌ها در زمان عمل‌آوری.....	۴۳
شکل ۱۵-۳ شمایی از نیم‌جعبه بالایی و پایینی بکار رفته در دستگاه برش مستقیم.....	۴۵
شکل ۱۶-۳ قالب مورد استفاده در نیم‌جعبه پایینی.....	۴۵
شکل ۱۷-۳ فرارگیری قالب‌های بالایی و پایینی به همراه نمونه درون دستگاه.....	۴۶
شکل ۱۸-۳ چگونگی استقرار جابجایی سنج‌ها بر روی دستگاه.....	۴۷
شکل ۱۹-۳ شمای کلی دستگاه حین آزمایش.....	۴۷

- شکل ۳-۲۰ نمودار تنش-جابجایی ملات ۲۸ روزه سیمانی ساده با بار نرمال ۹۰ کیلوگرم..... ۴۸
- شکل ۳-۲۱ سطح مشترک بین آجر و ملات..... ۵۰
- شکل ۳-۲۲ رابطه سختی نرمال در مقابل جابجایی برای بدست آوردن سختی محوری [۶۴]..... ۵۳
- شکل ۳-۲۳ تغییرات سختی نرمال در مقابل تنش نرمال برای سطح مشترک آجر و ملات..... ۵۴
- شکل ۳-۲۴ تعیین سختی برشی سطح مشترک (k_s) [۶۴]..... ۵۵
- شکل ۳-۲۵ تغییرات سختی برشی در مقابل تنش نرمال..... ۵۵
- شکل ۳-۲۶ تعیین پارامترهای سخت شوندهگی [۸۶]..... ۵۷
- شکل ۳-۲۷ سطح تسلیم و سطح نهایی شکست [۶۴]..... ۵۸
- شکل ۳-۲۸ حالت تنش در نقطه گذار [۶۴]..... ۵۹
- شکل ۳-۲۹ تنش برشی نهایی در مقابل تنش نرمال..... ۶۰
- شکل ۳-۳۰ نمودار تنش برشی به توان دو در مقابل تنش نرمال به توان دو (با اعمال ضریب افزایشی تنش برشی)..... ۶۱
- شکل ۳-۳۱ نمودار لگاریتم تنش نرمال در مقابل لگاریتم تنش برشی..... ۶۱
- شکل ۳-۳۲ تنش برشی نقطه گذار در مقابل تنش نرمال..... ۶۲
- شکل ۳-۳۳ تعیین پارامترهای سختی برای $\sigma_n = 2.5$ ۶۳
- شکل ۳-۳۴ تعیین پارامترهای سختی برای $\sigma_n = 22.5$ ۶۴
- شکل ۳-۳۵ تعیین پارامترهای سختی برای $\sigma_n = 45$ ۶۴
- شکل ۳-۳۶ مقایسه نمودار تنش-جابجایی برای نمونه حاوی ملات سیمانی ساده و بار نرمال ۵۰ نیوتن و سن ۲۸ روز، در حالت مدل سازی با استفاده از مدل HISS و نمونه تست شده در آزمایشگاه..... ۶۷
- شکل ۴-۱ نمودار تنش-جابجایی نمونه سیمانی ساده ۱ روزه تحت بار نرمال ۴۵۰ نیوتن..... ۶۹
- شکل ۴-۲ نمودار تنش-جابجایی نمونه سیمانی ساده ۳ روزه تحت بار نرمال ۴۵۰ نیوتن..... ۶۹
- شکل ۴-۳ نمودار تنش-جابجایی نمونه سیمانی ساده ۷ روزه تحت بار نرمال ۴۵۰ نیوتن..... ۷۰
- شکل ۴-۴ نمودار تنش-جابجایی نمونه سیمانی ساده ۱۴ روزه تحت بار نرمال ۴۵۰ نیوتن..... ۷۰
- شکل ۴-۵ نمودار تنش-جابجایی نمونه سیمانی ساده ۲۸ روزه تحت بار نرمال ۴۵۰ نیوتن..... ۷۱
- شکل ۴-۶ بررسی اثر سن در ملات سیمانی ساده تحت بار نرمال ۵۰ نیوتن..... ۷۲
- شکل ۴-۷ بررسی اثر سن در ملات سیمانی ساده تحت بار نرمال ۴۵۰ نیوتن..... ۷۲
- شکل ۴-۸ بررسی اثر سن در ملات سیمانی ساده تحت بار نرمال ۹۰۰ نیوتن..... ۷۳
- شکل ۴-۹ بررسی اثر سن در ملات پوزولان ۱۵٪ تحت بار نرمال ۵۰ نیوتن..... ۷۳
- شکل ۴-۱۰ بررسی اثر سن در ملات پوزولان ۱۵٪ تحت بار نرمال ۴۵۰ نیوتن..... ۷۴

- شکل ۴-۱۱ بررسی اثر سن در ملات پوزولان ۱۵٪ تحت بار نرمال ۹۰۰ نیوتن ۷۴
- شکل ۴-۱۲ اثر افزایش بار نرمال بر مقاومت برشی پیوند نمونه حاوی ملات سیمانی ساده ۷۶
- شکل ۴-۱۳ اثر افزایش بار نرمال بر مقاومت برشی پیوند نمونه حاوی ملات پوزولانی ۱۵٪ ۷۶
- شکل ۴-۱۴ اثر افزایش بار نرمال بر مقاومت برشی پیوند نمونه حاوی ملات پوزولانی ۱۵٪ بدون میکروسیلیس ۷۷
- شکل ۴-۱۵ اثر افزایش بار نرمال بر مقاومت برشی پیوند نمونه حاوی ملات پوزولانی ۲۵٪ ۷۷
- شکل ۴-۱۶ اثر افزایش بار نرمال بر مقاومت برشی پیوند نمونه حاوی ملات پوزولانی ۲۵٪ بدون میکروسیلیس ۷۸
- شکل ۴-۱۷ اثر افزایش بار نرمال بر مقاومت برشی پیوند نمونه حاوی ملات خاکستر پوسته برنج ۱۵٪ نوع I ۷۸
- شکل ۴-۱۸ اثر افزایش بار نرمال بر مقاومت برشی پیوند نمونه حاوی ملات خاکستر پوسته برنج ۲۵٪ نوع I ۷۹
- شکل ۴-۱۹ اثر افزایش بار نرمال بر مقاومت برشی پیوند نمونه حاوی ملات خاکستر پوسته برنج ۱۵٪ نوع II ۷۹
- شکل ۴-۲۰ اثر افزایش بار نرمال بر مقاومت برشی پیوند نمونه حاوی ملات خاکستر پوسته برنج ۲۵٪ نوع II ۸۰
- شکل ۴-۲۱ اثر ملات‌های مختلف بر مقاومت برشی پیوند برای بار نرمال ۵ نیوتن ۸۰
- شکل ۴-۲۲ اثر ملات‌های مختلف بر مقاومت برشی پیوند برای بار نرمال ۴۵۰ نیوتن ۸۱
- شکل ۴-۲۳ اثر ملات‌های مختلف بر مقاومت برشی پیوند برای بار نرمال ۹۰۰ نیوتن ۸۱
- شکل ۴-۲۴ مقایسه نمودار تنش-جابجایی برای نمونه حاوی ملات خاکستر پوسته برنج ۱۵٪ نوع I و بار نرمال ۹۰ کیلوگرم و سن ۲۸ روز، در حالت مدل سازی با استفاده از مدل HISS و نمونه تست شده در آزمایشگاه ۹۲
- شکل ۴-۲۵ مقایسه نمودار تنش-جابجایی برای نمونه حاوی ملات سیمانی ساده و بار نرمال ۵۰ نیوتن و سن ۲۸ روز، در حالت مدل سازی با استفاده از مدل HISS و نمونه تست شده در آزمایشگاه ۹۳

درک و توصیف رفتار مکانیکی مصالح مهندسی و سطوح مشترک، نقش مهمی را در پیش‌بینی رفتار، تحلیل و طراحی سیستم‌های مهندسی ایفا می‌کند. اصول مکانیک و فیزیک برای بدست آوردن معادلات حاکمی که منجر به حل رفتار سامانه‌های مهندسی می‌شوند، به وجود آمده‌اند. روش‌های حل تحلیلی و عددی بدین شکل، شامل اجزای مهمی از رفتار مصالح می‌گردند که توسط مدل‌ها و یا معادلات و قوانین رفتاری تعریف می‌شوند.

تعریف قوانین رفتاری بر اساس اصول مکانیک، تشخیص پارامترهای مشخصه، تعیین مقدار پارامترها از آزمایش‌های مناسب، صحت‌سنجی مدل‌ها با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، به کارگیری مدل‌ها در روندهای حل تحلیلی و یا محاسباتی و نیز صحت‌سنجی مسائل عملی مقدار مرزی، همگی اجزای مهمی در شکل‌گیری و استفاده از مدل‌های واقع‌گرایانه رفتار هستند.

از آنجایی که مواد دانه‌ای رفتاری غیرخطی از خود نشان می‌دهند، پاسخ ماده با بار و یا تحریک ورودی رابطه خطی و مستقیمی نخواهد داشت. بنابراین اگرچه فرض خطی بودن، راه‌های مفیدی را فراهم می‌کند، اما اعتبار آن در حالات غیر خطی پاسخ ماده به شدت محدود بوده و جواب‌های بدست آمده با واقعیت، اختلاف فراوانی دارد. عمده دلیل عدم استفاده از روابط غیر خطی به طور مستقیم، ناتوانی در حل مستقیم این معادلات می‌باشد. لذا روش‌های محاسباتی و عددی به وجود آمده که امکان تحلیل‌های غیر خطی را با سادگی بیشتری فراهم می‌سازند که به حل دقیق‌تر مسائل غیر خطی کمک شایانی کرده است. علی‌رغم روش‌های متعدد ارائه شده برای تحلیل و مدلسازی رفتار غیر خطی مصالح، هنوز هم نیاز به ارائه مدل‌های دقیق‌تر و واقع‌گرایانه‌تر برای پیش‌بینی رفتار مواد به جهت طراحی‌های اقتصادی‌تر احساس می‌گردد.

با توجه به نیاز موجود مبنی بر درک رفتار مصالح و سیستم‌های مهندسی، در این پایان‌نامه رفتار انواع ملات‌های مختلف شامل مصالح دوست‌دار محیط زیست^۱ در سیستم آجر و ملات بررسی گردیده و ضمن انجام آزمایشات مختلف با استفاده از تست برش مستقیم، به مدلسازی عددی سیستم‌های بکار رفته شده پرداخته شده است. در ذیل مقدمه‌ای مشروح پیرامون هر یک از آن‌ها ارائه شده است.

^۱ Green materials

۱-۲ مقدمه‌ای بر انواع سازه‌های بنایی

سازه‌های بنایی گونه‌ای از کامپوزیت‌های لایه‌ای بوده که از ملات و واحد بنایی (بلوک و یا آجر) تشکیل شده است. امروزه از این سیستم سازه‌ای در بسیاری از ساختمان‌های یک و دو طبقه و خصوصاً در مناطق روستایی کشور ایران استفاده فراوانی می‌شود. قیمت ارزان، سادگی تهیه این مواد و عدم نیاز به نیروی متخصص از جمله دلایل کاربرد بالای این سیستم سازه‌ای می‌باشد. این موضوع با توجه به آسیب پذیر بودن این سیستم سازه‌ای در مقابل بار لرزه‌ای و قرارگیری کشور ایران بر روی کمربند لرزه‌ای، از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد [۱]. نتایج حاصل از زلزله بم تاییدی قوی بر مطالب فوق می‌باشد [۲]. پیوند قوی بین واحد بنایی و ملات برای مقاومت این سیستم در برابر تنش‌های ناشی از شرایط بارگذاری‌های مختلف، کاملاً ضروری می‌باشد [۳]. در سازه‌های بنایی تحت فشار، سختی نسبی واحدهای بنایی و ملات، بر طبیعت توزیع تنش بین این دو تاثیر می‌گذارد. همچنین آسیب لرزه‌ای سازه‌های بنایی به مقدار زیادی به مقاومت‌شان در برابر نیروی برشی بستگی دارد [۴]. عمده این شکست‌ها در هنگام زلزله، ناشی از شکست در سطح اندرکنش واحد بنایی و ملات بوده که عمده دلیل آن مقاومت کمتر این ناحیه نسبت به دیگر اجزای سازه بنایی می‌باشد [۵]. همچنین به دلیل کم بودن مطالعات در زمینه‌های اندازه‌گیری مقاومت و چگونگی بهبود عملکرد این دسته از سیستم‌های سازه‌ای، مطالعه‌ی حاضر به بررسی موضوعات مطرح شده می‌پردازد.

۱-۳ مقدمه‌ای بر ملات‌های ساختمانی

پس از رواج سیمان در صنعت ساختمان، تا کنون ملات سیمانی با ترکیب ماسه، سیمان و آب پرفرودارترین و پرکاربردترین ملات در کشور می‌باشد. با توجه به روند رو به رشد ساخت و ساز در دنیا و به تبع آن افزایش استفاده از بتن و ملات، بررسی و بهبود خواص رفتاری این ماده ضرورتی پیوسته و دنباله دار است [۶]. بنابراین؛ نیاز به بهبود درک رفتار انواع ملات‌ها و تلاش برای بهبود آن، امری مهم و حیاتی است. اگر چه در پژوهش‌های پیشین بر روی مقاومت ملات مطالعات اندکی صورت گرفته، اما با توجه به تجربی-تحلیلی بودن این پژوهش اثر مواد و ترکیبات جدید بر روی ملات آورده شده تا ضمن بررسی خواص این مواد افزوده شده، بتوان به مدل تحلیلی قوی‌تری دست یافت.

۴-۱ طرح مسئله

مسئله مورد مطالعه در این پژوهش، مسئله بررسی و مدلسازی سطح اندرکنش بین آجر و ملات می باشد که به ترتیب مراحل زیر در آن دنبال شده است.

۴-۱-۱ گردآوری منابع

در این مرحله به جستجو و مطالعه تحقیقات انجام شده پیشین توسط سایر پژوهشگران دانشگاه‌های خارجی و داخلی پرداخته شده است. اهمیت این مرحله در ایجاد دید مناسب نسبت به روند تحقیقات تاکنون و همچنین اجتناب از تکرار پژوهش‌های صورت گرفته توسط پژوهشگران پیشین می باشد. از سوی دیگر، مطالعه تحقیقات پیشین می تواند ایده‌های جدیدی را در ذهن ایجاد کند که اهمیت موضوع را دوچندان می کند.

۴-۲-۱ بررسی و مقایسه مطالعات ارائه شده پیشین

بر اساس جستجوهای صورت گرفته از مرحله قبل، پژوهش‌های ارائه شده توسط محققان در زمینه‌های مقاومت سطح اندرکنش آجر و سیمان، استفاده از پوزولان در بتن، استفاده از پوسته برنج در بتن و دیگر مصالح سبز برای سطح مشترک^۱ آجر و ملات استخراج گردید. در این مرحله لزوم استفاده از هر کدام از این مصالح و نیز شرایط مورد نیاز استفاده از آنها و همچنین مزایا و معایب هر یک از آنها، با یکدیگر مقایسه گردیده است.

۴-۳-۱ بررسی مدل بکار رفته در پژوهش و تحلیل و بدست آوردن پارامترهای مدل

مدل ارائه شده جهت مدلسازی سطح مشترک، همانطور که در بخش طبقه بندی انواع مدل‌های رفتاری مورد بحث قرار خواهد گرفت، دارای پارامترهای زیادی می باشند. بدست آوردن این پارامترها نیاز به مطالعات گسترده‌ای دارد. در این مرحله داده‌های آزمایشگاهی حاصل از آزمایش‌های انجام شده مورد تحلیل قرار گرفته و پارامترهای مدل استخراج گردید.

^۱ Interface

۱-۴-۴ بررسی نتایج حاصل از آزمایشگاه و مقایسه با نتایج مدل سازی

در این مرحله نمودارهای بدست آمده از مدل سازی با نتایج حاصل از آزمایش مقایسه گردیده است. بررسی خطای مدل ارائه شده و با بررسی رویه انجام شده، راهکارهایی جهت بهبود بخشیدن مدل به عنوان پیشنهاد مطالعات آینده ارائه گردیده است.

۱-۴-۵ جمع بندی و ارائه گزارش نهایی

در این مرحله تمامی موارد انجام شده جمع بندی گردیده و گزارش نهایی در غالب پایان نامه پیش رو آماده و ارائه گردیده است.

۱-۵ اهداف تحقیق

اهداف تحقیق را می توان به طور کلی به سه بخش زیر تقسیم نمود:

- بهبود خواص ملات های استفاده شده در ساختمان ها با افزایش شکل پذیری و جلوگیری از ریزش ناگهانی در هنگام زلزله
- بررسی جایگزینی و تعدیل میزان سیمان با افزودن مواد دوستدار محیط زیست
- مدل سازی رفتار سطح مشترک، ارائه نمودارهای تنش-جابجایی برشی و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی

فصل ۲ مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۲-۱ مقدمه

اگر چه استفاده از مصالح بنایی سازه‌ای رو به کاهش بوده، اما این نوع مصالح هنوز هم از طرفداران زیادی خصوصاً در کشورمان ایران برخوردارند. به گونه‌ای که در خاورمیانه، میزان استفاده از این مصالح بنایی مانند انواع مختلف آجر، بلوک و سیمان به طرز چشمگیری بالا می‌باشد. این در حالی است که میزان استفاده از این سیستم در مناطق ضعیف اقتصادی و نیز مناطق روستایی زیاد می‌باشد. اگرچه تقریباً استفاده از سیستم دیوارهای باربر بسیار کم شده‌است، اما هنوز هم در دیوارهای جداکننده از این مصالح استفاده می‌شود. یکی از مشکلاتی که در سازه‌های دارای این مصالح و خصوصاً این دیوارها وجود دارد، حرکت خروج از صفحه آنها در حین زلزله می‌باشد که عمدتاً به دلیل ترد بودن و شکل پذیری کم مصالح رخ می‌دهد مسئله‌ای که در زلزله‌های گذشته ایران و سایر کشورها بوده و در بعضی موارد موجب خسارت‌های جانی شده‌اند. شکل ۱-۲ نمونه‌ای از دیوار جداکننده را در زلزله کرمانشاه در سال ۱۳۹۶ نشان می‌دهد که با آنکه اعضای سازه‌ای آسیب چندانی ندید و سازه پایدار ماند، اما حرکت خروج از صفحه دیوار آجری نگرانی‌هایی را در زمینه خسارت جانی به وجود می‌آورد.



شکل ۱-۲ دیوار جداکننده آسیب دیده در اثر زلزله سال ۱۳۹۶ کرمانشاه- شهرستان تازه آباد (تصویر توسط نگارنده گرفته شده است)

عمده ملات‌های استفاده شده جهت استفاده در دیوارهای جداکننده ملات سیمانی ساده بوده که عموماً بدون داشتن استاندارد خاصی توسط نیروی کار ساخته می‌شود.

در گذشته و قبل از رواج سیمان در کشور ما، عمده ملات‌های استفاده شده ملات‌های ساخته شده از مصالح بومی همچون آهک، گاه، لویی، خاکستر، فضولات حیوانات و... استفاده می‌شد و این ملات‌ها از منطقه‌ای به منطقه دیگر روش ساخت و مواد بکار رفته آنها تفاوت داشت [۸، ۷]. مزیت استفاده از این ملات‌ها ویژگی دوستدار محیط زیست بودن آن است. ویژگی‌ای که به سختی می‌توان در بسیاری از مصالح مورد استفاده در عصر جدید یافت. یکی از ویژگی‌هایی که در بسیاری از این مصالح وجود داشت، شکل پذیری بسیار بالای آنها بود. ویژگی‌ای که با آمدن سیمان تا حد بسیاری کاهش داده شد. موضوعی که تا به امروز تلاش چشمگیری برای رفع کردن آن صورت نپذیرفت زیرا که هنوز هم از ملات سیمانی در این دیوارها استفاده فراوانی می‌شود.

یکی از موضوعات پر اهمیت در حوزه صنایع مرتبط با مهندسی عمران و مهندسی مکانیک که از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، مسائل شریط مرزی شامل سطح مشترک دو جسم یکسان و یا غیر یکسان می‌باشد. به نوعی می‌توان تمامی حرکات همچون راه رفتن ساده، دویدن و یا حرکت قطار بر روی ریل‌ها را شامل اصطکاک و تماس دانست. که در صورت نبود اصطکاک هیچ یک از این حرکات ممکن نمی‌گشت. همچنین تمام این حرکات منجر به مسائلی می‌گردند که ذاتاً مسائلی غیر خطی بوده و حتی اگر رفتار تمامی مواد خطی فرض شده و روابط به صورت خطی نوشته شوند.

به دلیل ذات غیر خطی مسائل سطح مشترک یا تماس، این مسائل سابقاً با فرضیات خاصی در طراحی لحاظ می‌شدند. با رشد و بهبود پردازنده‌ها و فناوری‌های نوین، امروزه در کامپیوترها محدودیتی که در مدل‌های دهه‌های پیش از منظر هزینه محاسباتی بود، وجود ندارد. اگرچه هنوز هم اکثر نرم‌افزارهای تجاری اجزای محدود^۱ قادر به در نظر گرفتن رفتار کامل سطوح مشترک یا مسائل تماس با الگوریتم‌های قوی نیستند. بنابراین هنوز هم نیاز به روش‌های قوی و موثر برای مدل‌سازی سطوح مشترک احساس می‌شود.

۲-۲ مبانی نظری سطح مشترک

سطح مشترک بنا به تعریف سطح تشکیل دهنده‌ی مرز بین دو ماده با نواحی مشابه و یکسان و یا سطحی که دو ماده غیر یکسان را از هم جدا می‌کند گفته می‌شود [۹].

۲-۲-۱ معیارهای موثر بر سطح مشترک

معیارهایی که بر رفتار سطح مشترک تاثیر دارند، از جذابیت خاصی در تحقیقات برخوردار بوده‌اند. پوتیوندی^۲ تاثیر زبری سطح سازه بر رفتار سطح مشترک سازه و ماسه را با یک سری آزمایشات برش مستقیم با در نظر گیری مصالح مختلف سازه‌ای همچون بتن، چوب و فولاد بررسی کرده است [۱۰]. مجموعه‌ای از آزمایش‌های برش ساده یکنواخت و تناوبی بر روی رفتار سطح مشترک ماسه و فولاد انجام شده است که نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که توپوگرافی سطح معیاری کلیدی در رفتار اصطکاکی است [۱۱]. دسای و همکارانش^۳ آزمایش‌های تناوبی فراوانی بر روی سطح مشترک ماسه و بتن انجام دادند که نشان داد تنش برشی را می‌توان به عنوان تابعی از تنش نرمال، جابجایی مماسی، تعداد سیکل‌های بارگذاری و چگالی اولیه خاک دانست. [۱۲] همچنین حسینعلی در سال ۱۳۹۴ به مدل‌سازی رفتار انواع بتن‌های مختلفی چون بتن سبک و بتن پلیمری و سطح مشترک آنها با خاک ماسه‌ای پرداخت [۱۳] که به گونه‌ای تعمیم و ادامه فعالیت‌های انجام گرفته توسط دسای می‌باشد. از سوی دیگر، نتایج آزمایش‌های محدودی نشان دادند که مقاومت سطح مشترک بین خاک و ژئوگرید به طور چشمگیری تحت تاثیر تناوب بارگذاری نیست [۱۴]. در عمل سطوح مشترک سامانه‌های خاک-سازه‌ای می‌توانند بسیار پیچیده‌تر از سطوح مشترک آزمایش

^۱ Finite elements (FEM)

^۲ Potyondy

^۳ Desai et al

شده در آزمایشگاه‌ها باشند. رفتار چنین سطوحی می‌تواند به شدت تحت تاثیر شرایط اجرا و ساخت قرار گیرد. به عنوان مثال، در سطح مشترک بین دیواره بتنی و خاک اطراف آن معمولا یک لایه دوغاب قرار می‌گیرد که ناشی از شرایط اجرا است. نتایج آزمایش‌ها نشان داده است که ضخامت لایه دوغاب تاثیر چشمگیری بر رفتار سطح مشترک دارد [۱۵].

۲-۳ پیشینه سازه‌های بنایی^۱

دیوارهای بنایی تقریبا در تمام انواع سیستم‌های مختلف ساختمانی در سرتاسر جهان استفاده می‌شوند. عمده دلیل استفاده از این دیوارها هزینه مناسب، دسترسی آسان، عایق بودن نسبی و وجود نیروی کار ماهر در این زمینه است. دیوارهای بنایی عمدتاً از ملات و واحد بنایی^۲ (آجر، بلوک، سفال و...) تشکیل شده‌اند. به گونه‌ای که ملات و واحدهای بنایی گوناگون در فرآیند ساخت مورد استفاده قرار می‌گیرند.

پیوند قوی بین واحد بنایی و ملات برای سیستم امری ضروری و حیاتی است تا در مقابل تنش ناشی از انواع مختلف بارگذاری مقاومت کند. در سیستم‌های بنایی تحت تنش‌های فشاری، سختی نسبی واحد بنایی و ملات بر طبیعت توزیع تنش در واحد بنایی و ملات تاثیر بسزایی دارد. افزایش مقاومت پیوند آجر و ملات^۳ در اثر فرآیند هیدراسیون سیمان درون حفره‌های سطحی و ریز آجر رخ می‌دهند [۱۶-۱۸]. افزایش مقاومت پیوند آجر تحت تاثیر عوامل و پارامترهای زیادی در رابطه با خواص واحد بنایی و ملات می‌باشد [۱۸]. ویژگی‌هایی چون نوع بافت سطحی، اندازه حفره‌ها، تخلخل، توزیع اندازه حفره‌ها و... که نقش بسیار حیاتی در افزایش مقاومت سیستم ایفا می‌کنند [۱۹].

در گذشته و تا قبل از رواج سیمان، از ملات‌های بومی برای ساخت سیستم‌های بنایی که رایج‌ترین سیستم در آن زمان بود استفاده فراوانی می‌شد. همچنین در کنار ملات‌های بومی از آهک نیز به عنوان ملات استفاده می‌شد. ملاتی که از آهک ساخته می‌شد عموماً از هزینه بالایی برخوردار بود و به همین دلیل در جهت ساخت بناهای مهم و پرهزینه مانند قصرها، برج‌ها و آب‌انبارها از آن استفاده می‌شد. نمونه‌ای از سازه‌های استفاده شده از ملات حاوی آهک در شکل ۲-۲ آورده شده است. یکی دیگر از ملات‌های پرکاربرد و با مقاومت که در زمان‌های قدیم و در کشورهایی چون ایران، رم باستان و عمان استفاده می‌شد، ساروج بود که از ترکیب آهک و سیلیس فعال به وجود می‌آید و در هر منطقه شیوه ساخت خودش را داشت. بارزترین ویژگی این ملات کارایی بسیار خوب آن و مقاومت بسیار عالی آن در برابر آب می‌باشد.

^۱ Masonry structures

^۲ Masonry units

^۳ Brick-Mortar bond development

به گونه‌ای که بنای سد هزار ساله فریمان در استان خراسان رضوی نیز مؤید این ادعاست [۲۱]، [۲۰].



شکل ۲-۲ برج رسکت، نمونه‌ای از سازه‌های ساخته شده توسط مصالح بنایی. این برج در ۷۰ کیلومتری جنوب ساری واقع شده است. زمان ساخت آن به قرن پنجم هجری باز می‌گردد.

استفاده از این ملات‌های قدیمی تا ظهور سیمان ادامه پیدا کرد و پس از رواج سیمان، استفاده از این ملات‌ها نیز به حاشیه کشیده و ملات‌های سیمانی رایج گشت. مزیت استفاده از ملات سیمانی این بود که موجب گشت تا ملات‌های ساختمانی با استاندارد نسبتاً یکسان‌تر و کیفیت بهتری و نیز مقاومت بالاتری استفاده شوند. همچنین از معایب ملات سیمانی می‌توان به داشتن کارایی ضعیف‌تر نسبت به ملات‌های قدیمی و آهکی اشاره کرد [۲۲].

از عمده اشکالات رایج در اکثر سازه‌های بنایی مقاومت بسیار پایین این سازه‌ها در برابر نیروی برشی است که حاصل از عواملی چون زلزله و باد و غیره می‌باشد. بارگذاری جانبی در این سیستم سازه‌ای نهایتاً منجر به یکی از دو شکست زیر می‌شوند.

• شکست از نوع ترک قطری^۱

• شکست برشی ناشی از حرکت افقی اتصالات^۲

که در هر دو این موارد مقاومت ناکافی اتصال یکی از نگرانی‌های موجود در طراحی سازه‌های بنایی غیر مسلح می‌باشد [۲۳].

۴-۲ پیشینه استفاده از پوزولان

بتن یکی از بیشترین موادی است که در فرآیند ساخت و ساز در جهان به کار می‌رود. فراوانی مواد اولیه برای ساخت سیمان، هزینه‌ی کم در مقابل محصولات مشابه و راحتی کار در حالات و شرایط مختلف موجب کاربرد زیاد این ماده شده است. در کنار مزایای سیمان و بتن، یکی از بزرگترین معایب این مواد، نرخ بالای تولید کربن دی اکسید^۳ می‌باشد. میزان بالای کربن دی اکسید تولید شده نگرانی‌های زیادی را در زمینه محیط زیست و آلودگی هوا ایجاد می‌کند. مشکلی که تقریباً اکثر شهرهای صنعتی جهان گریبانگیر آن هستند. در کنار مشکلات و نگرانی‌های بیان شده در رابطه با مشکلات محیط زیستی، از بین بردن و یا استفاده مجدد محصولات جانبی کارخانه‌جات مختلف و همچنین به دلیل مزیت‌های اقتصادی، مخلوط سیمان پرتلند و پوزولان به طور رایجی در تولید بتن به کار می‌رود. [۲۴]

به طور کلی منشا کلمه پوزولان از کلمه "پوزولانا"^۴ بوده که به معنی تشکیل خاکسترهای آتشفشانی و خاک‌های کلسینه شده که در دمای محیط و در حضور آب، با آهک واکنش می‌دهند؛ می‌باشد [۲۵]. در سال‌های اخیر پوزولان مفهوم وسیعتری را در بر گرفته بدین معنی که تمامی مواد سیلیسی و یا سیلیسی-آلومینیومی که در اندازه‌های کوچکی هستند و در دمای محیط و در حضور آب، با کلسیم هیدروکسید^۵ واکنش می‌دهند تا ترکیباتی که خواص سیمانی دارند را تولید کنند گفته می‌شود (ASTM C 618). این مفهوم کلی حتی مواد زائدی مانند خاکستر بادی^۶، خاکستر پوسته برنج^۷، و میکروسیلیس^۸ را نیز در بر می‌گیرد [۲۶].

^۱ Diagonal cracking

^۲ Horizontal bed joint shear failure mode

^۳ CO₂

^۴ Pozzolana

^۵ CH

^۶ Fly ash

^۷ Rice husk ash

^۸ Silica fume

پوزولان‌ها عموماً به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول پوزولان‌هایی که به طور طبیعی و کاملاً آماده در طبیعت وجود دارند. مثل سنگ‌های آتشفشانی توف که عموماً این دسته از پوزولان‌ها در اطراف کوه‌های آتشفشانی یافت می‌شوند. و دسته دوم پوزولان‌های مصنوعی هستند که با انجام تغییراتی در آنها، فعالیت پوزولانی پیدا می‌کنند. همانند پوسته برنج که با تبدیل شدن به خاکستر، ویژگی پوزولانی پیدا می‌کند. مطالعات زیادی در جهت به کار بردن مواد پوزولانی در ساخت و ساز انجام شده است. زیرا علاوه بر اینکه می‌توان این مواد زائد را حذف و در جای دیگری استفاده کرد، استفاده از آن‌ها در ساخت و ساز نیز می‌تواند از آلودگی محیط نیز جلوگیری کند [۲۷-۲۹].

در کشور ما ایران، خالص ترین منابع پوزولانی موجود شناخته شده، تراست البرز و پومیس متخلخل و سبک تفتان می‌باشد.

استفاده از پوزولان؛ تنها به موارد ذکر شده در بالا خلاصه نمی‌شود. به عنوان مثال تانگچیراپات و همکاران^۱ از خاکستر ناشی از سوختن برگ نخل به عنوان پوزولان استفاده کرده و خواص پوزولانی آن را به اثبات رسانده‌اند [۳۰]. این مورد نشان می‌دهد که تحقیق و جستجو بر روی مواد پوزولانی همچنان ادامه دارد.

