

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده: مهندسی عمران

گروه: ژئوتکنیک

عنوان پایان نامه ارشد

بررسی تأثیر سربار بر نشست خاک تثبیت شده با پلی یورتان

دانشجو:

میلاذ محسنی نامقی

استاد راهنما:

دکتر امیر بذرافشان مقدم

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

مهر ۹۹

تقدیم به

پدر و مادر عزیز و مهربانم

که در سختی‌ها و دشواری‌های زندگی همواره یوری دلسوز و فداکار و پشتیبانی محکم و مطمئن برای من بوده‌اند.

تشکر و قدردانی

از استاد گرامی جناب آقای دکتر امیر بذرافشان مقدم بسیار سپاسگزارم به دلیل اینکه بدون راهنمایی‌های ایشان این پایان‌نامه برایم بسیار مشکل می‌نمود.

تعهدنامه

این جانب میلاد محسنی نامقی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران - ژئوتکنیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی تأثیر سربار بر نشست خاک تثبیت شده با پلی یورتان تحت راهنمایی دکتر امیر بذرافشان مقدم متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (بافت های آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

تزریق فوم پلی یورتان یکی از راه‌های کنترل نشست ساختمان است. روش کار با حفر گمانه‌هایی به فواصل معین، توسط دستگاه حفار و پر کردن این چاه‌ها با ماده سیال و نفوذ این مواد با سیستم‌های مختلف جذبی و ایجاد فشار در زمین موردنظر می‌باشد، این روش پرهزینه بوده و در حالت‌های خاص مثل تثبیت بستر خاک برای بهسازی خاک به کار می‌رود. پیوند یورتانی از طریق واکنش بین یک دی ایزوسیانات زنجیری و یک پلی‌ال تشکیل شده است. کاربرد فوم‌های پلی یورتان در صنعت شامل فوم نرم (در مبلمان و فوم صندلی)، فوم سخت (در عایق کاری دیوار و سقف)، فوم ترموپلاستیک (در تجهیزات پزشکی)، زیره کفش، آب‌بند و درزگیر و فوم الاستومر (در کفپوش و قطعات خودرو) می‌باشد.

در این پژوهش مقاومت فشاری فوم پلی یورتان با دانسیته‌های متفاوت برای یافتن بهترین درصد اختلاط ایزو سیانات و پلی‌ال از نظر مقاومت فشاری و مقدار انقباض مورد آزمایش قرار می‌گیرد و نمودارهای تنش و کرنش آن‌ها رسم شده است. سپس با دستگاه مقاومت فشاری تنش بالا زدگی فوم پلی یورتان بدست می‌آید. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که بهترین ترکیب جهت ساخت فوم پلی یورتان با نسبت ۵ در صد پلی‌ال سخت و ۴۵ درصد پلی‌ال چوب و ۵۰ درصد ایزوسیانات است که مقاومت فشاری ماکزیمم در حالت الاستیک برابر ۲ مگاپاسکال به دست می‌آید. سپس با همین نسبت آزمایش تحکیم برای بررسی پارامترهای تحکیم یک بعدی انجام شده که ضریب فشردگی (C_c) برابر ۰,۱۲۱، ضریب تورم (C_s) برابر ۰,۰۱۸ و شاخص بارگذاری مجدد (C_r) برابر ۰,۰۱۹ به دست آمده است. با مقایسه ضریب فشردگی فوم پلی یورتان با انواع خاک‌ها رفتاری مشابه خاک رس سفت دارد که می‌توان جایگزین مناسبی برای خاک دچار نشست شده باشد. تنشی که فوم پلی یورتان در هنگام منبسط شدن اعمال می‌کند برابر ۱۹۲,۳ کیلوپاسکال است.

کلمات کلیدی: فوم پلی یورتان، تثبیت خاک، تحکیم، مقاومت فشاری

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ ضرورت و اهداف تحقیق	۴
۳-۱ روش تحقیق	۵
۴-۱ فصل بندی پایان نامه	۶
فصل دوم: ادبیات و پیشینه تحقیق	۹
۱-۲ تعریف فوم	۱۰
۲-۲ تاریخچه پلی یورتان ها	۱۱
۳-۲ شیمی الاستومرهای پلی یورتان	۱۱
۱-۳-۲ دی ایزوسیانات ها	۱۲
۲-۳-۲ پلی ال ها	۱۳
۱-۲-۳-۲ پلی استرها	۱۳
۲-۲-۳-۲ پلی اترها	۱۳
۳-۳-۲ افزایشده زنجیرها	۱۴
۴-۳-۲ کاتالیزورها	۱۴
۱-۴-۳-۲ کاتالیزورهای اسیدی	۱۴
۲-۴-۳-۲ کاتالیزورهای بازی	۱۵
۳-۴-۳-۲ ترکیبات آلی فلزی	۱۵
۵-۳-۲ عامل پف دهنده	۱۵
۴-۲ روش تزریق پلی یورتان	۱۶
۵-۲ کاربرد فوم پلی یورتان در عمران	۱۷
۱-۵-۲ تونل مترو	۱۷
۲-۵-۲ جاده آسفالتی بتنی	۱۸
۳-۵-۲ تزریق فوم پلی یورتان در فونداسیون رسی نرم	۲۲
۴-۵-۲ تزریق جداری ستون فوم فونداسیون دارای خاک آلی	۲۴
۵-۵-۲ بالا آمدن سطوح بتنی جاده توسط دوغاب پلی یورتان	۲۴
۶-۵-۲ بررسی آزمایشگاهی فوم پلی یورتان	۲۵
۷-۵-۲ تزریق رزین پلی یورتان در خاک های رسی	۲۷
۸-۵-۲ کاربرد ماستیک پلی یورتان در کاهش رمبندگی	۲۷
۶-۲ کاربردهای پلی یورتان در صنعت	۲۸

۲۹	۱-۶-۲ فوم نرم پلی یورتان
۳۰	۲-۶-۲ فوم سخت پلی یورتان
۳۱	۱-۲-۶-۲ مزایای فوم سخت
۳۱	۳-۶-۲ فوم چوب پلی یورتان
۳۲	۱-۳-۶-۲ ویژگی های فوم چوب پلی یورتان
۳۳	۷-۲ مراحل تشکیل فوم پلی یورتان
۳۵	فصل سوم: روش تحقیق
۳۶	۱-۳ مقدمه
۳۶	۲-۳ آماده سازی نمونه آزمایشگاهی
۳۶	۱-۲-۳ هدف
۳۶	۲-۲-۳ روش انجام کار
۳۷	۳-۳ درصد رطوبت طبیعی فوم
۳۸	۴-۳ چگالی ویژه فوم
۳۸	۵-۳ آزمایش تعیین پارامترهای تحکیم یک بعدی
۳۸	۱-۵-۳ هدف
۳۹	۲-۵-۳ تجهیزات آزمایش
۳۹	۱-۲-۵-۳ قالب تحکیم
۴۰	۲-۲-۵-۳ سنگ های متخلخل
۴۱	۳-۲-۵-۳ گچ های تغییر مکان
۴۱	۴-۲-۵-۳ تجهیزات فرعی
۴۲	۳-۵-۳ روش آزمایش تحکیم
۴۳	۴-۵-۳ آماده سازی نمونه
۴۳	۵-۵-۳ انجام آزمایش
۴۴	۶-۳ محاسبه نیروی بالا زدگی فوم با دستگاه تک محوری
۴۷	فصل چهارم: تفسیر و نتایج آزمایش ها
۴۸	۱-۴ مقدمه
۴۸	۱-۱-۴ آزمایش مقاومت فشاری
۴۸	۲-۱-۴ آزمایش تحکیم یک بعدی
۴۸	۳-۱-۴ نیروی بالا زدگی
۴۹	۲-۴ ترکیب ساخت فوم پلی یورتان و آزمایش مقاومت فشاری

۴۹	۱-۲-۴ ترکیب فوم با نسبت ۵۰٪ ایزوسیانات به ۵۰٪ پلی‌ال سخت
۵۰	۲-۲-۴ ترکیب فوم با نسبت ۶۰٪ ایزوسیانات به ۴۰٪ پلی‌ال سخت
۵۱	۳-۲-۴ ترکیب فوم با نسبت ۵۰٪ ایزوسیانات به ۵۰٪ پلی‌ال چوب
۵۲	۴-۲-۴ ترکیب فوم با نسبت ۵۰٪ ایزوسیانات به ۴۷,۵٪ پلی‌ال چوب و ۲,۵٪ پلی‌ال سخت
۵۳	۵-۲-۴ ترکیب فوم با نسبت ۵۰٪ ایزوسیانات به ۴۶,۲۵٪ پلی‌ال چوب و ۳,۷۵٪ پلی‌ال سخت
۵۴	۶-۲-۴ ترکیب فوم با نسبت ۵۰٪ ایزوسیانات به ۴۵٪ پلی‌ال چوب و ۵٪ پلی‌ال سخت
۵۶	۷-۲-۴ ترکیب فوم با نسبت ۵۰٪ ایزوسیانات به ۴۲,۵٪ پلی‌ال چوب و ۷,۵٪ پلی‌ال سخت
۵۷	۸-۲-۴ ترکیب فوم با نسبت ۶۰٪ ایزوسیانات به ۳۶٪ پلی‌ال چوب و ۴٪ پلی‌ال سخت
۵۹	۹-۲-۴ ترکیب فوم با نسبت ۶۸٪ ایزوسیانات به ۵۰٪ پلی‌ال چوب و ۱۵٪ پلی‌ال سخت
۵۹	۱۰-۲-۴ ترکیب فوم با نسبت ۵۰٪ ایزوسیانات به ۵۰٪ پلی‌ال چوب و آب
۶۰	۱۱-۲-۴ ترکیب فوم با نسبت ۶۰٪ ایزوسیانات به ۴۰٪ پلی‌ال چوب و آب
۶۱	۱۲-۲-۴ ترکیب فوم با نسبت ۵۰٪ ایزوسیانات به ۴۷,۵٪ پلی‌ال چوب و ۲,۵٪ پلی‌ال سخت و آب
۶۲	۱۳-۲-۴ ترکیب فوم با نسبت ۵۰٪ ایزوسیانات به ۵۰٪ پلی‌ال چوب با دانسیته ۳۰۰
۶۳	۱۴-۲-۴ ترکیب فوم با نسبت ۵۰٪ ایزوسیانات به ۵۰٪ پلی‌ال چوب با دانسیته ۵۶۰
۶۶	۳-۴ محاسبه پارامترهای تحکیم تک بعدی
۶۶	۱-۳-۴ شاخص ضریب تحکیم (C_v)
۷۱	۲-۳-۴ شاخص فشردگی (C_c) و شاخص تورم (C_s)
۷۳	۴-۴ درصد رطوبت طبیعی فوم
۷۳	۵-۴ چگالی ویژه فوم
۷۴	۶-۴ نیرو و تنش بالا زدگی فوم پلی‌یورتان
۷۵	۱-۶-۴ محاسبات و نتیجه‌گیری
۷۷	فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۷۸	۱-۵ مقدمه
۷۸	۲-۵ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۷۹	۳-۵ پیشنهادها
۸۱	مراجع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: فوم سلول بسته (سخت) ۱۰
- شکل ۲-۲: فوم سلول باز (نرم) ۱۰
- شکل ۳-۲: واکنش شیمیایی پلی یورتان ۱۲
- شکل ۴-۲: رفتار جریان آب زیرزمینی و نشست زمین ۱۸
- شکل ۵-۲: نشست جاده و تزریق فوم پلی یورتان ۱۹
- شکل ۶-۲: تزریق فوم پلی یورتان در خاک قبل و بعد از تزریق ۲۱
- شکل ۷-۲: تزریق فوم پلی یورتان سخت در داخل لایه های ضعیف بستر خاک ۲۳
- شکل ۸-۲: کاربرد پلی یورتان در صنعت ۲۹
- شکل ۹-۲: مراحل تشکیل فوم پلی یورتان ۳۳
- شکل ۱-۳: اندازه گیری پلی ال و ایزوسیانات ۳۷
- شکل ۲-۳: برش استوانه ای فوم با کمان اره و سمباده ۳۷
- شکل ۳-۳: شماتیک دستگاه تحکیم (ادومتری) ۳۹
- شکل ۴-۳: سنگ متخلخل و قالب تحکیم ۴۰
- شکل ۵-۳: کرنش سنج با دقت ۰,۰۰۲ میلی متر ۴۱
- شکل ۶-۳: ترازو میلی گرمی ۴۱
- شکل ۷-۳: گرمخانه شکل ۴۱
- شکل ۸-۳: برازش معادله خط کالیبراسیون ۴۵
- شکل ۱-۴: آزمایش مقاومت فشاری فوم پلی یورتان ۴۹
- شکل ۲-۴: فوم با نسبت ۲۵ گرم ایزوسیانات به ۲۵ گرم پلی ال سخت ۵۰
- شکل ۳-۴: فوم با نسبت ۶۰ گرم ایزوسیانات به ۴۰ گرم پلی ال سخت ۵۱
- شکل ۴-۴: فوم با نسبت ۵۰ گرم ایزوسیانات به ۵۰ گرم پلی ال چوب ۵۲
- شکل ۵-۴: فوم با نسبت ۵۰ گرم ایزوسیانات به ۴۷,۵ گرم پلی ال چوب و ۲,۵ گرم پلی ال سخت ۵۳
- شکل ۶-۴: فوم با نسبت ۵۰ گرم ایزوسیانات به ۴۶,۲۵ گرم پلی ال چوب و ۳,۷۵ گرم پلی ال سخت ۵۴
- شکل ۷-۴: فوم با نسبت ۵۰ گرم ایزوسیانات به ۴۵ گرم پلی ال چوب و ۵ گرم پلی ال سخت ۵۵
- شکل ۸-۴: فوم با نسبت ۵۰ گرم ایزوسیانات به ۴۵ گرم پلی ال چوب و ۵ گرم پلی ال سخت ۵۵
- شکل ۹-۴: فوم با نسبت ۵۰ گرم ایزوسیانات به ۴۵ گرم پلی ال چوب و ۵ گرم پلی ال سخت ۵۶
- شکل ۱۰-۴: فوم با نسبت ۵۰ گرم ایزوسیانات به ۴۲,۵ گرم پلی ال چوب و ۷,۵ گرم پلی ال سخت ۵۷
- شکل ۱۱-۴: فوم با نسبت ۶۰ گرم ایزوسیانات به ۳۶ گرم پلی ال چوب و ۴ گرم پلی ال سخت ۵۸
- شکل ۱۲-۴: فوم با نسبت ۶۰ گرم ایزوسیانات به ۳۶ گرم پلی ال چوب و ۴ گرم پلی ال سخت ۵۸
- شکل ۱۳-۴: فوم با نسبت ۶۸ گرم ایزوسیانات به ۵۰ گرم پلی ال چوب و ۱۵ گرم پلی ال سخت ۵۹
- شکل ۱۴-۴: مقایسه فوم پلی یورتان چوب با نسبت ۵۰-۵۰ با و بدون حضور آب ۶۰
- شکل ۱۵-۴: فوم با نسبت ۳۰ گرم ایزوسیانات به ۲۰ گرم پلی ال چوب و ۰,۱ گرم آب ۶۱