پوسته برنج یک ماده زائد کشاورزی است که در فرآیند آسیاب کردن برنج، از جداسازی پوسته بیرونی برنج به وجود می‌آید. از لحاظ وزنی، وزن پوسته برنج در حدود ۲۰٪ وزن برنج آسیاب نشده است [۳۱]. اندازه بسیار ریز این خاکستر و قیمت بسیار ارزان آن موجب شد تا تحقیقاتی در رابطه با اثرات آن بر روی بتن صورت گیرد. می‌توان مطالعات پاتیها^۲ و سیس^۳ را اولین مطالعات در این زمینه نامید [۳۲، ۳۳]؛ که استفاده از آن را به جهت پرکننده و یا فیلر در بتن مناسب دانستند. سپس مطالعات بعدی که بر روی این ماده و بررسی اثرات آن بر روی بتن انجام شد، اثرات پوزولانی آن را گزارش داد [۳۴-۳۶].

دوام ملات‌های حاوی خاکستر پوسته برنج توسط اسپیر و همکارانش^۴ انجام شد [۳۷] که افزایش در مقاومت فشاری سیمان و بهبود خواص در برابر سایش و کاهش درصد هوای بتن را گزارش کرده‌اند. در فرآیند سوزاندن خاکستر پوسته برنج در دمای زیر ۳۰۰ درجه منجر می‌شود که خاکستر باقی مانده حاوی مقادیر نسبتاً زیادی کربن باشد که مطالعات گذشته نشان می‌دهد که اثر مثبتی بر روی مقاومت بتن نداشته است [۳۸] زیرا که میزان بالای کربن بر فعالیت پوزولانی تأثیر مناسبی ندارد. حال اگر دمای سوزاندن و یا زمان آن را زیاد گردد، با از دست دادن کربن، موجب بهبود خواص پوزولانی خاکستر پوسته برنج می‌گردد.

^۱ Tangchirapat et al

^۲ Pateha

^۳ Cisse

^۴ Spear et al

همچنین حمد و خطاب^۱ بر روی شرایط دمایی تشکیل خاکستر پوسته برنج مطالعاتی انجام داده و مشاهده کردند که در دمای ۶۰۰-۵۰۰ درجه سانتیگراد سیلیس‌هایی که تشکیل می‌شوند از نوع سیلیس‌های بی‌شکل^۲ می‌باشد که از کیفیت بالایی برخوردارند [۳۹]. سیلیس بی‌شکل با خلوص بالا، اندازه ذرات بسیار ریز و سطح مخصوص بسیار بالا می‌تواند به عنوان کریستال در محصولات شیمیایی استفاده گردد. به منظور آماده سازی سیلیس بی‌شکل با خلوص بالا، پوسته برنج می‌بایست در بازه دمایی ۱۴۰۰-۴۵۰ درجه سانتیگراد در بازه‌های زمانی متفاوت حرارت ببیند [۴۴-۴۰]. خاکستر تولید شده در بازه‌ی دمایی گفته شده رنگ سفید خواهد داشت. در صورتی که در دماهای کمتر از این مقدار، رنگ آن قهوه‌ای روشن خواهد بود.

۲-۵ پیشینه پژوهش رفتار سطح مشترک آجر و ملات و تست‌های انجام شده

تامبو و همکاران^۳ به بررسی اثر سن و عمل آوری بر روی مقاومت پیوند بتن با ملات‌های سیمان پلیمری پرداخته است [۴۵]. مطالعات زیادی در زمینه‌ی در نظر گیری ویژگی‌های مختلف توسعه‌ی پیوند واحد بنایی و ملات انجام گرفته است [۴۹-۴۶]. عمده این مطالعات، محققان عمدتاً به دنبال پارامترهای موثر بر مقاومت پیوند واحدهای بنایی متفاوت مانند آجرهای رسی، آجرهای بتنی و ... با استفاده از ملات‌های سیمان-آهک بوده‌اند.

همچنین مطالعات گذشته پارامترهای موثر بر مقاومت پیوند را تعیین کرده است. این پارامترها را می‌توان موارد زیر عنوان کرد:

- نوع ملات (طرح اختلاط، کارایی، حفظ آب، ویژگی‌های گیرش و درصد هوا موجود)
- نوع واحد بنایی (ویژگی‌های سایشی، زبری سطح، مقاومت فشاری و جذب آب)
- شیوه‌ی ساخت^۴ (کیفیت پر کردن حفره‌های سطحی، میزان فشار اعمالی به سیستم، و نوع وسایل استفاده شده)
- شرایط عمل آوری و کهنه‌شدگی^۵ [۴۶، ۵۰]

مطالعات سینها^۶ در سال ۱۹۶۷ نشان داد که بیشترین مقاومت کششی پیوند آجر و ملات زمانی بدست می‌آید که رطوبت آجر در هنگام ساخت در حدود ۸۰٪ رطوبت اشباع آن باشد. و رطوبت‌های کمتر و یا

^۱ Hamad and Khatab

^۲ Amorphous

^۳ Tamboo et al

^۴ Workmanship

^۵ Aging

^۶ Sinha

بیشتر از این مقدار منجر به مقاومت پیوند ضعیفتری می‌شود. همچنین پراکنندگی در نتایج تجربی این آزمایش‌ها بالا است [۵۱].

مطالعات گراندت و همکاران^۱ نیز در سال ۱۹۷۲ نشان داد که اندازه‌ی حفرات موجود در سطح آجر بر توسعه‌ی پیوند بین آنها تاثیر می‌گذارد و اندازه‌ی این حفرات می‌بایست بیش از $0.05\mu m$ باشد تا توسعه‌ی پیوند شکل گیرد. به طور کلی حفره‌های بزرگتر، مقاومت بهتری داده و توسعه‌ی مقاومت نیز ناشی از درگیری مکانیکی^۲ محصولات سیمانی هیدراته شده درون حفرات آجر است [۵۲]. گروت^۳ در سال ۱۹۹۳ مطالعاتی بر روی بافت سطحی آجر انجام داد. وی بافت سطح آجر را یک فاکتور اساسی در کنترل پیوند آجر و ملات دانست. همچنین مطالعات وی نشان داد که سطح زبرتر مقاومت پیوند بهتری نسبت به سطح صاف خواهند داشت [۱۸].

مطالعات مادهاوا و همکاران^۴ در سال ۱۹۹۶ بر روی مقاومت خمشی پیوند آجر و ملات‌های سیمانی، خاک-سیمان و سیمان-آهک انجام شد. نتایج بدست آمده در این آزمایش‌ها بیانگر موارد زیر است:

۱. مقاومت خمشی پیوند، با افزایش میزان سیمان در ملات‌های متشکل از سیمان تنها افزایش می‌یابد.

۲. ملات‌های مرکب مثل خاک-سیمان و ملات‌های سیمان-آهک مقاومت پیوند بهتری در مقایسه با ملات‌های سیمانی خالص داشته‌اند.

۳. واحدهای بنایی با زائده‌های عریض‌تر و عمیق‌تر مقاومت خمشی بیشتری می‌دهند.

۴. واحدهای بنایی نیمه اشباع با رطوبت تقریبی ۷۵٪ منجر به حداکثر مقاومت پیوند می‌شوند [۴۹].

ردی و همکاران^۵ در سال ۲۰۰۷ به بهبود خواص مقاومت پیوند بلوک‌های متشکل از خاک و سیمان پرداختند. آن‌ها با تغییر در پارامترهایی چون بافت و زبری سطح بلوک‌ها، اندازه و مساحت زائده‌ها^۶ تلاش‌هایی برای بهبود مقاومت برشی پیوند انجام دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که زبری سطح بالاتر برای بلوک آجری منجر به مقاومت بیشتری نسبت به سطح صاف می‌شود. همچنین این نتایج اذعان داشت که تغییرات به خصوص متوجه مقاومت فشاری و ویژگی‌های تنش-کرنش بلوک‌های خاک-سیمانی ناشی از تغییر مقاومت برشی در این حالت نمی‌شود [۵۳].

^۱ Grandet et al

^۲ Mechanical interlocking

^۳ Groot

^۴ Madhava et al

^۵ Reddy et al

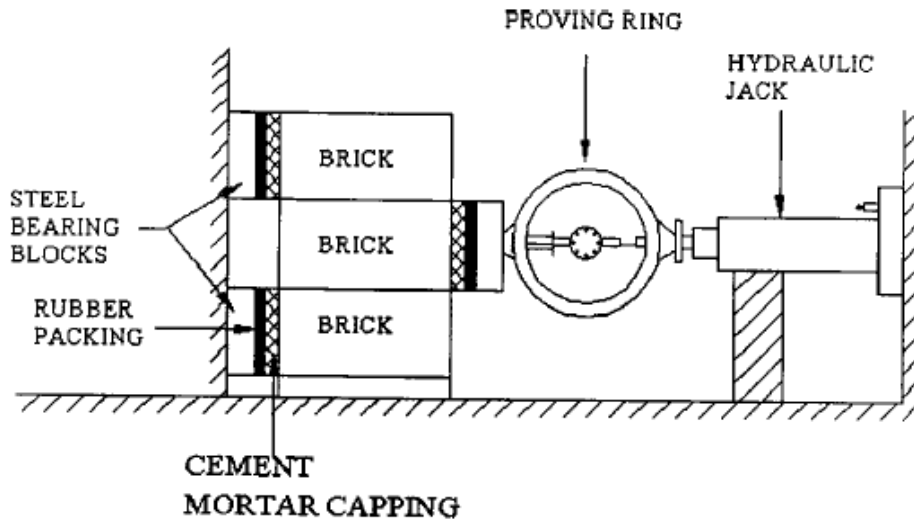
^۶ Frog

ردی در سال ۲۰۰۸ بر روی رابطه‌ی بین مقاومت فشاری سیستم بنایی و مقاومت برشی پیوند فعالیت-هایی انجام داد. پژوهش‌های وی منجر به فهم این موضوع شد که افزودن دوغاب سیمانی تازه بر روی آجر، قبل از ریختن ملات در افزایش مقاومت برشی پیوند بسیار موثر می‌باشد [۱۹]. همچنین نتایج وی بیانگر این موضوع بود که مقاومت برشی پیوند سیستم بنایی بر روی رفتار تنش-کرنش کل مجموعه تاثیر می‌گذارد. بدین معنی که با افزایش مقاومت پیوند، هنگامی که $\frac{E_{block}}{E_{mortar}} > 1$ باشد، مدول یانگ سیستم افزایش می‌یابد. و هنگامی که $\frac{E_{block}}{E_{mortar}} < 1$ با افزایش مقاومت پیوند، مدول یانگ سیستم کاهش می‌یابد.

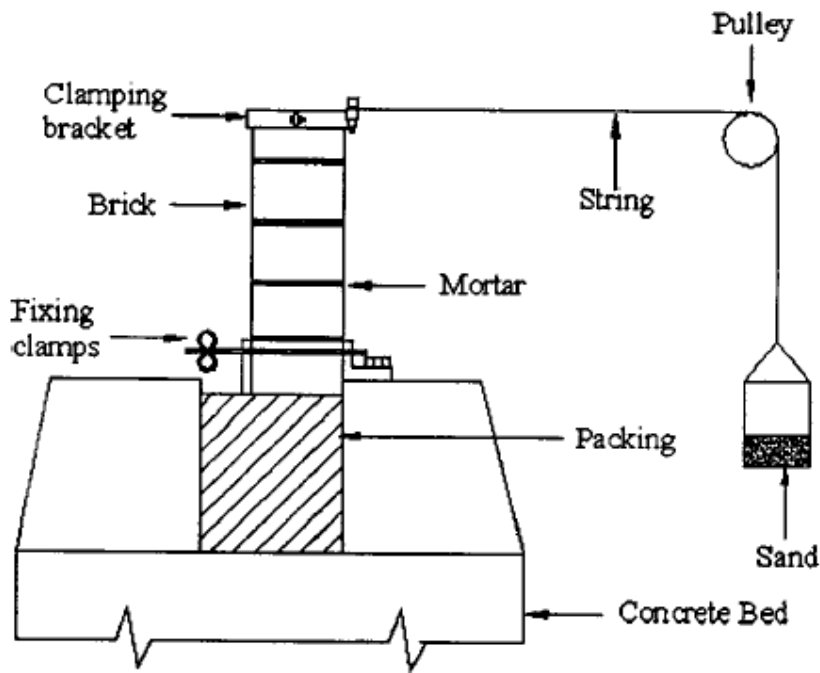
سارانگاپانی و همکاران^۱ در سال ۲۰۰۵ به بررسی مقاومت پیوند آجر و ملات و مقاومت فشاری آجر به منظور یافتن رابطه‌ای میان آن دو پرداخت. آنها به تعیین مقاومت پیوند با استفاده از تست‌های مقاومت خمشی و مقاومت برشی پرداخته‌اند. همچنین رابطه‌ای میان مقاومت فشاری نمونه‌های بنایی و مقاومت پیوند نیز بدست آورد [۵۴]. نتایج به وضوح نشان دهنده این است که با افزایش مقاومت پیوند در حالتی که مقاومت ملات ثابت باشد، مقاومت سیستم بنایی افزایش می‌یابد. شکل ۲-۳ شمایی از آزمایش برش بکار رفته را نشان می‌دهد. شکل ۲-۴ نیز تست مقاومت خمشی پیوند انجام شده بر روی سیستم را نشان می‌دهد. برای انجام تست مقاومت خمشی پیوند بر روی نمونه آجری، سارانگاپانی و همکاران از تست بر روی ۵ نمونه‌ی آجری کاملاً به هم چسبیده با نسبت ارتفاع به ضخامت ۴ استفاده کردند. همچنین تست مقاومت خمشی پیوند نمونه‌ها با استفاده از تست پیچش پیوند^۲ مطابق شکل ۲-۴ صورت گرفته است. این تست مطابق استاندارد ASTM C 1072 بوده است [۵۵].

^۱ Sarangapani et al

^۲ Bond wrench test



شکل ۳-۲ شمایی از شیوه تست برش بکار رفته در پژوهش سارانگاپانی [۵۴]



شکل ۴-۲ شمایی از تست مقاومت خمشی پیوند بکار رفته در پژوهش سارانگاپانی [۵۴]

مطالعات سارانگاپانی و همکاران در سال ۲۰۰۵ نشان داد که افزایش مساحت زائده‌ها بر روی سطح آجر منجر به افزایش مقاومت پیوند می‌شود. همچنین وی شکست خمشی نمونه‌های تحت خمش را به سه دسته زیر تقسیم بندی کرد:

- شکست نوع I: در این حالت شکست در سطح مشترک آجر و ملات رخ می‌دهد که نشان

دهنده شکست پیوند می‌باشد.

- شکست نوع II: در این حالت شکست آجر در خمش رخ داده که سطح مشترک در این حالت دست نخورده باقی می‌ماند

- شکست نوع III: ترکیبی از حالات I و II [۵۴]

که حالت مورد نیاز بری بدست آوردن مقاومت سطح مشترک پیوند، حالت I می‌باشد و می‌بایست شرایطی ایجاد کرد که نمونه‌ها بدین صورت بشکنند.

۶-۲ مدل‌های رفتاری در سطوح مشترک

مطالعات سطح مشترک عمدتاً در زمینه سطح مشترک خاک-سازه انجام گرفته است. بنابراین در اینجا به بررسی روند مطالعات سطح مشترک خاک و سازه و در انتها استفاده از آن در دیگر زمینه‌ها بررسی می‌شود.

۱-۶-۲ روند کلی مطالعات سطح مشترک

روند مطالعات سطح مشترک خاک-سازه به شدت به توسعه روش‌های آزمایشگاهی و تئوری‌های مهندسی ژئوتکنیک وابسته است. این مطالعات را می‌توان به طور کلی به سه بخش تقسیم کرد. بخش اول دوران قبل از سال ۱۹۶۰ می‌باشد. در این دوره عموماً به بررسی سطح مشترک با تمرکز بر رفتار مقاومتی آن و با توجه به نیازهای ناشی از کاربردهای عملی پرداخته شده است. در این دوره سطح مشترک به عنوان ماده‌ای جداگانه مورد بررسی قرار نگرفته است.

بخش دوم دوران بین سال‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۰ می‌باشد که در این دوره رابطه بین تنش-کرنش به شدت مورد توجه قرار گرفته است. دستاوردهای زیادی در روش‌های عددی حاصل گردید. و با توسعه بسیار سریع تکنیک‌های آزمایشگاهی و اندازه‌گیری، امکان مطالعات بیشتر فراهم گردید. بنابراین علاوه بر مطالعه رفتار مقاومتی سطح مشترک، رفتار غیر خطی و الاستوپلاستیک آن نیز با استفاده از ابزارهای گوناگون مورد مطالعه قرار گرفت و مدل‌های اندکی برای توضیح رفتار سطح مشترک ارائه گردیدند. هدف عمده این مطالعات بررسی ماکروسکوپی رابطه تنش-جابجایی مماسی سطح مشترک بوده است.

بخش سوم دوران پس از سال‌های ۱۹۸۰ بوده که در این دوره مطالعه مشترک خاک-سازه در این دوره با پیشرفت‌های مهم زیر همراه بوده است:

۱. مطالعه رفتار توام تنش برشی-جابجایی‌های مماسی و قائم بر خلاف مطالعات قبلی که تنها رفتار مماسی بررسی می‌گردید.
۲. بررسی رفتار سطح مشترک در مسیرهای بارگذاری مختلف و پیچیده مانند بارگذاری تناوبی^۱.
۳. اندازه‌گیری‌های ماکروسکوپی و همراهی کردن آن‌ها با اندازه‌گیری‌های میکروسکوپی.
۴. بررسی سطح مشترک برای طیف وسیعی از سامانه‌ها شامل انواع مختلف سازه و خاک‌هایی از شن تا رس.

۲-۶-۲ رویکردهای مدل‌سازی سطح مشترک

به منظور ایجاد یک مدل از سطح مشترک خاک-سازه عمدتاً سه رویکرد متفاوت اتخاذ شده است که در ادامه هر یک از آنها شرح داده می‌شوند.

۱. استفاده مستقیم از مدل رفتاری خاک برای سطح مشترک؛ به دلیل تشابهاتی که بین آن‌ها وجود دارد. در برخی موارد نیز تغییراتی در جهت ویژه سازی مدل رفتاری برای سطح مشترک اتخاذ شده است. این مدل به دلیل سادگی در شبیه‌سازی عددی سیستم‌های خاک-سازه بسیار استفاده می‌گردد. لیکن قادر به توضیح منطقی ویژگی‌های منحصر به فرد سطح مشترک نمی‌باشد. به عنوان مثال زینکوویچ و همکارانش^۲ برای سطح مشترک از یک المان ایزوپارامتریک با فرمول-بندی رایج اجزا محدود که برای جامدات استفاده می‌شود، استفاده کردند [۵۶].
۲. ارائه یک فرمول تجربی از رابطه تنش-کرنش که بر اساس درون‌یابی نتایج آزمایشگاهی بدست آمده است. اما استفاده از این مدل برای مسیرهای پیچیده تنش امکان‌پذیر نیست. بنابراین تنها برای موارد محدودی در تحلیل سطح مشترک خاک-سازه می‌توان از این مدل استفاده نمود. قوانین اوپلر و کولمب را می‌توان اولین مدل‌های رفتاری که رفتار دو ماده در تماس را بیان می‌کند دانست [۵۷، ۵۸].

^۱ Cyclic loading

^۲ Zienkiewicz *et al*

۳-۶-۲ دسته‌بندی مدل‌های رفتاری سطح مشترک

- مدل‌های رفتاری سطح مشترک خاک-سازه را می‌توان به چهار دسته کلی زیر تقسیم‌بندی کرد:
۱. مدل‌های الاستیسیته غیرخطی؛ که کلاف^۱ این مدل الاستیسیته غیرخطی را با فرض رابطه هذلولی تنش برشی-جابجایی مماسی تحت تنش نرمال ثابت ارائه کرده است [۵۹]. همچنین دسای و همکارانش مدل رامبرگ-ازگود^۲ را برای تشریح رابطه تنش برشی-جابجایی مماسی تناوبی اصلاح کردند [۱۲]. این مدل‌ها با اینکه تغییر شکل پلاستیک و تغییرات حجمی در آنها به خوبی ارضا نمی‌شود، به علت ساده بودن به طور گسترده‌ای در تحلیل‌های عددی استفاده شده‌اند.
 ۲. مدل‌های ایده‌آل که این مدل‌ها نظیر مدل الاستیک-پلاستیک کامل یا مدل پلاستیسیتیه صلب که به دلیل فرمول‌بندی معیار مقاومتی آنها با استفاده از معیار مور-کولمب به مدل مور-کولمب معروف هستند. چنین مدل‌هایی همچنان در نرم‌افزارهای تجاری مورد استفاده قرار می‌گیرند.
 ۳. مدل‌های الاستوپلاستیک دسته دیگری از این مدل‌ها هستند که قابوسی و همکارانش^۳ یکی از اولین مدل‌های الاستوپلاستیک سطح مشترک را با استفاده از سطح گسیختگی سرپوش^۴ ارائه کردند [۶۰]. پس از آن مجموعه‌ای از مدل‌های الاستوپلاستیک با فرضیات مختلف دیگر ارائه گردیدند [۶۱-۶۳]. اگرچه استفاده از این مدل‌ها به دلیل پیچیدگی و همین‌طور سختی بدست آوردن پارامترها، از رواج زیادی برخوردار نیست.
 ۴. مدل‌های پیشرفته؛ که دسای و همکارانش مدل جدیدی به نام "مفهوم حالت آشفته"^۵ را ارائه کردند. آنها فرض کردند که یک ماده‌ی دست نخورده با شروع بارگذاری شروع به آسیب دیدگی می‌کند. به بیان دیگر یک ماده را با توجه به حالت تنش-کرنش خود می‌توان به عنوان ترکیبی از دو ماده مختلف دانست: یکی ماده دست نخورده که می‌توان آن را با مدل الاستوپلاستیک توضیح داد و دیگری ماده‌ای که در حالت بحرانی تنها قادر به تحمل فشار هیدرواستاتیکی است [۶۴]. مدل‌هایی با استفاده از مفهوم حالت آشفته به پیش بینی رفتار سطح مشترک خاک-سازه پرداخته‌اند [۶۲, ۶۵, ۶۶].

^۱ Clough

^۲ Ramborg-Osgood

^۳ Ghaboussi et al

^۴ Cap yield surface

^۵ Disturbed state concept(DSC)

۲-۷ نتیجه گیری

با توجه به مطالعات انجام شده توسط محققان پیشین و همچنین فعالیت‌های ناکافی صورت گرفته بر مقاومت برشی پیوند، این پژوهش بر روی مقاومت برشی پیوند آجر و ملات انجام خواهد شد. سپس با استفاده از نتایج بدست آمده به مدلسازی عددی با استفاده از مدل هیز^۱ دسای پرداخته می‌شود. از ویژگی‌های برجسته این پژوهش استفاده از مصالح دوستدار محیط زیست مانند پوزولان تفتان و نیز خاکستر پوسته برنج و تلاش و توصیه جهت کاربرد این دسته ملات‌ها در سازه می‌باشد. همچنین استفاده از دستگاه برش مستقیم با طراحی قالب‌هایی جهت انجام این کار، به منظور محاسبه مقاومت برشی پیوند سطح مشترک آجر و ملات می‌باشد از دیگر نکات برجسته بکار رفته در این پژوهش می‌باشد. همچنین از نکات برجسته این پژوهش، بررسی افزایش مقاومت پیوند در طول سن و نیز اثر تغییر ملات‌های متفاوت با در نظر گیری ۹ تیپ ملات مختلف می‌باشد.

با توجه به اینکه مدل‌های ارائه شده برای پیش‌بینی رفتار بتن ایجاد شده‌اند، و قادر به پیش‌بینی رفتار ملات در محل سطح مشترک نمی‌باشند؛ لذا در این پژوهش ابتدا به انجام آزمایش‌های تجربی پرداخته شده و سپس پارامترهای مدل منتخب برای رفتار آجر و ملات بدست آورده شده و سپس به مدلسازی رفتار سطح مشترک آجر و ملات با استفاده از مفهوم حالت آشفته پرداخته می‌شود.

^۱ HISS(Hierarchical single surface)

فصل ۳ روش پژوهش

۳-۱ مقدمه

مطابق توضیحات عنوان شده در فصل قبل، پژوهش حاضر از دو بخش تشکیل شده است. بخش اول که قسمت تجربی کار بوده و بخش دوم قسمت مدلسازی می‌باشد. در بخش اول نمونه‌ها مطابق شرایطی که در ادامه ذکر می‌گردد ساخته شده و سپس مورد تست مقاومت برشی سطح مشترک قرار می‌گیرند. برای اینکار از دستگاه برش مستقیم^۱ استفاده شده است. در فرآیند ساخت از ۹ مدل ملات مختلف با ترکیبات سیمان، پوزولان و خاکستر پوسته برنج استفاده شده است. در هر کدام از این نوع ملات‌ها نوع آجر ثابت بوده است. نمونه‌ها پس از گذشت ۲۸ روز مورد تست قرار گرفته‌اند. همچنین برای دو مورد از ملات‌ها، تست‌ها در سنین یک، سه، هفت، چهارده و ۲۸ روزه به منظور بدست آوردن روند افزایش مقاومت برشی در طول زمان صورت گرفته است.

۳-۲ آزمایشات تجربی

در این قسمت ابتدا به معرفی مواد و مصالح استفاده شده پرداخته می‌شود؛ سپس معرفی و چگونگی انجام آزمایش^۲ مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۲-۱ ویژگی مصالح مورد استفاده

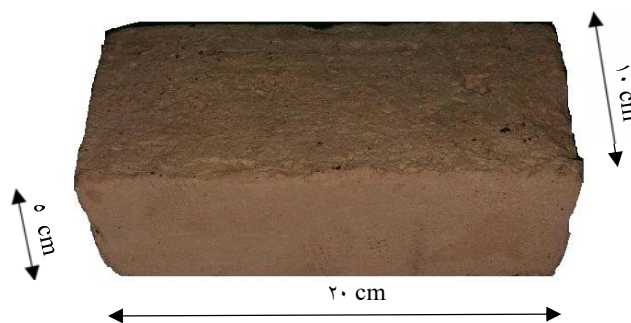
مصالح مورد استفاده جهت ساخت نمونه‌ها در این پژوهش به شرح زیر بوده که در ذیل هر یک از موارد، توضیحات لازم ارائه شده است.

^۱ Direct shear test(DST)

^۲ Test setup

• آجر

آجر مورد استفاده در این پژوهش آجر فشاری معمولی می‌باشد. به دلیل کاربرد بیشتر آجر فشاری معمولی در ایران خصوصا در مناطق روستایی، از این نوع آجر استفاده شده است. شکل ۱-۳ نمونه‌ای از آجر استفاده شده را نمایش می‌دهد. مشخصات فیزیکی و مقاومتی این آجرها در جدول ۱-۳ موجود است. مطابق جدول ۱-۳ مقاومت فشاری آجر محاسبه گردیده که محاسبه مقاومت این آجر مطابق با استاندارد ASTM C 1314 صورت گرفته است [۶۷].



شکل ۱-۳ نمونه‌ای از آجر به کار رفته در پژوهش

جدول ۱-۳ مشخصات فیزیکی و مقاومتی آجر استفاده شده

شماره نمونه	طول (cm)	عرض (cm)	ارتفاع (cm)	مساحت مقطع (cm ²)	مقاومت فشاری (kN)	مقاومت فشاری (MPa)
نمونه ۱	۲۰/۰۰	۹/۸۷	۶/۲۷	۱۲۵/۴	۷۷	۶/۱۴
نمونه ۲	۱۹/۸۸	۹/۹۵	۶/۲۲	۱۲۳/۶۵	۷۳/۱	۵/۹۱
نمونه ۳	۱۹/۹۲	۹/۸۱	۶/۲۵	۱۲۴/۵	۷۴/۵	۵/۹۸
نمونه ۴	۱۹/۹۷	۹/۹۷	۶/۲۳	۱۲۴/۴۱	۷۶/۵	۶/۱۵
میانگین						۶/۰۴

• ماسه

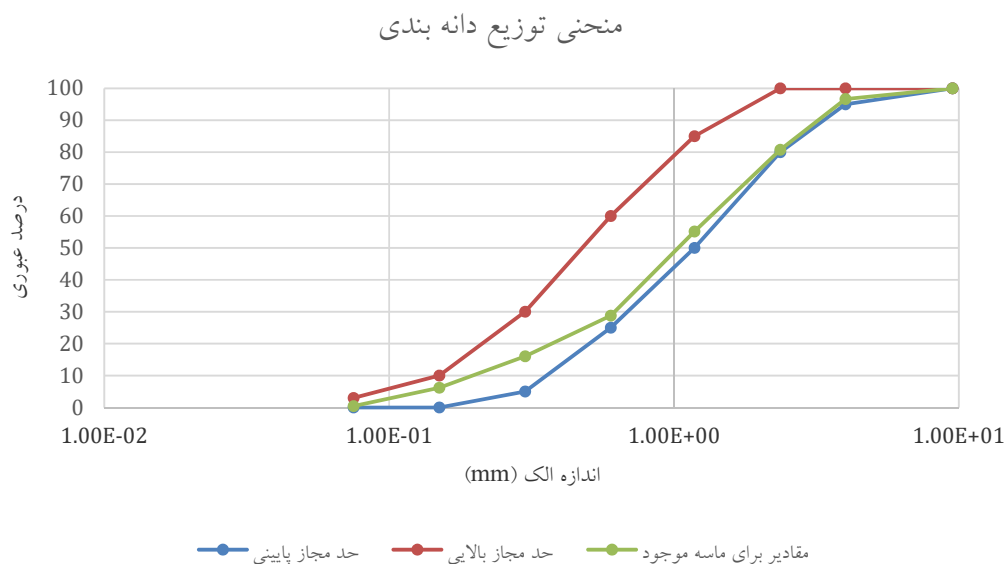
ماسه استفاده شده در این پژوهش تماما ماسه بابل‌سز بوده که همگی در یک زمان خریداری شده است. محل نگهداری ماسه‌ها در فضایی بسته درون آزمایشگاه با تغییرات رطوبتی و دمایی

کمی بوده است. بر روی این ماسه آزمایش دانه بندی و نیز تست درصد رطوبت انجام شده است که نتایج حاصل از این آزمایش‌ها در تطابق با استاندارد ASTM C 33 می‌باشد [۶۸]. نتایج حاصل از آزمایش دانه بندی بر روی این ماسه در جدول ۲-۳ آورده شده است. مقدار اولیه ماسه مورد استفاده جهت انجام آزمایش دانه‌بندی ۱۰۰۰ گرم بوده که پس از اتمام آزمایش و جمع مقادیر مانده بر روی الک مطابق جدول ۲-۳، ۹۹۵/۹ گرم شد که این مقدار نیاز به اصلاح داشته و با ضریب اصلاح ۱/۰۰۴ این مقادیر اصلاح گردید.

جدول ۲-۳ نتایج آزمایش دانه بندی بر روی ماسه مورد استفاده

شماره الک	وزن اولیه (گرم)	وزن نهایی (گرم)	مانده روی الک (گرم)	وزن اصلاح شده	درصد مانده	درصد تجمعی مانده	درصد عبوری
#۳/۸	۵۳۳/۵	۵۳۳/۵	۰	۰	۰	۰	۱۰۰
۴	۵۱۲/۱	۵۴۳/۳	۳۳/۲	۳۳/۳۴	۳/۳۳	۳/۳۳	۹۶/۶۷
۸	۴۸۶/۲	۶۴۴/۵	۱۵۸/۳	۱۵۸/۹۵	۱۵/۸۹	۱۹/۲۳	۸۰/۷۷
۱۶	۴۵۶/۴	۷۱۱/۳	۲۵۴/۹	۲۵۵/۹۵	۲۵/۵۹	۴۴/۸۲	۵۵/۱۸
۳۰	۴۱۹/۱	۶۸۲	۲۶۲/۹	۲۶۳/۹۸	۲۶/۴۰	۷۱/۲۲	۲۸/۷۸
۵۰	۳۷۷/۱	۵۰۳/۶	۱۲۶/۵	۱۲۷/۰۲	۱۲/۷۰	۸۳/۹۲	۱۶/۰۷
۱۰۰	۲۹۷	۳۹۵/۳	۹۸/۳	۹۸/۷۰	۹/۸۷	۹۳/۷۹	۶/۲۱
۲۰۰	۲۶۵/۸	۳۲۳/۲	۵۷/۴	۵۷/۹۴	۵/۷۶	۹۹/۵۶	۰/۴۴
سینی	۲۳۶/۸	۲۴۱/۲	۴/۴	۴/۴۲	۰/۴۴	۱۰۰	۰
مجموع			۹۹۵/۹	۱۰۰۰	۱۰۰		

مطابق مقادیر حاصله از جدول ۲-۳ مدول نرمی ماسه مورد استفاده ۴,۱۶ بدست آمده است. همچنین جهت مقایسه حدود استاندارد ASTM C 33 برای ماسه با قابلیت استفاده در بتن، منحنی دانه‌بندی ماسه مورد استفاده در کنار حدود بالا و پایین استاندارد رسم شده و نتایج در شکل ۲-۳ آورده شده است. مطابق شکل ۲-۳ مشاهده می‌گردد که این ماسه نیازی به اصلاح نداشته و قابل قبول است.