- شکل ۴-۱۶: فوم با نسبت ۲۵ گرم ایزوسیانات به ۲۳,۶۵ گرم پلی‌ال چوب و ۱,۲۵ گرم پلی‌ال سخت و ۰,۱ گرم آب ۶۲
- شکل ۴-۱۷: فوم با نسبت ۱۰۰ گرم ایزوسیانات به ۱۰۰ گرم پلی‌ال چوب با دانسیته ۳۰۰ ۶۳
- شکل ۴-۱۸: فوم با نسبت ۱۰۰ گرم ایزوسیانات به ۱۰۰ گرم پلی‌ال چوب با دانسیته ۵۶۰ ۶۴
- شکل ۴-۱۹: دستگاه مقاومت فشاری بزرگ مقیاس ۶۴
- شکل ۴-۲۰: روش لگاریتم زمان کاساگرانده ۶۷
- شکل ۴-۲۱: منحنی تغییرات قرائت گیج قائم نسبت به لگاریتم زمان برای بارگذاری ۰,۵ کیلوگرم ۶۷
- شکل ۴-۲۲: منحنی تغییرات قرائت گیج قائم نسبت به لگاریتم زمان برای بارگذاری ۱ کیلوگرم ۶۸
- شکل ۴-۲۳: منحنی تغییرات قرائت گیج قائم نسبت به لگاریتم زمان برای بارگذاری ۲ کیلوگرم ۶۸
- شکل ۴-۲۴: منحنی تغییرات قرائت گیج قائم نسبت به لگاریتم زمان برای بارگذاری ۴ کیلوگرم ۶۹
- شکل ۴-۲۵: منحنی تغییرات قرائت گیج قائم نسبت به لگاریتم زمان برای بارگذاری ۸ کیلوگرم ۶۹
- شکل ۴-۲۶: منحنی تغییرات قرائت گیج قائم نسبت به لگاریتم زمان برای بارگذاری ۱۶ کیلوگرم ۷۰
- شکل ۴-۲۷: منحنی تغییرات ضریب تحکیم نسبت به فشار ۷۰
- شکل ۴-۲۸: منحنی تغییرات نسبت تخلخل به لگاریتم فشار ۷۲
- شکل ۴-۲۹: آزمایش نیروی بالا زدگی فوم با دستگاه تک محوری ۷۴

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: مقایسه پارامترهای تحکیمی بین خاک طبیعی با خاک اصلاح شده با فوم پلی یورتان ۲۲
- جدول ۲-۲: مقاومت فشاری و وزن مخصوص خاک مخلوط شده با پلی یورتان ۲۶
- جدول ۱-۳: کالیبره کردن دستگاه ۴۵
- جدول ۱-۴: آزمایش‌های مقاومت فشاری فوم پلی یورتان ۶۵
- جدول ۲-۴: مقادیر شاخص تراکم برای خاک‌های مختلف ۷۲
- جدول ۳-۴: درصد رطوبت طبیعی فوم پلی یورتان ۷۳
- جدول ۴-۴: چگالی ویژه فوم پلی یورتان ۷۳

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

یکی از پدیده‌هایی که در بعضی سازه‌ها به وجود می‌آید نشست ساختمان است که می‌تواند آثار مخرب جانی و مالی زیادی بر جای بگذارد. نشست ساختمان عمدتاً به علت نشست خاک در پی می‌دهد. کیفیت خاک به عنوان ماده‌ای سست و غیرفشرده که بخش اصلی از پی ساختمان را تشکیل می‌دهد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و سلامت ساخت و ساز به کیفیت و مقاومت خاک پی بستگی دارد. روش‌های ساخت و تثبیت متعددی مانند تقویت سطح، پیش بارگذاری، تثبیت شیمیایی، ستون‌های سنگی و زهکش‌های عمودی پیش ساخته به منظور تقویت مقاومت خاک پیشنهاد شده‌اند. انتخاب مناسب‌ترین روش باید بر اساس بررسی شاخص و ویژگی‌های مهندسی خاک صورت پذیرد. محققان خاک‌هایی با ویژگی‌های مختلف و از بخش‌های مختلف جهان را بررسی کرده‌اند. بر این اساس، ارزیابی پاسخ خاک به بار وارده باید قبل از هر نوع ساخت و سازی انجام گیرد.

اثر قابل توجه فشار تورم بر روی سازه‌ها می‌تواند منجر به شیب، انحراف و خم شدن قابل توجه و به دنبال آن سطح غیر قابل قبول گسست در سازه‌های نسبتاً ضعیف شود [۱]. تعداد کمی رویکردهای موثر و اقتصادی وجود دارد که می‌توانند مشکل را برطرف کنند و از بروز مجدد آن جلوگیری کنند. راه‌حل‌های موجود شامل هزینه‌هایی است که ممکن است به هزینه جایگزینی سازه نزدیک شود. قابلیت فشرده‌گی خاک نه تنها به تغییر شکل مواد و بازتنظیم ذرات آن بلکه به انتشار فشار آب متخلخل از خاک در پاسخ به بار و تجزیه محتوی فیبر نیز بستگی دارد. تغییر شکل خاک ممکن است بطور کلی تغییر شکل الاستیک خاک تحت تاثیر ذرات یا فیبر موجود در خاک قرار دارد. روش‌های متعددی برای تقویت و افزایش مقاومت خاک مورد استفاده قرار گرفته است.

پلی یورتان ابتدا در سال ۱۹۳۷ توسط اوتو بایر به عنوان جایگزین جیر، سنتز شد. فوم پلی یورتان انعطاف‌پذیر ابتدا در سال ۱۹۵۴ معرفی شد و به عنوان ماده عایق اسپری شده در دهه ۱۹۶۰ مورد استفاده

قرار گرفت. پلی یورتان یک کوپلیمر بر پایه ایزو سیانات است که به دلیل مقاومت خوب در مقابل تغییرات فصلی و زیست محیطی، امروزه کاربردهای مختلفی مانند عایق ساختمان ها، مخازن استخرها، و غیره استفاده می شود [۲]. پلی یورتان به دلیل واکنش های شیمیایی بین ذرات مایع پلی ال و ایزوسیانات پلیمریزه می شود. زمان دوره مایع ترکیب را می توان بر اساس نوع محصول انتخاب کرد. پلی یورتان ها به علت خواص مطلوب عایق و پوشش مانند دانسیته و سرعت صوت نزدیک به آب، ضریب پواسان نزدیک به ۵،۰، نفوذپذیری و جذب آب پایین و سهولت استفاده و توانایی پلیمریزاسیون در دمای اتاق، به عنوان پوشش و عایق در سیستم های مختلف استفاده می شوند [۳].

تزریق رزین پلی یورتان در حال انبساط یک گزینه معمول برای جلوگیری از نشست ساختمان ها و جاده ها است [۴]. فشار وارد شده توسط گاز تکامل یافته در طی واکنش شیمیایی که رزین را تشکیل می دهد سازه را بلند می کند. این راه حل نیازی به حفاری یا نصب موارد اضافی عناصر ساختاری پی ندارد، زیرا رزین به طور مستقیم با استفاده از لوله های آلومینیومی با قطر کوچک قابل تزریق به زیر ساختمان است. هنگام تزریق در خاک های گسترده، که اغلب به دلیل جمع شدگی ناشی از هدر رفت آب نشست کرده اند، مسئله عملکرد طولانی مدت آن مطرح می شود. در ژئومکانیک از رزین های پلی یورتان به عنوان یک راه حل برای کاهش تراوش استفاده شده است [۵].

بسیاری از مواد پلیمری مانند اکریلیک ها، لیگنوسولفونات ها و اپوکسی ها به علت سمی بودن بر محیط اثرات نامطلوب می گذارند و هم اکنون منسوخ شده اند. به جای آن رزین پلی یورتان وارد بازار شده است که دوستدار محیط زیست می باشد و باعث تثبیت خاک می شود [۶] بیشترین کاربرد رزین ها و پلیمرها در تزریق می باشد. یکی دیگر از راه های کنترل نشست سازه تزریق فوم پلی یورتان در زیر سازه هست. در این روش گمانه هایی به فواصل معین، توسط دستگاه حفار به وجود آمده و این گمانه ها با ماده گروت و با فشار بالا در درون خلل و فرج خاک نفوذ کرده و باعث بالا آمدن سطح پی می شوند.

از کاربردهای روش تزریق پر کردن فضاهای خالی به منظور جلوگیری از نشست سازه، کاهش قابلیت نفوذپذیری خاک، افزایش دوام، مقاومت و ظرفیت باربری خاک، تثبیت ماسه‌های شل برای کاهش واگرایی خاک و کنترل تغییر حجم خاک‌های انبساطی است. انتخاب نوع ماده تزریقی، فشار تزریق و غلظت آن به نوع خاک، اقتصاد پروژه، روش اجرایی تزریق، عمق اجرای عملیات و شعاع تأثیر آن بستگی دارد [۷].

۱-۲ ضرورت و اهداف تحقیق

ضعیف بودن خاک و پایین بودن مقاومت فشاری خاک علت اصلی در ایجاد نشست ساختمان می‌باشد که در اثر افزایش ناگهانی رطوبت و نشست آب از طرق مختلف باعث تغییر در تراکم و دانه‌بندی و نیز خاصیت مکانیکی خاک می‌گردد. در این حالت دیوارهای زیرزمین دچار ترک‌های افقی و عمودی می‌شوند. در این شرایط آب به درون زمین نفوذ می‌کند و در نتیجه آن دیوار زیرزمین به سمت جلو هل داده می‌شود. کج شدن و خم شدن دیوار زیرزمین نشان‌دهنده نشست ساختمان است. موضوع مقاوم‌سازی ساختمان فقط مختص به سازه ساختمان و مقاوم‌سازی تیر و ستون و... نیست بلکه ضعف در فونداسیون و خاک زیر پی آن می‌باشد. در این مواقع باید ساختمان به جهت ضعیف بودن خاک زیر پی و یا فونداسیون آن مقاوم‌سازی و تقویت گردد. این میزان نشست در ساختمان‌های متعارف و با مقاومت فشاری متعارف خاک در حدود ۲/۵ سانتیمتر در نظر گرفته می‌شود که با توجه به انعطاف‌پذیر بودن خاک در زیر پی نشست خاک در زیر فونداسیون در طراحی‌ها مدنظر قرار می‌گیرند [۸]. از راه‌های جلوگیری از نشست سازه می‌توان به مقاوم‌سازی پی ساختمان و افزایش قدرت باربری زمین به وسیله تزریق مواد متراکم‌کننده پلی‌یورتان به داخل خاک اشاره کرد. فوم پلی‌یورتان دارای وزن مخصوص پایین و مقاومت فشاری بالایی به نسبت خاک دارند که می‌توانند در جهت کنترل نشست سازه در زیر سازه تزریق شود. با تزریق فوم پلی‌یورتان در خلل و فرج خاک در کوتاه‌ترین زمان سازه به سطح اولیه خود باز می‌گردد و قابل بهره‌برداری است. اطلاعات بسیار کمی در ادبیات فنی در مورد استفاده از رزین پلی‌یورتان با ویژگی‌های مختلف به عنوان تکنیک

بهبود خاک وجود دارد. بنابراین پژوهش حاضر قصد دارد تا به معرفی مواد پلی‌یورتان و کاربرد تزریق این مواد در پی، مترو، جاده‌های بتنی و آسفالتی پرداخته و با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری و تحکیم خواص این مواد را شناسایی کند.

۳-۱ روش تحقیق

پلی‌یورتان از مواد ایزوسیانات و پلی‌ال تشکیل شده که دارای دانسیته‌های مختلفی هستند. در این پژوهش به منظور تولید فوم که بیشترین انبساط و بالاترین مقاومت فشاری را داشته باشد از ترکیب نسبت‌های پلی‌ال (نوع سخت و چوب) و ایزوسیانات ۱۷ نمونه فوم تولید می‌شوند. این فوم‌ها به شکل استوانه‌ای و با نسبت ارتفاع به قطر ۲ تولید و بعد از ۲۴ ساعت که به بیشترین مقاومت خود رسید تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار می‌گیرد.

بعد از یافتن بهترین فوم از نظر مقاومت فشاری و میزان انبساط فوم را جهت بررسی تغییر شکل‌های آنی و درازمدت فوم تحت آزمایش تحکیم مطابق استاندارد ASTM D 2435 قرار داده می‌شود. در این آزمایش به بررسی پارامترهای تحکیم تک بعدی (پارامتر شاخص فشردگی C_c ، شاخص تراکم C_s و ضریب تحکیم C_v) در شرایط محصور شده جانبی با زهکشی قائم در معرض بارگذاری تنش کنترل شده پرداخته می‌شود. در انتها با استفاده از دستگاه مقاومت فشاری نیروی بالا زدگی فوم پلی‌یورتان به دست می‌آید تا مشخص شود تا چه میزان تنشی می‌توان از فوم پلی‌یورتان استفاده کرد. بدین منظور مواد پلی‌یورتان را درون استوانه ته بسته ریخته و مخلوط می‌شود. قبل از آنکه فوم به مرحله گرمی شدن برسد شفت هم‌اندازه قطر استوانه روی فوم قرار داده و در زیر گیج دستگاه مقاومت فشاری قرار داده می‌شود و با شروع عملیات منبسط شدن گیج شروع به حرکتی کرده و زمانی که عقربه‌های گیج متوقف شود با دانستن ضریب رینگ حلقه از فصل سوم نیرو بالا زدگی آن به دست می‌آید. برای اطمینان از نتایج آزمایش از قالب استوانه‌ای با قطرهای متفاوت استفاده شده است.

۱-۴ فصل بندی پایان نامه

فصل اول: کلیات

این فصل شامل کلیاتی از تاریخچه فوم پلی یورتان، روش های بهسازی خاک با تزریق فوم، اهداف پژوهش و روش تحقیق می باشد.

فصل دوم: ادبیات و پیشینه تحقیق

این فصل شامل تاریخچه فوم پلی یورتان و معرفی انواع فوم پلی یورتان (فوم نرم برای تشک مبلمان، فوم سخت برای عایق کاری و فوم چوب که برای صنایع چوبی) می باشد. سپس به معرفی مواد اولیه فوم پلی یورتان، اطلاعات فنی آن و همچنین کاربرد این فوم ها در صنعت پرداخته شده و در انتها فصل به مقاله ها و سابقه استفاده از فوم در مهندسی عمران و ژئوتکنیک پرداخته می شود.

فصل سوم: روش تحقیق

در این فصل از پایان نامه به معرفی مواد اولیه فوم پلی یورتان، اطلاعات فنی آن و روش تهیه فوم و آزمایش مقاومت فشاری انواع فوم ها با دانسیته متفاوت و با بهترین نسبت ترکیب از نظر مقاومت فشاری و مقدار انبساط فوم آزمایش تحکیم انجام می شود.

فصل چهارم: تفسیر نتایج

در این فصل به تجزیه تحلیل نتایج آزمایشگاهی در سه بخش پرداخته می شود.

بخش اول به بررسی مقاومت فشاری انواع فوم پلی یورتان با دانسیته های متفاوت و ترسیم نمودار تنش و کرنش آن پرداخته می شود.

بخش دوم به بررسی پارامترهای تحکیم شامل شاخص فشردگی، تورم و سرعت تحکیم نمونه فوم ساخته شده با بهترین ترکیب از نظر مقاومت و مقدار انبساط بالا تحت آزمایش تحکیم یک بعدی خاک قرار

می‌گیرد.

بخش سوم به بررسی نیروی بالا زدگی فوم پلی‌یورتان با آزمایش مقاومت فشاری پرداخته می‌شود.

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

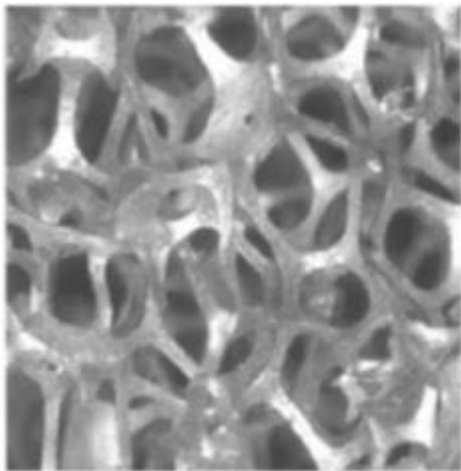
در فصل پنجم به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها برای پژوهش‌های آینده پرداخته می‌شود.

فصل دوم

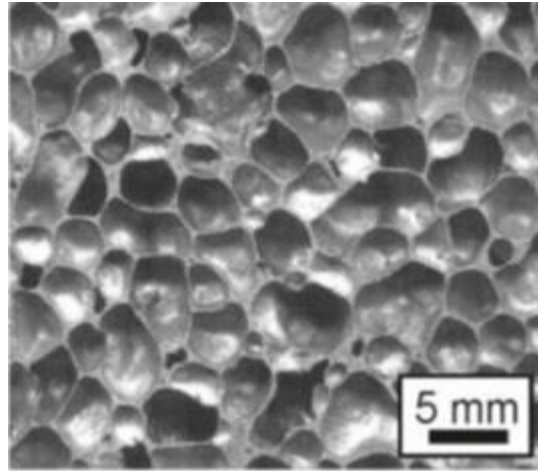
ادبیات و پیشینه تحقیق

۱-۲ تعریف فوم

فوم‌های پلیمری موادی هستند که داخل آن‌ها سلول توزیع شده است. یک سلول فضای توخالی کوچکی است که در حین ساخت فوم، توسط گاز در داخل پلیمر ایجاد می‌شود. این سلول‌ها می‌توانند باز، نیمه بسته و بسته باشند (شکل ۱-۲ و شکل ۲-۲).



شکل ۲-۲: فوم سلول باز (نرم) [۹]



شکل ۱-۲: فوم سلول بسته (سخت) [۹]

اتو بایر برای اولین بار در شهر لورکوزن آلمان در سال ۱۹۳۷ پلی‌یورتان را کشف کرد. پلی‌یورتان که معمولاً با نام اختصاری (PU^۱) شناخته می‌شود که از ترکیب دو ماده ایزوسیانات و پلی‌ال در حضور کاتالیست و افزودنی‌ها تولید می‌شود.

پلی‌یورتان اخیراً به دلیل وزن مخصوص پایین، نرخ انبساط بالا و زمان واکنش سریع در مهندسی عمران و ژئوتکنیک مورد استفاده قرار گرفته است که می‌توان به تعمیر نشت خط لوله؛ فشرده سازی بستر خاک؛ به سازی فوندا سیون، جداره دیوارها برای سازه‌های سد؛ نصب لوله‌های فوم درجا بدون حفاری، بالا بردن دال‌های بتنی فرورفته، پر کردن فضای خالی؛ تعمیر پل‌های جانبی، بالا آمدن جاده بتنی فرورفته، بهبود عملکرد جوی مواد، افزایش ظرفیت باربری، تثبیت شرایط خاک و جلوگیری از لوله‌گذاری و فرسایش خاک

^۱ polyurethane

اشاره کرد [۱۰].

۲-۲ تاریخچه پلی یورتان ها

پلی یورتان ها مجموعه نسبتاً جدیدی از پلیمرهای بسیار مهم هستند که در تهیه اسفنج ها، الیاف مصنوعی، روکش ها، رنگ ها و چسب ها و الاستومرها به سرعت افزایش یافته است [۱۱].

دکتر اتو بایر آلمانی در سال ۱۹۳۷ با انجام واکنش بین دی ایزو سیانات آلیفاتیک و دی ال آلیفاتیک نوعی پلیمر خطی با جرم مولکولی بالا به دست آورد و برای این واکنش کاربرد تجاری یافت [۱۲]. در جنگ جهانی دوم به دلیل کمبود مواد اساسی فوم های سخت پلی یورتان در عایق کاری، ساختمان زیر دریایی ها و شناورها، قطعات ساندویچی سبک وزن و مقاوم برای ساختمان هواپیما استفاده کردند.

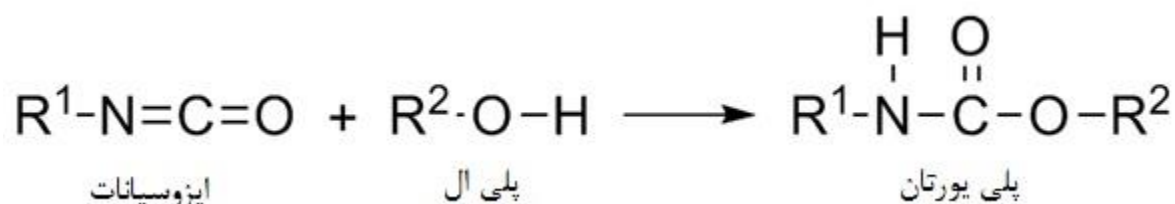
به طور کلی تولید فوم نتیجه واکنش بین ایزوسیانات و پلی ال و در حضور ماده ای پف کننده است که پلی یورتان تهیه شده را به صورت فوم درمی آورد. کارهای اولیه به تولید فوم های یورتان با پلی ال پلی استری و دی ایزوسیانات فرایندی پرهزینه و مشکل می باشد. به همین دلیل صنایع پلی یورتان به دنبال مواد هیدروکسی دیگری بودند که آن را جایگزین پلی استر نمایند؛ این فعالیت ها ادامه یافت تا اینکه در سال ۱۹۵۷ پلی ال های پلی اتری تولید شدند. این مواد محصولاتی با خواص گسترده تر از پلی استر تولید می کنند اما در مقایسه با آن ها قیمت کمتری دارند و فوم های تهیه شده از آن ها نیز ارزان تر خواهد بود.

زمینه های دیگر کاربردی پلی یورتان ها در تهیه اسفنج ها (سخت، نیمه سخت و نرم) روکش ها، پلاستیک ها، چسب ها، مواد درزگیر و الیاف است که خواص آن ها بستگی به نوع مواد اولیه مورد مصرف، درجه پیوند عرضی و همچنین روش ساخت و تهیه آن ها دارد [۱۳].

۲-۳ شیمی الاستومرهای پلی یورتان

پلی یورتان ها یک فرآورده نفتی هستند که یکی از محصولات آن ها مواد الاستومری می باشد. الاستومرها

سیستم‌های کوپلیمری هستند که در زنجیر پلیمری آن‌ها قسمت‌های سخت و نرم به تناوب قرار دارند. قسمت‌های سخت از واکنش بین دی‌ایزوسیانات و دی‌آمین و یا دی‌ال تشکیل می‌شود و قسمت‌های نرم به ساختار پلی‌ال مربوط می‌شود. در نتیجه مواد اولیه جهت تشکیل الاستومر پلی‌یورتان دی‌ایزوسیانات‌ها، پلی‌ال‌ها، افزاینده زنجیرها و ترکیبات آلی فلزی می‌باشد. واکنش شیمیایی بین ایزو سیانات با پلی‌ال‌ها که دارای هیدروژن فعال هستند می‌توان به صورت زیر نمایش داد [۱۴].



شکل ۲-۳: واکنش شیمیایی پلی‌یورتان [۱۴]

۲-۳-۱ دی‌ایزوسیانات‌ها^۱

ایزو سیانات‌ها اغلب از واکنش آمین و فسژن در یک حلال بی‌اثر مانند ارتو دی‌کلروبنزن^۲ و شرایط دمایی ۲۵- تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد تولید می‌شوند. دی‌ایزوسیانات‌ها دارای دو گروه سیاناتی می‌باشند. از جمله معروف‌ترین دی‌ایزوسیانات‌های تجاری می‌توان به MDI (متیلن دی‌ایزوسیانات^۳) و TDI (تولوئن دی‌ایزوسیانات^۴) اشاره کرد [۱۵].

تولوئن دی‌ایزوسیانات به‌ندرت در تهیه فوم‌های سخت به‌عنوان ایزوسیانات خالص مورد استفاده قرار می‌گیرد اما گاهی اوقات از آن در تهیه نیمه پیش‌پلیمر - که محصولی از پلی‌ال و ایزوسیانات اضافی است - استفاده می‌شود. فوم‌های به‌دست آمده از نوع تولوئن دی‌ایزوسیانات به مقیاس و سبکی در عایق‌بندی یخچال‌ها در آمریکا استفاده می‌شود؛ اما صنایع یخچال سازی اروپا به کار بردن متیلن دی‌ایزوسیانات را

^۱ Diisocyanate

^۲ Ortho Dichlorobenzene

^۳ Methylene Di Isocyanate

^۴ Toluene Di Isocyanate

ترجیح می‌دهند زیرا تبخیر شونده‌گی آن به مراتب کمتر است. نگهداری متیلن دی‌ایزوسیانات خام در درجه حرارت بالاتر از 15°C برای جلوگیری از عمل انجماد آن ضروری است [۱۴].

۲-۳-۲ پلی‌ال‌ها^۱

پلی‌ال‌ها به زنجیر پلیمری اطلاق می‌شود که دارای دو یا چند گروه هیدروکسیل (OH) می‌باشند. معمولاً در تولید پلی‌یورتان‌ها از دو نوع پلی‌ال پلی‌استری و پلی‌ال پلی‌اتری استفاده می‌شود. نوع پلی‌ال بکار رفته در پلی‌یورتان‌ها تعیین‌کننده خواص نهایی آن‌ها می‌باشد. معمولاً پلی‌استرها دارای خواص مکانیکی بهتر و پلی‌اترها مقاومت بیشتری در مقابل آب دارند. پلی‌ال‌های بکار رفته در تولید پلی‌یورتان‌ها دارای وزن مولکولی بین ۲۰۰ تا ۱۰۰۰۰ می‌باشند که با توجه به خواص نهایی مورد انتظار از پلی‌یورتان، انتخاب می‌شوند. پلی‌ال‌های پلی‌اتری به دلیل ارزان‌تر بودن و در دسترس بودن و مقاومت بسیار بیشتر در مقابل هیدرولیز کاربرد بسیار بیشتری نسبت به پلی‌استرها دارند اگرچه پلی‌استرها پلیمرهای قوی‌تری تولید می‌کنند [۱۶].

۲-۳-۲-۱ پلی‌استرها^۲

پلی‌استرها زنجیرهای مولکولی با وزن مولکولی بالا هستند که در زنجیر آن‌ها گروه $\text{O}-\text{C}=\text{O}$ تکرار می‌شود و از واکنش یک اسید کربوکسیلیک دو عاملی با یک دی‌ال حاصل می‌شوند.

۲-۳-۲-۲ پلی‌اترها^۳

این نوع پلی‌ال‌ها معمولاً از واکنش پلیمریزاسیونی گروه اپوکسیدالکلین اسید در مجاورت کاتالیزست‌های بازی مانند هیدروکسید سدیم و هیدروکسید پتاسیم تولید می‌شوند. پلی‌اتر پلی‌ال‌ها بسته به روش تهیه

^۱ Polyols

^۲ Polyesters

^۳ Polyethers

آن‌ها دوعاملی یا سه عاملی می‌باشند. اغلب پلی‌ال‌های پلی‌تری که در ساخت پلی‌یورتان مورد استفاده قرار می‌گیرند از اکسید پروپیلن ساخته می‌شوند که معمولاً دی‌ال‌ها و تری‌ال‌ها با وزن مولکولی ۱۰۰۰-۷۰۰۰ ایجاد می‌کند [۱۷].

۲-۳-۳ افزایش زنجیرها^۱

افزاینده زنجیرها به دو گروه دی‌ال‌ها و دی‌آمین‌های آلیفاتیک و آروماتیک تقسیم‌بندی می‌شوند. افزایش زنجیرها به منظور طول‌تر کردن زنجیر سخت پلی‌یورتان‌ها، افزایش چگالی پیوندهای هیدروژنی و تنظیم وزن مولکولی زنجیرهای پلی‌یورتان به کار برده می‌شوند. قابل ذکر است که پلی‌یورتان‌هایی که در آن‌ها افزایش زنجیر آلیفاتیک بکار رفته نسبت به پلی‌یورتان‌هایی که در آن‌ها افزایش زنجیر آروماتیک بکار گرفته شده، نرم‌تر می‌باشند [۱۸].

۲-۳-۴ کاتالیزورها^۲

هدف از کاربرد کاتالیزورها در شیمی پلی‌یورتان افزایش سرعت واکنش به میزانی معین و مناسب است؛ چرا که مواد مختلف مورد استفاده جهت انجام واکنش از لحاظ فعالیت شیمیایی به میزان زیادی با یکدیگر تفاوت دارند. مهم‌ترین انواع کاتالیزورهای به کار رفته در شیمی پلی‌یورتان‌ها کاتالیزورهای اسیدی، کاتالیزورهای بازی و ترکیبات آلی‌فلزی شامل جیوه و روی می‌باشند.

۲-۳-۴-۱ کاتالیزورهای اسیدی

کاتالیزورهای اسیدی سرعت گسترش زنجیر را به میزان کمی افزوده و از پیوند عرضی جلوگیری می‌کنند. تنها واکنشی که در آن شدیداً کاتالیزورهای اسیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد واکنش با آب است که در

^۱ Chain Extenders

^۲ Catalysts

مورد پلی‌یورتان‌های سخت مورد استفاده ندارد [۱۹]. به دلیل گزینش پذیری کاتالیزورهای اسیدی بنزوئیل کلراید به عنوان پایدار کننده سیستم‌های پیش پلیمری مورد استفاده قرار می‌گیرند تا از واکنش بین رطوبت هوا و ایزوسیانات موجود جلوگیری کنند [۲۰].

۲-۳-۴-۲ کاتالیزورهای بازی

بازها کلیه واکنش‌های ایزوسیانات‌ها را تشدید می‌کنند و معمولاً اثر کاتالیزوری آن‌ها با افزایش قدرت بازی افزایش می‌یابد. از کاتالیزورهایی که در صنعت پلی‌یورتان مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌توان به ۴و۱ دی آزو بی سیکلو اکتان اشاره کرد که با نام تجاری (DABCO) در بازار عرضه می‌شود. به‌علت قابل دسترس بودن اتم نیتروژن و فقدان مزاحمت فضایی، این ترکیب کاتالیزوری به نسبت قوی است [۲۱].