شکل ۳-۲ مقایسه حدود مجاز عبوری از هر الک برای ماسه و ماسه مورد استفاده

مطابق استاندارد ASTM C ۵۶۶ می‌بایست بر روی ماسه مورد استفاده آزمایش درصد رطوبت انجام گیرد [۶۹]. لذا برای ماسه مورد استفاده، این آزمایش انجام گردیده و نتایج آن در جدول ۳-۳ آورده شده است.

جدول ۳-۳ آزمایش درصد رطوبت بر روی ماسه

وزن ظرف	وزن نمونه مرطوب	وزن خالص مرطوب	وزن نمونه خشک	وزن خالص خشک	درصد رطوبت
نمونه ۱	۳۶۷/۴	۱۳۳۷/۹	۹۷۰/۵	۱۳۰۱/۶	۳/۸۹
نمونه ۲	۲۳۶/۷	۱۷۸۲/۷	۱۵۴۶	۱۴۸۲/۱	۴/۳۱
میانگین					۴/۱۰

• سیمان

سیمان مورد استفاده در این پژوهش سیمان پرتلند تپ II بوده که از کارخانه سیمان تهران تهیه شده است.

• پوزولان تفتان

از پوزولان تفتان که یک نوع پوزولان طبیعی است، جهت افزودن درون ملات استفاده شده

است. این پوزولان از کوه تفتان در استان سیستان و بلوچستان بدست می‌آید که جهت جلوگیری از آلودگی محیط منطقه، متناوباً جمع‌آوری می‌گردد. بدین دلیل ماده‌ای زائد به حساب می‌آید. این پوزولان از کارخانه سیمان خاش تهیه گردیده است.

• پوسته برنج

پوسته بیرونی برنج به عنوان یک ماده زائد و دور ریختنی، از شمال کشور تهیه و جهت آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۳-۳ پوسته برنج نمایش داده شده است. مطابق روش-هایی که در ادامه بیان می‌شود؛ پوسته برنج سوزانده شده و در دو حالت خاکستر پوسته برنج نوع I و خاکستر پوسته برنج نوع II مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۳-۳ پوسته برنج مورد استفاده در پژوهش

• نانوسیلیس

به جهت تسریع و بهبود فعالیت پوزولان مورد استفاده، می‌بایست از مواد حاوی سیلیس فعال^۱ استفاده شود. بدین منظور تلاش‌هایی برای استفاده از این ماده انجام گرفت. با مقایسه نتایج

^۱ SiO_۲

بدست آمده از مطالعات پیشین [۷۰-۷۲] در زمینه استفاده از نانوسیلیس و نیز مزیت‌های همه-جانبه آن نسبت به میکروسیلیس مانند سطح مخصوص بسیار بالای نانوسیلیس نسبت به میکروسیلیس، از نانوسیلیس در این پروژه استفاده گردیده و جهت تولید ملات از این ماده استفاده گردیده است.

• روان‌کننده

عموما روان‌کننده‌های موجود در بازار، از ترکیبات کربوکسیلات و یا نفتالن می‌باشند. که روان‌کننده‌های کربوکسیلاتی از قدرت روان‌کنندگی بالاتری برخوردار می‌باشند. به دلیل قدرت بالای این روان‌کننده‌ها که عمدتاً برای ساخت بتن کاربرد دارند و استفاده از آن در ملات موجب آب زدگی^۱ می‌شود؛ بنابراین از روان‌کننده بر پایه نفتالین در این پژوهش استفاده گردیده است.

• آب

آب مورد استفاده در این پروژه از نوع آب شرب معمولی شهر تهران بوده است.

۲-۲-۳ ترکیبات شیمیایی و سطح مخصوص مصالح مورد استفاده

ترکیبات شیمیایی و سطح مخصوص مواد استفاده شده جهت ساخت ملات از اهمیت بالایی به جهت مقایسه با نتایج سایر محققان برخوردار است. به جهت بدست آوردن هر یک از این پارامترها می‌بایست از آزمایشاتی تکمیلی جهت بدست آوردن این پارامترها استفاده کرد. به منظور بدست آوردن درصد ترکیبات شیمیایی بکار رفته در مواد استفاده شده، از نتایج تست XRF^۲ در پژوهشکده نانو دانشگاه صنعتی شریف استفاده شده است و نتایج آن در جدول ۳-۴ آمده است.

^۱ Bleeding

^۲ X-Ray Fluorescence

جدول ۳-۴ نتایج تست XRF؛ درصد مواد بدست آمده از آزمایشگاه

نتایج تست XRF				
ترکیب شیمیایی	سیمان	پوزولان	میکروسیلیس	نانوسیلیس
SiO ₂	۱۰/۰۵	۵۶/۶۹	۹۰/۱۷	۸۷/۸۴
TiO ₂	۰/۴۹	۱/۳۶	۰/۰۲	۰/۰۴۱۱۲
Al ₂ O ₃	۱/۱۹	۱۱/۸	۰/۱۹	۰/۲۴۳۶
Fe ₂ O ₃	۵/۳۱۹	۱/۹۶	۱/۵۷	۳/۰۶
MnO	۰/۳۳۹	۰/۲۱	۰/۲۶	۰/۴۱۹۱
MgO	۰/۷۷۳	۱/۳۲	۰/۰۴	۰/۱۱۷۹
CaO	۷۶/۳۸	۱۹/۹۵	۲/۵۷	۳/۰۲۶
Na ₂ O	۱/۴۷۶	۰/۴۲	۰/۵۳	۰/۷۷۵
K ₂ O	۰/۷۰۴۱	۳/۰۹	۱/۶۸	۱/۹۸۹
P ₂ O ₅	۰/۵۴۱	۱/۵۷	۲/۰۸	۱/۵۸۶
CO ₂	۰	۱/۳۳	۰	۰
SO ₃	۲/۱۵۳	۰/۲۲	۰/۱۸	۰/۳۵۴۳
مجموع	۹۹,۴۱۵۱	۹۹/۹۲	۹۹/۲۹	۹۹/۴۵۲
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	۱۶,۵۵۹	۷۰/۴۵	۹۱/۹۳	۹۱/۱۴۴

در نمونه‌های حاوی خاکستر پوسته برنج، عنصر کربن وجود دارد و به دلیل اینکه تست XRF قادر به تعیین میزان کربن موجود در نمونه‌ها نمی‌باشد، می‌بایست درصد کربن این نمونه‌ها را تعیین کرد. در نمونه‌های خاکستر پوسته برنج از تست تعیین درصد کربن، مطابق استاندارد ASTM D 5373 استفاده شده است [۷۳]. این تست در دانشکده شیمی دانشگاه صنعتی شریف انجام گرفته است. نتایج حاصل از این تست در جدول ۳-۵ آمده است. پس از تعیین درصد کربن، مقادیر بدست آمده در این تست جهت تصحیح تست XRF استفاده گردیده است. که نتایج تصحیح شده تست XRF برای نمونه‌های خاکستر پوسته برنج مطابق جدول ۳-۶ می‌باشد.

جدول ۳-۵ نتایج بدست آمده از تست کربن

نتایج تست کربن		
عناصر	درصد خاکستر پوسته برنج نوع I	درصد خاکستر پوسته برنج نوع II
کربن	۳۱/۱	۳/۳۶
هیدروژن	۲/۴۷	۱/۴۸

جدول ۳-۶ نتایج تست XRF اصلاح شده؛ درصد مواد تشکیل دهنده خاکستر، بدست آمده از آزمایشگاه

نتایج تست XRF		
ترکیب شیمیایی	خاکستر پوسته برنج نوع ۱	خاکستر پوسته برنج نوع ۲
SiO ₂	۴۹/۴	۸۹/۱۵
TiO ₂	۰/۰۳	۰/۰۲
Al ₂ O ₃	۰/۱۴	۰/۰۱
Fe ₂ O ₃	۰/۲	۰/۲۸
C	۳۱/۱	۲/۶۱
MnO	۰/۱۵	۰/۱۱
MgO	۱/۱۴	۰/۱۹
CaO	۱/۴	۲/۷۳
H	۲/۴۷	۱/۴
Na ₂ O	۳/۳۶	۰/۱۹
K ₂ O	۵/۵۲	۲/۱
P ₂ O ₅	۷/۹۶	۲/۰۱
SO ₃	۰/۲۹	۰/۵
cl	۰/۲۷	۰/۲۵
مجموع	۱۰۳/۴۳	۱۰۱/۵۵
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	۴۹/۷۴	۸۹/۴۴

برای بدست آوردن سطح مخصوص هر یک از مواد استفاده شده، از تست BET^۱ آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی شریف استفاده شده است. که نتایج آن مطابق جدول ۳-۷ می باشد.

^۱ Brunauer-Emmett-Teller

جدول ۳-۷ نتایج بدست آمده از آزمون BET

سطح مخصوص (cm ² /gr)					
سیمان	پوزولان	میکروسیلیس	نانوسیلیس	خاکستر پوسته برنج نوع ۱	خاکستر پوسته برنج نوع ۲
۵۰۵۷/۳	۶۰۹۲/۴	۱۴۶۸۴۰/۰	۲۰۱۶۹۰/۰	۶۹۹۳۰۰/۰	۱۰۷۱۵۰۰/۰

همچنین مطابق نتایج موجود در جدول ۳-۴ و جدول ۳-۶ و مقایسه با استاندارد ASTM C 15017 مشاهده گردیده که سیمان بکار رفته در این پروژه الزامات سیمان پرتلند تیپ II استاندارد ASTM C 15017 نیز رعایت شده است [۷۴].

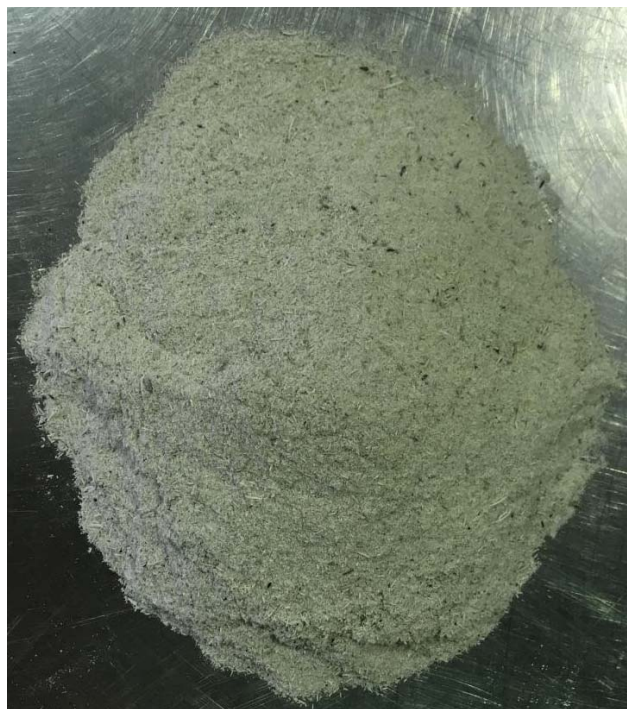
۳-۲-۳ چگونگی تولید خاکستر پوسته برنج

مطابق مطالب عنوان شده در قسمت قبل، از دو نوع خاکستر برای ساخت ملات استفاده می‌گردد. همانطور که در فصل دوم در رابطه با شرایط دمایی و نحوه تولید خاکستر پوسته برنج بیان شد، با توجه به دمای سوختن و زمان نگهداری پوسته برنج در دمای مورد نظر، دو نوع خاکستر تولید شده است. خاکستر نوع اول که با سوزاندن پوسته برنج تا زمانی که رنگ نمونه تیره شده و خود تمایلی به سوختن بیشتر ندارد، ایجاد می‌شود. این خاکستر کاملاً به رنگ تیره بوده و درصد کربن و نیز ترکیبات مواد تشکیل دهنده آن مطابق جدول ۳-۵ و جدول ۳-۶ آمده است. همچنین شکل ۳-۴ نیز نشان دهنده ظاهر این نمونه می‌باشد. این نوع خاکستر در این پژوهش تحت عنوان خاکستر پوسته برنج نوع I نامیده می‌شود.



شکل ۳-۴ تصویری از خاکستر پوسته برنج نوع I

با توجه به اینکه این میزان خاکستر از درصد بالای کربن برخوردار است و از طرفی طبق مطالب عنوان شده در فصل قبل، میزان کربن بالا موجب تضعیف خواص مقاومتی ملات می‌گردد، بنابراین از نوعی دیگر از خاکستر پوسته برنج نیز در این پژوهش استفاده شده است. بدین منظور برای تهیه این نوع خاکستر، خاکستر پوسته برنج نوع I به مدت ۱۲ ساعت و درون کوره به دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری می‌شود. پس از گذشت این زمان، خاکستر از کوره بیرون آورده می‌شود. مطابق شکل ۳-۵ مشاهده می‌شود که خاکستر حاصله از این روش سوزاندن، رنگ سفید رنگ دارد که حاکی از، کاهش بسیار زیاد میزان کربن می‌باشد. همچنین جدول ۳-۵ نیز بیان کننده این موضوع می‌باشد. این نوع خاکستر سفید رنگ نیز در این پژوهش تحت عنوان خاکستر پوسته برنج نوع II شناخته می‌شود.



شکل ۳-۵ تصویری از خاکستر پوسته برنج نوع II

۴-۲-۳ طرح اختلاط و شیوه ساخت ملات سیمانی ساده

با توجه به مطالعات بیان شده در فصل قبل در رابطه با لزوم قوی بودن آجر و ملات برای شکستن در سطح مشترک بین آنها، طرح اختلاط ملات‌ها می‌بایست به میزانی قوی باشد تا شکست برشی در محل سطح مشترک آجر و ملات وارد شده و به هیچ یک از آجر و ملات آسیبی وارد نشود. بدین منظور سعی شده تا از یک ملات پرمقاومت استفاده شود. همچنین این ملات پرمقاومت می‌بایست از کارایی^۱ کافی جهت استفاده به عنوان ملات بین دو آجر برخوردار باشد. بدین منظور با توجه به مطالعات انجام شده توسط محققان مختلف و نیز میزان کارایی مورد نیاز، از رابطه (۱-۳) برای طرح اختلاط ملات سیمانی معمولی استفاده می‌شود [۷۵-۷۷].

$$\frac{\text{Cement}}{\text{Sand}} = 0.3 \qquad \frac{\text{Water}}{\text{Cement}} = 0.45 \qquad (1-3)$$

برای محاسبه کارایی ملات، با توجه به اینکه در مطالعات مشابه بر روی ملات و نیز نیاز به حجم کمتر

^۱ Workability

ملات برای ساخت، نسبت به روش‌های دیگر اندازه‌گیری کارایی؛ از میز جریان جهت اندازه‌گیری میزان کارایی استفاده شده است. میز جریان استفاده شده در آزمایش مطابق استاندارد ASTM C 230 بوده و برای اندازه‌گیری میزان کارایی نیز از استاندارد ASTM C 1437 استفاده شده است [۷۸، ۷۹]. تصویری از میز جریان مورد استفاده در شکل ۳-۶ آمده است. مطابق این استاندارد، جریان^۱ ملات بر حسب درصد بیان می‌شود. که برای این پژوهش با مقادیر ماسه به سیمان و نیز آب به سیمان ذکر شده در رابطه (۳-۱)، و در حالتی که میزان رطوبت ماسه نیز مطابق جدول ۳-۳ باشد، میزان جریان بین ۷۳٪ تا ۷۷٪ متغیر می‌باشد.



شکل ۳-۶ میز جریان مورد استفاده در پژوهش

مطابق شرایط ذکر شده، ملات مورد نظر ساخته شده و تعداد ۳ نمونه استوانه‌ای 10×20 برای آزمایش مقاومت فشاری و ۳ نمونه استوانه‌ای 10×20 نیز برای آزمایش مقاومت کششی ملات ریخته می‌شود. شرایط ساخت ملات و نیز عمل‌آوری نمونه‌های استوانه‌ای استفاده شده مطابق استاندارد ASTM C 192 انجام گرفته است [۸۰].

^۱ Flow

۵-۲-۳ طرح اختلاط دیگر ملات‌های استفاده شده

با توجه به ساخت ملات سیمانی ساده با شرایط عنوان شده، دیگر ملات‌ها نیز می‌بایست به گونه‌ای ساخته شوند تا شباهت زیادی با این نوع ملات داشته باشند تا به این نحو بتوان بین آن‌ها مقایسه نمود. بدین منظور تلاش می‌شود تا نسبت مواد سیمانی به ماسه و همچنین کارایی ملات‌های دیگر مشابه با موارد بدست آمده در ملات سیمانی ساده گردد. به همین جهت با توجه به حساسیت نسبی کارایی در روش میزجریان، جریان ملات بین ۷۰٪ تا ۸۰٪ قابل قبول تلقی می‌شود. همچنین تلاش می‌شود تا نسبت آب به سیمان نیز در حد امکان با نسبت بدست آمده در ملات سیمانی ساده برابر گردد و میزان کمبود جریان ملات با افزودن روان‌کننده رفع گردد. همچنین می‌بایست به این نکته توجه نمود که افزودن میزان زیاد روان‌کننده موجب آب زدگی ملات می‌شود که در این صورت ملات قابل استفاده نمی‌باشد. تمامی ملات‌های استفاده شده در این پژوهش به شرح زیر می‌باشد.

۱. ملات سیمانی ساده (Normal Cement)

چگونگی ساخت و نیز طرح اختلاط این ملات تماماً در قسمت قبل توضیح داده شد. و جدول طرح اختلاط آن برای یک کیلوگرم ماسه به شرح زیر می‌باشد.

جدول ۳-۸ طرح اختلاط ملات سیمانی ساده

ماسه (گرم)	سیمان (گرم)	آب (گرم)
۱۰۰۰	۳۰۰	۱۳۵

۲. پوزولانی ۱۵٪ (P۱۵, Pozzolanic ۱۵٪)

با توجه به مطالعات انجام شده توسط محققان پیشین، این طرح اختلاط، بیشترین مقاومت را در هنگام استفاده از پوزولان طبیعی می‌دهد [۸۱]. طرح اختلاط این ملات به این صورت می‌باشد که نسبت مواد سیمانی به ماسه و نیز نسبت آب به سیمان آن مشابه ملات سیمانی ساده می‌باشد. با این تفاوت که ۱۵٪ میزان سیمان از ترکیب حذف شده و به جای آن پوزولان جایگزین گردید. همچنین به همان میزانی که در این طرح اختلاط پوزولان ریخته شده، میکروسیلیس نیز اضافه می‌گردد. میزان آب نیز در این نمونه به این صورت می‌باشد که به اندازه دو برابر وزن میکروسیلیس، آب نسبت به مرحله قبل اضافه می‌گردد. همچنین روان‌کننده به میزانی اضافه می‌گردد تا جریان ملات در بازه‌ی ذکر شده قرار گیرد. میزان روان‌کننده برای این نوع ملات

۱/۵٪ وزنی مواد سیمانی می‌باشد. طرح اختلاط این ملات برای یک کیلوگرم ماسه مطابق جدول ۳-۹ می‌باشد.

جدول ۳-۹ طرح اختلاط ملات پوزولانی ۱۵٪

ماسه (گرم)	سیمان (گرم)	پوزولان (گرم)	آب (گرم)	میکروسیلیس (گرم)	روان‌کننده (گرم)
۱۰۰۰	۲۵۵	۴۵	۱۵۸	۴۵	۴,۵

۳. پوزولانی ۲۵٪ (P_{۲۵}, Pozzolanic ۲۵٪)

ساخت این نوع ملات نیز مشابه با ملات پوزولانی ۱۵٪ بوده و به ۲۵٪ سیمان حذف و به جای آن پوزولان به مخلوط اضافه می‌گردد. در این حالت میزان روان‌کننده اضافه شده برابر ۱,۷٪ وزنی مواد سیمانی گشت. جدول ۳-۱۰ نیز طرح اختلاط این ملات را برای یک کیلوگرم ماسه نمایش می‌دهد.

جدول ۳-۱۰ طرح اختلاط ملات پوزولانی ۲۵٪

ماسه (گرم)	سیمان (گرم)	پوزولان (گرم)	آب (گرم)	میکروسیلیس (گرم)	روان‌کننده (گرم)
۱۰۰۰	۲۲۵	۷۵	۱۷۳	۷۵	۵

۴. پوزولانی ۱۵٪ بدون میکروسیلیس (P_{۱۵}WSF, Pozzolanic ۱۵٪ without silica fume)

تفاوت این ملات با ملات پوزولانی ۱۵٪ در نبود میکروسیلیس است. اثر میکروسیلیس بر افزایش مقاومت فشاری به اثبات رسیده است؛ اما در مقاومت برشی سطح مشترک نیاز به مطالعه و بررسی بیشتری دارد. بدین منظور با حذف میکروسیلیس از طرح اختلاط، به ساخت ملات پرداخته می‌شود. همچنین در این ملات جهت رسیدن به جریان مورد نظر مقدار کمی روان‌کننده لازم می‌باشد. که این موضوع نشان دهنده نیاز به آب بیشتر برای پوزولان است که این موضوع با توجه به سطح مخصوص بیشتر آن نسبت به سیمان قابل توجیه است. طرح اختلاط این ملات برای یک کیلوگرم ماسه مطابق جدول ۳-۱۱ می‌باشد.

جدول ۱۱-۳ طرح اختلاط ملات پوزولانی ۱۵٪ بدون میکروسیلیس

ماسه (گرم)	سیمان (گرم)	پوزولان (گرم)	آب (گرم)	روان کننده (گرم)
۱۰۰۰	۲۵۵	۴۵	۱۳۵	۰.۵

۵. پوزولانی ۲۵٪ بدون میکروسیلیس (Pozzolanic ۲۵% without silica fume, P۲۵WSF) ساخت این نوع ملات نیز کاملاً مشابه ملات ۱۵٪ بدون میکروسیلیس می باشد. با این تفاوت که ۲۵٪ وزنی سیمان جایگزین پوزولان می گردد. و در این ملات نیز به مقدار کمی (۰.۳٪) روان کننده نیاز است. جدول ۱۲-۳ طرح اختلاط این ملات را برای یک کیلوگرم ماسه نشان می دهد.

جدول ۱۲-۳ طرح اختلاط ملات پوزولانی ۲۵٪ بدون میکروسیلیس

ماسه (گرم)	سیمان (گرم)	پوزولان (گرم)	آب (گرم)	روان کننده (گرم)
۱۰۰۰	۲۲۵	۷۵	۱۳۵	۱

۶. پوسته برنجی نوع I ۱۵٪ (Rice husk ash type I ۱۵%, RHAI ۱۵) مطابق نکات عنوان شده، برای ساخت این ملات از خاکستر پوسته برنج نوع I استفاده می شود. در این حالت نیز به میزان ۱۵٪ وزنی از مقدار سیمان کاسته شده و با خاکستر پوسته برنج جایگزین می گردد. جذب آب پوسته برنج به دلیل سطح مخصوص بالای آن زیاد بوده و از آنجایی که به دلیل مسائل مربوط به آب زدگی ملات نمی توان میزان روان کننده را از ۲٪ وزنی سیمان بیشتر نمود، لذا با افزودن آب میزان جریان مورد نظر بتن تامین می گردد. جدول ۱۳-۳ طرح اختلاط ملات مورد نظر را برای یک کیلوگرم ماسه نشان می دهد.

جدول ۱۳-۳ طرح اختلاط ملات خاکستر پوسته برنج ۱۵٪ نوع I

ماسه (گرم)	سیمان (گرم)	خاکستر پوسته برنج نوع I (گرم)	آب (گرم)	روان کننده (گرم)
۱۰۰۰	۲۵۵	۴۵	۱۵۸	۴.۵

۷. پوسته برنجی نوع I (۲۵٪ RHAI ۲۵٪, Rice husk ash type I ۲۵٪) طرح اختلاط این ملات نیز همانند خاکستر پوسته برنج ۱۵٪ نوع I می‌باشد و با این تفاوت که ۲۵٪ وزنی سیمان با این نوع خاکستر جایگزین گردیده است. طرح اختلاط این ملات برای یک کیلوگرم ماسه مطابق جدول ۳-۱۴ می‌باشد.

جدول ۳-۱۴ طرح اختلاط ملات خاکستر پوسته برنج ۲۵٪ نوع I

ماسه (گرم)	سیمان (گرم)	خاکستر پوسته برنج نوع I (گرم)	آب (گرم)	روان‌کننده (گرم)
۱۰۰۰	۲۲۵	۷۵	۱۷۳	۶

۸. پوسته برنجی نوع II (۱۵٪ RHAI ۱۵٪, Rice husk ash type II ۱۵٪) در این ملات از پوسته برنج نوع II استفاده گردیده و مشابه ملات پوسته برنجی ۱۵٪ نوع I می‌باشد. همچنین طرح اختلاط آن طبق جدول ۳-۱۵ می‌باشد.

جدول ۳-۱۵ طرح اختلاط ملات خاکستر پوسته برنج ۱۵٪ نوع II

ماسه (گرم)	سیمان (گرم)	خاکستر پوسته برنج نوع II (گرم)	آب (گرم)	روان‌کننده (گرم)
۱۰۰۰	۲۵۵	۴۵	۱۶۵	۴,۵

۹. پوسته برنجی نوع II (۲۵٪ RHAI ۲۵٪, Rice husk ash type II ۲۵٪) این ملات نیز مشابه ملات پوسته برنجی ۱۵٪ نوع I بوده و با این تفاوت که در آن از خاکستر نوع II استفاده شده است. که طرح اختلاط این نوع ملات نیز برای یک کیلوگرم ماسه مطابق جدول ۳-۱۶ است.

جدول ۱۶-۳ طرح اختلاط ملات خاکستر پوسته برنج ۲۵٪ نوع II

ماسه (گرم)	سیمان (گرم)	خاکستر پوسته برنج نوع I (گرم)	آب (گرم)	روان‌کننده (گرم)
۱۰۰۰	۲۲۵	۷۵	۱۸۰	۶

۶-۲-۳ ویژگی‌های مقاومتی ملات مورد استفاده

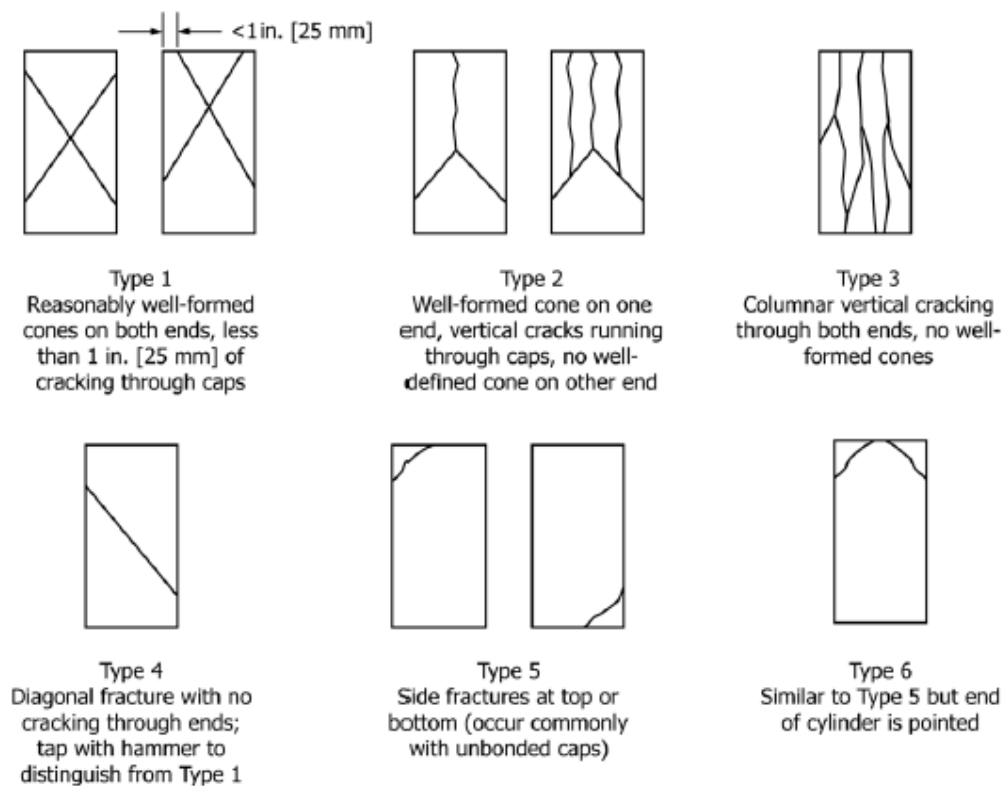
بدست آوردن ویژگی‌های مقاومتی ملات مانند مقاومت کششی و نیز مقاومت فشاری جهت مقایسه با سایر نتایج از اهمیت بسزایی برخوردار است. بدین منظور در این پژوهش به محاسبه مقاومت فشاری و کششی ۲۸ روزه هر یک از ملات‌های بکار رفته در آزمایش پرداخته می‌شود. برای بدست آوردن مقاومت فشاری ملات، از قالب استوانه‌ای 10×20 استفاده شده است. این نمونه‌های استوانه‌ای در زمان ساخت نمونه‌های آجری قالب گیری شده و پس از گیرش اولیه درون حوضچه آب در اتاق رطوبت با دمای ثابت ۲۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شده است. برای بدست آوردن مقاومت فشاری بتن برای هر نوع ملات از ۳ نمونه استوانه‌ای استفاده شده است. به جهت تست این نمونه‌ها از استاندارد ASTM C 39 استفاده شده است [۸۲]. شکل ۳-۷ نمونه‌ای از این ملات‌ها را نشان می‌دهد. الزامات این استاندارد از جمله حذف رطوبت سطحی، نرخ سرعت، بررسی عدم ناهمواری و... به کلی رعایت شده است. برای مسطح سازی دو طرف نمونه، به دلیل موجود نبودن امکانات کلاهی‌گذاری^۱، از قطع کردن نمونه استفاده گردیده است. به این گونه که یک لایه سطحی از نمونه را برش داده تا سطح نمونه مسطح و هموار جهت تست مقاومت فشاری گردد. مطابق استاندارد ASTM C 39 شکست‌های ملات فشاری به ۶ تیپ مختلف تقسیم‌بندی می‌شود (مطابق شکل ۳-۸) که شکست‌های مورد اعتبار در استاندارد ASTM C 39 شکست‌های نوع ۲ و ۳ می‌باشد.

^۱ Capping



شکل ۳-۷ نمونه‌های استوانه‌ای ساخته شده جهت تست بر روی ملات

شکست تمامی نمونه‌های فشاری مورد آزمایش از نوع ۲ و ۳ استاندارد ASTM C۳۹ بوده است. در شکل ۳-۹ به جهت مقایسه یک نمونه از ملات‌های آزمایش شده آورده شده است که در آن شکست از نوع ۳ ایجاد شده است که این موضوع بیانگر صحت تست می‌باشد. نتایج بدست آمده برای هر نوع از ملات‌ها میانگین‌گیری شده و در جدول ۳-۱۷ آورده شده است.