۲-۳-۴-۳ ترکیبات آلی فلزی

اگرچه تعداد زیادی از ترکیبات آلی فلزی بر روی واکنش‌های گروه ایزو سیانات‌ها اثر کاتالیزوری دارند ولی ترکیبات آلی روی، کاتالیزورهای فوق‌العاده مؤثری هستند که معمولاً و ترجیحاً در سیستم‌های پلی‌یورتان مورد استفاده قرار می‌گیرد. به طور کلی آمین‌های نوع سوم و ترکیبات آلی روی، بیشترین کاربرد کاتالیزورهای تجاری را در تولید پلی‌یورتان دارا هستند [۲۲].

۲-۳-۵ عامل پف دهنده

دی‌اکسید کربن که از واکنش بین آب با ایزو سیانات به دست می‌آید باعث افزایش حجم فوم می‌شود که بیشتر برای فوم پلی‌یورتان نرم کاربرد دارد. بیشترین و معمولی‌ترین عامل پف دهنده فوم سخت پلی‌یورتان تری کلروفلوئورمتان است که اغلب به نام R-۱۱ نامیده می‌شود. نقطه جوش این ماده 24°C است و در حین انجام واکنش ایزوسیانات با پلی‌ال عمل تبخیر و فوم شدن انجام می‌پذیرد. دو راه برای رسیدن به ساختار فوم وجود دارد.

۱. عامل پف دهنده شیمیایی به طور مستقیم در حین فرایند پلیمریزاسیون تشکیل می شود؛ مانند آب که با واکنش با ایزوسیانات تشکیل گاز کربن دی اکسید می دهد و باعث انبساط فوم می شود.
۲. عامل پف دهنده فیزیکی که حین فرایند پلیمریزاسیون از یک محلول مایع تبخیر می شود که حاوی ترکیبات آلی فرار نظیر پنتان، CFC ها، HCFC ها، HFC ها هستند.
- استفاده از عوامل پف دهنده فیزیکی مزایای زیادی دارند:
۱. هیچ ترکیب اضافه ای به ساختار فوم وارد نمی شود.
۲. تبخیر عامل پف دهنده باعث سرد شدن دستگاه در حین واکنش گرمازای فوم می شود.
۳. افزایش اثر عایق کاری حرارتی
۴. اختلاط آسان مواد اولیه به علت پایین بودن گرانشی ماده دهنده [۲۳].

۲-۴ روش تزریق پلی یورتان

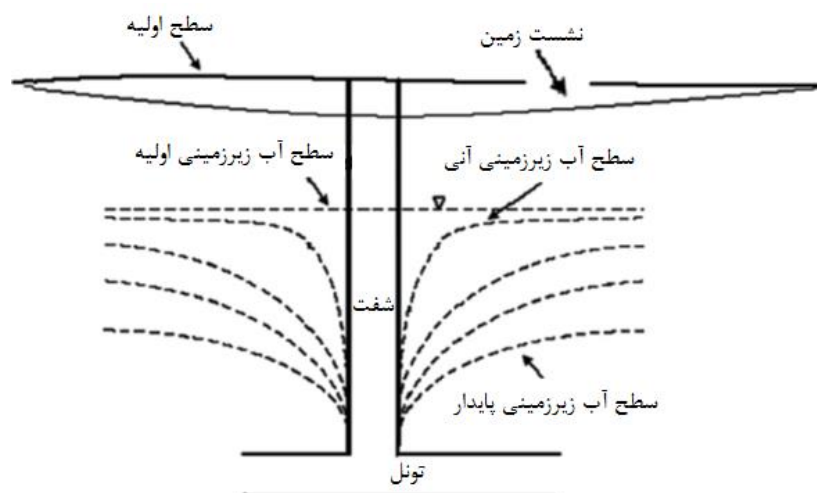
از تکنیک های تزریق برای بهسازی خاک استفاده می شود، که به وسیله آن مصالح سیال تحت فشار به درون ترک ها و منافذ خاک تزریق شده و موجب ایجاد تغییر در خصوصیات خاک در نواحی تزریق می شوند. تزریق پلی یورتان به روش تزریق تراکمی یا تحکیمی است که به منظور بهسازی خاک های دانه ای (ماسه سست) به کار می رود. این روش تزریق تنها راه برای نفوذ دوغاب به منافذ خاک و بهبود خاک های دانه ای موجود در زیر سازه به حساب می آید. با حفاری در دال بتنی کف سازه می توان دوغاب را به زیر سازه جهت تقویت خاک بستر تزریق کرد. تزریق تحکیمی باعث افزایش ظرفیت باربری، کاهش و کنترل نشست خاک های سست و کاهش پتانسیل روانگرایی خاک می گردد [۲۴].

۵-۲ کاربرد فوم پلی یورتان در عمران

۲-۵-۱ تونل مترو

در سال ۲۰۰۷ شهرداری از میر ترکیه برای جلوگیری از نشست خاک ناشی از زهکشی آب های زیرزمینی در محور تونل مترو از تزریق پلی یورتان استفاده کرد. آب های زیرزمینی با سرعت ۴,۵ لیتر بر ثانیه در ایستگاه مترو گوزل یالی^۱ تخلیه شدند، سطح آب زیرزمینی از سطح اولیه ۴ متر کاهش یافت و نشست زمین به ۹۸ میلی متر رسید (شکل ۲-۴). این شفت با قطر ۲۶ متر و عمق ۱۶ متر به شکل یک سیلندر رانده شد و سپس توسط بتن پاش با ضخامت ۲۰-۴۰ سانتی متر با مش فولادی گذاشته شد. در مجموع ۲۸۰ پیچ و مهره سنگی گام به گام نصب شد. دلیل اصلی نشست، بسته شدن حجم منافذ با لایه های سربار بود. به منظور جلوگیری از افزایش این نشست و محافظت از ساختمان ها و سایر زیر ساخت ها از آسیب بیشتر، از تزریق شیمیایی استفاده شد. مواد پلی یورتان در درون ترک ها نفوذ کرده و منبسط شد. تزریق در جهت بالا انجام شد تا سرعت آب کاهش یابد و سپس به طور کامل تزریق متوقف شد. پس از اتمام فرایند تزریق در پایین ترین سطح، سطح آب های زیرزمینی افزایش یافت. فوم پلی یورتان ابتدا با فشار ۶۰ تا ۷۰ بار به داخل پیچ و مهره های سنگی و حفره های زهکشی در پایین شفت تزریق و پس از آن در سطوح بالاتر تزریق شد. در مجموع ۵۱۱ نقطه دچار نشست حفاری شده و در آن ۲۵۰ کیلو گرم فوم پلی یورتان تزریق شد. پس از تزریق شیمیایی نشست زمین متوقف و سطح آب زیرزمینی به سطح اولیه خود نزدیک شد [۲۵].

^۱ Guzelyali



شکل ۲-۴: رفتار جریان آب زیرزمینی و نشست زمین [۲۵]

۲-۵-۲ جاده آسفالتی بتنی

در سال ۲۰۰۹ بخشی از آسفالت بتنی در ایالت تگزاس به علت فرسودگی به شکل دال بتنی دچار نشست شد و حمل و نقل خودروها را دچار مشکل و رانندگی را مختل کرد. همچنین باعث کاهش ضریب انتقال بار و گسیخته شدن کلاف میلها شد. روش‌های معمول برای بالا بردن دال‌های بتنی برای تنظیم کردن بخش‌های جاده‌ای و یا اصلاح چاله‌ها نیاز به تزریق تحت فشار زیر دال یا تعمیر کامل عمق دارد. این دو روش می‌تواند زمان زیادی را برای تکمیل و ایجاد اختلالات ترافیکی اتخاذ کند. با استفاده از تزریق فوم پلی‌یورتان با پر کردن حفره‌های زیر دال بتنی سطح دال بتنی به سطح هدف رسید [۲۶]. مراحل تزریق فوم در شکل ۲-۵ آورده شده است.



شکل ۲-۵: نشست جاده و تزریق فوم پلی‌یورتان [۲۶]

در سال ۲۰۱۰ در بزرگراه لوئیزیانا واقع در ایالت واشنگتن دی سی برای کاهش نشست بر روی جاده بتنی با فوم پلی‌یورتان بر روی یک جاده اصلی شریانی به طول ۴ مایل با میانگین ترافیکی روزانه ۱۵,۸۰۰ با ۲۰ درصد کامیون تزریق انجام شد. عمق نشست تا سطح ۲,۵ سانتی‌متر بود که فرایند بهسازی با فوم پلی‌یورتان نشست دال بتنی به حدود ۰,۶۳ سانتی‌متر رساند. در مکان‌های مختلف هفده نمونه فوم پلی‌یورتان مورد آزمایش قرار گرفت. تقریباً ۱۸ درصد بهبود در کیفیت رانندگی و ۷۹ درصد بهبود در کاهش دال‌های فرورفته انجام شد. استفاده از روش تزریق پلی‌یورتان به دلیل سرعت بالا تعمیر در مناطق پرتراфик گزینه مناسبی است. از مزایای تزریق فوم می‌توان زمان کوتاه برای اجرا و کاهش مسائلی مانند وقفه ترافیکی اشاره کرد. تراکم آزاد فوم پلی‌یورتان برای این پروژه ۶۵ کیلوگرم بر مترمکعب و مقاومت فشاری محصور نشده آن ۶۹۰ کیلوپاسکال بود. با تزریق فوم در زیر دال بتنی تراکم فوم از ۱۱۰ به ۲۰۰

کیلوگرم بر مترمکعب افزایش یافت. این تغییر انتظار می‌رفت زیرا با افزایش محدودشدگی تراکم فوم پلی‌یورتان در غیاب آب افزایش می‌یابد [۲۷].

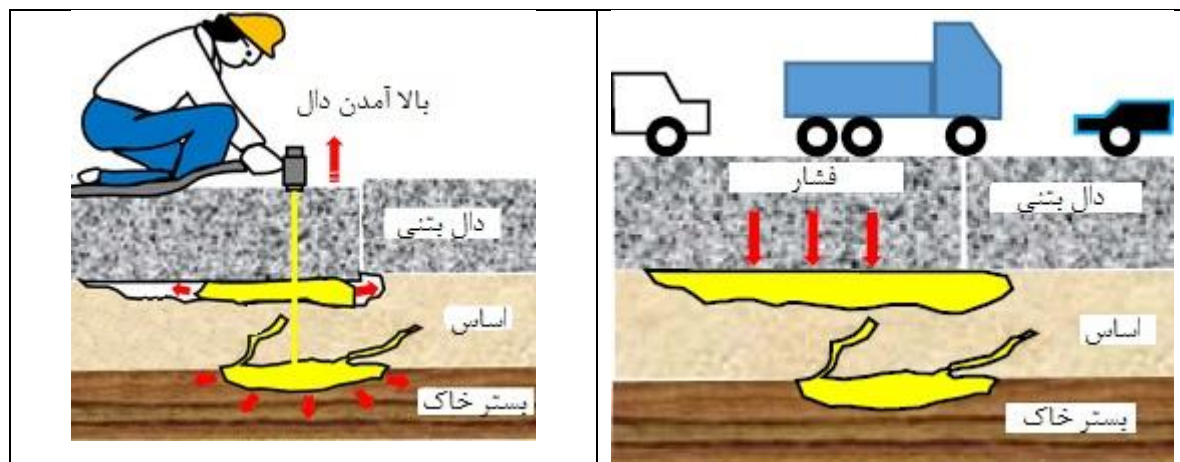
بزرگراه پلازا تول کلیا^۱ (۲۰۱۵) واقع در شهر کوالالامپور کشور مالزی در امتداد جاده بتنی به دلیل تراکم ضعیف در هنگام ساخت، فرورفتگی، بار زیاد در ترافیک، به نگهداری مداوم آن نیاز داشت؛ که موجب افزایش هزینه‌های غیرضروری می‌شد.

ساختار رو سازی ترمیم و بهبود خاک باید از مقاومت و تحمل کافی برخوردار باشد تا از ایمنی خودرو در بزرگراه‌ها اطمینان حاصل شود. این امر برای رسیدگی به ظرفیت‌های نشست و تحکیم بلندمدت، پایداری و ظرفیت باربری برای فونداسیون است. سیستم تزریق فوم پلی‌یورتان یک فرایند ثبت شده با استفاده از ترکیب دوغاب شیمیایی (ایزوسیانات و پلی‌ال) است که قادر به بالا بردن، پر کردن حفره‌ها و تقویت ساختار خاک می‌باشد و با موفقیت در چندین ایالت اجرا شد. رزین تزریق شده در داخل خاک تقریباً ۹۰٪ مقاومت فشاری آن (حداقل مقاومت فشاری ۰,۲۷۶ مگاپاسکال) را در مدت ۱۵ دقیقه به دست آورد و توانست روز بعد برای تردد باز باشد. هر دو ماده شیمیایی (ایزوسیانات و پلی‌ال) سازگار با محیط‌زیست، غیر سمی و دارای طول عمر زیاد هستند. فوم پلی‌یورتان بر پایه پلیمر جامد شبکه‌ای به صورت سه‌بعدی با استحکام بالا است که با ترکیب ایزوسیانات مایع و پلی‌ال (حاوی مقدار کمی آب) موجب گرما و افزایش حجم می‌شود. فوم سخت پلی‌یورتان دارای خصوصیات وزن سبک و قابلیت انبساط فوم با استحکام بالا، چسبندگی بالا با سایر مواد، خاصیت ضد پیری و پخت در مدت‌زمان کوتاه است.

روش تزریق فوم در اصل با تزریق سیمان معمولی یکسان است که مطابق شکل ۲-۶ رزین شیمیایی با حفر سوراخ به داخل زمین تزریق شد. پکر را با لوله نصب کرده و فضای خالی بین خاک پر شد. علاوه بر این، با استفاده از فوم پلی‌یورتان ظرفیت باربری خاک به دلیل گسترش فوم بین ذرات خاک بهبود

^۱ Plaza Tol KLIA

یافت [۲۸]. علاوه بر این، ویژگی‌های سبک وزن بودن فوم پلی‌یورتان باعث کاهش سرعت نشست و ویژگی‌های انبساطی PU موجب بالا بردن سطح خاک شد.



شکل ۲-۶: تزریق فوم پلی‌یورتان در خاک قبل و بعد از تزریق [۲۹]

در این پروژه به ابعاد ۵۱ متر طول و ۴۵ متر عرض ۶۲۱ گمانه به قطر ۱۶ میلی‌متر برای تزریق پلی‌یورتان در هر نقطه مشخص شد که تزریق در هر نقطه در دو مرحله تزریق شد (شکل ۲-۶).

نمونه‌های خاک قبل و بعد از تزریق برای تعیین بهبود مقاومت، سفتی و تراکم‌پذیری با انجام آزمایش مقاومت فشاری و آزمایش تحکیم یک‌بعدی بررسی شد. نتایج بدست آمده برای حداکثر مقادیر تنش فشاری برای خاک اصلاح شده به ترتیب بین ۱۹۰ تا ۱۹۹ کیلوپاسکال ۱ تا ۳ برابر بیشتر از خاک طبیعی (۶۲ تا ۱۴۵ کیلوپاسکال) ثبت شد.