شکل ۳-۸ انواع شکست‌های موجود در تست مقاومت فشاری [۸۲]



شکل ۳-۹ نمونه تست شده در تست مقاومت فشاری

جدول ۳-۱۷ نتایج تست مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های استوانه‌ای

نوع نمونه	نوع تست	نیرو (kN)	تنش (MPa)
سیمانی ساده	فشاری	۲۵۰	۳۱/۸۳
پوزولان ۲۵٪	فشاری	۲۸۹/۴	۳۶/۸۵
پوزولان ۱۵٪	فشاری	۲۸۳/۹	۱۵/۳۷
پوزولان بدون میکروسیلیس ۱۵٪	فشاری	۱۶۱/۹	۲۰/۶۱
پوزولان بدون میکروسیلیس ۲۵٪	فشاری	۱۷۶/۰	۲۲/۴۱
RHA I 15%	فشاری	۱۵۹/۲	۲۰/۲۷
RHA I 25%	فشاری	۵۶/۹	۱۲/۵۶
RHA II 15%	فشاری	۱۴۶/۲	۱۸/۶۱
RHA II 25%	فشاری	۱۴۷/۲	۲۱/۳

برای بدست آوردن مقاومت کششی نیز از قالب، تعدد نمونه‌ها و شرایط ساخت و عمل آوری نمونه‌های مشابه با مقاومت فشاری استفاده می‌گردد. به منظور انجام تست مقاومت کششی ملات از تست برزیلی استفاده می‌شود این تست مطابق با استاندارد ASTM C 496 انجام می‌گیرد [۸۳]. در شکل ۳-۱۰ نمایی از تست برزیلی انجام شده در آزمایش آورده شده است. پس از انجام تست برزیلی بر روی نمونه‌ها و میانگین گیری، مقادیر بدست آمده در جدول ۳-۱۸ آورده شده است.



شکل ۳-۱۰ نمونه تست شده توسط تست مقاومت کششی

جدول ۳-۱۸ نتایج تست مقاومت کششی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای

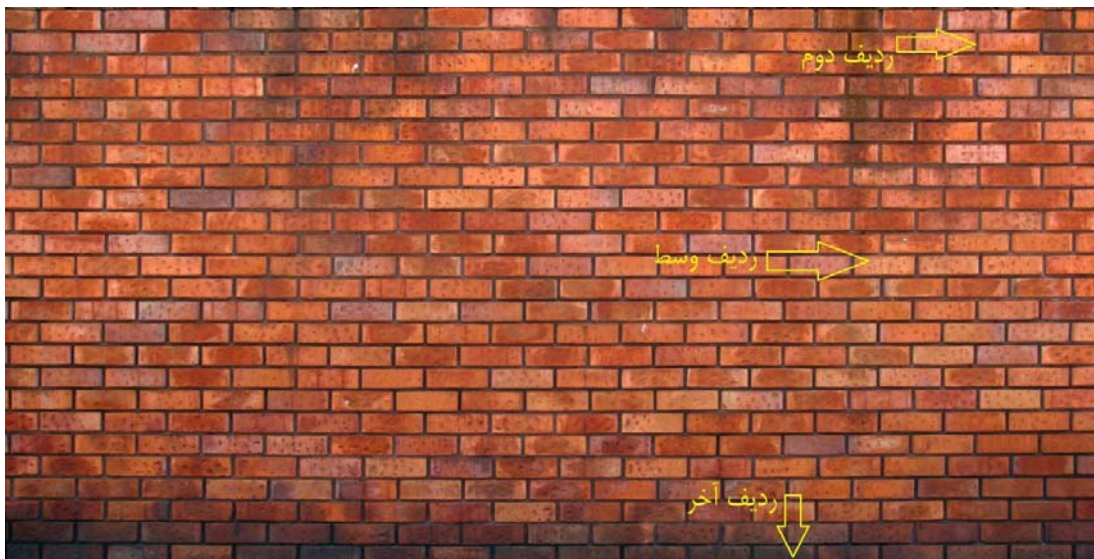
نوع نمونه	نوع تست	نیرو (kN)	تنش (Mpa)
سیمانی ساده	کشش (برزیلی)	۹۹/۶	۳/۱۷
پوزولان ۱۵٪	کشش (برزیلی)	۱۳۳/۴	۴/۲۵
پوزولان ۲۵٪	کشش (برزیلی)	۱۰۸/۲	۳/۴۴
پوزولان بدون میکروسیلیس ۱۵٪	کشش (برزیلی)	۸۵/۱	۲/۷۱
پوزولان بدون میکروسیلیس ۲۵٪	کشش (برزیلی)	۹۴/۸	۳/۰۲
RHA I 15%	کشش (برزیلی)	۹۰/۷	۲/۸۹
RHA I 25%	کشش (برزیلی)	۲۰/۸	۱/۲۴
RHA II 15%	کشش (برزیلی)	۶۳/۴	۲/۰۲
RHA II 25%	کشش (برزیلی)	۷۵/۵	۲/۷۵

نتایج حاصل از مقادیر جدول ۳-۱۷ و جدول ۳-۱۸ نشان می‌دهند که مطابق انتظار، مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های استوانه‌ای پوزولانی ۱۵٪ دارای میکروسیلیس از بقیه ملات‌ها بیشتر شده است.

۷-۲-۳ محاسبه بار نرمال‌های مختلف اعمالی

جهت محاسبه مقاومت برشی پیوند نیازمند اعمال نیروی قائم می‌باشیم. همچنین به دلیل نیاز مدلسازی به وجود سه بار نرمال متفاوت، ترجیح بر آن شد که این کار با مدلسازی یک دیوار تیغه و در نظرگیری سه تراز ارتفاعی استفاده گردد. بدین منظور برای محاسبه‌ی بار نرمال اعمالی، از یک دیوار تیغه آجری به ارتفاع ۳,۵ متر استفاده شده است. برای ترازهای ارتفاعی نیز سعی گردید که این ترازها به گونه‌ای انتخاب گردند تا نماینده خوبی از کل دیوار باشند. بدین منظور از سه بار نرمال مختلف معادل نیروی اعمالی در ردیف دوم، ردیف وسط (ردیف بیست و پنجم) و ردیف آخر (ردیف پنجاهم) این دیوار استفاده می‌گردد. مطابق شکل ۳-۱۱ مقدار هر کدام از این نیروهای نرمال محاسبه گردیده و مقادیر آن در جدول ۳-۱۹ آورده

شده است.)



شکل ۳-۱۱ نمایش ردیف‌های دیوار جهت محاسبه بار نرمال

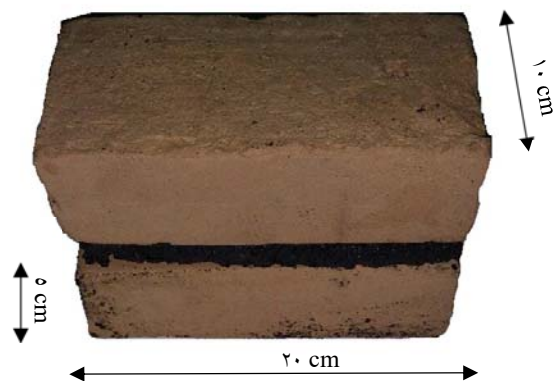
جدول ۳-۱۹ محاسبه بار نرمال اعمالی در ردیف‌های مختلف دیوار

شماره ردیف	بار نرمال واقع بر سطح آجر kg	بار نرمال اتخاذ شده kg
۳	۳/۶	۵
۲۵	۴۳/۲	۴۵
۵۰	۸۸	۹۰

۸-۲-۳ ساخت نمونه‌های آجری

برای ساخت نمونه‌های آجری، مطابق مصالح معرفی شده در قسمت قبل عمل می‌شود. بدین منظور دو عدد آجر توسط ملات بین‌شان چسبانده می‌شود. نکته قابل ذکر در این مرحله، رطوبت آجر در حین ساخت می‌باشد که مطابق پژوهش‌های گذشته این میزان رطوبت می‌بایست در حدود ۸۰٪ رطوبت اشباع آجر باشد؛ که به منظور ایجاد این شرایط مطابق جدول ۳-۲۰ با قرار دادن آجر در محیط آزمایشگاه به مدت ۶ تا ۷ ساعت، آجر در حین ساخت این میزان رطوبت را خواهد داشت. همچنین به جهت ثابت

بودن شرایط ملات‌ها با یکدیگر، ضخامت ملات در همه نمونه‌ها برابر مقدار ثابت یک سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود. نمونه‌ها تماما توسط نیروی کار ماهر و خبره و تا حد امکان مشابه یکدیگر ساخته شده‌اند. شکل ۳-۱۲ شمایی از این نمونه‌ها را نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۱۲ چگونگی ساخت نمونه‌های بکار رفته در پژوهش

جدول ۳-۲ درصد رطوبت آجر با گذشت زمان و در محیط آزمایشگاه

زمان ماندن در محیط آزمایشگاه	درصد رطوبت نمونه شماره ۱	درصد رطوبت نمونه شماره ۲
۱۰ دقیقه	۹۹/۵۶	۹۹/۴۱
۲۰ دقیقه	۹۸/۸۸	۹۸/۶۸
۳۰ دقیقه	۹۸/۳۵	۹۸/۱۴
۱ ساعت	۹۶/۶۲	۹۶/۲۳
۱٫۵ ساعت	۹۵/۳۷	۹۴/۷۹
۲ ساعت	۹۴/۱۷	۹۳/۳۳
۳ ساعت	۹۱/۸۱	۹۰/۵۴
۴ ساعت	۸۹/۶۶	۸۷/۸۲
۵ ساعت	۸۷/۵۷	۸۵/۸۹
۶ ساعت	۸۵/۴۳	۸۳/۱۸
۷ ساعت	۸۳/۳۶	۸۰/۵۰
۸ ساعت	۸۱/۳۰	۷۰/۸۱

این نمونه‌ها پس از ساخت در محیط آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه صنعتی شریف با دمای تقریبا

ثابت درون گونی‌های نخی نگهداری شده است (مطابق شکل ۳-۱۳). این نمونه‌ها روزانه یک مرتبه مرطوب شده تا رطوبت خود را از دست ندهند.



شکل ۳-۱۳ شرایط نگهداری و عمل‌آوری نمونه

با توجه به وجود نیروهای قائم ۵ کیلوگرم، ۴۵ کیلوگرم و ۹۰ کیلوگرم، پس از گذشت یک ساعت از زمان ساخت، این بارها بر روی نمونه‌های مختلف قرار داده شده و تا زمان تست بر روی نمونه باقی مانده است (شکل ۳-۱۴). برای هر کدام از نیروهای قائم مختلف تعداد سه نمونه ساخته شده است. به عبارتی دیگر برای هر نوع از ملات‌های ذکر شده در قسمت قبل، تعداد ۹ عدد نمونه وجود دارد. این نمونه‌های ساخته شده پس از گذشت ۲۸ روز مورد آزمایش قرار می‌گیرند. این فرآیند برای تمامی ۹ نوع ملات مورد استفاده، انجام گردیده است.



شکل ۳-۱۴ اعمال بار بر روی نمونه‌ها در زمان عمل‌آوری

همچنین به منظور بررسی روند افزایش مقاومت در طول زمان، برای دو نوع ملات سیمانی ساده و پوزولانی ۱۵٪ تعداد ۹ عدد نمونه برای هر یک از ملات‌ها و در هر یک از سنین ۱، ۳، ۷ و ۱۴ روزه تهیه گردیده‌است.

۹-۲-۳ انجام تست بر روی نمونه‌ها

مطابق مطالب عنوان شده در قسمت قبل، نمونه‌های ساخته شده پس از ساخت و فرارسیدن زمان آزمایش، مورد تست قرار می‌گیرند. بدین منظور نمونه‌های ساخته شده در دستگاه برش مستقیم قرار می‌گیرند. دستگاه برش مستقیم متشکل از دو نیم‌جعبه بالایی و پایینی می‌باشد که نیم‌جعبه بالایی ثابت بوده و نیم‌جعبه پایینی رو به جلو حرکت می‌کند (مطابق شکل ۳-۱۵). ابعاد داخلی این نیم‌جعبه $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ می‌باشد و از آنجایی که ابعاد نیم‌جعبه از ابعاد آجر بزرگتر است، به منظور جلوگیری از لغزش آجر نسبت به هر یک از جعبه‌ها، قالبی تهیه شد که نمونه درون آن ثابت نگه داشته شده است (مطابق شکل ۳-۱۶). برای هر کدام از نیم‌جعبه‌هایی بالایی و پایینی قالب مورد نظر تهیه شده است. قالب پایینی درون نیم‌جعبه قرار گرفته و پس از قرار گرفتن آجر درون این قالب، قالب بالایی بر روی نمونه آجری سوار شده و بدنه‌های آن به نیم‌جعبه بالایی پیچ می‌شوند. نمایش حالت کلی نمونه سوار شده بر روی دستگاه، در شکل ۳-۱۷ آورده شده است.



شکل ۱۵-۳ شمایی از نیم جعبه بالایی و پایینی بکار رفته در دستگاه برش مستقیم



شکل ۱۶-۳ قالب مورد استفاده در نیم جعبه پایینی



شکل ۳-۱۷ قرارگیری قالب‌های بالایی و پایینی به همراه نمونه درون دستگاه

پس از قرارگیری نمونه و قالب‌ها درون دستگاه برش، نوبت به اعمال سربار می‌رسد. دستگاه برش مستقیم استفاده شده در این پژوهش قادر است تا نیروهایی در بازه ده کیلوگرم تا دو تن را از طریق سیستم سازوکار بازو و لنگر موجود در دستگاه اعمال کند. از آنجایی که در این پژوهش نیاز به اعمال نیروی پنج کیلوگرم می‌باشد، می‌بایست این نیرو را به صورت دستی بر روی نمونه قرار داد. که برای این کار از قرار دادن یک وزنه ۵ کیلوگرمی بر روی نمونه استفاده می‌شود. این در حالی است که برای اعمال نیروهای ۴۵ کیلوگرمی و ۹۰ کیلوگرمی از طریق سازوکار بازو و لنگر دستگاه نخواهد بود.

پس از اعمال نیروی قائم وارده، جابجایی‌سنج‌های^۱ افقی و قائم بر روی نمونه سوار می‌شوند. این جابجایی‌سنج‌ها به همراه دستگاه اندازه‌گیری نیرو^۲ به دستگاه جمع‌آوری داده‌ها^۳ وصل و از آن طریق نیز به کامپیوتر جهت قرائت داده‌ها متصل می‌گردد. دستگاه جمع‌آوری داده‌های استفاده شده در این پژوهش قادر به برداشت داده‌ها به میزان دو دفعه در هر ثانیه می‌باشد. طبق استاندارد ASTM D 5607 که برای نمونه‌های سنگی در دستگاه برش مستقیم استفاده می‌گردد [۸۴]، سرعت اعمال نیروی برشی در حالت کنترل جابجایی می‌بایست بین ۰/۱ میلی‌متر بر ثانیه تا ۰/۲ میلی‌متر بر ثانیه باشد. بدین منظور سرعت اعمال بار افقی اعمالی برای این پژوهش ۰/۱۵ میلی‌متر بر ثانیه تنظیم گشت [۸۵]. شمای کلی دستگاه به همراه متعلقات در هنگام آزمایش در شکل ۳-۱۸ و شکل ۳-۱۹ آورده شده است.

^۱ linear variable differential transformer (LVDT)

^۲ Load cell

^۳ Data logger



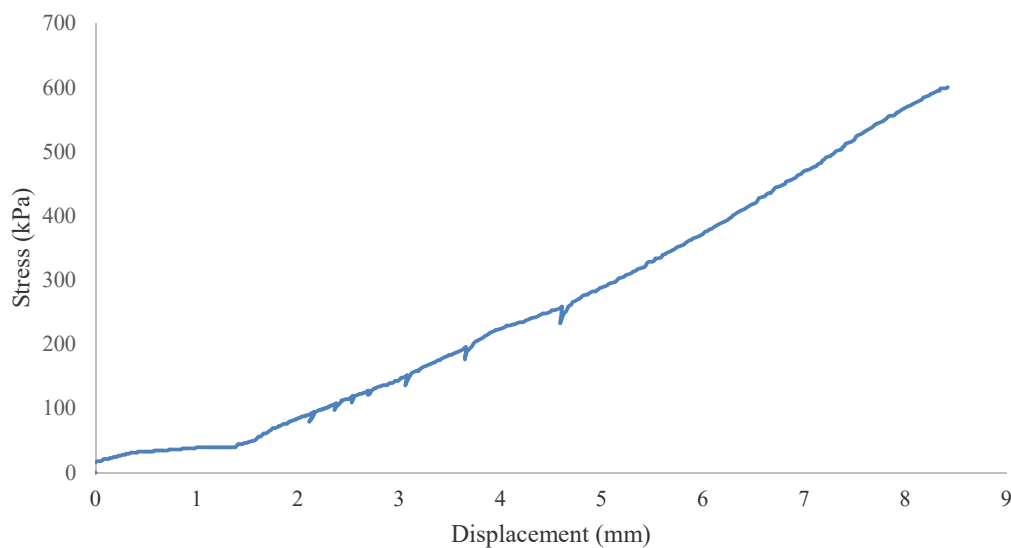
شکل ۱۸-۳ چگونگی استقرار جابجایی سنجها بر روی دستگاه



شکل ۱۹-۳ شمای کلی دستگاه حین آزمایش

با توجه به اینکه دستگاه قادر به قرائت نیرو می‌باشد، تنش وارد بر نمونه در هر لحظه می‌بایست محاسبه گردد. با توجه به اینکه نمونه در بعد عرضی، بعد تماس ثابتی داشته و تنها در راستای طولی به دلیل حرکت رو به جلوی آجر پایینی نسبت به آجر بالایی کاهش بعد تماس وجود خواهد داشت که این کاهش بعد در نمونه منجر به کاهش سطح و نیز تغییر تنش می‌گردد. با توجه به قرائت مقدار جابجایی سنج افقی، میزان جابجایی نسبی بین دو آجر بدست آمده و در هر لحظه تنش اعمالی بدست می‌آید.

با توجه به زمان انجام تست برای هر نمونه، تست بر روی نمونه‌ها انجام شده و نتایج آن ذخیره می‌گردد. شکل ۳-۲۰ نمونه‌ای از نمودار تنش-جابجایی برای ملات سیمانی ساده را نمایش می‌دهد. مطابق این نمودار نمونه آجری با شیبی تقریباً ثابت تا لحظه شکست افزایش تنش را تحمل می‌کند تا به تنش حداکثر شکست برسد. پس از آن نمونه شکسته شده و تاب آوری نیروی آن تقریباً به صفر می‌رسد. میزان حداکثر تنش و جابجایی متعاقب آن لحظه نیز در این تست‌ها قابل تعیین می‌باشد.



شکل ۳-۲۰ نمودار تنش-جابجایی ملات ۲۸ روزه سیمانی ساده با بار نرمال ۹۰ کیلوگرم

فرآیند مورد نظر برای تمامی نمونه‌های آجری ساخته شده انجام گرفته و نمودار تنش-جابجایی نیز برای تمامی موارد موجود می‌باشد. نتایج بدست آمده در آزمایش‌ها به کلی در فصل آتی آورده شده است.

۳-۳ مدل سازی

۳-۳-۱ مقدمه

مدل‌های رفتاری^۱ اغلب به منظور پیش‌بینی رفتار پیچیده یک مصالح مرتبط با زمین‌شناسی^۲ بکار می‌روند. از جمله نمونه‌های کاربردی می‌توان رفتار سطح مشترک تحت بارگذاری را نام برد. مدل رفتاری مورد استفاده قبل از استفاده جهت پیش‌بینی رفتار مصالح نیازمند کالیبره شدن می‌باشد که بدین منظور می‌بایست نتایج مستند موجود باشد تا این عمل انجام گیرد. در این پژوهش با توجه به وجود نتایج بدست آمده از آزمایشگاه، از نتایج یاد شده بهره‌گیری می‌شود. به منظور کالیبره کردن مدل، می‌بایست ثابت‌های مورد نیاز مواد که جهت مدلسازی بکار می‌روند؛ محاسبه شوند. بدین منظور می‌بایست از تئوری‌های الاستیسیته و پلاستیسیته جهت تعیین مشخصات مواد مورد استفاده نمود. برای استفاده از تئوری پلاستیسیته می‌بایست سطح تسلیم^۳، سطح پتانسیل پلاستیک^۴ و قانون سخت‌شوندگی^۵ برای مدل مورد نظر تعریف گردند که جهت استفاده از این تئوری‌ها بدست آوردن ثابت‌های ذکر شده الزامی می‌باشد. در این پژوهش پارامترهای مرتبط با مدل HISS با استفاده از حالات مختلف تغییر شکل مانند حالت الاستیک، حالت پلاستیک در حالت سخت‌شوندگی، تغییر فاز از حالت کاهش حجم به افزایش حجم و نیز رفتار حدی نهایی تعیین گردیده است. مفاهیم و ایده‌های بکار رفته در قسمت مدلسازی این پژوهش از کتاب Mechanics of Materials and Interfaces که توسط دسای و در سال ۲۰۰۶ نوشته شده؛ آورده شده است [۶۴].

به طور کلی تعداد ۹ پارامتر برای بدست آوردن خواص مصالح در مدل HISS مورد نیاز می‌باشد که این موارد به دو دسته پارامترهای الاستیسیته و پلاستیسیته تقسیم بندی می‌گردند. پارامترهای الاستیسیته شامل دو پارامتر کاملاً آشنای E و ν بوده و پارامترهای پلاستیسیته به چهار دسته زیر تقسیم می‌گردند.

• ثابت‌های مرتبط با حالت نهایی

در این حالت، پارامترهای مد نظر، γ ، β و m می‌باشند.

^۱ Constitutive model

^۲ Geological material

^۳ Yield surface

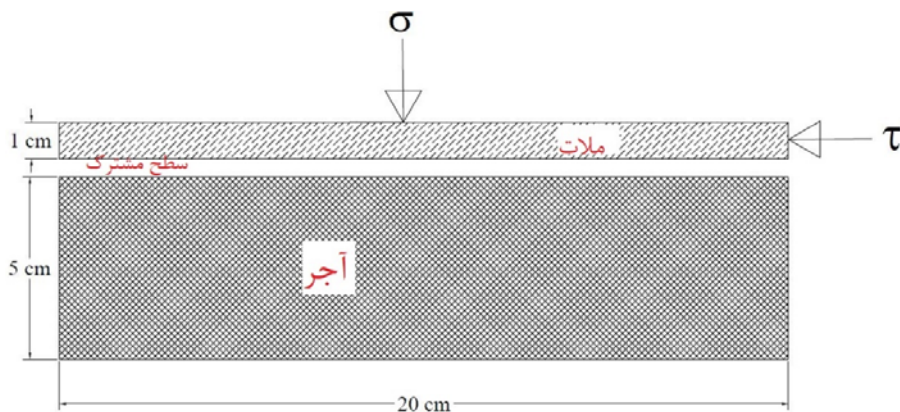
^۴ Plastic potential surface

^۵ Hardening law

- ثابت‌های مرتبط با تغییر فاز از حالت جمع‌شدگی به بازشدگی^۱ در این حالت، پارامتر مد نظر، n می‌باشد.
- ثابت مرتبط با تابع رشد^۲ در این حالت، پارامترهای مد نظر، a_1 و η_1 می‌باشند.
- ثابت‌های غیر وابسته^۳ در این حالت، پارامتر مد نظر، K می‌باشد.

۲-۳-۳ استفاده از مفهوم سطح مشترک

یکی از تعاریف سطح مشترک این است که دو جسم ساخته شده از مواد متفاوت که در تماس با یکدیگر قرار گیرند؛ به لایه نازکی که بین آن‌ها تشکیل می‌شود سطح مشترک گفته می‌شود. به عنوان نمونه‌ای از سطح مشترک می‌توان به سطح مشترک آجر و ملات اشاره کرد که وجود لایه‌ای بسیار نازک مابین آجر و ملات که تحت عنوان سطح مشترک عمل می‌کند، پرداخت. مطابق شکل ۲۱-۳ سطح مشترک بین آجر و ملات نشان داده شده‌است. در تعریف سطح مشترک محدودیتی برای سطح تماس وجود ندارد به این معنی که این سطح تماس می‌تواند در بازه‌ی بسیار زبر تا نرم و هموار تغییر کند.



شکل ۲۱-۳ سطح مشترک بین آجر و ملات

^۱ Transition from contractive to dilative

^۲ Growth function

^۳ Non-associative

جابجایی‌های نسبی سطح مشترک، جابجایی‌های نرمال (v) و جابجایی مماسی (u) می‌باشند که مطابق رابطه (۲-۳) بدست می‌آید. [۶۵]

$$\begin{aligned} u &= u^e + \bar{u}^p + u^s \\ v &= v^e + \bar{v}^p + v^s \end{aligned} \quad (2-3)$$

که در رابطه بالا e ، p و s به ترتیب نشان دهنده تغییر شکل‌های الاستیک، تغییر شکل‌های پلاستیک و تغییر شکل ناشی از لغزش می‌باشد. اگرچه تغییر شکل لغزشی و پلاستیک می‌تواند مشابه زیر ترکیب گردد.

$$\begin{aligned} u &= u^e + u^p \\ v &= v^e + v^p \end{aligned} \quad (3-3)$$

تنش سطح مشترک برای سطح مشترک دو بعدی مطابق شکل ۳-۲۱ توسط رابطه (۴-۳) ارائه شده است.

$$\tau = \frac{T}{A} \quad (4-3)$$

$$\sigma_n = \frac{N}{A}$$

که در این روابط τ و σ_n تنش‌های برشی و نرمال بوده و A نیز سطح مقطع اسمی سطح مشترک می‌باشد. بر پایه نتایج آزمایشگاهی بدست آمده و نیز مطالعات پیشین، اثری از نرم‌شدگی^۱ در رفتار سطح مشترک آجر و ملات مشاهده نگردید. بنابراین مقدار آشفستگی^۲ صفر بوده و جهت مدلسازی از مدل HISS- δ_0 استفاده شده است. ورژن الاستوپلاستیک δ_0 از مدل HISS برای پاسخ سطح مشترک به پارامترهای بیان شده در جدول ۳-۲۱ نیاز دارد که در ادامه در مورد آن‌ها توضیح داده خواهد شد.

^۱ Softening

^۲ Disturbance

جدول ۳-۲۱ پارمترهای ثابت مدل HISS- δ_0

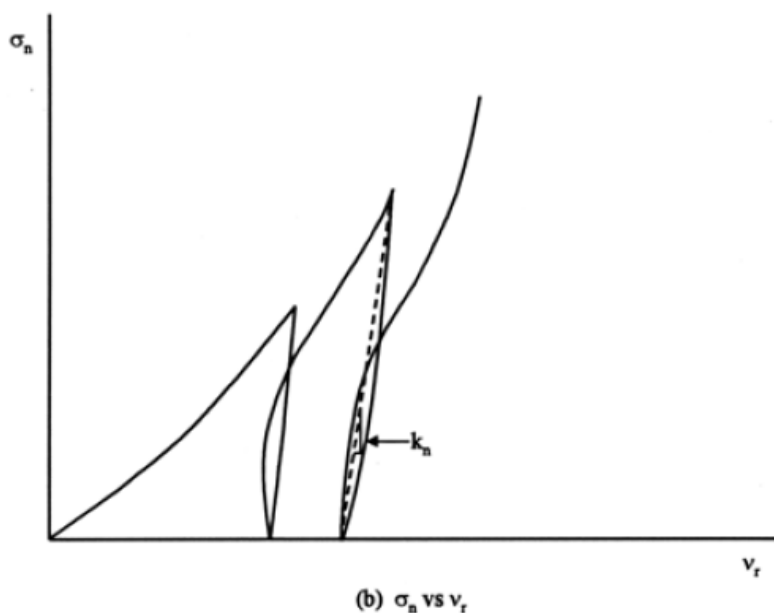
توضیحات	ثابت‌ها	مدل
سختی برشی و سختی نرمال	k_n و k_s	الاستیسیته
پوش نهایی مستقیم ^۱	γ و n, b, a	پلاستیسیته
پوش نهایی منحنی ^۲	q و γ, n, b, a	
بدون مقاومت	-	حالت بحرانی
مقاومت نرمال	k_n	
حالت بحرانی	$\bar{\lambda}$ و ν'_0, c_2, c_1, c_0	

۳-۳-۳ پارامترهای الاستیک برای مدل HISS

طبق تعریف سختی برشی k_s به عنوان شیب باربرداری منحنی τ در مقابل u_r اطلاق می‌شود. همچنین k_n نیز سختی نرمال بوده و طبق تعریف شیب باربرداری σ_n در مقابل v_r می‌باشد. در صورتی که این پارامترها، متغیرهایی در مدل الاستیک غیرخطی در نظر گرفته شوند، می‌توانند به عنوان تابعی از عواملی چون تنش برشی و تنش نرمال بیان گردند. رابطه سختی نرمال با استفاده از تست فشار مطابق شکل ۳-۲۲ بدست می‌آید.

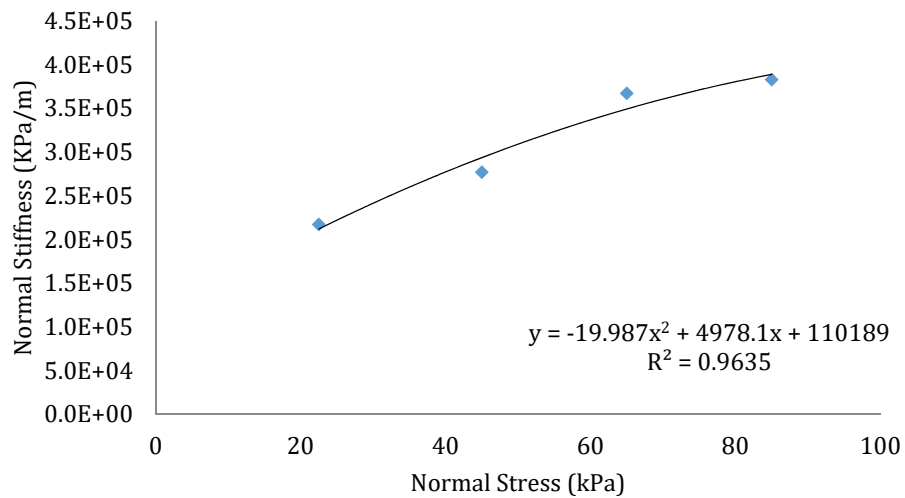
^۱ Straight ultimate envelope

^۲ Curved ultimate envelope



شکل ۳-۲۲ رابطه سختی نرمال در مقابل جابجایی برای بدست آوردن سختی محوری [۶۴]

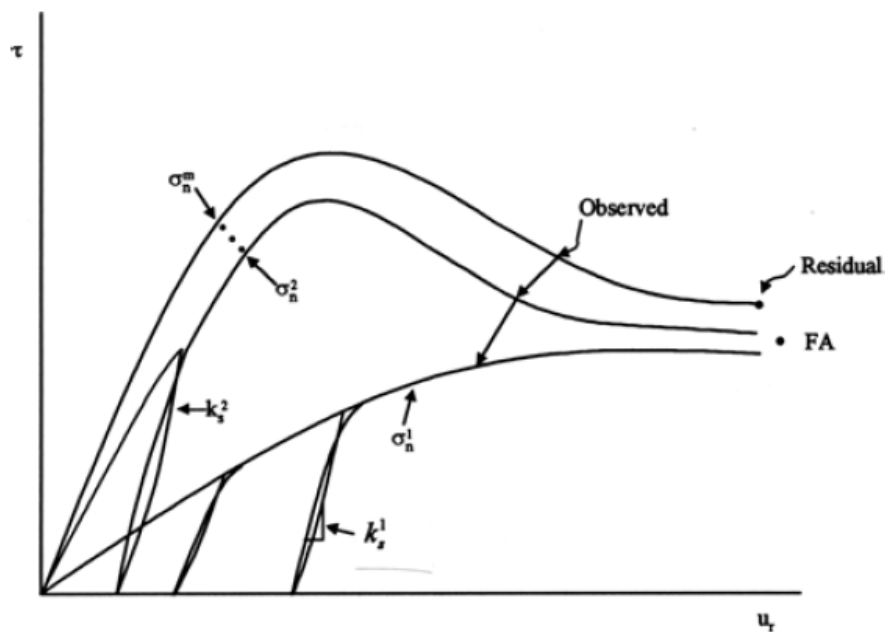
پس از یافتن شیب مربوط به تنش نرمال، نتایج سختی نرمال در مقابل تنش نرمال برای ملات سیمانی ساده در شکل ۳-۲۳ آمده است. سپس بهترین منحنی که از نتایج نمودار تنش نرمال در مقابل سختی نرمال می‌گذرد، برازش داده شده و معادله متعاقب آن در رابطه (۳-۵) آورده شده است. لازم به ذکر است که انجام این آزمایش توسط سازوکار اعمال نیروی دستگاه برش مستقیم در آزمایشگاه مکانیک خاک در دانشگاه شریف انجام گردیده است.