پارامترهای تحکیمی برای هر دو نمونه خاک (طبیعی و اصلاح شده) نسبت تخلخل، فشار پیش تحکیمی، شاخص تراکم و شاخص تورم مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج به‌دست آمده طبق جدول ۲-۱ نسبت تخلخل اولیه خاک اصلاح شده (۰,۴۳۵) کاهش ۳۱,۵٪ از خاک طبیعی (۰,۶۳۵) را نشان داد که فوم پلی‌یورتان بیشتر فضاهای خالی را پرکرد. علاوه بر این، شاخص تورم همچنین برای خاک اصلاح شده (۰,۰۰۹) ۶۱٪ نسبت به خاک طبیعی (۰,۰۲۳) کاهش یافت که نشان دهنده به حداقل رسیدن تغییر

حجم، سرعت نشست و همچنین تغییر شکل دائمی پلاستیک بود [۳۰].

جدول ۱-۲: مقایسه پارامترهای تحکیمی بین خاک طبیعی با خاک اصلاح شده با فوم پلی یورتان [۳۰]

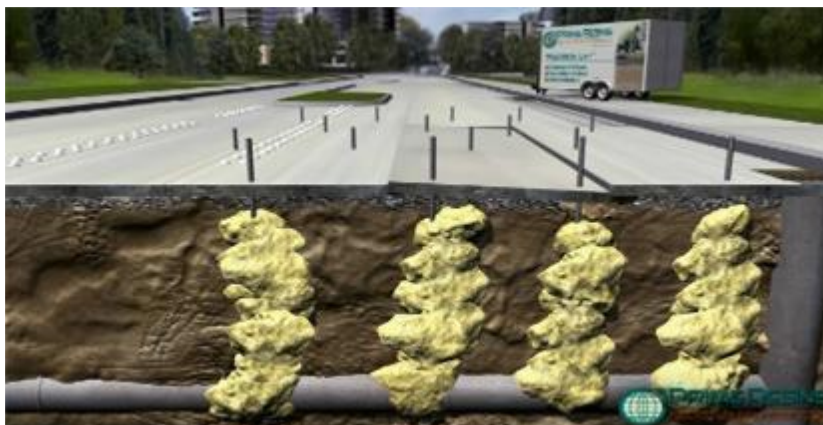
خاک	نسبت تخلخل اولیه (e_0)	شاخص تراکم (C_c)	شاخص تورم (C_s)	فشار پیش تحکیمی (P_c , kpa)
طبیعی	۰,۶۳۵	۰,۰۷۶	۰,۰۲۳	۵۲
اصلاح شده	۰,۴۳۵	۰,۰۷۵	۰,۰۰۹	۵۶

۲-۵-۳ تزریق فوم پلی یورتان در فونداسیون رسی نرم

تحقیقات ژئوتکنیک در سال ۲۰۰۸ بستر خاک در محدوده حداکثر نشست، رسوب نرم تا سفت، رس با حالت خمیری متوسط انجام شد که در آن تحکیم رس نرم و وزن اضافی ناشی از لکه گیری آسفالت به عنوان دو عامل اصلی نشست در نظر گرفته شد.

فناوری تزریق پلی یورتان برای بهبود مقاومت بستر و تحکیم رس نرم انتخاب شد. مزایای این روش عدم حفاری و حذف سازه جاده، بهبود عمیق بستر و عدم بستن جاده و مشکلات ترافیک می باشد.

حفاری گمانه در فواصل شبکه ای مثلثی ۱,۲ متری برای ۱۵ متر طول هر دو خط بزرگراه انجام شد. یک کارگر میله های تزریق به قطر ۲۵ میلی متر را تا عمق ۶ متر قرار داد. یک لوله جداری فلزی که مانع سقوط رس های نرم به سوراخ های حفاری است، نصب شد. پوشش فولاد در طی تزریق فوم به تدریج بیرون آمد، به طوری که یک ستون فوم تشکیل شد و ستون به عنوان یک شمع درجا با هر دو مقاومت اصطکاکی جداری و مقاومت تکیه گاهی عمل می کرد. یک ستون فوم به قطر حدود ۰,۳ متر توانست مقاومت فشاری ۵,۲ تا ۸,۳ مگاپاسکال و اصطکاکی پستی بیش از ۲۶ کیلوپاسکال برای ماسه های رسی تولید کند. در هر سوراخ، حدود ۱۲,۶ لیتر مواد پلی یورتان تزریق شد. در مجموع ۱۳۰ ستون فوم به قطر ۰,۵۶ متر در این پروژه نصب و هزینه پروژه حدود ۱۷۰ هزار دلار شد [۱۰] (شکل ۲-۷).



شکل ۲-۷: تزریق فوم پلی‌یورتان سخت در داخل لایه‌های ضعیف بستر خاک [۱۰]

در سال ۲۰۱۸ در کشور مالزی برای بهبود مقاومت خاک رس دریایی از روش تثبیت شیمیایی با مواد پلی‌یورتان استفاده شد. افزایش مداوم جمعیت خواستار توسعه زیر ساخت ها در مناطق ساحلی است که دارای ذخایر زیادی از رس دریایی است. وقتی خاک رس دریایی در معرض تغییرات محتوای رطوبت قرار می‌گیرد، با تورم و انقباض قابل توجهی مشخص می‌شود. همچنین ظرفیت تحمل کم و نفوذ پذیری کمتری دارد. مقاومت فشاری محدود نشده بین ۲۵ تا ۵۰ کیلو پاسکال است. این خصوصیات نشان داد که خاک رس دریایی برای استفاده به عنوان خاک زیر پی مناسب نیست. تزریق پلی‌اورتان باعث بهبود مقاومت برشی خاک رس دریایی از ۷۵ کیلو پاسکال به ۲۵۰ کیلو پاسکال (بیش از ۲۳۰ درصد) بهبود شد. این بهبود مقاومت برشی دریایی همچنین باعث کاهش کرنش خاک رس دریایی از ۵٫۱۸ به ۲٫۹۲ درصد شد. این نتیجه نشان می‌دهد که خاک رس دریایی که در شرایط طبیعی خود برای استفاده به عنوان ماده زیر سطح یا به عنوان خاک زیر پی مناسب نیست، می‌تواند با استفاده از پلی‌یورتان به عنوان یک تثبیت کننده بهبود یابد [۳۱].

۲-۵-۴ تزریق جداری ستون فوم فونداسیون دارای خاک آلی

بخشی از بزرگراه کشور کانادا که در فونداسیون آن خاک رس آلی نرم وجود داشت از سال ۲۰۰۲ حدود ۵۰ سانتی متر نشست داشته است. دو الگو از شبکه جداگانه برای تزریق فوم سایت با استفاده از فاصله ۱،۲ متر و ۲،۴ متر در مرکز انتخاب و اجرا شد. فرآیند ساخت شامل گسترش فوم تزریقی پلی یورتان به داخل کیسه‌های پارچه‌ای بسته‌بندی شده در گمانه‌ها در سراسر منطقه موجب تشکیل ستون فوم به قطر ۰،۵ متر شد. ساخت و ساز در ۱۰ روز کاری بدون ترافیک پایان یافت. پروفیل عمودی سطح زمین پنج بار در طول یک سال مورد بررسی قرار گرفت که نشست بسیار کم رخ داد [۳۲].

۲-۵-۵ بالا آمدن سطوح بتنی جاده توسط دوغاب پلی یورتان

بخشی از سطح جاده آنتونی هندی درایو که یک مسیر حلقه‌ای بزرگ در اطراف ادمونتون، آلبرتا است در طول سال‌ها دچار نشست شده بود. روش‌های مختلفی برای حل مسائل نشست، از جمله دوغاب سیمان و تزریق پلی یورتان وجود دارد. با توجه به ویسکوزیته کم، زمان واکنش سریع و نرخ انبساط زیاد خصوصیات دو مؤلفه، تزریق پلی یورتان به عنوان رویکرد ترجیح داده شده انتخاب شد. این روش تزریق در کمترین زمان اجرا شد.

مواد ایزو سیانات و پلی ال با نسبت ۱ به ۱ مخلوط شدند که با تنظیم دمای هر دو مؤلفه در ساخت فوم با کارایی بالا اهمیت دارد. در هر صفحه دال بتنی ۶ سوراخ حفاری شده وجود داشت و دوغاب پلی یورتان تزریق شد که از پایین‌ترین نقطه دال با یک تزریق ۵-۱۰ ثانیه شروع شد. در هر مکان با یک مکث کوتاه بین تزریق‌ها که معمولاً بیش از ۵ ثانیه نبود چندین تزریق انجام شد. مکث در نظر گرفته شده بدین خاطر بود که اجازه دهد تا فوم به طور جزئی گسترش و فضای خالی را پر کند به طوری که تزریق‌های بعدی محدود و حجم فوم استفاده شده مدیریت شود. هنگامی که حفره‌ها زیر دال پر شدند، فوم در حال گسترش مانند یک بالابر هیدرولیکی عمل کرد و شروع به بالا بردن دال کرد. همان‌طور که دال بالا می‌رفت، تزریق

کوتاه‌تر با فواصل کوتاه‌تر مورد استفاده قرار گرفت تا لبه دال را به ارتفاع مطلوب تنظیم کند. نقاط تزریق متعددی برای توزیع مساوی بالآمدگی استفاده شد. در این روش در عرض نیم ساعت یک صفحه دال بتنی توانست به سطح هدف بالا بیاید و کارکنان روزانه ۱۲ تا ۲۰ دال را تنظیم کنند تا به راحتی به زمان بندی پروژه‌ها برسند. نتایج در این روش نشان داد که با توجه به سرعت انبساط بالا و خواص مواد آب‌گریز، تمام رطوبت و آب از زمین خارج شد [۱۰].

۲-۵-۶ بررسی آزمایشگاهی فوم پلی‌یورتان

آقای بزی^۱ و همکاران (۲۰۰۸) از دانشگاه نیوکاسل استرالیا با استفاده از اسکن میکروسکوپ الکترونی و آزمایش مکانیکی، ریز ساختار و خصوصیات فیزیکی فوم پلی‌یورتان تزریق شده گسترش یافته در سطح زمین را مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه به منظور ارزیابی تفاوت خواص هیدرولیکی و مکانیکی بین فوم‌های تشکیل شده در زمین و فوم‌های تولید شده در آزمایشگاه انجام شد. فوم ناهمگن را با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی اسکن و خواص هیدرولیکی و مکانیکی آن از یک سری آزمایش‌های مقاومت فشاری محدود نشده و آزمایش‌های نفوذپذیری ارزیابی شد.

از اسکن الکترون تصاویر میکروسکوپ، به نظر می‌رسید که اندازه سلول اصلی در محدوده‌های ۰,۱ میلی‌متر تا ۰,۴ میلی‌متر باشد و سلول‌ها شکل چندوجهی نامنظم داشته باشند. نتایج نشان داد که آزمایش‌های انجام شده بر روی مواد همگن شکل گرفته در آزمایشگاه نماینده فومی که در زمین تولید می‌شود نبود. برای نمونه‌هایی که در حدود یک متر عمق داشتند، چگالی فوم به‌طور طبیعی بین ۸۵ تا ۱۴۵ کیلوگرم بر مترمکعب متغیر بود. چگالی با سطح محصور شدگی افزایش یافت به‌طوری‌که رزینی که در عمق بیشتری تزریق شد، چگالی بیشتری داشت [۳۳].

^۱ Bozzi

در پژوهش آزمایشگاهی آقای کمورلو^۱ (۲۰۱۵) از دانشگاه کارادنیز شهر ترابزون ترکیه فوم‌های پلی‌یورتان که از واکنش شیمیایی پلی‌ال و ایزوسیانات تشکیل شد بعد از مخلوط شدن در عرض یک دقیقه در سه جهت منبسط شدند، پلی‌یورتان با نسبت‌های مختلف وزنی پلی‌یورتان به خاک (۷/۱ و ۸/۱ و ۹/۱) در مصالح سنگی (خاک ماسه سیلتی خشک) مخلوط شد و سپس با دستگاه مقاومت فشاری مقاومت آن مورد آزمایش قرار گرفت.

فوم پلی‌یورتان مورد استفاده در حالت آزاد دارای چگالی ۶۵ کیلوگرم بر مترمکعب، مقاومت فشاری ۸۰۰ کیلوپاسکال و مدول الاستیسیته ۲۵ مگاپاسکال بوده و چگالی مواد اولیه فوم (پلی‌ال و ایزوسیانات) تقریباً مشابه آب بود. برای تهیه نمونه‌های پلی‌یورتان در خاک ابتدا پلی‌ال و ایزوسیانات را با نسبت وزنی یک به یک درون ظرف مخلوط کرده و سپس با شروع فرایند پلیمریزاسیون خاک خشک را بر روی مواد افزوده شد. در هنگام انبساط مایع با یک قاشق مواد را تا زمان مرحله ژل شدن مخلوط شدند. ۱۵ نمونه‌های استوانه‌ای با نسبت‌های مختلف وزنی در سه گروه با نسبت پلی‌یورتان به خاک (۷/۱ و ۸/۱ و ۹/۱) و نسبت طول به قطر ۲ جهت انجام آزمایش مقاومت فشاری آماده شد.

با افزایش در صد مقدار پلی‌یورتان در مخلوط، مقادیر مقاومت فشاری از نمونه‌های خاک به‌سازی شده با پلی‌یورتان به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت. نتایج آزمایش مقاومت فشاری و وزن مخصوص نمونه‌ها در جدول (۲-۲) آورده شده است.

جدول ۲-۲: مقاومت فشاری و وزن مخصوص خاک مخلوط شده با پلی‌یورتان [۳۴]

نسبت وزنی پلی‌یورتان به خاک	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	وزن واحد حجم (کیلونیوتن بر مترمکعب)
۷/۱	۴,۲۲	۷,۱۵
۸/۱	۳,۴۵	۷,۰۸

^۱ Komurlu

۹/۱	۳,۱	۶,۹۵
-----	-----	------

از آنجایی که قیمت یک کیلوگرم محصول فوم پلی‌یورتان مورد استفاده در مطالعه آزمایشی ۲ دلار آمریکا بود، هزینه مواد را می‌توان ۱۶۰ دلار در هر مترمکعب در نظر گرفت [۳۴].

۲-۵-۷ تزریق رزین پلی‌یورتان در خاک‌های رسی

آقای حسین اسداللهی در کشور فرانسه در سال ۲۰۱۸ تأثیر شکل‌گیری تزریق رزین پلی‌یورتان در خاک‌های رسی را بررسی کرد که باعث تراکم خاک و افزایش ظرفیت باربری آن شد. این روش معمولاً در تعمیر ساختمان‌های آسیب‌دیده در حضور خاک‌های حساس با فونداسیون سطحی سازگار است. یک ساختمان مسکونی به علت خشت‌های رسی خرده شده در فونداسیون دچار نشست شد؛ چهار حس‌گر فیبر نوری در جهت زاویه‌های مختلف ساختمان به منظور اندازه‌گیری کرنش محلی در طی فرآیند تزریق نصب شد. این حس‌گرها در حالت دینامیکی با مراحل زمان اندازه‌گیری در هر ۲۰ میلی‌ثانیه با وضوح ۲۰ میکرومتر و در چهار زاویه مختلف ساختمان نصب شدند. مقاومت دینامیکی خاک در محل قبل و پس از پردازش توسط آزمون پاندا مورد بررسی قرار گرفت. این روش نظارت این امکان را فراهم کرد تا یک حد برای تزریق رزین و جلوگیری از هرگونه آسیب اضافی به سازه تعیین گردد. نتایج آزمون پاندا در این نقطه نشان‌دهنده بهبود قابل‌توجهی از مقاومت دینامیکی در ۰,۶ متر از مشخصات خاک بود اما مقاومت دینامیکی از عمق ۰,۶ تا ۲ متر کاهش یافت. آزمایش بعدی تزریق سریع‌تر از تزریق قبلی متوقف شد. دیوار در این نقطه بالا آمد و خاک در اولین متر بهبود یافت. تزریق فوم زیر خاک فونداسیون منجر به بستن ترک در محدوده ۰,۵ میلی‌متر شد [۳۵].

۲-۵-۸ کاربرد ماستیک پلی‌یورتان در کاهش رمبندگی

در ایران خانم سهرابی شکفتی و آقای اسکندری در دانشگاه شهید چمران اهواز از ماستیک تک جزئی

پلی‌یورتان درزگیر الاستیک برای کاهش رمبندگی خاک استفاده کردند. خاک رمبنده مورد مطالعه از شهر حمیدیه نزدیک اهواز بود. ابتدا آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ، تراکم، برش مستقیم و تعیین شاخص رمبندگی انجام گرفت. در مرحله بعد با در صدهای اختلاط مختلف پلی‌یورتان در خاک رمبنده ترکیب شد که نتایج نشان داد مواد پلی‌یورتان شاخص رمبندگی در درصد اختلاط ۵٪ به میزان ۹۲٪ کاهش یافت [۳۶].

۲-۶ کاربردهای پلی‌یورتان در صنعت

امروزه پلی‌یورتان‌ها به‌عنوان یکی از متنوع‌ترین مواد در صنایع مختلف استفاده شده است. از فوم نرم^۱ در تشک مبلمان و صندلی استفاده می‌شود و از فوم سخت^۲ در عایق‌کاری دیوار و سقف می‌توان استفاده نمود (شکل ۲-۸).

پلی‌یورتان یک ماده بی‌نظیر است که خاصیت الاستیکی لاستیک همراه با سختی و مقاومت فلز را هم‌زمان فراهم می‌کند. از آنجایی که پلی‌یورتان در دامنه وسیعی از سختی موجود است، به مهندسان این امکان را می‌دهد که لاستیک، پلاستیک و فلزات را با این مواد با خواص مقاومت سایشی و خواص فیزیکی منحصر به فرد جایگزین کرد. بسیاری از کاربردها با استفاده از مواد پلی‌یورتان از لحاظ زمانی یا هزینه در مقایسه با مواد دیگر به‌صرفه است [۳۷].

^۱ Soft foam

^۲ Rigid foam



شکل ۲-۸: کاربرد پلی یورتان در صنعت [۳۷]

۲-۶-۱ فوم نرم پلی یورتان

این فوم از نظر ساختاری از نوع فوم های سلول باز هستند. به طوری که هوا به راحتی از داخل آن ها عبور می کند، فوم نرم جاذب صوت بوده و ضریب هدایت حرارتی پائینی دارند، فوم های نرم پلی یورتان در صورتی که در معرض نور فرابنفش خور شید قرار گیرند، به سرعت رنگ خود را از دست می دهند. این فوم ها وقتی در شرایط دمایی تحت بارهای فشاری قرار می گیرند تغییر شکل های ماندگار از خود نشان می دهند.

از جمله کاربردهای فوم های نرم می توان به موارد ذیل اشاره کرد:

صنایع مبیل خانگی و اداری، صندلی خودرو، زین موتورسیکلت، عایق صوتی موتور خودرو، صنایع اسباب بازی و دکوراسیون، فیلترهای هوا، کفی داخل کفش، صنایع پوشاک و ...

کاربردهای فوم نرم پلی یورتان در صنعت بسیار گسترده است. این فوم می تواند در شکل ها و درجه سفتی متنوعی تولید شود. به علاوه، فوم نرم دارای وزن سبک (دارای دانسیته بین ۳۵ تا ۵۵ کیلوگرم بر

مترمکعب)، بادوام و راحت است. فوم نرم پلی‌یورتان درجه‌های مختلفی را شامل می‌شود از فوم نرم بلوکی (ابر و اسفنج^۱) برای تولید فوم مبلی، تشک، بالشتک، پشت سری، تزئینات داخلی خودرو، آستر فرش و پارچه و بسته‌بندی استفاده می‌شود. فوم منعطف قالبی (فوم سرد) عمدتاً در تولید صندلی خودرو، هواپیما و قطار و همچنین در صندلی مبلمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. فوم‌های قالبی نرم پلی‌یورتان ویسکوالاستیک کاربرد مناسبی به عنوان عایق صدا (عایق صوت) دارد [۳۷].

۲-۶-۲ فوم سخت پلی‌یورتان

فوم‌های سخت پلی‌یورتان در اواخر دهه ۱۹۴۰ به میزان بسیار کم در ساختارهای ساندویچ پانل به کار گرفته شدند. از سال ۱۹۶۰ با ورود ایزو سیانات MDI به این صنعت فوم‌های سخت پلی‌یورتان به عنوان عایق‌های حرارتی در تولید قطعات مختلف مورد استفاده قرار گرفتند. این فوم حاوی درصد بالایی سلول بسته می‌باشد. امروزه فوم‌های سخت پلی‌یورتان از دانسیته ۱۵ تا ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب تولید می‌شوند. فوم‌های سخت پلی‌یورتان به دلیل پایین بودن ضریب هدایت حرارتی نسبت به سایر فوم‌ها و مواد پلیمری برای کاربردهای عایق کاری بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. از فوم‌های سخت پلی‌یورتان با دانسیته بالا در تولید محصولات دکوراسیونی به عنوان جایگزین چوب استفاده می‌شود.

فوم سخت پلی‌یورتان یکی از محبوب‌ترین، کم‌مصرف‌ترین از لحاظ انرژی، و متنوع‌ترین عایق است. فوم سخت پلی‌یورتان تا حد زیادی مصرف سوخت و هزینه‌های ساخت و تولید را کاهش می‌دهد در حالی که ایمنی و رفاه را افزایش می‌دهد. فوم‌های سخت می‌تواند در داخل دیواره فلز و پلاستیک یخچال‌ها و یا در پشت کاغذ، فلزها و دیگر مواد در پانل‌های عایق در صنعت ساختمان، عایق لوله‌های انتقال نفت و گاز، فوم اسپری، کشتی‌ها، شناورها و بسته‌بندی استفاده شود. فوم سخت پلی‌یورتان کاربردهای وسیعی در صنعت خودرو سازی جهت تولید داشبورد، ضربه‌گیر خودرو و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد. این محصول در

^۱ slab stock

انواع تزریقی، ریختگی و پاششی ارائه می‌گردد.

۲-۶-۱ مزایای فوم سخت

عایق‌بندی: این فوم با ضخامت معین در مقایسه با هر نوع ماده تجاری دیگر در مقابل نفوذ و انتقال گرما و سرما مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد و مقاومت حرارتی خوبی نیز دارد.

سبکی وزن: این فوم سخت را می‌توان در ساختارهای ساندویچی به کار برد قطعاتی با مقاومت زیاد و وزن کم تولید کرد.

قابلیت قالب‌گیری مخلوط منبسط شده پلی‌یورتان قادر است شکل‌های پیچیده و خلل و فرج قطعات مورد استفاده را پر کند.

چسبندگی فوم‌های سخت پلی‌یورتان در خلال تشکیل با بسیاری از مواد معمولی مانند فلزات کاغذ چوب سنگ پلاستیک‌ها و شیشه‌ها پیوند تشکیل می‌دهد فوم‌های برده شده نیز می‌تواند به وسیله چسب‌های معمولی به قطعات دیگر متصل شود.

سبکی و شناور بودن: به علت ساختار بسته سلولی، فوم‌های سخت یورتان جذب آب بسیار کمی دارد. فوم با چگالی ۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب قادر است حدود ۲۵ برابر وزن خودش را در آب نگه دارد. تولید آسان و یک مرحله‌ای: تولید برق با استفاده از مواد مایع و در یک مرحله صورت می‌گیرد شایان ذکر است این که پخت مجدد یا اقدامات دیگر در مورد آن لازم نیست.

قابلیت جذب انرژی فوم‌های سخت یورتان قابلیت جذب انرژی خوبی دارند در نتیجه برای جذب صدا و ارتعاشات مناسب بوده و به عنوان ضربه‌گیر نیز مصرف می‌شود [۱۴].

۲-۶-۳ فوم چوب پلی‌یورتان

در سالیان اخیر استقبال از فوم پلی‌یورتان سخت بسیار بالا بوده و قطعات تولید شده با استفاده از این نوع فوم با سرعت در حال گسترش بازار و استفاده عمومی می‌باشند. این نوع فوم سخت پلی‌یورتان در بازار

تجاری ایران با نام فوم چوب و در بازار جهانی با نام Wood imitation Polyurethane Foam شناخته می‌شوند.

۲-۶-۳-۱ ویژگی‌های فوم چوب پلی‌یورتان

– خواص فیزیکی و مکانیکی مناسب

– فرایند تولید و قالب‌گیری ساده

– سطح ظاهری مناسب

– وزن پایین قطعات تولیدشده

– سرعت تولید بالا

حالت مایع مواد اولیه فوم پلی‌یورتان موجب قالب‌گیری آسان قطعات پیچیده آرایشی و تکرارپذیری تولید یکسان این قطعات می‌گردد. با توجه به شکل ظاهری، خواص موردنیاز، دانسیته فوم و اندازه قطعات، قالب‌های مورد استفاده در تولید فوم چوب پلی‌یورتان از جنس آلومینیوم یا فولاد، لاستیک یا سیلیکون، رزین اپوکسی و یا سایر مواد مورد استفاده در صنایع قالب‌سازی انتخاب می‌گردد. تزریق این نوع فوم نیز با توجه به حجم تولید و اندازه قطعات به اشکال تزریق دستی، تزریق با دستگاه فشار پایین و تزریق با دستگاه فشار بالا صورت می‌پذیرد.

مهم‌ترین ویژگی مورد توجه در فوم چوب پلی‌یورتان دانسیته آن است. با توجه به خواص فیزیکی و مکانیکی مورد انتظار از فوم چوب پلی‌یورتان، شرکت‌های تولیدکننده مواد اولیه دانسیته این نوع فوم را بین ۶۰ تا ۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب تنظیم می‌نمایند. لازم به ذکر است که با بالا رفتن دانسیته خواص فیزیکی و مکانیکی افزایش یافته و از سوی دیگر وزن قطعات تولیدی نیز بیشتر خواهد شد.

این فوم با ویژگی‌های منحصربه‌فرد شامل سبکی، قابلیت قالب‌گیری و تزریق، قابلیت ماشین‌کاری و همچنین ضد آب بودن جایگاه ویژه‌ای به انواع قطعات تزئینی، آرایشی و مبلمان دارد [۳۸].

۷-۲ مراحل تشکیل فوم پلی یورتان



شکل ۲-۹: مراحل تشکیل فوم پلی یورتان [۳۷]

۲-۷-۱ زمان کرمی شدن^۱

یکی از پارامترهای فرآیندی گزارش شده در اطلاعات فنی مواد اولیه سیستم‌های پلی یورتان، زمان شروع فوم کردن مخلوط پلی ال و ایزوسیانات از لحظه اختلاط اولیه آن‌ها، می‌باشد که زمان کرمی شدن نامیده می‌شود و با توجه به سرعت آن معمولاً با واحد ثانیه گزارش می‌شود (شکل ۲-۹).

۲-۷-۲ زمان ژل شدن^۲

با توجه به اینکه پلی یورتان حاصل از ترکیب پلی ال و ایزوسیانات یک پلیمر ترموست (گرماسخت) می‌باشد و در این نوع از پلیمرها ویژگی اصلی وجود پیوندهای عرضی در ساختار آن‌هاست. مدت زمان تشکیل اولین پیوندهای عرضی در ساختار پلی یورتان در حال شکل‌گیری از زمان آغاز اختلاط پلی ال و ایزوسیانات، زمان ژل شدن (ژل تایم) نامیده می‌شود که پارامتر بسیار حساس و مهم در فرایند تولید پلی یورتان است. زمان ژل شدن نیز همانند زمان کرمی شدن با واحد ثانیه گزارش می‌شود (شکل ۲-۹).

^۱ Cream Time

^۲ Gel Time

۲-۷-۳ زمان خاتمه رشد^۱

این پارامتر به مدت زمان آغاز اختلاط تا اتمام رشد سامانه فوم پلی یورتان تشکیل شده مرتبط می باشد و معمولاً در سیستم فوم های پلی یورتان با واحد ثانیه گزارش می شود (شکل ۲-۹).

۲-۷-۴ دانسیته آزاد^۲

پارامتر دانسیته آزاد پلی یورتان که با واحد کیلوگرم بر مترمکعب گزارش می شود. به وزن واحد حجم سامانه پلی یورتان تشکیل شده بدون فرایند قالب گیری گویند [۳۴].

^۱ Rise Time

^۲ Free Rise Density

فصل سوم

روش تحقیق

۳-۱ مقدمه

در این فصل به مراحل تشکیل فوم پلی‌یورتان، جزئیات آزمایش‌های مقاومت فشاری انجام شده با دستگاه یونیورسال به منظور یافتن بهترین فوم پلی‌یورتان از نظر مقاومت فشاری و افزایش انبساط و همچنین برای بررسی پارامترهای تحکیم تک بعدی (پارامتر شاخص فشردگی C_c ، شاخص تراکم C_s و ضریب تحکیم C_v) از آزمایش تحکیم مطابق استاندارد ASTM D2435 انجام می‌شود. این آزمایش برای تعیین مقدار و سرعت تحکیم یک خاک در شرایط محصور شده جانبی با زهکشی قائم در معرض بارگذاری تنش کنترل شده است. سپس با استفاده از دستگاه مقاومت فشاری نیروی بالا زدگی فوم پلی‌یورتان به دست می‌آید تا مشخص شود تا چه میزان تنشی می‌توان از فوم پلی‌یورتان استفاده کرد.

۳-۲ آماده‌سازی نمونه آزمایشگاهی

۳-۲-۱ هدف

هدف از تهیه این پژوهش تولید فوم پلی‌یورتان جهت بهسازی خاک‌های دچار نشست شده و دال‌های فرورفته می‌باشد. بدین منظور فوم باید دارای مقاومت فشاری بالا و در عین حال بیشترین میزان انبساط را داشته باشد. بدین ترتیب از ترکیب پلی‌ال با دانسیته‌های مختلف و ایزوسیانات فوم‌هایی به شکل استوانه‌ای تولید کرده و مورد آزمایش مقاومت فشاری و تحکیم قرار داده می‌شود.