شکل ۳-۲۳ تغییرات سختی نرمال در مقابل تنش نرمال برای سطح مشترک آجر و ملات

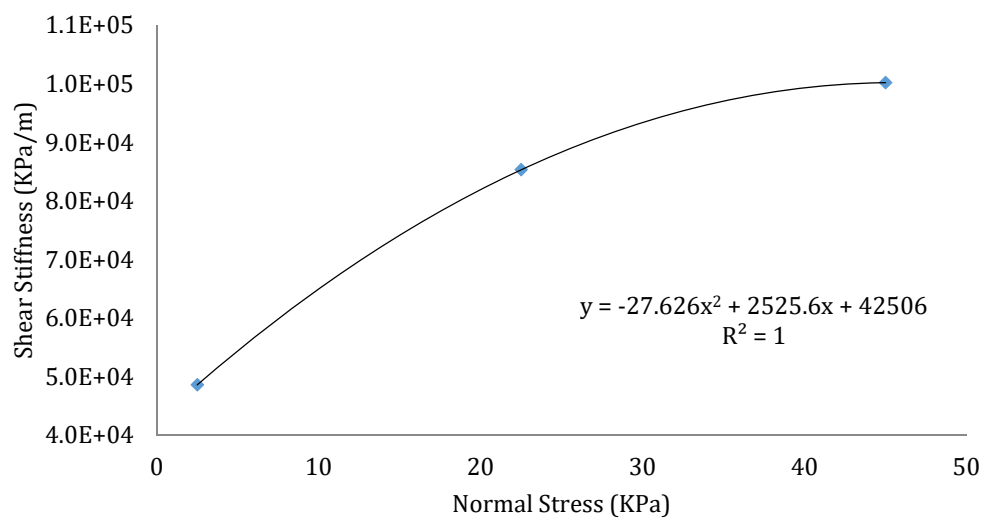
$$k_n = -19.987\sigma_n^2 + 4978.1\sigma_n + 110189 \quad (۵-۳)$$

به منظور بدست آوردن مقدار سختی برشی k_s می‌بایست از بارگذاری سیکلی استفاده نمود و در آن شیب باربرداری سیکل دوم تحت عنوان سختی برشی قرائت می‌شود. با توجه به امکانات موجود در آزمایشگاه و ناتوانی در اعمال بارگذاری سیکلی، با دستگاه برش مستقیم سه مرحله بارگذاری انجام می‌گردد. در مرحله اول تنش برشی به ۲۰۰ کیلو پاسکال رسیده و سپس بارگذاری متوقف می‌شود تا تنش اعمالی به صفر برسد در مرحله بعد بارگذاری تا مرحله‌ای انجام می‌شود که تنش برشی به مقدار ۴۰۰ کیلو پاسکال برسد. پس از آن بارگذاری متوقف تا تنش اعمالی به صفر برسد. در مرحله سوم بارگذاری تا تنش ۶۰۰ کیلو پاسکال پیش می‌رود و سپس باربرداری انجام می‌شود. میانگین شیب این سه مرحله را تحت عنوان سختی برشی قلمداد می‌شود. شکل ۳-۲۴ روند این عملیات را نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۲۴ تعیین سختی برشی سطح مشترک (k_s) [۶۴]

مطابق مراحل ذکر شده برای سختی نرمال، مقادیر تنش نرمال در مقابل سختی برشی رسم شده و بهترین منحنی در این نمودار برازش داده می‌شود. نتایج بدست آمده برای ملات سیمانی ساده در شکل ۳-۲۵ و رابطه (۳-۶) آورده شده است.



شکل ۳-۲۵ تغییرات سختی برشی در مقابل تنش نرمال

$$k_s = -27.626\sigma_n^2 + 2525.6\sigma_n + 42506 \quad (6-3)$$

۴-۳-۳ پارامترهای الاستوپلاستیک برای مدل HISS

مطابق نکات ذکر شده در قسمت‌های قبل، ورژن δ_0 مدل پلاستیسیته HISS در نظر گرفته شده است. بنابراین پارامترهای الاستوپلاستیک مدل می‌بایست محاسبه گردند. مطالعات دسای در سال ۱۹۹۵ نشان داده که برای یک سطح مشترک دو بعدی تابع تسلیم F مطابق رابطه (۷-۳) خواهد بود.

$$F = \tau^2 + \alpha\sigma_n^* - \gamma\sigma_n^{*q} \quad (7-3)$$

$$\sigma_n^* = R + \sigma_n$$

در رابطه بالا R مقدار τ هنگامی که σ_n برابر صفر است می‌باشد که بیان کننده پارامتر چسبندگی می‌باشد. برای پوش نهایی خطی مقدار R مطابق رابطه (۸-۳) می‌باشد.

$$R = \frac{c_0}{\sqrt{\gamma}} \quad (8-3)$$

و α نیز تابع ضریب رشد بوده که از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\alpha = \frac{a}{\xi^b} \quad (9-3)$$

در این رابطه a و b پارامترهای سختی بوده و ξ مسیر برش پلاستیک^۱ و جابجایی نرمال می‌باشد. همچنین رابطه (۱۰-۳) نیز بیان کننده این عبارت می‌باشد.

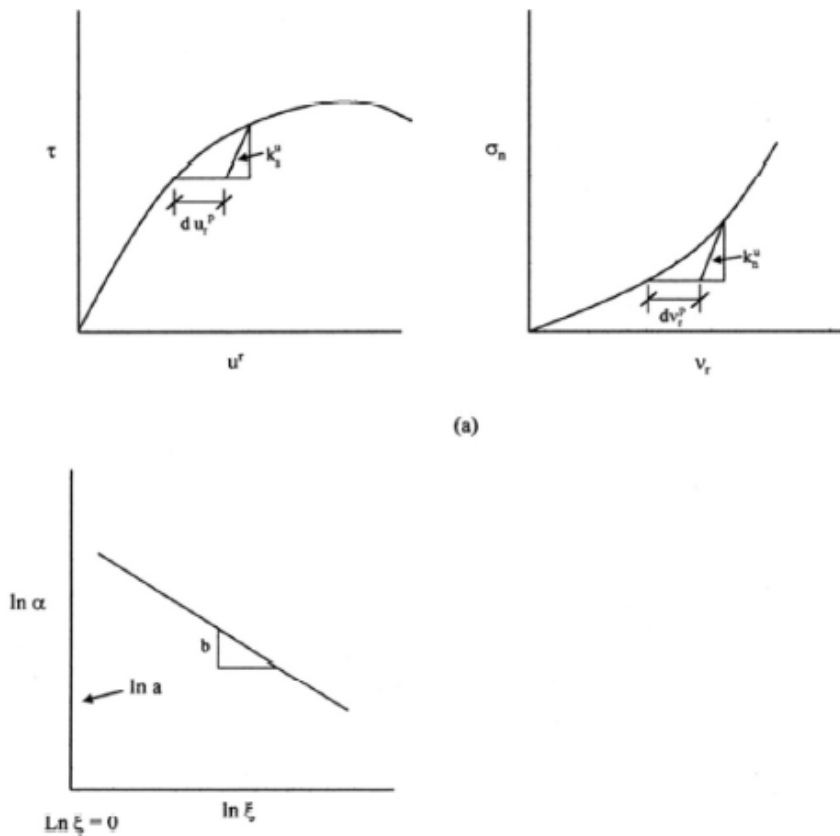
$$\xi = \int \left(du_r^p du_r^p + dv_r^p dv_r^p \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10-3)$$

برای محاسبه ξ در نقاط مختلف در منحنی‌های τ در مقابل u_r و σ_n در مقابل v_r رسم می‌گردد. سپس مقادیر a و b توسط معادله زیر قابل تعیین می‌باشد.

^۱ Trajectory of plastic shear

$$\ln a - b \ln \xi = \ln \alpha \quad (11-3)$$

پارامتر b نشان دهنده نرخ سخت‌شدگی می‌باشد که در واقع شیب میانگین منحنی حاصل از رابطه (11-3) بوده و پارامتر a نیز نشان دهنده مقدار α هنگامی که ξ برابر یک است می‌باشد. که در واقع محل برخورد با محور هنگامی که $\ln \xi$ برابر صفر است می‌باشد. توضیحات مقتضی در شکل ۳-۲۶ آورده شده است.

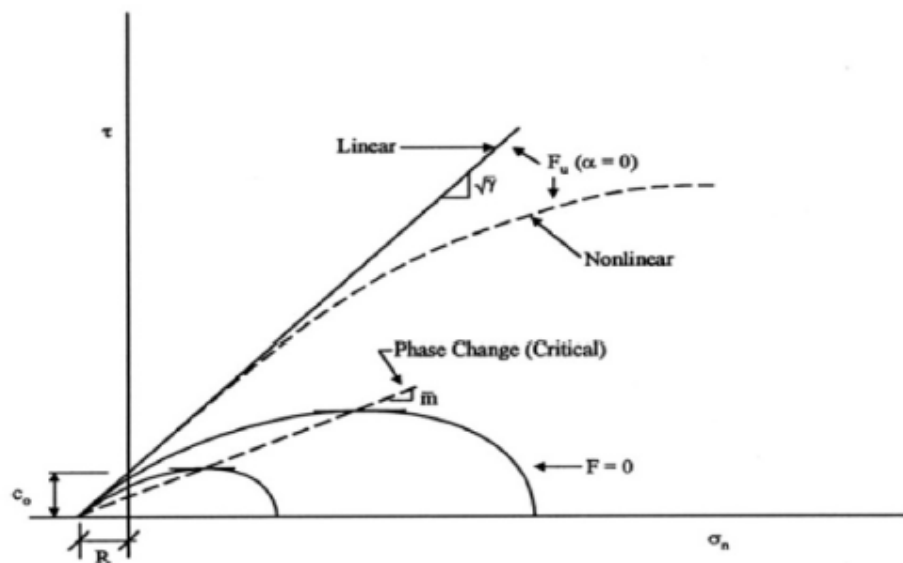


شکل ۳-۲۶ تعیین پارامترهای سخت‌شدگی [۸۶]

پارامتر γ از طریق شیب نهایی پوش در نمودار تنش برشی در مقابل تنش نرمال بدست می‌آید. همچنین رابطه زیر نیز جهت بدست آوردن این پارامتر صادق است. شکل ۳-۲۷ بیان کننده این مورد می‌باشد.

$$\tau_u = \sqrt{\gamma} \sigma_n^{q/2} \quad (12-3)$$

$$\gamma = \frac{\tau_u^2}{\sigma_n^q}$$



شکل ۳-۲۷ سطح تسلیم و سطح نهایی شکست [۶۴]

مقدار q برای پوش منحنی در هنگامی که تنش برشی، تنش برشی نهایی است می‌باشد. بنابراین مقدار α صفر خواهد بود. در بیشتر مواقع مقدار q برابر دو خواهد بود که بیان کننده یک خط صاف می‌باشد. اگرچه مقدار واقعی q از معادله زیر تعیین می‌شود.

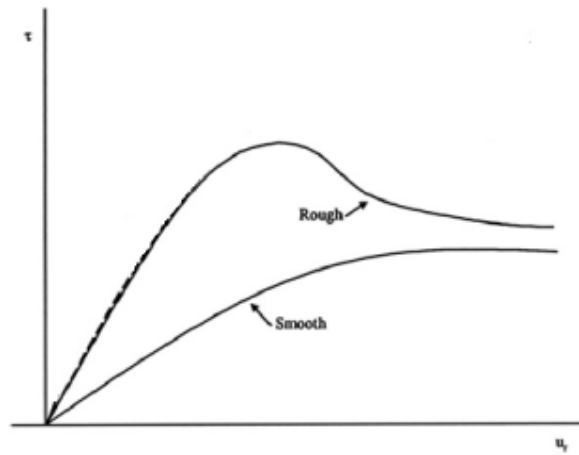
$$\ln \tau_u = \ln \sqrt{\gamma} + \frac{q}{2} \ln \sigma_n \quad (13-3)$$

شیب خط میانگین نمودار $\ln \tau_u$ در مقابل $\ln \sigma_n$ نشان دهنده مقدار q می‌باشد. مقدار n یا پارامتر تغییر فاز از شرایط تنش در نقطه گذار^۱ تعیین می‌شود. نقطه گذار نقطه‌ای است که با افزایش جابجایی افقی در نمونه، جابجایی قائم روند کاهشی خود را جایگزین روند افزایشی کند؛ و یا به بیانی دیگر نقطه‌ای که روند انقباضی حجم با انبساط جایگزین گردد. این نقطه در شکل ۳-۲۸ نشان داده شده است. پس از پیدا کردن این نقطه، مقدار پارامتر n از رابطه زیر بدست می‌آید.

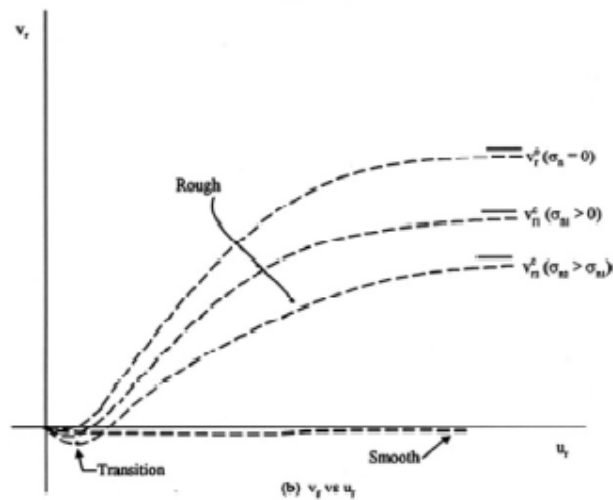
$$n = \frac{q}{\left(1 - \frac{\bar{\tau}^2}{\gamma \bar{\sigma}_n^q}\right)} \quad (14-3)$$

^۱ Transition point

که در این رابطه $\bar{\tau}$ و $\bar{\sigma}_q$ تنش‌های برشی و محوری در نقطه گذار می‌باشند.



(a) $\tau - u_s$



(b) $v_s \text{ vs } u_s$

شکل ۳-۲۸ حالت تنش در نقطه گذار [۶۴]

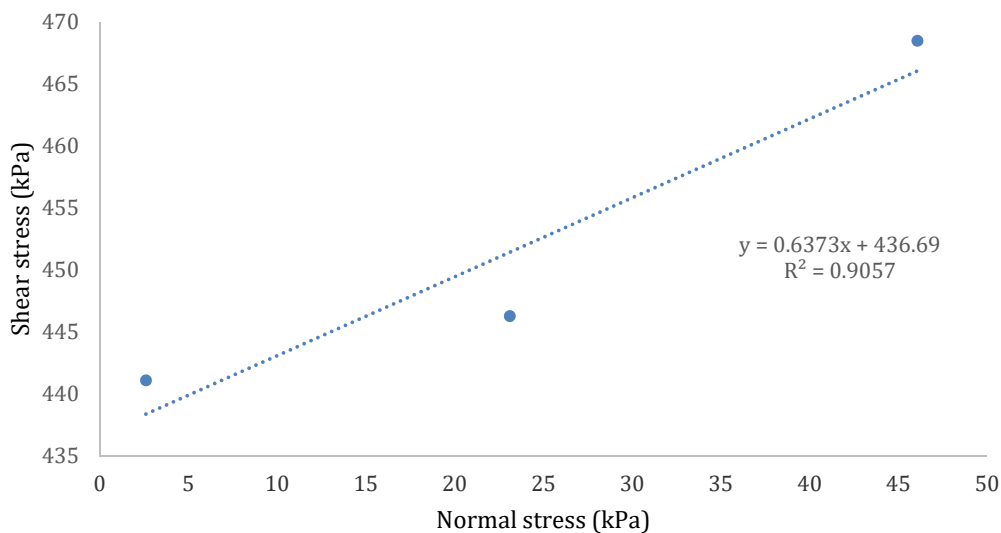
۳-۳-۵ محاسبه زاویه اصطکاک^۱ و چسبندگی^۲

شکل ۳-۲۹ تنش برشی نهایی شکست را در مقابل تنش نهایی نرمال شکست نشان می‌دهد. این نمودار برای ملات سیمانی ساده و در سن ۲۸ روز بوده که با اعمال بارهای نرمال متفاوت ۵۰ نیوتن، ۴۵۰ نیوتن و ۹۰۰ نیوتنی بدست می‌آید. همچنین نتایج موجود برای هر بار نرمال به صورت یک داده نمایش داده

^۱ Friction angle

^۲ Adhesion

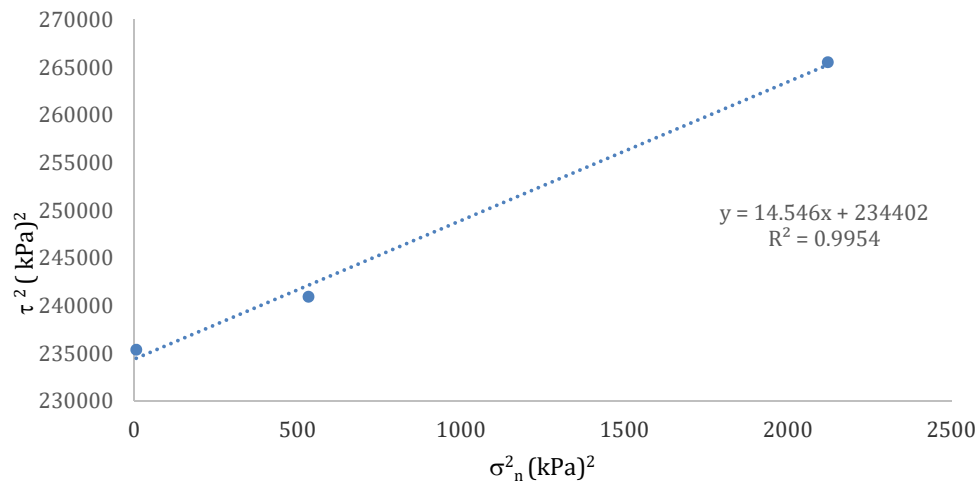
شده که این داده از میانگین نتایج بدست آمده مربوط به بار نرمال مربوطه بدست می‌آید. نمودارهای مربوط به دیگر انواع ملات‌ها در فصل آتی به طور کامل مورد بحث قرار خواهد گرفت. پس از انتخاب نقاط، بهترین خط عبوری از این نقاط مطابق شکل ۳-۲۹ برازش داده می‌شود. طبق معادله خط بدست آمده در شکل ۳-۲۹ زاویه اصطکاک داخلی سطح مشترک ۳۲/۵۱ درجه و پارامتر چسبندگی نیز برابر ۴۳۶/۶۹ کیلوپاسکال می‌باشد.



شکل ۳-۲۹ تنش برشی نهایی در مقابل تنش نرمال

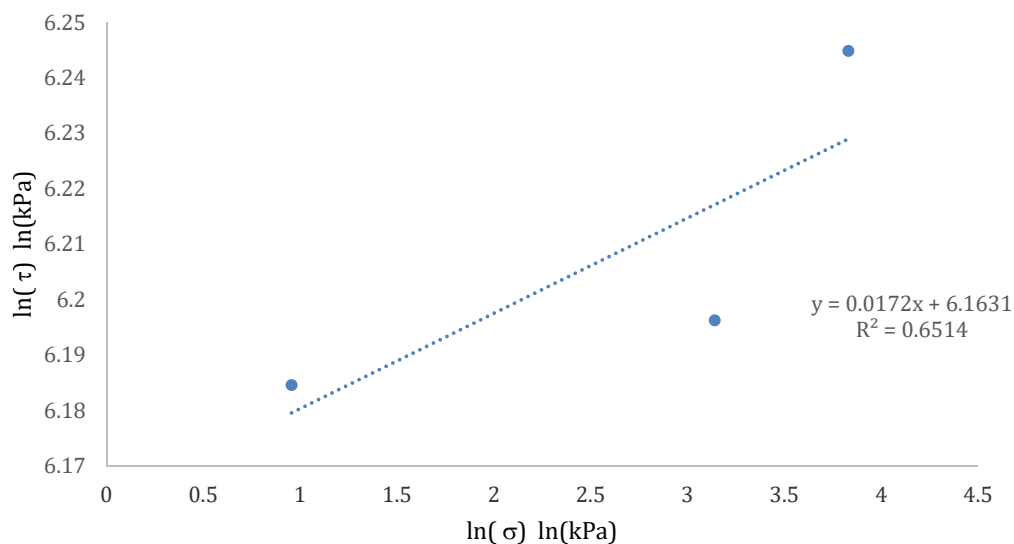
۳-۳-۶ تعیین پارامترهای q و γ

تنش تسلیم نهایی که نشان دهنده حالات تنش می‌باشد برابر میانگین خط برازش با شیب رادیکال گاما می‌باشد که در آن q نیز یک پارامتر تاثیر گذار است. مقدار پارامتر q برابر ۲ برای پوش خط صاف می‌باشد. همچنین مطابق مطالب گفته شده در قبل مقدار پارامتر α نیز در تنش برشی حالت نهایی برابر صفر می‌باشد. با توجه به این موضوع که تنش نهایی رفتار ماده در حالت دست نخورده نامشخص می‌باشد؛ تنش برشی نهایی در حالت رفتار دست نخورده را می‌توان برابر مقداری تقریباً ده درصد بیشتر از تنش نهایی بدست آمده از تست برش در نظر گرفت [۶۴]. شکل ۳-۳۰ توان دوم تنش برشی در مقابل توان دوم تنش نرمال را نشان می‌دهد. در این نمودار بهترین خط برازش داده شده و شیب خط برابر ۱۴/۵۶ بدست می‌آید که برابر مقدار γ در حالتی که q برابر دو است، می‌باشد.



شکل ۳۰-۳ نمودار تنش برشی به توان دو در مقابل تنش نرمال به توان دو (با اعمال ضریب افزایشی تنش برشی)

برای بدست آوردن پارامتر q مطابق نکات بیان شده در قبل از رابطه (۳-۱۳) استفاده می‌گردد. بدین منظور نمودار لگاریتم طبیعی تنش برشی در مقابل تنش نرمال رسم می‌گردد. مطابق شکل ۳۱-۳ پس از برازش بهترین خط در این نمودار، عرض از مبدا برابر $\ln \sqrt{\gamma}$ و شیب خط نیز $\frac{q}{2}$ می‌باشد.



شکل ۳۱-۳ نمودار لگاریتم تنش نرمال در مقابل لگاریتم تنش برشی

بنابراین مطابق نتایج بدست آمده مقادیر q و γ به شرح زیر است.

$$q = 0.0344$$

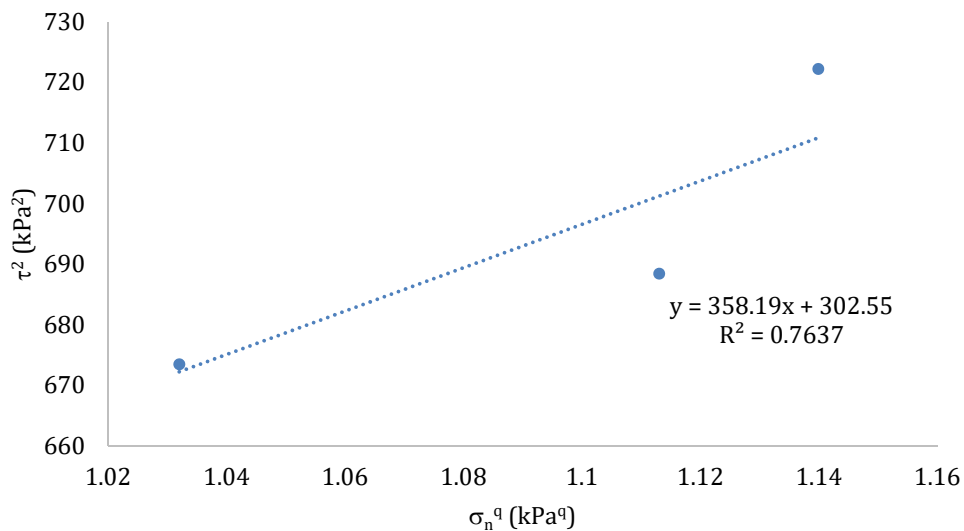
(۱۵-۳)

$$\gamma = 225528$$

۳-۳-۷ محاسبه پارامتر n

محاسبه پارامتر تغییر فاز (n) وابسته به شرایط تنش‌های برشی و نرمال در هنگام عبور سطح مشترک از نقطه گذار است. خطی که نقاط حداکثر پوش تسلیم را به یکدیگر متصل می‌کند خط تغییر فاز نامیده می‌شود. در این نقاط مقدار $\frac{dF}{d\sigma_n}$ برابر صفر می‌باشد. همچنین مقدار پارامتر n طبق رابطه (۱۴-۳) تعیین می‌گردد.

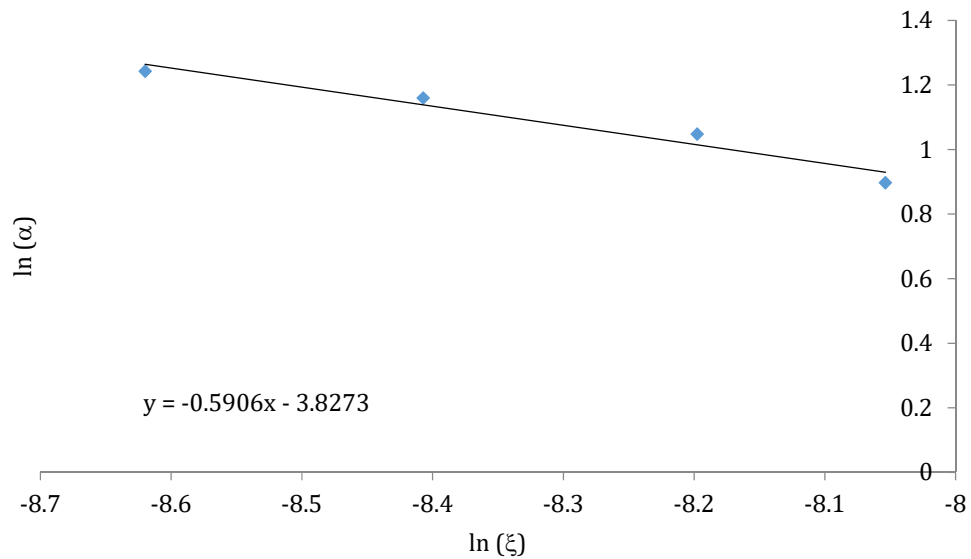
طبق رابطه (۱۴-۳) تنش برشی، تنش در نقطه‌ی گذار می‌باشد. شکل ۳-۳ تنش برشی نقطه گذار در مقابل تنش نرمال را برای نمونه سیمانی ساده نشان می‌دهد که شیب این خط برابر $358/19$ می‌باشد؛ که برابر مقدار $\frac{\tau_t^2}{\sigma_n^q}$ می‌باشد. با دانستن موارد ذکر شده، پارامتر n برابر $0/03445$ خواهد بود.



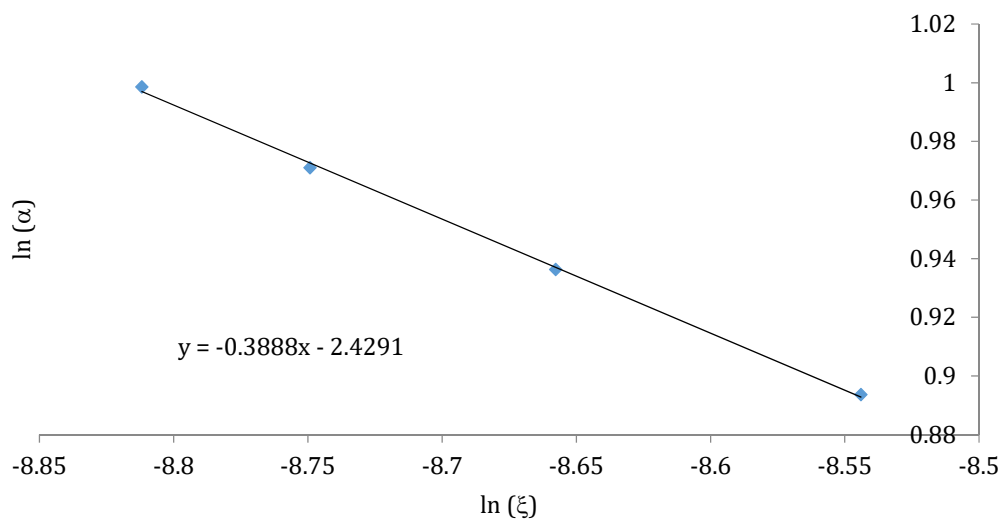
شکل ۳-۳ تنش برشی نقطه گذار در مقابل تنش نرمال

۳-۳-۸ تعیین مقادیر α ، a و b

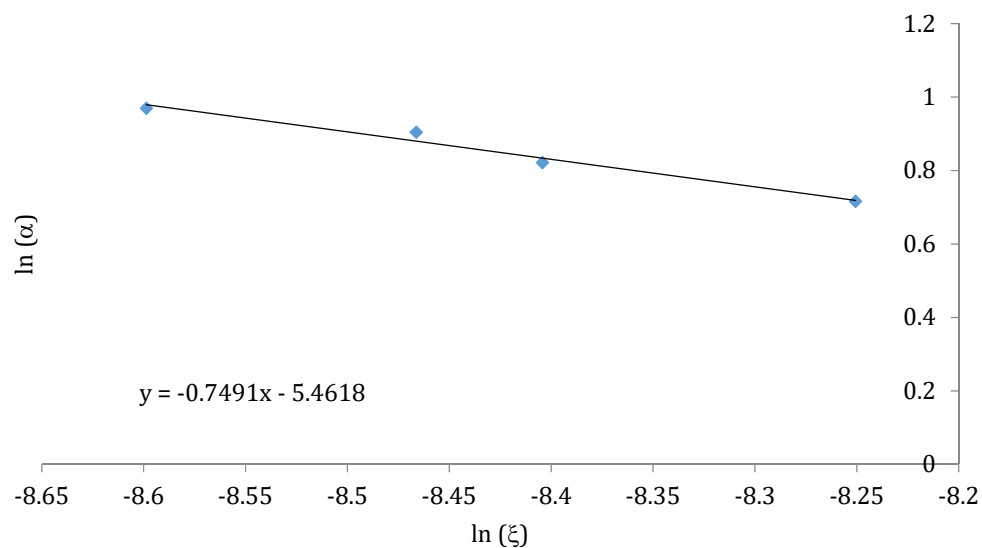
به منظور تعیین تابع رشد (α)، به تعریف پارامترهای سخت شونده (a و b) نیاز می‌باشد. مطابق موارد ذکر شده در قسمت‌های قبل، پارامتر b نشان دهنده نرخ سخت شدگی که همان شیب میانگین منحنی است، می‌باشد و پارامتر a نیز نشان دهنده مقدار α هنگامی که ξ برابر یک است می‌باشد. که در واقع محل برخورد با $\ln \xi$ برابر صفر می‌باشد. شکل‌های زیر نمودار $\ln \alpha$ در مقابل $\ln \xi$ برای نیروهای نرمال مختلف را جهت محاسبه پارامترهای سختی نشان می‌دهد.



شکل ۳-۳-۳ تعیین پارامترهای سختی برای $\sigma_n = 2.5$



شکل ۳-۳۴ تعیین پارامترهای سختی برای $\sigma_n = 22.5$



شکل ۳-۳۵ تعیین پارامترهای سختی برای $\sigma_n = 45$

پس از میانگین گیری مقادیر a و b از تست‌ها، نرخ سخت شوندگی (b) برابر 0.05762 و مقدار α هنگامی که $\xi = 1$ می‌باشد (a) برابر 0.03798 خواهد بود.

تمامی پارامترهای بدست آمده برای ملات سیمانی ساده در جدول ۳-۲۲ آورده شده است.

جدول ۳-۲۲ ثابت‌های مواد برای سطح مشترک آجر و ملات سیمانی ساده

ثابت‌های مواد	پارامتر	مقدار
ثابت‌های الاستیسیته	k_n	$-19.98\sigma_n^2 + 4978.1\sigma_n + 110189$
	k_s	$-27.63\sigma_n^2 + 2525.6\sigma_n + 42506$
ثابت‌های پلاستیسیته	γ	225528
	β	0
	q	0.0344
پارامتر تغییر فاز	n	0.03445
پارامتر رشد	a	0.03798
	b	0.5762

مطابق پژوهش‌های انجام شده توسط توفیق در سال ۲۰۱۲، در نظر گرفتن مقدار واقعی q مقدار دقیق-تری را نسبت به انتخاب مقدار دو برای q خواهد داد [۸۷]. بنابراین در این پژوهش مقدار q همان مقدار محاسبه شده در نظر گرفته می‌شود.