۳-۲-۲ روش انجام کار

۱. جداره‌های قالب استوانه‌ای شکل ته بسته را به طور کامل با واکس جداکننده فوم آغشته کرده تا فوم به بدنه قالب نچسبد و راحت بیرون بیاید.
۲. پلی‌ال با نسبت وزنی مشخص توسط ترازو با دقت میلی گرم وزن کرده و درون قالب ریخته می‌شود.
۳. ایزوسیانات را بعد از وزن کشی به درون قالب اضافه می‌شود. (شکل ۳-۱)

۴. قالب را زیر همزن برقی با سرعت بالا قرار داده سپس کرنومتر روشن می‌شود.

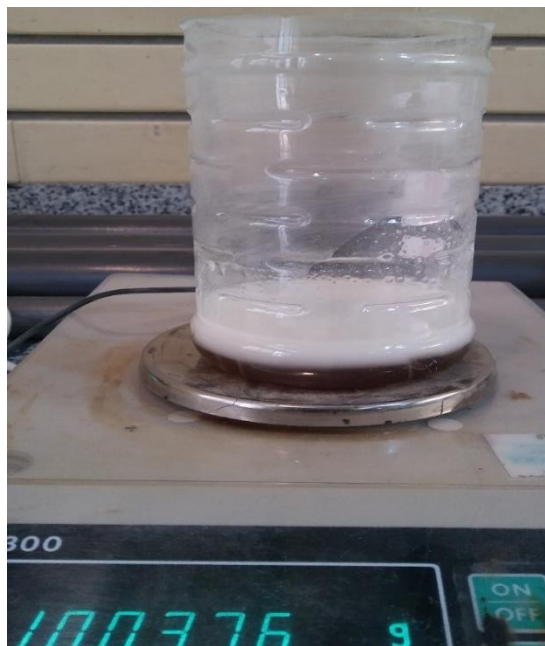
۵. زمان مراحل تشکیل فوم (کرم تایم، ژل تایم و اتمام رشد) را با کرنومتر اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۲-۹).

۶. فوم را از قالب بیرون آورده و قالب را با متیلن کلراید (حلال پلی‌یورتان) تمیز کرده و نمونه جهت آزمایش مقاومت فشاری را با استفاده از کمان اره طوری جدا کرده که نسبت طول به قطر آن تقریباً ۲ باشد و سپس سطوح پایین و بالای آن با سمباده صاف می‌شود. (شکل ۲-۳)

آزمایش‌های زیادی با انواع ایزوسیانات و پلی‌ال‌های با دانسیته متفاوت موجود در بازار انجام داده که بررسی و تحلیل هر آزمایش در فصل چهارم توضیح داده شده است.



شکل ۲-۳: برش استوانه‌ای فوم با کمان اره و سمباده



شکل ۲-۱: اندازه‌گیری پلی‌ال و ایزوسیانات

۳-۳ درصد رطوبت طبیعی فوم

آزمایش تعیین درصد رطوبت طبیعی فوم طبق ASTM D2216، نمونه در گرمخانه تا اندازه‌ای خشک

می‌شود که وزن آن ثابت بماند. کاهش وزن نمونه مربوط به از دست دادن آب است. درصد رطوبت به صورت نسبت وزن آب در نمونه به وزن نمونه خشک محاسبه می‌شود.

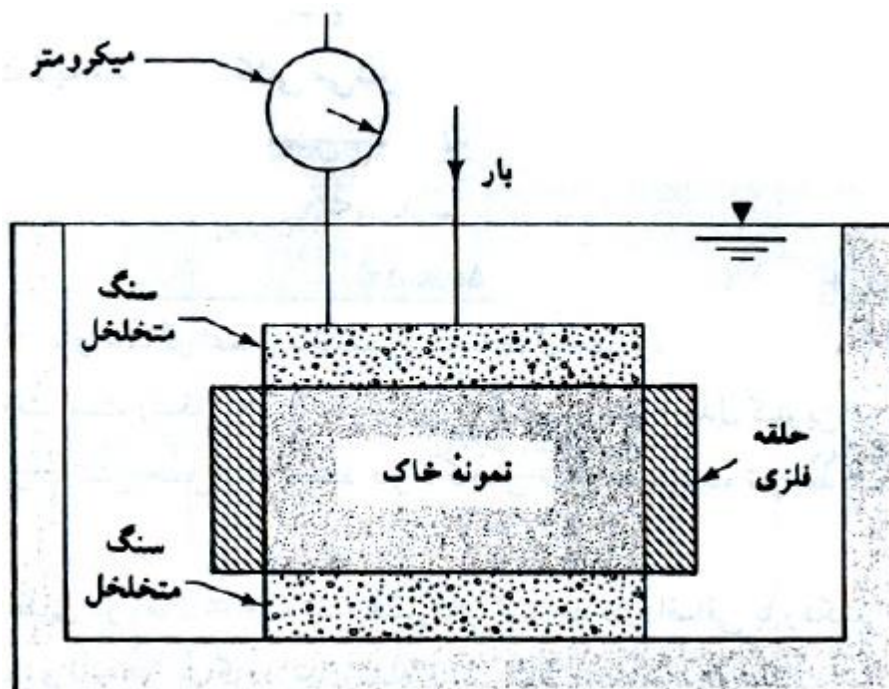
۳-۴ چگالی ویژه فوم

هدف از این آزمایش تعیین نسبت بین واحد حجم دانه‌های فوم در دمای مشخص به وزن حجم آب مقطر در همان دما می‌باشد. به همین منظور نمونه فوم که از دستگاه تحکیم بعد از بارگذاری و باربرداری بیرون آورده و داخل گرمخانه قرار داده تا رطوبت فوم خشک شود. سپس فوم را به شکل استوانه برش زده و با کولیس حجم آن اندازه‌گیری می‌شود. سپس وزن فوم را با ترازو دقیق (دقت میلی‌گرم) ثبت کرده و با داشتن وزن و حجم چگالی ویژه آن به دست می‌آید.

۳-۵ آزمایش تعیین پارامترهای تحکیم یک بعدی

۳-۵-۱ هدف

این آزمایش به منظور تعیین مقدار و سرعت تحکیم یک فوم پلی‌یورتان در شرایط محصورشده جانبی و زهکشی قائم در حین بارگذاری با تنش کنترل شده انجام شد. در واقع، در آزمایش تحکیم یک بعدی، از ابزار ادومتری برای تعیین ویژگی‌های مهندسی خاک با اندازه‌گیری مقدار تحکیم برای نمونه خاک استفاده شد. آزمایش‌های ادومتری با اعمال بارهای مختلف به نمونه خاک و اندازه‌گیری پاسخ تغییرشکل انجام می‌شود. در پژوهش حاضر، هدف از انجام این آزمایش مشاهده تاثیر فوم پلی‌یورتان به عنوان ماده جدید برای بهبود پی و آزمایش میزان بهبود خاک با استفاده از قدرت و قابلیت فشردگی فوم پلی‌یورتان است.



شکل ۳-۳: شماتیک دستگاه تحکیم (ادومتری) [۳۹]

۳-۵-۲ تجهیزات آزمایش

آزمایش فیزیکی ویژگی‌های ژئوتکنیکی و تحکیم خاک بر اساس استاندارد ASTM D 2435 انجام شد [۴۰]. تا محتوی رطوبتی، تراکم ذرات، حداکثر تراکم خشک و ویژگیهای فشردگی خاک، تعیین شود. قابلیت فشردگی خاک با انجام آزمون تحکیم با استفاده از ابزار و تجهیزات ادومتری طبق شکل ۳-۳ انجام شد. این تجهیزات قابلیت اعمال بار برای مدت طولانی با دقت نیم درصد بار مورد نظر را داشته و همچنین بار را بدون ضربه قابل توجه به مقدار مشخصی افزایش داد. میزان بار در هر مرحله به ترتیب از ۲۵ کیلوپاسکال، ۵۰ کیلوپاسکال، ۱۰۰ کیلوپاسکال، و ۲۰۰ کیلوپاسکال، افزایش یافت.

۳-۵-۲-۱ قالب تحکیم

این قالب نمونه را در داخل یک حلقه که دو طرف آن سنگ های متخلخل قرار گرفته است نگهداری می کند. قطر داخلی حلقه باید با دقت ۷۵ هزارم میلی متر اندازه گیری شود. قالب تحکیم همچنین باید قابلیت لازم

برای مستغرق کردن نمونه انتقال بار قائم به سنگ های متخلخل و اندازه گیری تغییرات ارتفاع نمونه را داشته باشد حداقل قطر نمونه باید ۵۰ میلی متر و حداقل ارتفاع آن باید ۱۲ میلی متر باشد ارتفاع نمونه باید از ۱۰ برابر قطر بزرگترین سنگدانه بزرگتر باشد (شکل ۳-۳).

۳-۵-۲ سنگ های متخلخل

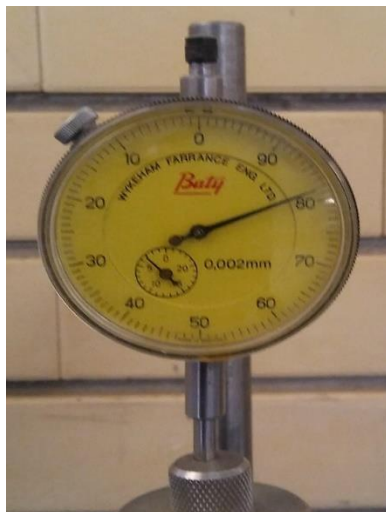
سنگ متخلخل از جنس کاربید سیلیکون، اکسید آلومینیوم یا مصالح غیر خورنده مشابه است. دانه های سنگ متخلخل باید به اندازه ای کوچک باشد که مانع نفوذ خاک به منافذ آن ها شود. قطر سنگ متخلخل فوقانی باید در حدود ۰,۲ میلی متر تا ۰,۵ میلی متر کمتر از قطر داخلی حلقه دور نمونه باشد. سنگ های متخلخل باید تمیز، فاقد ترک، رنگ پریدگی و ناصافی باشد. سنگ های متخلخل قبل از اولین استفاده باید به مدت ۱۰ دقیقه در آب جوشانده شود و سپس در آب باقی بماند تا به دمای محیط برسند (شکل ۳-۴).



شکل ۳-۴: سنگ متخلخل و قالب تحکیم

۳-۲-۵-۳ گيج‌های تغيير مکان

برای اندازه‌گیری تغيير ضخامت نمونه نیاز به گيج‌های با دقت 0.002 میلی‌متر است (شکل ۵-۳).



شکل ۵-۳: کرنش سنج با دقت 0.002 میلی‌متر

۳-۲-۵-۴ تجهیزات فرعی



شکل ۳-۷: گرمخانه شکل



شکل ۳-۶: ترازو میلی‌گرمی

زمان سنج با دقت یک ثانیه، آب مقطر یا آب فاقد املاح، کاردک، اره سیمی، ترازو، گرمخانه (شکل ۳-۶ و شکل ۳-۷)

۳-۵-۳ روش آزمایش تحکیم

بعد از آماده‌سازی بهترین نمونه فوم که مقاومت فشاری و درصد انبساط بالا داشته باشد به‌اندازه حلقه فلزی رینگ تحکیم از فوم جدا کرده و وزن آن را با ترازو با دقت میلی‌گرم اندازه‌گیری کرده و داخل حلقه فلزی طوری قرار داده می‌شود که از حرکت جانبی جلوگیری کند. دو سنگ متخلخل یکی روی نمونه و دیگری در زیر آن قرار داده می‌شود قطر نمونه‌ها ۷۵ میلی‌متر و ضخامت آن ۱۹ میلی‌متر می‌باشد. بار از طریق اهرمی به‌صورت محوری با گام‌های تنش کل بر نمونه وارد می‌شود (بار واقعی ۱۰ برابر وزنه‌ای است که روی دستگاه تحکیم گذاشته می‌شود) و تراکم با میکرومتر ساعتی اندازه‌گیری می‌شود. در طول آزمایش نمونه از آب اشباع هست. هر گام بارگذاری تا زمانی که اضافه فشار آب حفره‌ای کاملاً پراکنده شود نگه داشته می‌شود. معمولاً هر بار تا ۲۴ ساعت وارد می‌شود سپس بار را دو برابر نموده و اندازه‌گیری تراکم را ادامه داده می‌شود. در طی فرایند تحکیم مقدار نشست نمونه قرائت شده و از این اطلاعات برای تعیین ارتباط بین تنش مؤثر و نسبت منافذ یا کرنش استفاده می‌شوند. همچنین با ارزیابی ضریب تحکیم می‌توان سرعت تحکیم را ارزیابی نمود.

از نتایج آزمایش تحکیم برای تخمین مقدار و سرعت نشست کل و تفاضلی خاک‌ریزها و سازه‌ها استفاده می‌شود. تخمین این موارد در طراحی سازه‌های مهندسی و ارزیابی عملکرد آن‌ها بسیار مهم است. نتایج این آزمایش شدیداً از دست‌خوردگی نمونه تأثیرپذیر است. نتایج آزمایش تحکیم تابعی از مقدار گام بارگذاری است. به‌صورت مرسوم در هر گام بارگذاری مقدار بار دو برابر می‌شود به‌گونه‌ای که همیشه نسبت افزایش بار برابر یک است. همچنین نتایج آزمایش تحکیم تابعی از مدت‌زمان تداوم هر گام بارگذاری است. به‌طور مرسوم مدت زمان هر گام بارگذاری ۲۴ ساعت است [۴۱].

۳-۵-۴ آماده سازی نمونه

وزن، ارتفاع و قطر حلقه د ستگاه تحکیم اندازه گیری و نمونه ها را در داخل حلقه تحکیم قرار داده می شود. بالا و پایین نمونه با لبه حلقه دور نمونه توسط اره سیمی و کاردک تیز هم تراز می شود سپس وزن نمونه مرطوب همراه با حلقه اندازه گیری کرده و وزن مخصوص نمونه محاسبه می کنیم قسمتی از فوم را برای اندازه گیری درصد رطوبت برداشته می شود و داخل گرمخانه قرار داده می شود تا رطوبت آن از بین برود. پس از قرار دادن نمونه در حلقه وزن نمونه مرطوب همراه حلقه اندازه گیری می شود. با معلوم بودن وزن اولیه حلقه وزن خالص نمونه مرطوب مشخص می گردد. ارتفاع اولیه نمونه با متوسط گیری بر روی چهار نقطه مسطح از نمونه با کولیس محاسبه می شود با معلوم بودن قطر و ارتفاع اولیه نمونه حجم اولیه نمونه محاسبه می شود.