۳-۳-۹ برنامه کامپیوتری جهت بدست آوردن نمودار تنش-جابجایی

پس از بدست آوردن پارامترهای مدل HISS برنامه‌ای کامپیوتری با استفاده از نرم‌افزار متلب^۱ به جهت بدست آوردن نمودار تنش برشی در مقابل جابجایی افقی برای سطح مشترک آجر و ملات نوشته شده است. روند کار این برنامه به صورت زیر است:

۱. مشتق‌گیری نسبت به τ ، σ_n و ξ از تابع تسلیم. این کار با استفاده از رابطه (۳-۷) انجام شده که نتایج حاصل از آن مطابق رابطه (۳-۱۶) می‌باشد.

$$\frac{df}{d\tau} = 2\tau$$

$$\frac{df}{d\sigma_n} = \alpha n(\sigma_n + R)^{n+1} - \gamma q(\sigma_n + R)^{q-1} \quad (۳-۱۶)$$

$$\frac{df}{d\xi} = \frac{df}{d\alpha} \times \frac{d\alpha}{d\xi} = \frac{-ba(\sigma_n + R)^n}{\xi^{b+1}}$$

^۱ MATLAB

۲. تعریف ضرایب الاستیک به صورت ماتریسی (C^e)

ماتریس ضرایب به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$[C_e] = \begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & k_n \end{bmatrix} \quad (۱۷-۳)$$

۳. تعریف $\frac{dF}{d\sigma}$ به شکل ماتریسی

$$\left[\frac{dF}{d\sigma} \right] = \begin{bmatrix} dF/d\tau \\ dF/d\sigma_n \end{bmatrix} \quad (۱۸-۳)$$

۴. تعریف C^i (ماتریس ضرایب غیر الاستیک) به شکل ماتریسی

$$[c_e] = \begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & k_n \end{bmatrix} - \frac{\begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & k_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dF/d\tau \\ dF/d\sigma_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dF/d\tau \\ dF/d\sigma_n \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & k_n \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} dF/d\tau \\ dF/d\sigma_n \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & k_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dF/d\tau \\ dF/d\sigma_n \end{bmatrix} - \frac{\partial F}{\partial \sigma_\xi} \left[\begin{bmatrix} dF/d\tau \\ dF/d\sigma_n \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} dF/d\tau \\ dF/d\sigma_n \end{bmatrix} \right]^{1/2}} \quad (۱۹-۳)$$

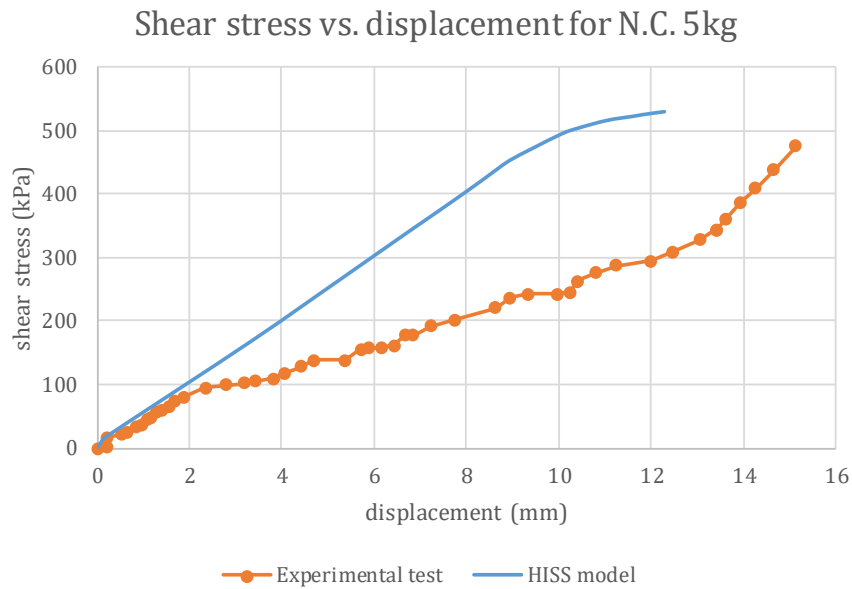
به منظور مدل‌سازی تست برش مستقیم با استفاده از مدل HISS ابتدا بازه‌های کوچک تنش نرمال اعمال می‌شود سپس تغییر شکل متعاقب نرمال آن با استفاده از رابطه (۲۰-۳) محاسبه می‌گردد. در این مرحله تا زمانی که به تنش نرمال مورد نظر نرسیده است، تنش برشی اعمال نمی‌گردد. سپس تنش برشی نیز به صورت بازه‌ای اعمال شده و تغییر شکل برشی متعاقب آن با ثابت‌های تنش نرمال محاسبه می‌گردد.

$$d\sigma_{ij}^a = C_{ijkl}^i d\varepsilon_{kl}^i \quad (۲۰-۳)$$

در این رابطه ε_{ij}^i تانسور کرنش بوده و C_{ijkl}^i نیز ماتریس ضرایب الاستوپلاستیک بوده که با استفاده از تئوری‌های الاستیسیته و الاستوپلاستیک مطابق رابطه (۲۱-۳) بدست می‌آید.

$$C_{ijkl}^{i(ep)} = C_{ijkl}^e - \frac{C_{ijmn}^e \cdot \frac{dF}{d\sigma_{mn}} \cdot \frac{dF}{d\sigma_{uv}} \cdot C_{uvkl}^e}{\frac{dF}{d\sigma_{ij}} \cdot C_{ijkl}^e \frac{dF}{d\sigma_{kl}} - \frac{dF}{d\xi} \left(\frac{dF}{d\sigma_{kl}} \cdot \frac{df}{d\sigma_{kl}} \right)^{1/2}} \quad (21-3)$$

نمودار تنش- کرنش نمونه ساخته شده با ملات سیمانی ساده با بار نرمال ۵ کیلوگرم در حالت تست شده در آزمایشگاه و نیز مدلسازی شده در شکل ۳-۳۶ آورده شده است.



شکل ۳-۳۶ مقایسه نمودار تنش-جابجایی برای نمونه حاوی ملات سیمانی ساده و بار نرمال ۵۰ نیوتن و سن ۲۸ روز، در حالت مدل سازی با استفاده از مدل HISS و نمونه تست شده در آزمایشگاه

در فصل آتی به طور مفصل به تجزیه و تحلیل یافته‌های پژوهش و بررسی و مقایسه مدلسازی صورت گرفته پرداخته می‌شود.

فصل ۴ تجزیه و تحلیل یافته‌ها

۴-۱ مقدمه

در این بخش از پژوهش نتایج آزمایش‌ها و مدلسازی آورده خواهد شد. بدین منظور مطالب این فصل به سه بخش تقسیم می‌گردد. در بخش اول نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی بر روی نمونه‌های آجری ساخته شده آورده می‌شود. در این قسمت با توجه به این موضوع که روند افزایش مقاومت سطح مشترک نیز دارای اهمیت می‌باشد، در ابتدا به بررسی نتایج حاصل از روند افزایش مقاومت این نمونه‌ها در طول زمان پرداخته خواهد شد و در ادامه به بررسی مقاومت برشی نمونه‌های ۲۸ روزه برای تمامی ملات‌ها و تحت بارهای نرمال متفاوت پرداخته می‌شود.

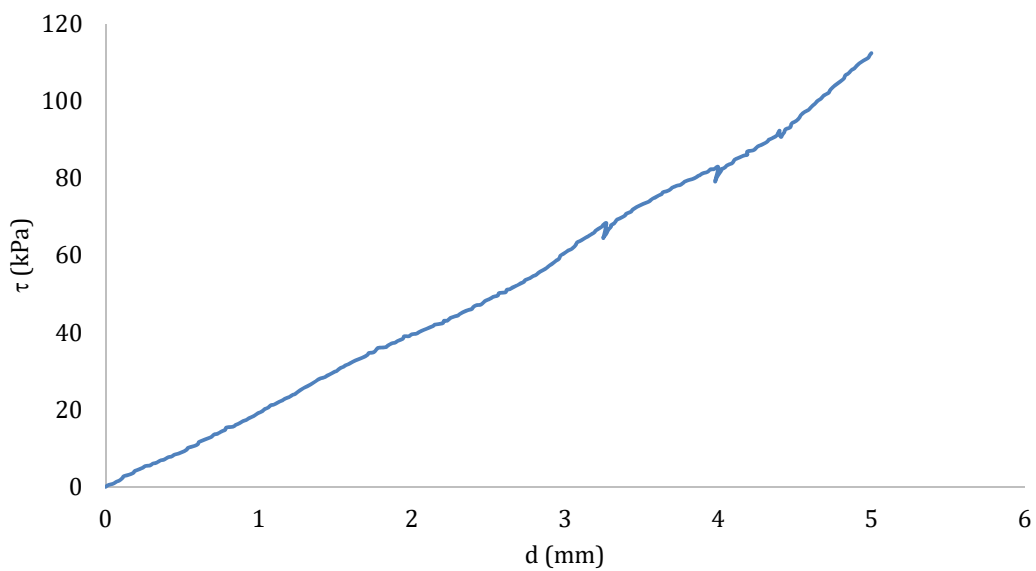
بخش دوم این فصل به محاسبه پارامترهای مدل HISS به صورتی که در فصل سوم توضیح داده شد؛ پرداخته می‌شود. با استفاده از این پارامترها می‌توان نمودارهای تنش-جابجایی را برای هر نوع نمونه با ملات‌های متفاوت توان بدست آورد.

در بخش سوم از این فصل نیز به مقایسه یافته‌های حاصل از مدلسازی و نتایج ناشی از آزمایش‌های تجربی پرداخته می‌شود. اهمیت این موضوع از این بابت می‌باشد که می‌توان مدل بدست آمده را با نتایج آزمایشگاهی موجود تایید و یا اصلاح کرد.

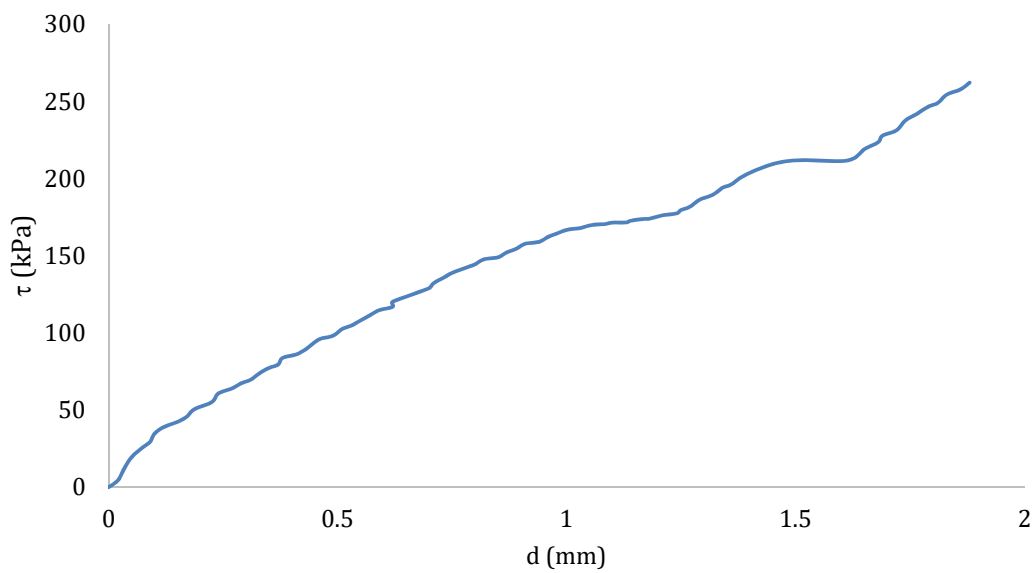
در انتهای هر بخش به نتیجه‌گیری و مقایسه نتایج بدست آمده پرداخته می‌شود.

۴-۲ نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی

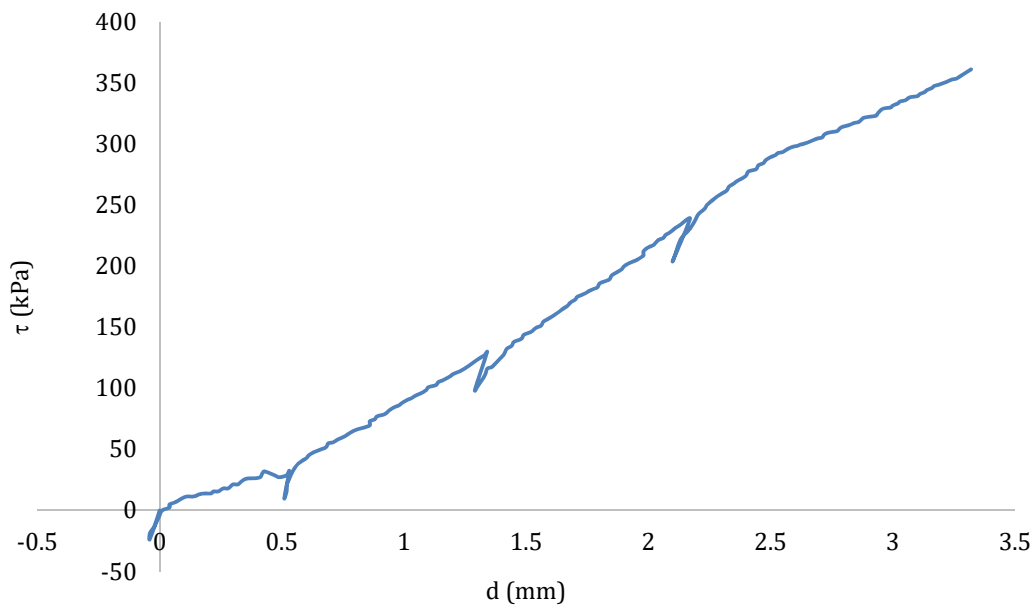
در فصل سوم تعداد آزمایش‌ها و نیز روند آن به کلی توضیح داده شد. در این قسمت به بررسی نتایج حاصله پرداخته خواهد شد. در ابتدا نمودارهای تنش-جابجایی حاصل از آزمایش، برای نمونه‌های سیمانی در سنین مختلف آورده شده سپس با انتخاب مقادیر حداکثر آن‌ها به بررسی اثر سن نمونه‌ها و در ادامه به بررسی ملات‌های مختلف پرداخته می‌شود.



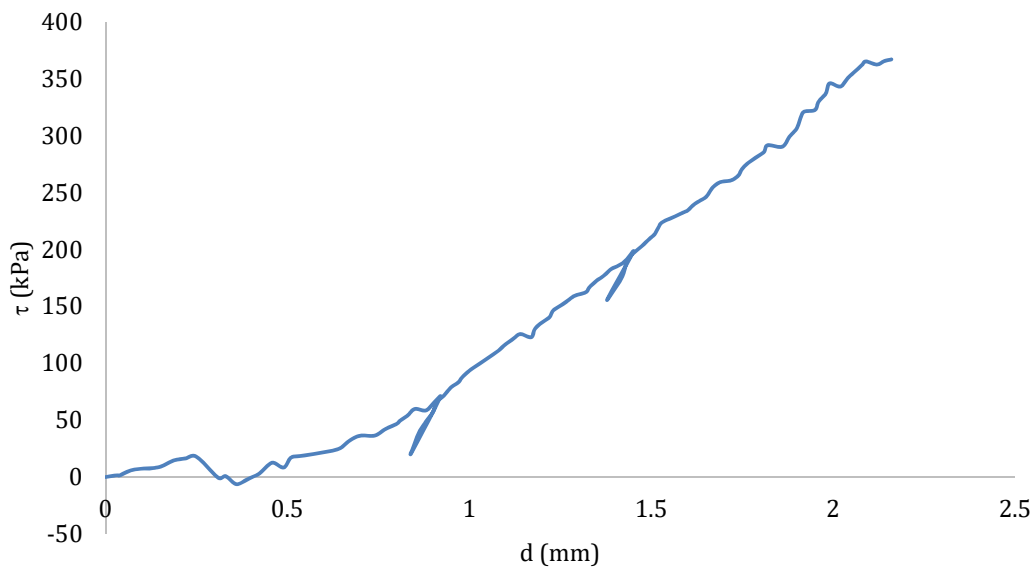
شکل ۴-۱ نمودار تنش-جابجایی نمونه سیمانی ساده ۱ روزه تحت بار نرمال ۴۵۰ نیوتن



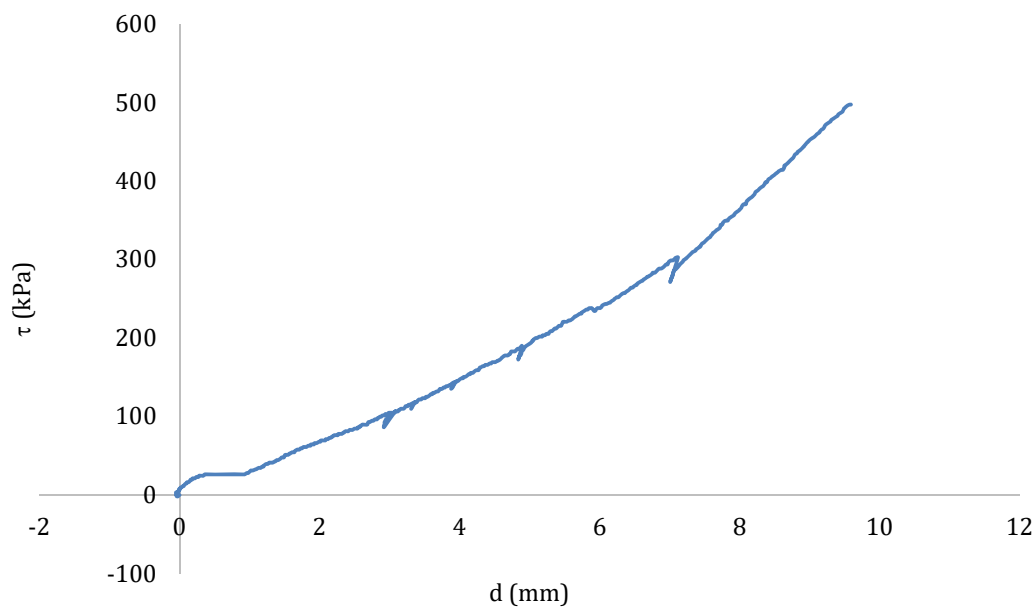
شکل ۴-۲ نمودار تنش-جابجایی نمونه سیمانی ساده ۳ روزه تحت بار نرمال ۴۵۰ نیوتن



شکل ۳-۴ نمودار تنش-جابجایی نمونه سیمانی ساده ۷ روزه تحت بار نرمال ۴۵۰ نیوتن



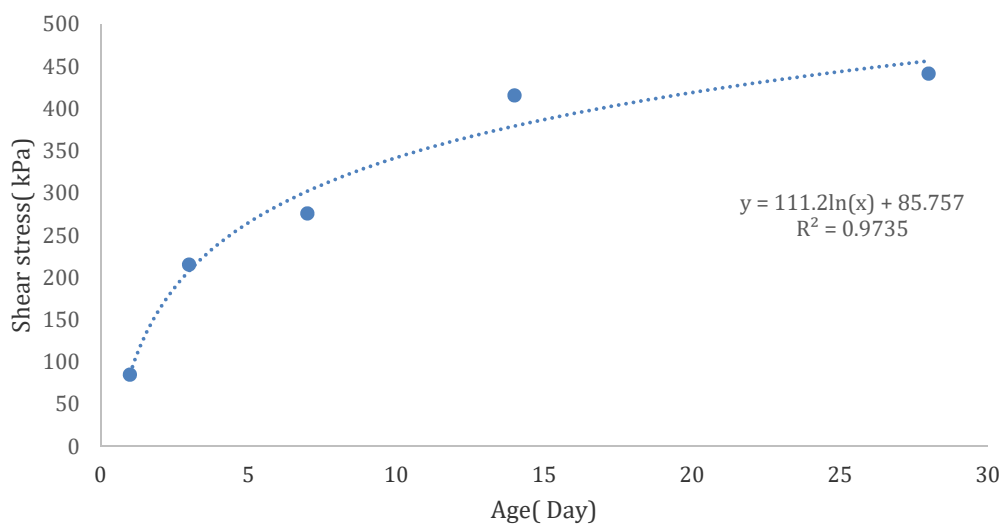
شکل ۴-۴ نمودار تنش-جابجایی نمونه سیمانی ساده ۱۴ روزه تحت بار نرمال ۴۵۰ نیوتن



شکل ۴-۵ نمودار تنش-جابجایی نمونه سیمانی ساده ۲۸ روزه تحت بار نرمال ۴۵۰ نیوتن

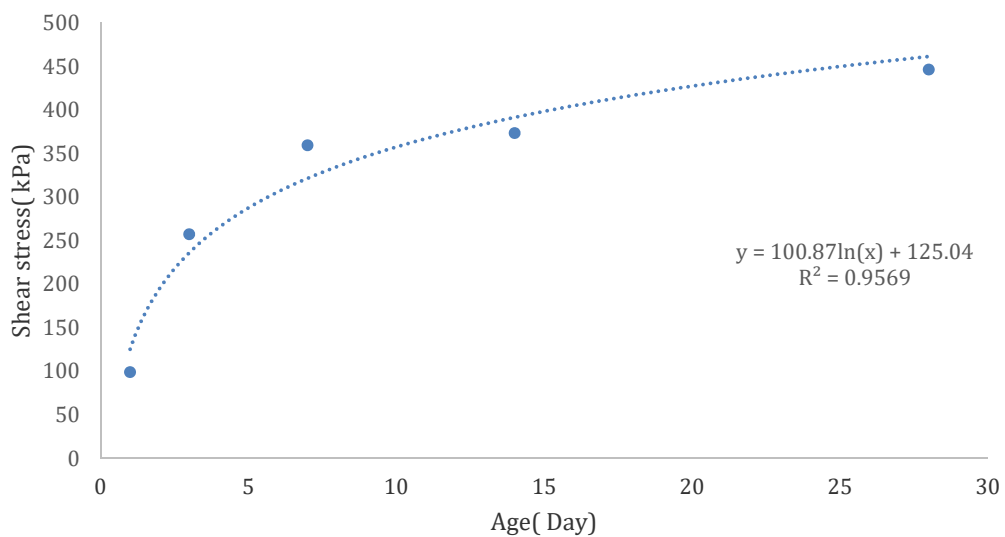
۴-۲-۱ بررسی اثر سن نمونه‌های ساخته شده از ملات سیمانی ساده و پوزولانی

همانطور که در فصل سوم نیز ذکر شد، برای ملات‌های سیمانی ساده و نیز ملات پوزولانی نمونه‌هایی ساخته شد تا در سنین یک روزه، سه روزه، هفت روزه، چهارده روزه و ۲۸ روزه مورد تست قرار گیرد. پس از انجام تست و با میانگین گیری از نتایج بدست آمده مشابه، نمودار مقاومت برشی در مقابل سن آن به شرح زیر می‌باشد. پس از مشخص کردن نقاط، بهترین منحنی ممکن برازش داده شده است. با توجه به پژوهش‌های انجام شده توسط دیگر محققان و در نظر گرفتن منحنی لگاریتمی برای افزایش مقاومت بتن و ملات از این نوع منحنی استفاده شده است [۸۸، ۸۹]. همچنین در هر یک از شکل‌های زیر معادلات منحنی‌های برازش آورده شده است.



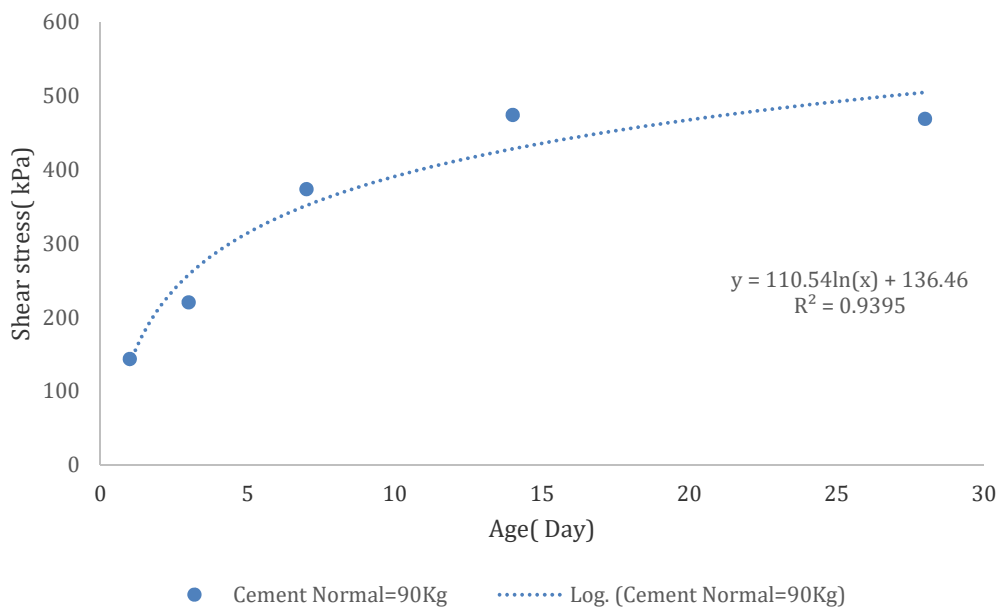
● Cement Normal =5Kg Log. (Cement Normal =5Kg)

شکل ۴-۶ بررسی اثر سن در ملات سیمانی ساده تحت بار نرمال ۵۰ نیوتن

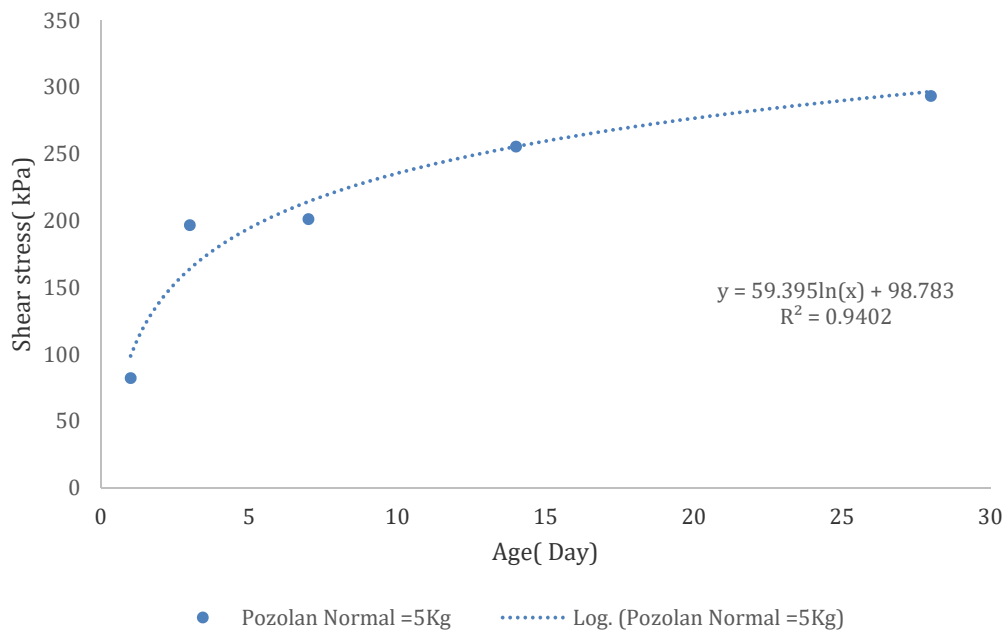


● Cement Normal =45Kg Log. (Cement Normal =45Kg)

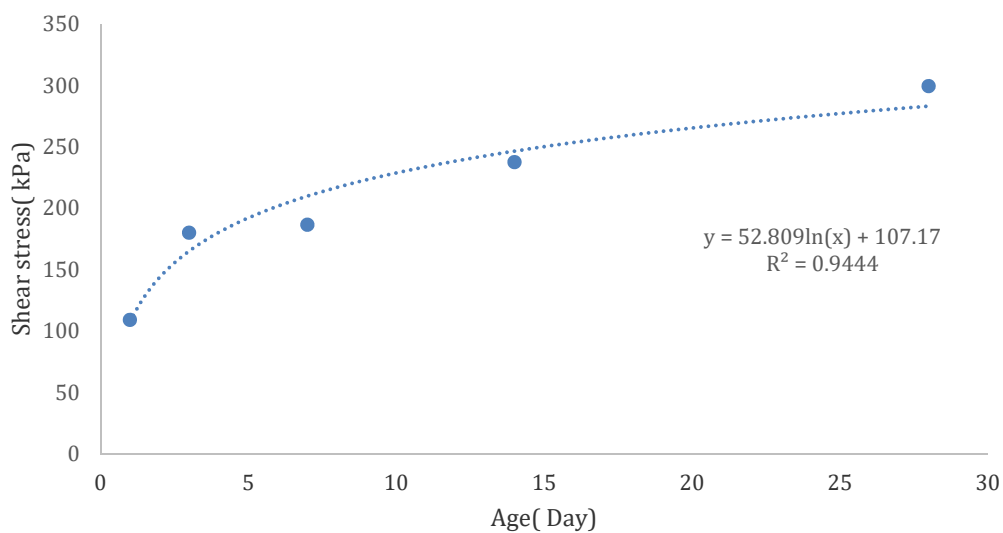
شکل ۴-۷ بررسی اثر سن در ملات سیمانی ساده تحت بار نرمال ۴۵۰ نیوتن



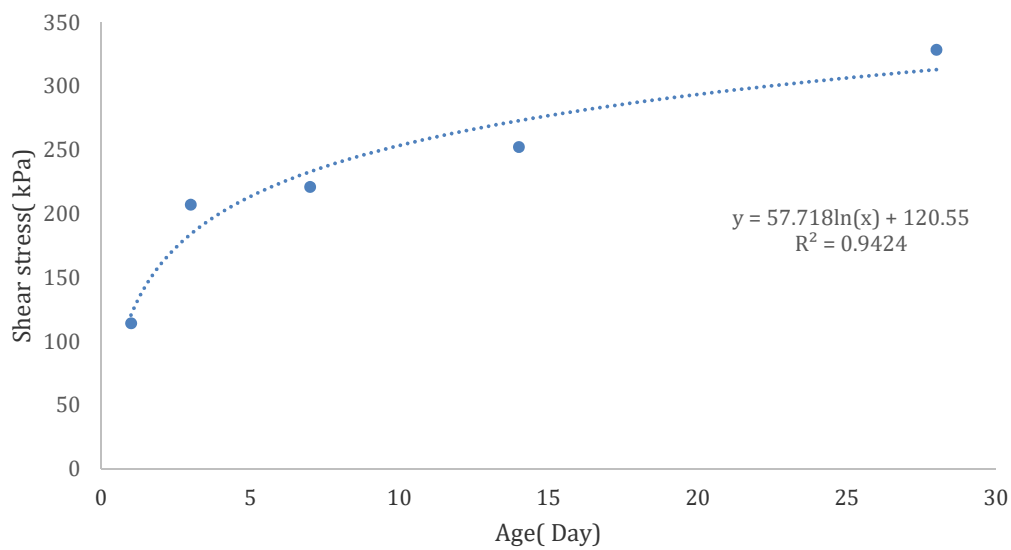
شکل ۴-۸ بررسی اثر سن در ملات سیمانی ساده تحت بار نرمال ۹۰۰ نیوتن



شکل ۴-۹ بررسی اثر سن در ملات پوزولان ۱۵٪ تحت بار نرمال ۵۰ نیوتن



● Pozolan Normal =45Kg Log. (Pozolan Normal =45Kg)
 شکل ۴-۱۰ بررسی اثر سن در ملات پوزولان ۱۵٪ تحت بار نرمال ۴۵۰ نیوتن



● Pozolan Normal=90Kg Log. (Pozolan Normal=90Kg)
 شکل ۴-۱۱ بررسی اثر سن در ملات پوزولان ۱۵٪ تحت بار نرمال ۹۰۰ نیوتن

۲-۲-۴ تجزیه و تحلیل نتایج بدست آمده از تست‌های اثر افزایش سن

نمونه‌ای از نتایج حاصل از تست‌های انجام شده بر روی آجر و ملات سیمانی ساده در سنین ۱، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه در شکل ۴-۱ تا شکل ۴-۵ موجود می‌باشد. مقادیر حداکثر تنش و جابجایی متعاقب آن نیز برای هر نمونه در هر یک از سنین ذکر شده استخراج گردیده و روند تغییرات آن در شکل ۴-۶ تا شکل ۴-۱۱ برای ملات‌های سیمانی ساده و نیز ملات پوزولانی ۱۵٪ موجود می‌باشد.

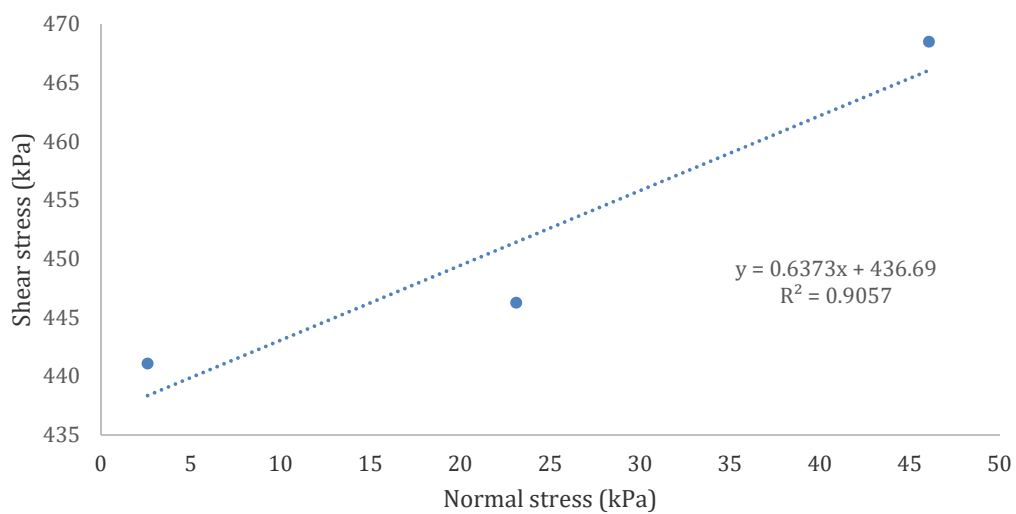
مطابق نتایج حاصل از نمودارهای تنش-جابجایی برای نمونه‌های کمتر از ۲۸ روز مشاهده می‌گردد که اثر سن علاوه بر افزایش مقاومت، موجب افزایش کرنش شکست نیز می‌گردد. به گونه‌ای که در شکل ۴-۵ مشاهده می‌گردد که جابجایی شکست این نمونه تفاوت بسیاری با نمونه‌های کمتر از این سن داشته است. این موضوع برای ملات پوزولانی ۱۵٪ نیز که در آن تست بر روی نمونه‌های با سن کمتر از ۲۸ روز انجام گردید، مشاهده شد.

در شکل ۴-۶ تا شکل ۴-۱۱ اثر سن برای هر نوع ملات و هر بار نرمال به طور جداگانه در یک نمودار آورده شده است. با توجه به روند افزایش مقاومت سطح مشترک آجر و ملات، روند افزایش لگاریتمی مناسب‌ترین روند افزایشی می‌باشد. با توجه به پژوهش‌های موجود بر روند افزایش مقاومت بتن در اثر سن [۸۸، ۸۹]، انتخاب روند لگاریتمی برای مقاومت سطح مشترک را قابل توجیه می‌نماید.

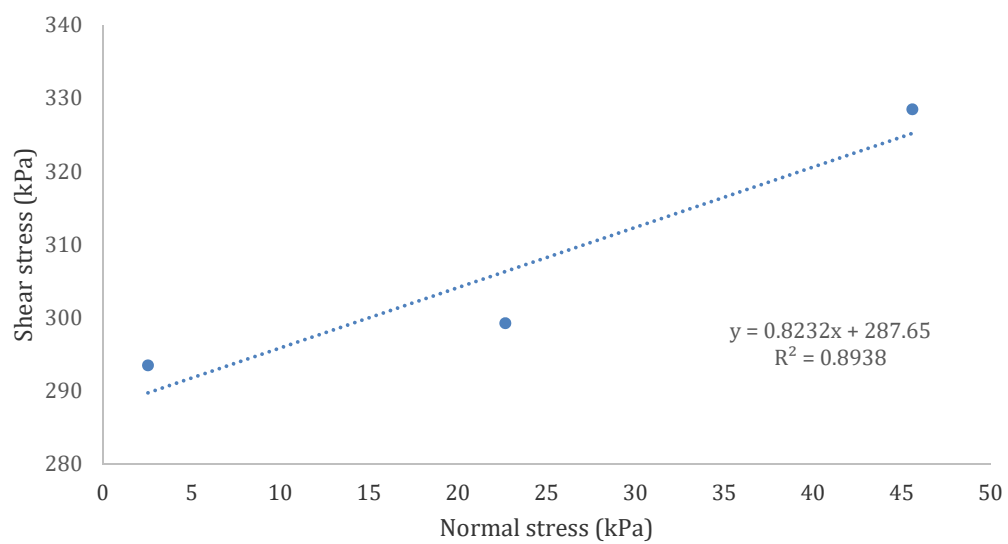
با توجه به خواص مقاومتی، و نیز جدول ۳-۱۷ علی‌رغم بالاتر بودن مقاومت فشاری ملات پوزولانی نسبت به ملات سیمانی ساده، این نوع ملات مقاومت برشی پیوند ضعیفتری نسبت به ملات سیمانی ساده نشان داده است. همچنین با توجه به اعمال بارهای نرمال مختلف، مشاهده شده که افزایش بار نرمال موجب افزایش مقاومت برشی پیوند گردیده و اعمال بار قائم اثر کمتری بر روی ملات سیمانی ساده خواهد داشت.

۲-۲-۳ بررسی نمونه‌های ساخته شده با ملات‌های مختلف در سن ۲۸ روز

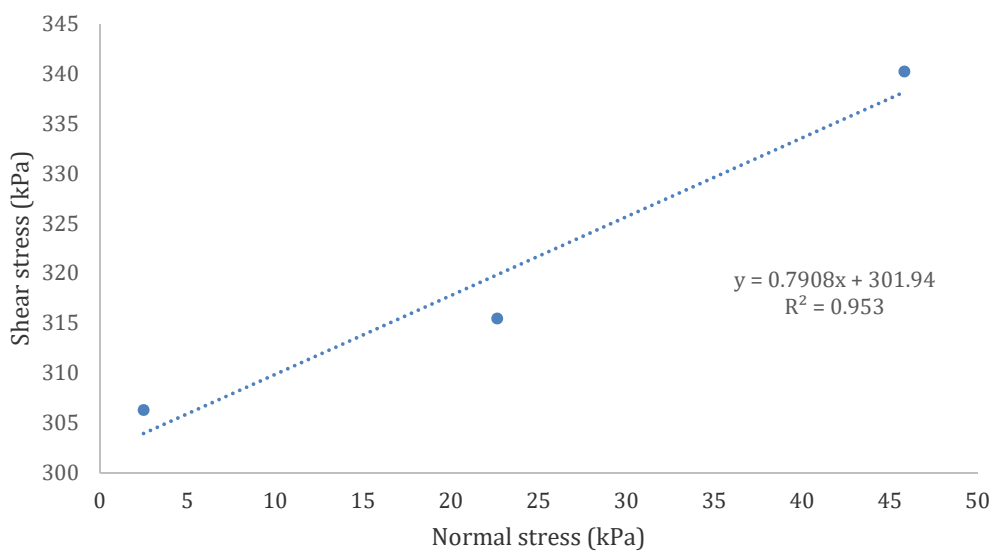
نتایج حاصل از تست بر روی نمونه‌های ۲۸ روزه با ملات‌های مختلف مطابق شکل‌های زیر می‌باشد. در این شکل‌ها، نمونه‌های با ملات‌های یکسان و نیروهای نرمال متفاوت را در یک شکل قرار داده شده است.



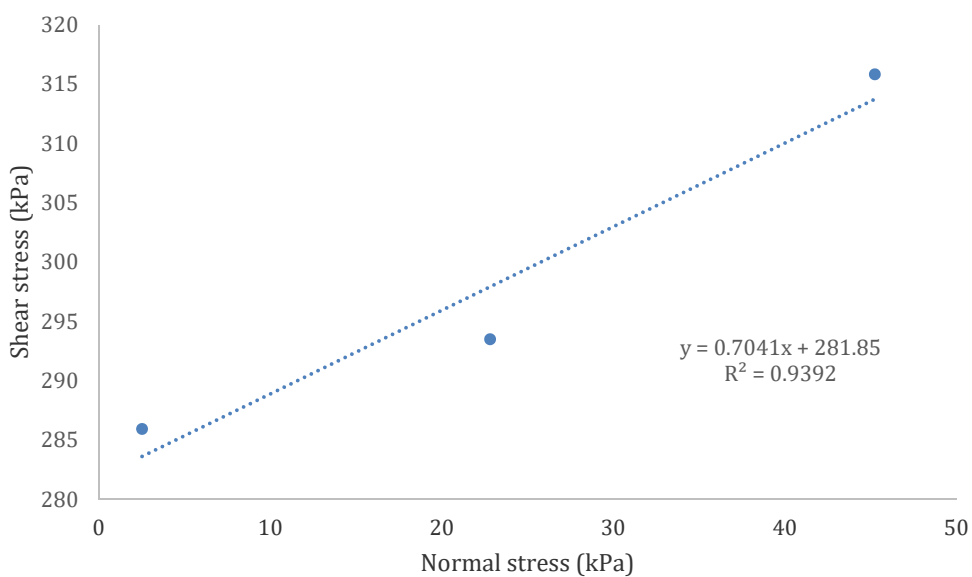
شکل ۴-۱۲ اثر افزایش بار نرمال بر مقاومت برشی پیوند نمونه حاوی ملات سیمانی ساده



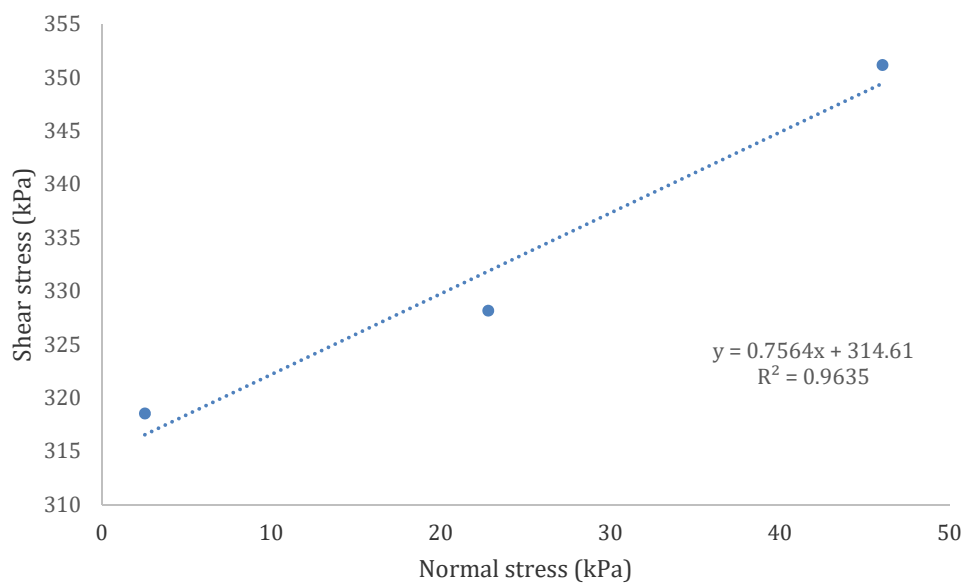
شکل ۴-۱۳ اثر افزایش بار نرمال بر مقاومت برشی پیوند نمونه حاوی ملات پوزولانی ۱۵٪



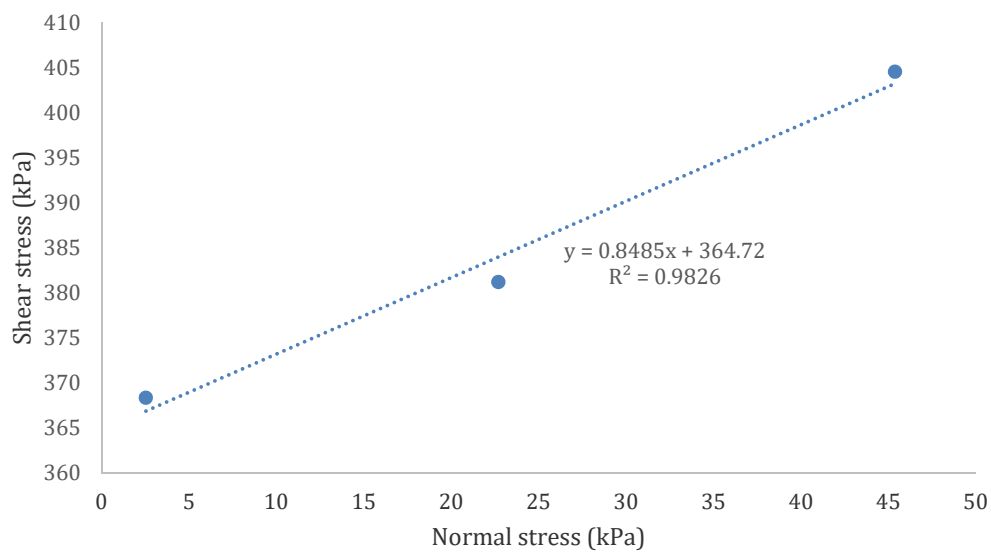
شکل ۴-۱۴ اثر افزایش بار نرمال بر مقاومت برشی پیوند نمونه حاوی ملات پوزولانی ۱۵٪ بدون میکروسلیس



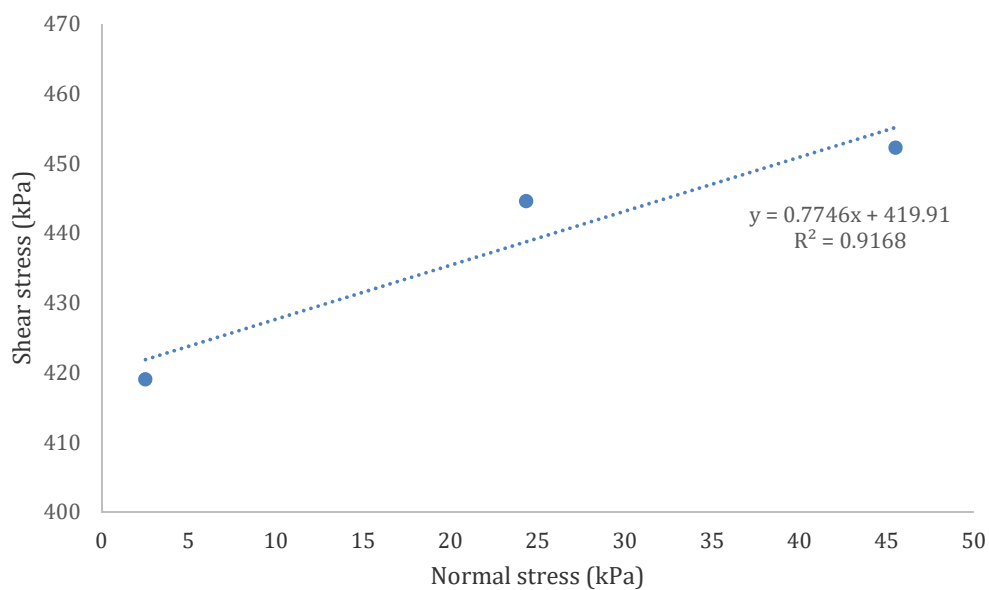
شکل ۴-۱۵ اثر افزایش بار نرمال بر مقاومت برشی پیوند نمونه حاوی ملات پوزولانی ۲۵٪



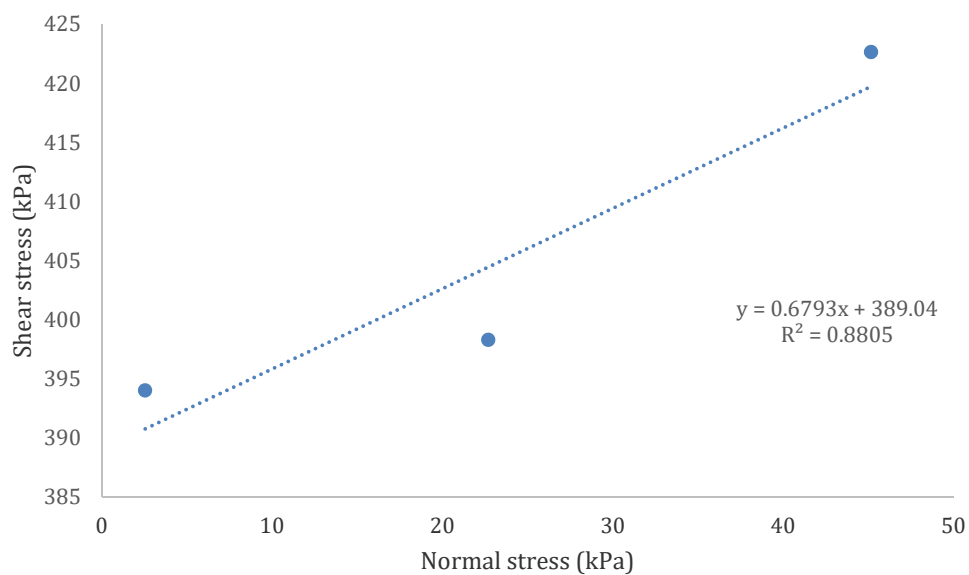
شکل ۴-۱۶ اثر افزایش بار نرمال بر مقاومت برشی پیوند نمونه حاوی ملات پوزولانی ۲۵٪ بدون میکروسیلیس



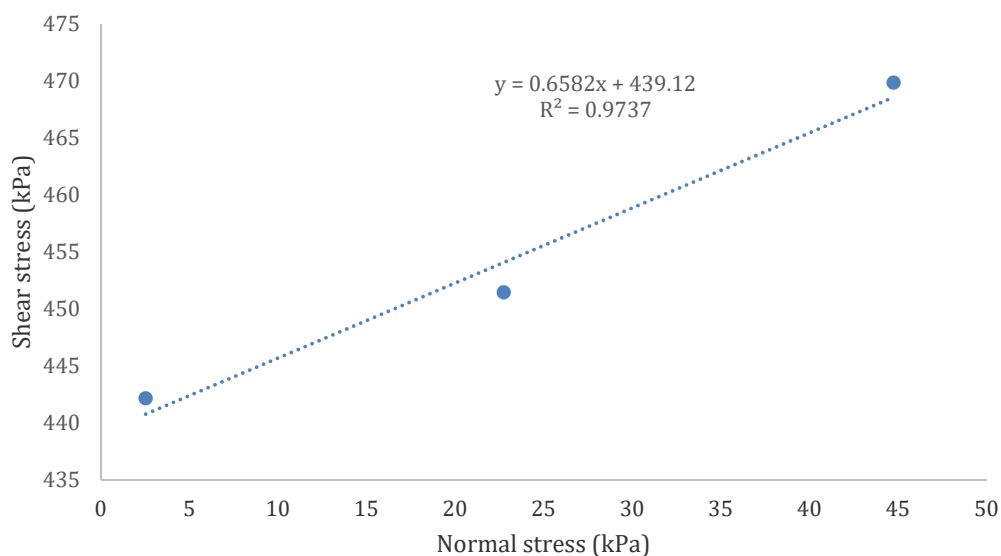
شکل ۴-۱۷ اثر افزایش بار نرمال بر مقاومت برشی پیوند نمونه حاوی ملات خاکستر پوسته برنج ۱۵٪ نوع I



شکل ۴-۱۸ اثر افزایش بار نرمال بر مقاومت برشی پیوند نمونه حاوی ملات خاکستر پوسته برنج ۲۵٪ نوع I

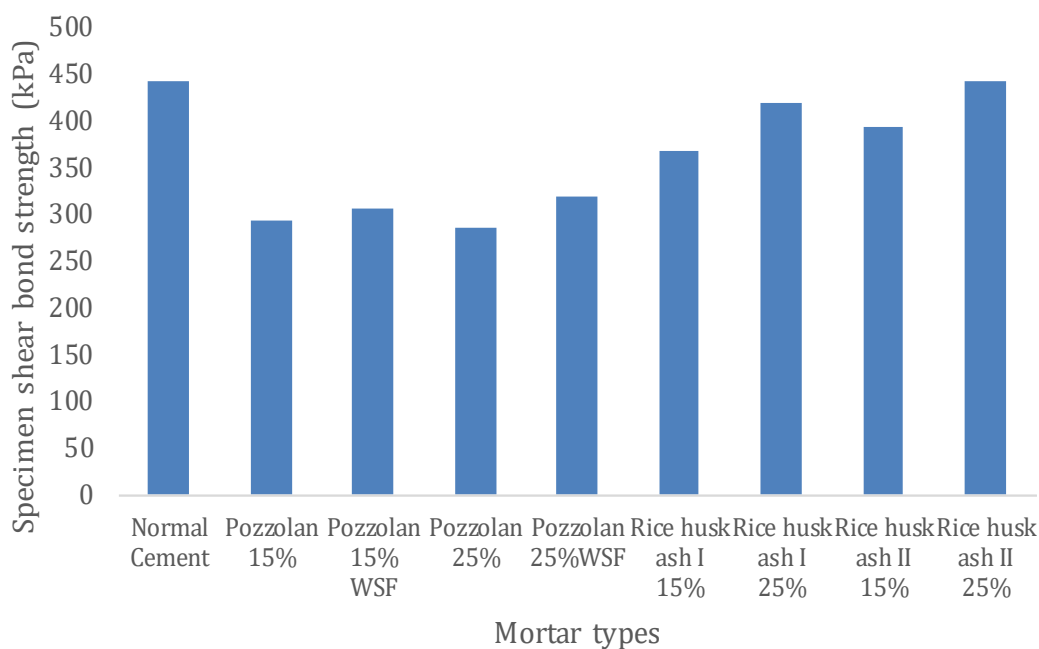


شکل ۴-۱۹ اثر افزایش بار نرمال بر مقاومت برشی پیوند نمونه حاوی ملات خاکستر پوسته برنج ۱۵٪ نوع II

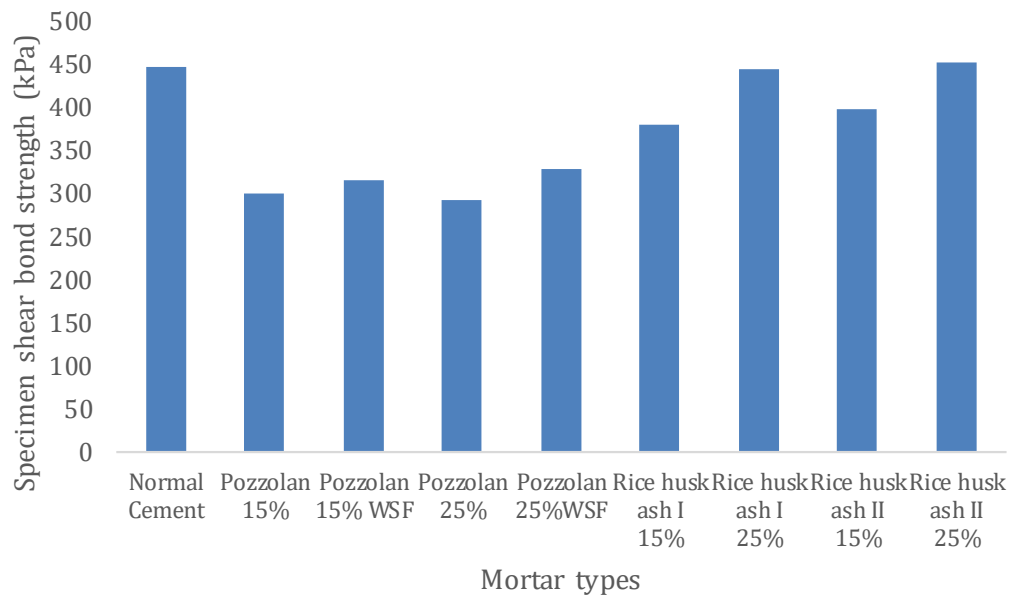


شکل ۴-۲۰ اثر افزایش بار نرمال بر مقاومت برشی پیوند نمونه حاوی ملات خاکستر پوسته برنج ۲۵٪ نوع II

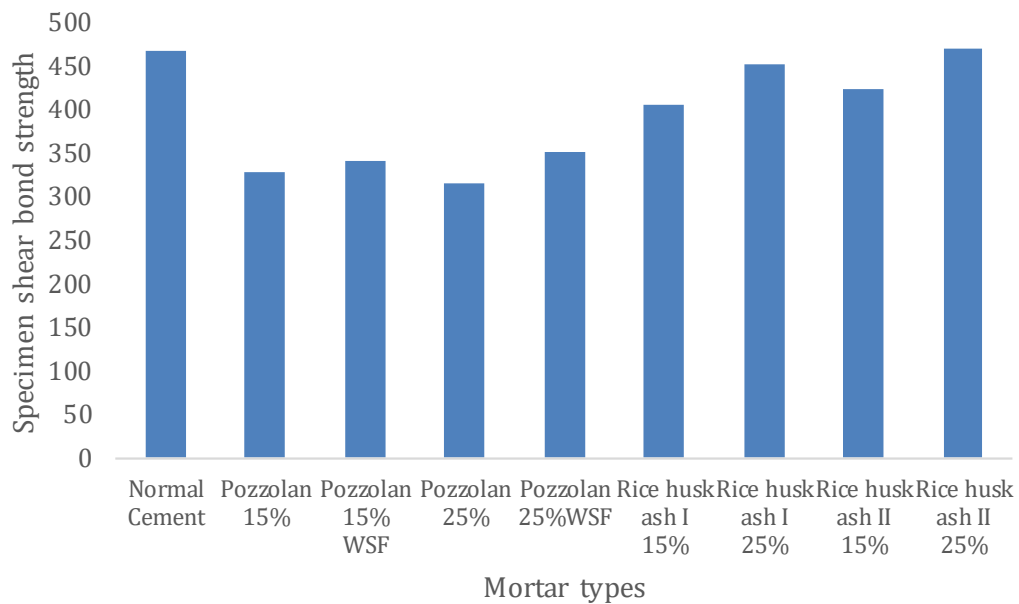
به جهت مقایسه بین مقاومت برشی پیوند ملات‌های مختلف، شکل ۴-۲۱، شکل ۴-۲۲ و شکل ۴-۲۳ مقاومت هر یک از ملات‌ها را به ترتیب برای بارهای نرمال ۵ کیلوگرم، ۴۵ کیلوگرم و ۹۰ کیلوگرم نشان می‌دهند.



شکل ۴-۲۱ اثر ملات‌های مختلف بر مقاومت برشی پیوند برای بار نرمال ۵ نیوتن



شکل ۲۲-۴ اثر ملات‌های مختلف بر مقاومت برشی پیوند برای بار نرمال ۴۵۰ نیوتن



شکل ۲۳-۴ اثر ملات‌های مختلف بر مقاومت برشی پیوند برای بار نرمال ۹۰۰ نیوتن

۴-۲-۴ تجزیه و تحلیل نتایج بدست آمده از تست‌های ۲۸ روزه بر ملات‌های مختلف

طبق نتایج بدست آمده از تست مقاومت برشی، بالاترین مقاومت برشی در نمونه‌ها مربوط به نمونه‌ی حاوی ملات سیمانی ساده می‌باشد. پس از این ملات، به ترتیب ملات‌های خاکستر

۲. پوسته برنج ۲۵٪ نوع II
۳. خاکستر پوسته برنج ۲۵٪ نوع I
۴. خاکستر پوسته برنج ۱۵٪ نوع II
۵. خاکستر پوسته برنج ۱۵٪ نوع I
۶. پوزولان ۲۵٪ بدون میکروسیلیس
۷. پوزولان ۱۵٪ بدون میکروسیلیس
۸. پوزولان ۱۵٪ و
۹. پوزولان ۲۵٪ می‌باشد.

مشاهده می‌گردد که ملات‌های پوسته برنجی علی‌رغم مقاومت فشاری پایینی که دارند، از مقاومت برشی پیوند بالاتری برخوردارند و همچنین خاکستر پوسته برنج نوع I علی‌رغم درصد کربن بالا و توصیه مطالعات پیشین مبنی بر عدم استفاده آن در ملات، ویژگی مقاومت برشی پیوند را به مقدار مناسبی افزایش داده است. با توجه به هزینه به نسب پایین تولید این نوع خاکستر، استفاده از آن، جهت کاهش مصرف سیمان و نیز حذف مواد زائد توصیه می‌گردد.

همچنین با توجه به شیب نمودار تنش برشی در مقابل تنش نرمال، این ملات‌ها از نظر حساسیت به بار نرمال از بیشترین به کمترین مقاومت به ترتیب زیر دسته بندی می‌گردند.

۱. خاکستر پوسته برنج ۱۵٪ نوع I
۲. پوزولان ۱۵٪
۳. پوزولان ۱۵٪ بدون میکروسیلیس
۴. خاکستر پوسته برنج ۲۵٪ نوع II
۵. پوزولان ۲۵٪ بدون میکروسیلیس
۶. پوزولان ۲۵٪
۷. خاکستر پوسته برنج ۱۵٪ نوع II
۸. خاکستر پوسته برنج ۲۵٪ نوع II
۹. سیمانی ساده

طبق عنوان شده فوق، در این نمونه‌ها کمترین اثر افزایش بار نرمال بر روی نمونه حاوی ملات سیمانی

ساده مشاهده گردیده است. همچنین با توجه به بازه‌ی تغییراتی زیاد و نیز عدم امکان طبقه بندی نسبت به نوع ملات در جهت حساسیت به بار نرمال و همچنین احتمال وجود خطا در این قسمت، نتایج مربوط به حساسیت نسبت به بار نرمال از درجه اهمیت بالایی برخوردار نیست. و این امر به احتمال فراوان نشان دهنده حساسیت کم مقاومت برشی پیوند نسبت به بار نرمال وارده می‌باشد. البته نگارنده به تنهایی و با توجه به نتایج موجود نمی‌تواند صحت این موضوع را تایید کند. و تایید آن را منوط به انجام آزمایش‌های بیشتری می‌داند.

۳-۴ پارامترهای مدل

مطابق مطالب عنوان شده در فصل قبل، برای تمامی انواع ملات‌های ۲۸ روزه پارامترهای مدل جهت انجام مدل‌سازی و مقایسه با نمونه‌ها محاسبه گردیده و مطابق جدول‌های زیر می‌باشد.

جدول ۴-۱ ثابت‌های مواد برای سطح مشترک آجر و ملات سیمانی ساده

مقدار	پارامتر	ثابت‌های مواد
$-19.98\sigma_n^2 + 4978.1\sigma_n + 110189$	k_n	ثابت‌های الاستیسیته
$-27.63\sigma_n^2 + 2525.6\sigma_n + 42506$	k_s	
225528	γ	ثابت‌های پلاستیسیته
0	β	
0.0344	q	
0.034	n	پارامتر تغییر فاز
0.03798	a	پارامتر رشد
0.5762	b	

جدول ۴-۲ ثابت‌های مواد برای سطح مشترک آجر و ملات پوزولانی ۱۵٪

ثابت‌های مواد	پارامتر	مقدار
ثابت‌های الاستیسیته	k_n	$-16.7\sigma_n^2 + 5235.2\sigma_n + 140254$
	k_s	$-32.3\sigma_n^2 + 1421.5\sigma_n + 38325$
ثابت‌های پلاستیسیته	γ	96336
	β	0
	q	0.0636
پارامتر تغییر فاز	n	0.621
پارامتر رشد	a	0.03791
	b	0.5761

جدول ۴-۳ ثابت‌های مواد برای سطح مشترک آجر و ملات پوزولانی ۱۵٪ بدون میکروسیلیس

ثابت‌های مواد	پارامتر	مقدار
ثابت‌های الاستیسیته	k_n	$-18.23\sigma_n^2 + 3842.1\sigma_n + 91230.3$
	k_s	$-31.43\sigma_n^2 + 1891\sigma_n + 38923.4$
ثابت‌های پلاستیسیته	γ	105704
	β	0
	q	0.0614
پارامتر تغییر فاز	n	0.0606
پارامتر رشد	a	0.038
	b	0.5765

جدول ۴-۴ ثابت‌های مواد برای سطح مشترک آجر و ملات پوزولانی ۲۵٪

ثابت‌های مواد	پارامتر	مقدار
ثابت‌های الاستیسیته	k_n	$-17.4\sigma_n^2 + 5173.2\sigma_n + 137254$
	k_s	$-34.35\sigma_n^2 + 1473.2\sigma_n + 41232.2$
ثابت‌های پلاستیسیته	γ	92466
	β	0
	q	0.0576
پارامتر تغییر فاز	n	0.0569
پارامتر رشد	a	0.03791
	b	0.5763

جدول ۴-۵ ثابت‌های مواد برای سطح مشترک آجر و ملات پوزولانی ۲۵٪ بدون میکروسیلیس

ثابت‌های مواد	پارامتر	مقدار
ثابت‌های الاستیسیته	k_n	$-10.42\sigma_n^2 + 4562\sigma_n + 101432.5$
	k_s	$-36.3\sigma_n^2 + 1652\sigma_n + 37242.3$
ثابت‌های پلاستیسیته	γ	114783
	β	0
	q	0.0578
پارامتر تغییر فاز	n	0.057
پارامتر رشد	a	0.03821
	b	0.5766

جدول ۶-۴ ثابت‌های مواد برای سطح مشترک آجر و ملات خاکستر پسته برنج ۱۵٪ نوع I

مقدار	پارامتر	ثابت‌های مواد
$-21.3\sigma_n^2 + 3975.2\sigma_n + 842490$	k_n	ثابت‌های الاستیسیته
	k_s	
154014	γ	ثابت‌های پلاستیسیته
0	β	
0.0568	q	
0.0552	n	پارامتر تغییر فاز
0.0371	a	پارامتر رشد
0.5762	b	

جدول ۴-۷ ثابت‌های مواد برای سطح مشترک آجر و ملات خاکستر پوسته برنج ۲۵٪ نوع I

ثابت‌های مواد	پارامتر	مقدار
ثابت‌های الاستیسیته	k_n	$-27.2\sigma_n^2 + 3324\sigma_n + 52240$
	k_s	$-32.31\sigma_n^2 + 2123.5\sigma_n + 41252.5$
ثابت‌های پلاستیسیته	γ	202318.81
	β	0
	q	0.0526
پارامتر تغییر فاز	n	0.0517
پارامتر رشد	a	0.0371
	b	0.5743

جدول ۴-۸ ثابت‌های مواد برای سطح مشترک آجر و ملات خاکستر پوسته برنج ۱۵٪ نوع II

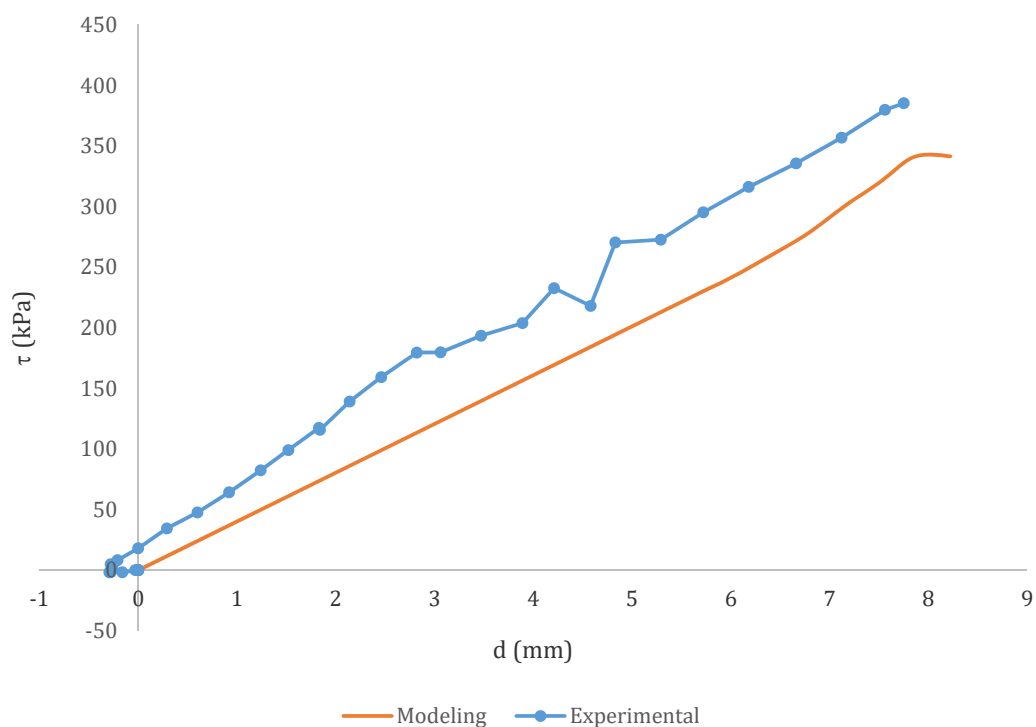
ثابت‌های مواد	پارامتر	مقدار
ثابت‌های الاستیسیته	k_n	$-23.5\sigma_n^2 + 3642\sigma_n + 65252$
	k_s	$-30.23\sigma_n^2 + 1723.1\sigma_n + 37245$
ثابت‌های پلاستیسیته	γ	178831
	β	0
	q	0.0394
پارامتر تغییر فاز	n	0.0391
پارامتر رشد	a	0.0375
	b	0.576

جدول ۴-۹ ثابت‌های مواد برای سطح مشترک آجر و ملات خاکستر پوسته برنج ۲۵٪ نوع II

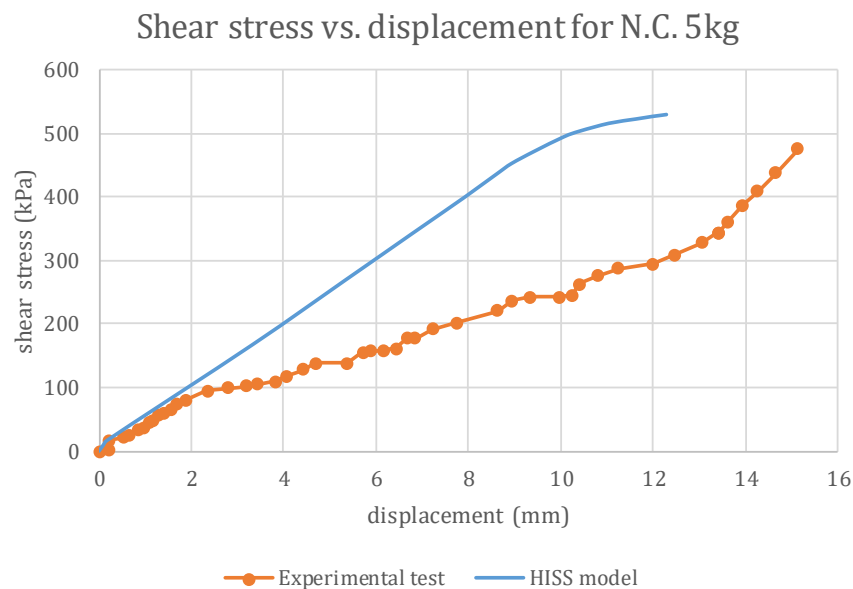
مقدار	پارامتر	ثابت‌های مواد
$-16.52\sigma_n^2 + 4032.4\sigma_n + 95248.4$	k_n	ثابت‌های الاستیسیته
	$-29.32\sigma_n^2 + 2072.1\sigma_n + 40354$	
96336	γ	ثابت‌های پلاستیسیته
0	β	
0.0636	q	
0.0621	n	پارامتر تغییر فاز
0.03753	a	پارامتر رشد
0.576	b	

۴-۴ مقایسه مدل‌سازی و نتایج تجربی

با توجه به پارامترهای مدل بدست آمده، نمودار تنش-جابجایی برای هر نمونه مطابق روش بیان شده در فصل ۳ قابل تعیین است. بدین منظور مدل‌سازی دو نمونه از ملات‌های بکار رفته در شکل ۴-۲۴ و شکل ۴-۲۵ آورده شده است.



شکل ۴-۲۴ مقایسه نمودار تنش-جابجایی برای نمونه حاوی ملات خاکستر پوسته برنج ۱۵٪ نوع I و بار نرمال ۹۰ کیلوگرم و سن ۲۸ روز، در حالت مدل‌سازی با استفاده از مدل HISS و نمونه تست شده در آزمایشگاه



شکل ۴-۲۵ مقایسه نمودار تنش-جابجایی برای نمونه حاوی ملات سیمانی ساده و بار نرمال ۵۰ نیوتن و سن ۲۸ روز، در حالت مدل سازی با استفاده از مدل HISS و نمونه تست شده در آزمایشگاه

۱-۴-۴ تجزیه و تحلیل نتایج بدست آمده از بخش مدلسازی و مقایسه با نمونه

آزمایشگاهی

با توجه به آزمایش‌ها انجام گرفته، اگرچه تلاش در طول آزمایش بر این بود تا رفتار بدست آمده رفتار خالص سطح مشترک آجر و ملات باشد، اما عواملی منجر به خالص نبودن این رفتار شده که برخی از آن‌ها غیر قابل اجتناب می‌باشد. موارد موثر به شرح زیر می‌باشد.

۱. ناهمگن بودن آجر: آجر تولید شده در کارخانه‌های موجود از کیفیت یکسانی برخوردار نبوده و از نظر وزن، حجم، چگالی، جذب آب و غیره تفاوت‌های غیر قابل صرف‌نظری در مقیاس آزمایشگاهی دارند. اگر چه این مقادیر در مقیاس‌های کارگاهی قابل صرف‌نظر می‌باشند. علاوه بر عوامل ذکر شده، عوامل ثانویه‌ای مانند حمل آجرها پس از سخت و نحوه تخلیه و بارگیری آن‌ها موجب ضعف در قسمت‌هایی از آجر می‌گردد.

۲. به دلیل یکسان نبودن ابعاد آجرهای مشابه، قالب موجود در دستگاه برش مستقیم مقداری بزرگتر

ساخته شد تا این مشکل را مرتفع سازد. به جهت پر کردن فضای خالی بین آجر و قالب از ورق‌های پرکننده فولادی استفاده شد که جای‌گذاری این ورق‌ها در بعضی مواقع منجر به آسیب به نمونه و تکرار آزمایش گردید. با توجه به موارد ذکر شده در آزمایش‌های انجام شده ضعیف-شدگی نمونه نیز وجود داشت که جدا کردن آن اجتناب‌ناپذیر بود. به جهت کم کردن خطای این مرحله، بالا بردن تعداد نمونه‌های آزمایش شده انجام گردید.

وجود موارد فوق، عدم قطعیت‌هایی را به نمونه وارد می‌کند که این عدم قطعیت‌ها موجب تفاوت اندکی بین مدلسازی انجام شده و نمونه‌های تست شده آزمایشگاه شده است. در حین تست در بعضی موارد و در نمودار تنش-جابجایی در نقاطی کاهش ناگهانی تنش ایجاد می‌گردد که این عامل به دلیل ضعف آجر و شکست داخلی قسمتی از آجر و باز توزیع تنش در جسم می‌باشد. با توجه به موارد ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت که مدلسازی نمونه‌ها از دقت بالایی برخوردار می‌باشد.

در فصل بعدی نتایج کلی مربوط به پژوهش انجام شده و کیفیت آن به تمامی مورد بحث قرار می‌گیرد.

فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱ نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از هر بخش به صورت زیر دسته‌بندی گردیده است.

۵-۱-۱ نتایج حاصل از تست بر روی نمونه‌های

- تست‌های انجام شده بر روی این نمونه‌ها بیانگر مقاومت فشاری نسبتاً خوب ملات سیمانی در مقابل دیگر ملات‌های استفاده شده می‌باشد. این در حالی است که در دیوارها، مقاومت برشی پیوند از اهمیت برخوردار می‌باشد. ملات‌های پوزولانی به دلیل دردهای ساخت آن (به علت استفاده از میکروسیلیس) و هزینه بالاتر آن نسبت به ملات‌های سیمانی ساده و خاکستر پوخته برنج توصیه نمی‌گردد. در ملات خاکستر پوخته برنجی نوع II نیز جهت تهیه این نوع خاکستر به دلیل شرایط دمایی متفاوت آن نسبت به خاکستر پوخته برنجی نوع I نیاز به دستگاه-های مجهز و صرف هزینه‌های نسبتاً بالا می‌باشد. که به همین دلیل این نوع خاکستر نیز توصیه نمی‌گردد. علی‌رغم اینکه در مطالعات گذشته استفاده از خاکستر پوخته برنج نوع I به دلیل درصد بالای کربن آن توصیه نشد، اما نگارنده به دلیل هزینه پایین و سادگی تولید آن تلاش به استفاده از این ماده نمود. از مهمترین مزیت‌های استفاده از این ماده، افزایش شکل‌پذیری ملات می‌باشد همچنین با توجه به دور ریز این ماده و همچنین دوستدار محیط زیست بودن آن و با توجه به نتایج نسبی از مقاومت برشی پیوند بدست آمده از نمونه‌های حاوی ملات پوخته برنجی نوع I استفاده از این نوع ملات توصیه می‌گردد. استفاده از این نوع ملات خصوصاً در مناطقی که برنج کشت شده و این مواد به وفور یافت می‌شود قویاً توصیه می‌گردد.
- علی‌رغم مقاومت نسبتاً بالاتر ملات سیمانی ساده نسبت به دیگر ملات‌های بکار رفته در این پژوهش، ضعف اصلی این نوع ملات شکل‌پذیری بسیار پایین این ماده می‌باشد. استفاده از خاکستر پوخته برنج به مقدار بسیار زیادی شکل‌پذیری نمونه را افزایش می‌دهد و لذا استفاده

از آن توصیه می‌گردد.

- با توجه به آزمایش‌های انجام شده، نگارنده لزومی به رعایت چارچوب استفاده از مواد پوزولانی در ملات نمی‌بیند. از آنجایی که مقاومت فشاری ملات در دیوارها نقش مهمی را ایفا نمی‌کند و تنها مقاومت برشی ارزشمند می‌باشد؛ بنابراین استفاده از دیگر مواد با خاصیت‌های غیر پوزولانی به شرط انجام کامل آزمایش‌های مقاومتی و دوام و کهنه‌شدگی توصیه می‌گردد.

۵-۲ پیشنهادها

با توجه به آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های آجری، موارد زیر جهت پژوهش‌های آتی توصیه می‌گردند.

۱. تعداد بیشتر بارهای نرمال اعمالی به نمونه‌ها به جهت بررسی میزان حساسیت مقاومت برشی بر بار نرمال

۲. بررسی اثر دوام هر یک از این ملات‌ها در محیط‌های اسیدی و محیط‌های مهاجم به منظور تعیین دوام هر یک از این ملات‌ها

۳. بررسی شرایط عمل‌آوری و تاثیر شرایط محیطی در هنگام عمل‌آوری بر مقاومت نمونه

۴. بررسی انواع مختلف آجر و آزمایش بر روی آجرهای سوراخدار

۵. سوزاندن خاکستر پسته برنج در دمای ۷۰۰ درجه و مقایسه آن با نتایج حاصل از استفاده پسته برنج نوع II

۶. بررسی اثر پوزولانی و نیز تاثیر خاکستر ساقه برنج بر ملات

- [1] J. H. MARTIN DEGG, "Earthquake Vulnerability in the Middle East," *Geography*, vol. 90, no. 1, pp. 54–66, 2005.
- [2] H. Mostafaei and T. Kabeyasawa, "Investigation and analysis of damage to buildings during the 2003 Bam earthquake," *Bull. Earthq. Res. Inst.*, vol. 79, pp. 107–132, 2004.
- [3] B. V. V. Reddy and C. V. U. Vyas, "Influence of shear bond strength on compressive strength and stress–strain characteristics of masonry," *Mater. Struct.*, vol. 41, no. 10, pp. 1697–1712, 2008.
- [4] F. Fouchal, F. Lebon, and I. Titeux, "Contribution to the modelling of interfaces in masonry construction," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 6, pp. 2428–2441, 2009.
- [5] A. J. Francis, C. B. Horman, and L. E. Jerrems, "The effect of joint thickness and other factors on the compressive strength of brickwork," in *Proceedings of 2nd international brick masonry conference, stoke-on-trent*, 1971, pp. 31–37.
- [6] P. K. Mehta, "Greening of the concrete industry for sustainable development," *Concr. Int.*, vol. 24, no. 7, pp. 23–28, 2002.
- [7] P. Maravelaki-Kalaitzaki, A. Bakolas, and A. Moropoulou, "Physico-chemical study of Cretan ancient mortars," *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 5, pp. 651–661, 2003.
- [8] C. Genestar, C. Pons, and A. Más, "Analytical characterisation of ancient mortars from the archaeological Roman city of Pollentia (Balearic Islands, Spain)," *Anal. Chim. Acta*, vol. 557, no. 1–2, pp. 373–379, 2006.
- [9] G. Beer and B. A. Poulsen, *Mechanics of Geomaterial Interfaces*, vol. 42. 1995.
- [10] J. G. Potyondy, "Skin friction between various soils and construction materials," *Geotechnique*, vol. 11, no. 4, pp. 339–353, 1961.
- [11] M. Uesugi and H. Kishida, "Influential factors of friction between steel and dry sands," *Soils Found.*, vol. 26, no. 2, pp. 33–46, 1986.
- [12] C. S. Desai, E. C. Drumm, and M. M. Zaman, "Cyclic testing and modeling of interfaces," *J. Geotech. Eng.*, vol. 111, no. 6, pp. 793–815, 1985.
- [13] ح. مسعود, "مدلسازی رفتار انواع بتن و سطح مشترک آنها با خاک ماسه ای," دانشگاه صنعتی شریف, ۱۳۹۴.
- [14] H. I. Ling, J. P. Wang, and D. Leshchinsky, "Cyclic behaviour of soil-structure interfaces associated with modular-block reinforced soil-retaining walls," *Geosynth. Int.*, vol. 15, no. 1, pp. 14–21, 2008.
- [15] G. Zhang and J. Zhang, "Experimental study on behavior of soil-structure interface with slurry," *ROCK SOIL Mech.*, vol. 26, no. 9, p. 1374, 2005.
- [16] S. J. Lawrence and H. T. Cao, "Microstructure of the interface between brick and mortar," *Brick Block Masonry(8 th IBSMAC) London, Elsevier Appl. Sci.*, vol. 1, pp. 194–204, 1988.
- [17] S. J. Lawrence and H. T. Cao, "An experimental study of the interface between brick and mortar," in *Proceedings 4th N Am masonry conference, Dublin*, 1987, pp.

194–204.

- [18] C. J. W. P. Groot, *Effects of water on mortar-brick bond*. TU Delft, Delft University of Technology, 1993.
- [19] B. V. Reddy and C. U. Vyas, “Influence of shear bond strength on compressive strength and stress–strain characteristics of masonry,” *Mater. Struct.*, vol. 41, no. 10, pp. 1697–1712, 2008.
- [20] A. A. Al-Rawas, A. Wahid Hago, T. C. Corcoran, and K. M. Al-Ghafri, “Properties of Omani artificial pozzolana (sarooj),” *Appl. Clay Sci.*, vol. 13, no. 4, pp. 275–292, 1998.
- [21] N. Marriner and C. Morhange, “Geoscience of ancient Mediterranean harbours,” *Earth-Science Rev.*, vol. 80, no. 3–4, pp. 137–194, 2007.
- [22] B. V. Venkatarama Reddy, “Characteristics of cement-soil mortars,” *Mater. Struct.*, vol. 38, no. 280, pp. 639–650, 2005.
- [23] R. H. Atkinson, B. P. Amadei, S. Saeb, and S. Sture, “Response of masonry bed joints in direct shear,” *J. Struct. Eng.*, vol. 115, no. 9, pp. 2276–2296, 1989.
- [24] P. K. Mehta, “Role of pozzolanic and cementitious material in sustainable development of the concrete industry,” *Spec. Publ.*, vol. 178, pp. 1–20, 1998.
- [25] B. Sabir, S. Wild, and J. Bai, “Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: A review,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 23, no. 6, pp. 441–454, 2001.
- [26] A. C618, “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use,” *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. i, pp. 1–5, 2017.
- [27] H. Paiva, A. S. Silva, A. Velosa, P. Cachim, and V. M. Ferreira, “Microstructure and hardened state properties on pozzolan-containing concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 140, pp. 374–384, 2017.
- [28] N. F. Medina, G. Barluenga, and F. Hernández-Olivares, “Enhancement of durability of concrete composites containing natural pozzolans blended cement through the use of Polypropylene fibers,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 61, pp. 214–221, 2014.
- [29] K. Ganesan, K. Rajagopal, and K. Thangavel, “Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 8, pp. 1675–1683, 2008.
- [30] W. Tangchirapat, T. Saeting, C. Jaturapitakkul, K. Kiattikomol, and A. Siripanichgorn, “Use of waste ash from palm oil industry in concrete,” *Waste Manag.*, vol. 27, no. 1, pp. 81–88, 2007.
- [31] N. Bhanumathidas and P. K. Mehta, “Concrete mixtures made with ternary blended cements containing fly ash and rice-husk ash,” *Spec. Publ.*, vol. 199, pp. 379–392, 2001.
- [32] M. K. Pateha, “Contribution à la valorisation des sous-produits industriels et agricoles dans l’industrie du ciment,” 1991.
- [33] I. Cisse, “Contribution à la valorisation des matériaux locaux au Sénégal: Application aux bûtons de sable,” 1996.

- [34] S. H. Kosmatka, B. Kerkhoff, and W. C. Panarese, "Fly ash, slag, silica fume, and natural pozzolans," *Des. Control Concr. Mix. EB001*, 2002.
- [35] D. D. Bui and P. Stroeven, "Rice husk ash-based binders and their use in high strength concrete in Vietnam," in *Infrastructure regeneration and rehabilitation improving the quality of life through better construction. International conference*, 1999, pp. 263–274.
- [36] R. Jauberthie, F. Rendell, S. Tamba, and I. Cisse, "Origin of the pozzolanic effect of rice husks," *Constr. Build. Mater.*, vol. 14, no. 8, pp. 419–423, 2000.
- [37] P. R. S. Speare, K. Eleftheriou, S. Siludom, R. K. Dhir, T. G. Jappy, and T. Telford, "Durability of concrete containing rice husk ash as an additive," in *International Seminar on Exploiting Wastes in Concrete*, 1999, pp. 283–290.
- [38] M. N. Al-khalaf and H. a Yousift, "Use of rice husk ash in concrete," *Int. J. Cem. Compos. Light. Concr.*, vol. 6, no. 4, pp. 241–248, 1984.
- [39] M. A. Hamad and I. A. Khattab, "Effect of the combustion process on the structure of rice hull silica," *Thermochim. Acta*, vol. 48, no. 3, pp. 343–349, 1981.
- [40] N. Yalçın and V. Sevinc, "Studies of the surface area and porosity of activated carbons prepared from rice husks," *Carbon N. Y.*, vol. 38, no. 14, pp. 1943–1945, 2000.
- [41] N. Yalcin and V. Sevinc, "Studies on silica obtained from rice husk," *Ceram. Int.*, vol. 27, no. 2, pp. 219–224, 2001.
- [42] A. Chakraverty, P. Mishra, and H. D. Banerjee, "Investigation of combustion of raw and acid-leached rice husk for production of pure amorphous white silica," *J. Mater. Sci.*, vol. 23, no. 1, pp. 21–24, 1988.
- [43] P. Sidheswaran and A. N. Bhat, "Recovery of amorphous silica in pure form from rice husk," *Trans. Indian Ceram. Soc.*, vol. 55, no. 4, pp. 93–96, 1996.
- [44] R. V Krishnarao, J. Subrahmanyam, and T. J. Kumar, "Studies on the formation of black particles in rice husk silica ash," *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 21, no. 1, pp. 99–104, 2001.
- [45] Thamboo, "Age and Curing Effect on the Bond Strength of Thin Bed Concrete Masonry With Polymer Cement Mortar," *12th Can. Mason. Symp.*, no. 12, pp. 3–6, 2013.
- [46] S. J. Lawrence, H. O. Sugo, and A. W. Page, "Masonry bond strength and the effects of supplementary cementitious materials," *Aust. J. Struct. Eng.*, vol. 8, no. 2, pp. 101–115, 2008.
- [47] F. M. Khalaf, "New test for determination of masonry tensile bond strength," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 17, no. 6, pp. 725–732, 2005.
- [48] P. Walker, "Bond characteristics of earth block masonry," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 11, no. 3, pp. 249–256, 1999.
- [49] K. V. M. Rao, B. V. V. Reddy, and K. S. Jagadish, "Flexural bond strength of masonry using various blocks and mortars," vol. 29, no. March, pp. 119–124, 1996.
- [50] M. Dhanasekar, "Shear in reinforced and unreinforced masonry: response, design and construction," *Procedia Eng.*, vol. 14, pp. 2069–2076, 2011.

- [51] B. P. Sinha, "Model studies related to load-bearing brickwork," University of Edinburgh, 1967.
- [52] J. Grandet, R. Javelas, B. Perrin, and B. Thenoz, "Rôle de lettringite dans la liaison de type mécanique entra la terre cuite et la pâte de ciment-portland," *Rev. Terre Cuite*, vol. 48, pp. 21–28, 1972.
- [53] B. V. V. R. Æ. K. S. Jagadish, "Strength and elasticity of brick masonry prisms and wallettes under compression," pp. 241–253, 2007.
- [54] G. Sarangapani, B. V. Reddy, and K. Jagadish, "Brick-Mortar Bond and Masonry Compressive Strength," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 17, no. 2, pp. 229–237, 2005.
- [55] A. C1072, "Standard Test Methods for Measurement of Masonry Flexural Bond Strength 1," pp. 1–19, 2016.
- [56] O. C. Zienkiewicz, B. Best, C. Dullage, and K. G. Stagg, "Analysis of nonlinear problems in rock mechanics with particular reference to jointed rock systems," 1970.
- [57] L. Euler, *Sur la Diminution de la Résistance du Frottement*. 1750.
- [58] C. A. Coulomb, "The theory of simple machines," *Mem. Math. Phys. Acad. Sci.*, vol. 10, no. 161–331, p. 4, 1785.
- [59] G. W. Clough and J. M. Duncan, "Finite element analyses of retaining wall behavior," *J. Soil Mech. Found. Div*, 1971.
- [60] J. Ghaboussi, E. L. Wilson, and J. Isenberg, "Finite element for rock joints and interfaces," *J. Soil Mech. Found. Div*, vol. 99, no. Proc Paper 10095, 1973.
- [61] K. L. Fishman, C. W. Derby, and M. C. Palmer, "Verification for numerical modelling of jointed rock mass using thin layer elements," *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, vol. 15, no. 1, pp. 61–70, 1991.
- [62] N. Navayogarah, C. S. Desai, and P. D. Kioussis, "Hierarchical single-surface model for static and cyclic behavior of interfaces," *J. Eng. Mech.*, vol. 118, no. 5, pp. 990–1011, 1992.
- [63] A. Gens, I. Carol, and E. E. Alonso, "A constitutive model for rock joints formulation and numerical implementation," *Comput. Geotech.*, vol. 9, no. 1–2, pp. 3–20, 1990.
- [64] Chandrakant S. Desai, *Mechanics of Materials and Interfaces The Disturbed State Concept*, vol. 1, no. September. 2006.
- [65] C. S. Desai and Y. Ma, "Modelling of joints and interfaces using the disturbed-state concept," *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, vol. 16, no. 9, pp. 623–653, 1992.
- [66] C. S. Desai and K. L. Fishman, "Plasticity-based constitutive model with associated testing for joints," in *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1991, vol. 28, no. 1, pp. 15–26.
- [67] ASTM Standard C1314, "Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms 1," pp. 1–10, 2012.
- [68] ASTM Standard C33, "Standard Specification for Concrete Aggregates," *ASTM Int.*,

vol. i, no. C, p. 11, 2003.

- [69] ASTM C566, “ASTM C566-97: Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying, ASTM C566-97,” *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. i, no. Reapproved, pp. 5–7, 2004.
- [70] P. Mondal, S. Shah, L. Marks, and J. Gaitero, “Comparative study of the effects of microsilica and nanosilica in concrete,” *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. board*, no. 2141, pp. 6–9, 2010.
- [71] A. Najjigivi, A. Khaloo, S. A. Rashid, and others, “Investigating the effects of using different types of SiO₂ nanoparticles on the mechanical properties of binary blended concrete,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 54, pp. 52–58, 2013.
- [72] A. Pourjavadi, S. M. Fakoorpoor, A. Khaloo, and P. Hosseini, “Improving the performance of cement-based composites containing superabsorbent polymers by utilization of nano-SiO₂ particles,” *Mater. Des.*, vol. 42, pp. 94–101, 2012.
- [73] A. D5373, “Standard Test Methods for Determination of Carbon, Hydrogen and Nitrogen in Analysis Samples of Coal and Carbon in Analysis Samples of Coal and Coke 1,” 2017, pp. 1–11.
- [74] Astm:C150/C150M-12, “Standard Specification for Portland Cement,” *ASTM Int.*, vol. 552, no. d, pp. 1–9, 2012.
- [75] H. K. Kim and H. K. Lee, “Effects of high volumes of fly ash, blast furnace slag, and bottom ash on flow characteristics, density, and compressive strength of high-strength mortar,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 25, no. 5, pp. 662–665, 2012.
- [76] O. E. Gjrv, “High strength concrete,” *Dev. Formul. Reinf. Concr.*, pp. 79–97, 2008.
- [77] I. Kett, *Engineered Concrete, Mix Design and Test Methods*. 2010.
- [78] ASTM C230, “Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement 1,” *Annu. B. ASTM Stand.*, pp. 4–9, 2010.
- [79] ASTM C1437, “Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar 1,” *Am. Soc. Test. Mater.*, pp. 1–2, 2016.
- [80] ASTM C192/C192M, “Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory,” *Am. Soc. Test. Mater.*, vol. 4, pp. 1–8, 2016.
- [81] M. J. Shannag, “High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 22, no. 6, pp. 399–406, 2000.
- [82] ASTM C39, “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens,” *Am. Soc. Test. Mater.*, pp. 1–7, 2016.
- [83] ASTM C496, “C496/C496M-11. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens,” *Am. Soc. Test. Mater.*, pp. 1–5, 2011.
- [84] Astm D5607, “Standard Test Method for Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens Under Constant Normal Force,” *Astm*, vol. 4, no. D5607-8, pp. 1–8, 2008.
- [85] A. Aydin, “The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014,” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 46, pp. 627–634, 2009.
- [86] C. Shao and C. S. Desai, “Implementation of DSC model and application for

analysis of field pile tests under cyclic loading,” *Int. J. Numer. Anal. methods Geomech.*, vol. 24, no. 6, pp. 601–624, 2000.

- [87] V. Toufigh, “Experimental and analytical studies of geo-composite applications in soil reinforcement,” The University of Arizona, 2012.
- [88] A. Oner and S. Akyuz, “An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 29, no. 6, pp. 505–514, 2007.
- [89] N. Yazdani, F. Asce, B. Mckinnie, and S. Haroon, “Modeling Compressive Strength Development in Florida Concrete,” vol. 18, no. December, pp. 868–870, 2006.

Abstract

Usage of masonry materials in a country like Iran is still significantly high. As most of the failures during an earthquake in this system is failure caused by low ductility of cement mortars and also the high rate of carbon dioxide produced by cement. Experiences of Kermanshah earthquake in 2017 in Iran has doubled the importance of this issue. Hence, in the present investigation, an attempt to enhance the shear bond characteristics of structures constructed by masonry using green materials has been made. "Taftan" natural Pozzolan and two types of rice husk ash (RHA) was used in mix design of used mortars as a green material. In this investigation, a direct shear test (DST) device is modified and proposed to determine brick-mortar shear bond strength. The proposed method of applying DST has the advantageous of changing normal load and determine pure bond characteristics. For this purpose, two bricks bonded to each other by a mortar and subjected to the shear load. Tests were performed using DST for nine different types of mortars with different normal loads. The effect of increasing shear bond strength over time was also studied. Tests showed that using waste material like RHA in mortar is reasonable as its causes to the increase mortar plasticity and failure strain and also reduce the cost of mortar and its environmental effect.

Keywords: Brick-mortar bond strength; shear Bond strength; Green materials; Taftan's Pozzolan; Rice husk ash, Direct shear test



**Sharif University of Technology
(Faculty of Civil Engineering)**

**A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the M.Sc.
degree**

**Analytical and Experimental Studies on Interface between Different
Mortars and Brick**

**By:
Nima Azimi Resketi**

**Supervisor:
Dr. Vahab Toufigh**

January 2018