۳-۵-۵ انجام آزمایش

به ترتیب سنگ متخلخل مرطوب پایین نمونه، سپس نمونه با حلقه دور آن و قطعه نگه دارنده حلقه و سنگ متخلخل بالا و کلاهک صلب آن در داخل قالب تحکیم قرار داده می شود. (شکل ۳-۴) در قالب تحکیم آب ریخته شد تا نمونه غوطه ور شده و اشباع باقی بماند لوله متصل به صفحه پایه باید کاملاً از آب پر شده و در طول آزمایش پر از آب باقی بماند. پس از ۲۴ ساعت که نمونه اشباع شد تحکیم سنج را روی دستگاه اعمال بار قرار داده می شود. گیج (عقربه مندرج) تعیین تغییر شکل قائم را برای اندازه گیری مقدار نشست فوم روی تحکیم سنج قرار داده می شود. در ابتدای کار عقربه روی صفر قرار می گیرد گیج باید به نحوی کالیبره شده باشد که در هر درجه آن برابر با ۰,۰۰۲ میلی متر نشست داشته باشد. اهرم تحکیم را با دستگاه تراز می شود. بارگذاری نمونه با آرامی و با بار ۰,۲۵۰ کیلوگرم شروع گردیده و در زمان های صفر، ۰,۲۵، ۱,۲، ۲,۵، ۴، ۶، ۹، ۱۲، ۲۵، ۳۰، ۳۶، ۶۰، ۱۲۰، ۲۴۰، ۴۸۰ و ۱۴۴۰ دقیقه (۲۴ ساعت) گیج قائم را قرائت کرده و اعداد خوانده شده را یادداشت می شود.

روز بعد بار نمونه را افزایش داده به نحوی که فشار روی آن دو برابر شود. در زمان‌های ذکر شده اعداد گیج را قرائت می‌شود. در هر گام بارگذاری وزنه‌های ۰,۲۵، ۰,۵، ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۶ کیلوگرمی را روی حلقه قرار داده سپس در هر گام باربرداری وزنه‌های ۸,۴، ۲، ۱ کیلوگرمی و بارگذاری مجدد ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۶ کیلوگرم را روی دستگاه تحکیم قرار داده می‌شود [۳۶].

پس از پایان آزمایش نمونه با حلقه دور آن خارج کرده آب آزاد از روی نمونه و اطراف حلقه پاک می‌شود و وزن نمونه و حلقه اندازه‌گیری می‌شود. با کسر کردن وزن حلقه نمونه، وزن خالص اشباع محاسبه شد همچنین قسمتی از نمونه جهت تعیین رطوبت نهایی و چگالی ویژه در گرمخانه گذاشته شد. با دانستن وزن خشک و محاسبه حجم آن با کولیس چگالی ویژه فوم به دست می‌آید. برای جلوگیری از خطا و دقت محاسبات ۴ بار آزمایش تحکیم تکرار می‌شود.

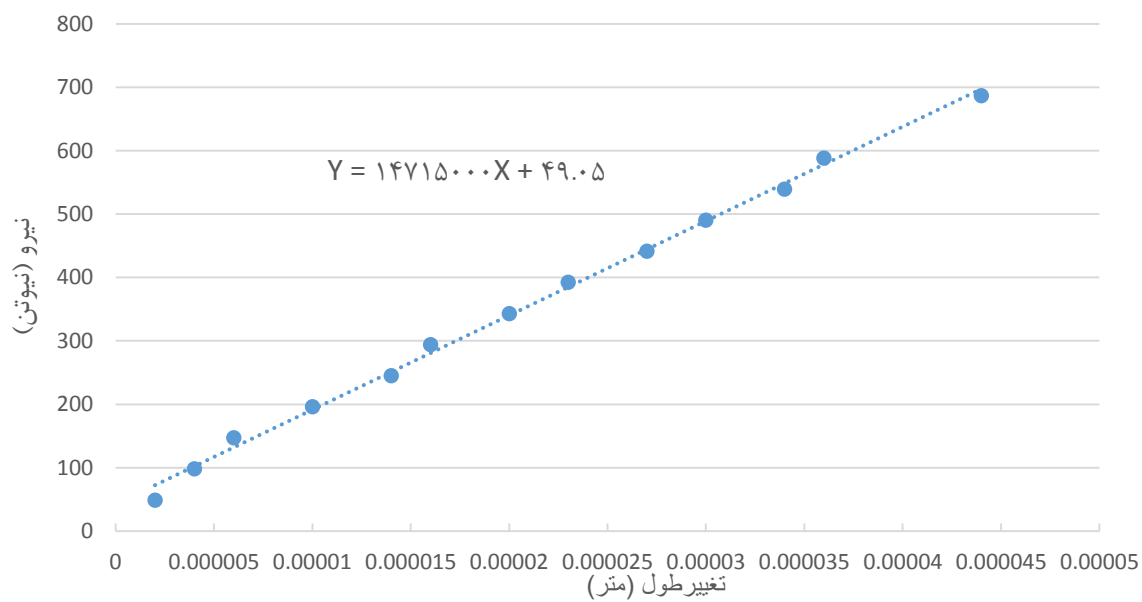
۳-۶ محاسبه نیروی بالا زدگی فوم با دستگاه تک محوری

نیروی بالا زدگی فوم را از دستگاه مقاومت فشاری بدست می‌آید. توان دستگاه ۵۰ کیلو نیوتون و متعلق به شرکت ویکهام فرانس انگلیس است. ابتدا دستگاه را کالیبره کرده تا ضریب سختی رینگ دستگاه بدست آید. بدین جهت وزنه‌های ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ... تا ۷۰ کیلوگرم را روی دستگاه قرار داده و تغییر شکل دستگاه را از روی کرنش سنج خوانده می‌شود. با دانستن نیرو (F) و تغییر شکل (Δ) ضریب سختی رینگ (K) طبق رابطه (۳-۱) به دست می‌آید.

$$F=K*\Delta \quad (۳-۱)$$

جدول ۳-۱: کالیبره کردن دستگاه

Δ (m)	F(N)	Δ (mm)	F(Kg)
۰.۰۰۰۰۰۲	۴۹.۰۵	۰.۰۰۲	۵
۰.۰۰۰۰۰۴	۹۸.۱	۰.۰۰۴	۱۰
۰.۰۰۰۰۰۶	۱۴۷.۱۵	۰.۰۰۶	۱۵
۰.۰۰۰۰۰۱	۱۹۶.۲	۰.۰۰۱	۲۰
۰.۰۰۰۰۰۱۴	۲۴۵.۲۵	۰.۰۰۱۴	۲۵
۰.۰۰۰۰۰۱۶	۲۹۴.۳	۰.۰۰۱۶	۳۰
۰.۰۰۰۰۰۲	۳۴۳.۳۵	۰.۰۰۲	۳۵
۰.۰۰۰۰۰۲۳	۳۹۲.۴	۰.۰۰۲۳	۴۰
۰.۰۰۰۰۰۲۷	۴۴۱.۴۵	۰.۰۰۲۷	۴۵
۰.۰۰۰۰۰۳	۴۹۰.۵	۰.۰۰۳	۵۰
۰.۰۰۰۰۰۳۴	۵۳۹.۵۵	۰.۰۰۳۴	۵۵
۰.۰۰۰۰۰۳۶	۵۸۸.۶	۰.۰۰۳۶	۶۰
۰.۰۰۰۰۰۴۴	۶۸۶.۷	۰.۰۰۴۴	۷۰



شکل ۳-۸: برازش معادله خط کالیبراسیون

فصل چهارم

تفسیر و نتایج آزمایش‌ها

۴-۱ مقدمه

در این فصل تجزیه تحلیل نتایج آزمایشگاهی در سه بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۱-۱ آزمایش مقاومت فشاری

در این بخش به بررسی مقاومت فشاری انواع فوم پلی‌یورتان با پلی‌ال‌هایی با دانسیته‌های متفاوت و افزودن آب به‌عنوان کاتالیزور برای به دست آوردن بهترین فوم از نظر مقاومت فشاری و مقدار انبساط فوم ۱۷ نمونه فوم تولید شده و مورد آزمایش مقاومت فشاری با دستگاه مقاومت فشاری قرار داده می‌شود. در انتها نمودار تنش و کرنش بررسی می‌شود.

۴-۱-۲ آزمایش تحکیم یک بعدی

در این بخش به بررسی پارامترهای ضریب فشردگی و شاخص تورم و سرعت تحکیم نمونه فوم ساخته شده با بهترین ترکیب با استفاده از آزمایش تعیین پارامترهای تحکیم یک بعدی خاک طبق استاندارد ASTM D2435 انجام می‌شود. برای حصول اطمینان از نتایج تحکیم این آزمایش چهار بار تکرار می‌شود.

۴-۱-۳ نیروی بالا زدگی

در این بخش به بررسی نیروی بالا زدگی فوم پلی‌یورتان پرداخته می‌شود که با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری، فوم را درون استوانه ته بسته مخلوط کرده و قبل از آنکه به مرحله کرم شدن برسد شفت هم‌اندازه قطر استوانه روی فوم قرار داده و در زیر گیج دستگاه مقاومت فشاری قرار داده می‌شود و با شروع عملیات منبسط شدن گیج شروع به حرکتی کرده و زمانی که عقربه‌های گیج متوقف شود با دانستن ضریب رینگ حلقه از فصل سوم نیرو بالا زدگی آن به دست می‌آید. برای اطمینان از نتایج آزمایش از قالب استوانه‌ای با قطرهای متفاوت استفاده شده است.

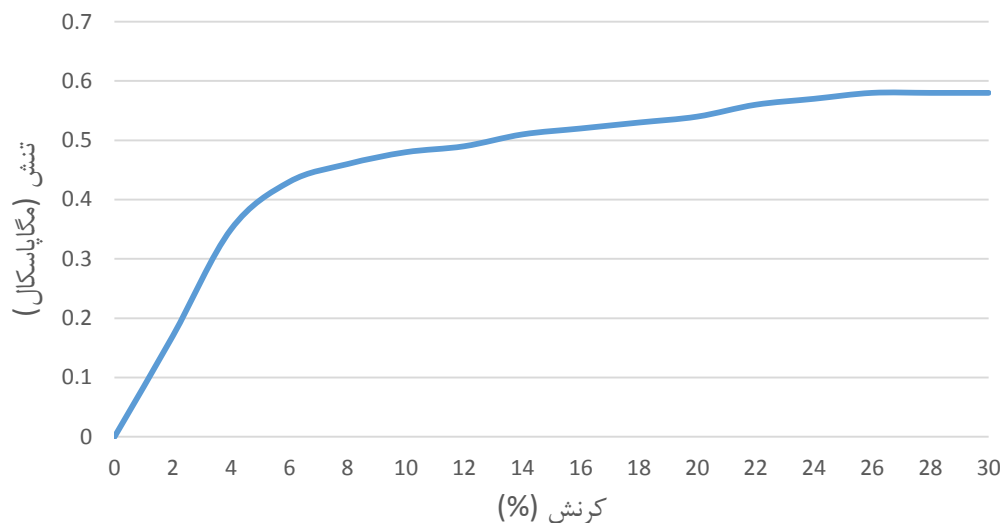
۲-۴ ترکیب ساخت فوم پلی یورتان و آزمایش مقاومت فشاری

۱-۲-۴ ترکیب فوم با نسبت ۵۰٪ ایزوسیانات به ۵۰٪ پلی ال سخت

فوم پلی یورتان با نسبت ۵۰-۵۰ ایزوسیانات به پلی ال سخت ساخته می شود. ۲۵ گرم پلی ال از نوع سخت را با ۲۵ گرم ایزوسیانات در قالب استوانه ای به مدت ۳۰ ثانیه با دستگاه همزن برقی با سرعت بالا مخلوط می شود. زمان کرمی شدن ۳۰ ثانیه بعد از ترکیب دو ماده به وقوع می پیوندد. در زمان ۲ دقیقه و ۱۵ ثانیه اولین تارهای پلی یورتان مشاهده می شود و به مرحله ژل شدن می رسد و در زمان ۲ دقیقه و ۴۵ ثانیه رشد فوم به اتمام می رسد. فوم با این نسبت ۱۰ برابر اندازه حالت مایع خود منبسط می شود. دانسیته آزاد فوم ۴۸ کیلوگرم بر مترمکعب می باشد. سپس با دستگاه یونیورسال آزمایش مقاومت فشاری (شکل ۱-۴) نمونه انجام می گیرد. نتایج حاصل از آزمایش و نمودار تنش- کرنش آن در شکل ۲-۴ مشاهده می شود.



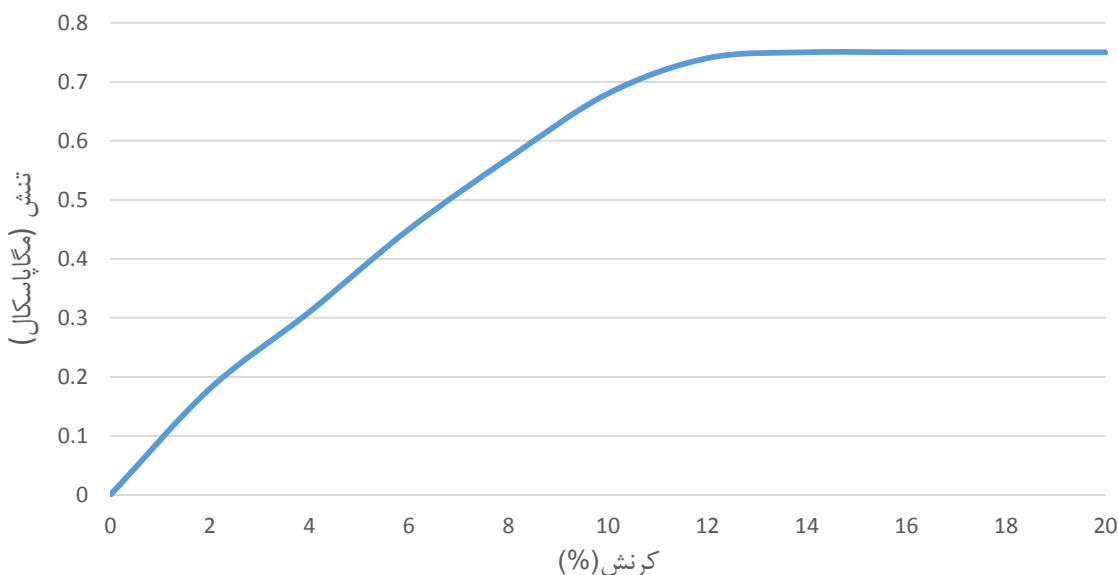
شکل ۱-۴: آزمایش مقاومت فشاری فوم پلی یورتان



شکل ۲-۴: فوم با نسبت ۲۵ گرم ایزوسیانات به ۲۵ گرم پلی‌ال سخت

۲-۲-۴ ترکیب فوم با نسبت ۶۰٪ ایزوسیانات به ۴۰٪ پلی‌ال سخت

فوم پلی‌یورتان با نسبت ۶۰ گرم ایزوسیانات به ۴۰ گرم پلی‌ال سخت ساخته می‌شود. همانند آزمایش قبلی این دو ماده با هم ترکیب می‌شوند. سپس فوم تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از آزمایش و نمودار تنش-کرنش آن در شکل ۳-۴ مشاهده می‌شود. مقاومت فشاری بیشینه آن در حالت الاستیک ۰,۷۴ مگاپاسکال هست. در مقایسه با آزمایش قبلی نتیجه گرفته می‌شود هرچه ایزوسیانات بیشتر باشد فوم سخت‌تر و مقاومت فشاری بیشتر دارد و هرچه پلی‌ال بیشتر باشد فوم نرم‌تر می‌شود.



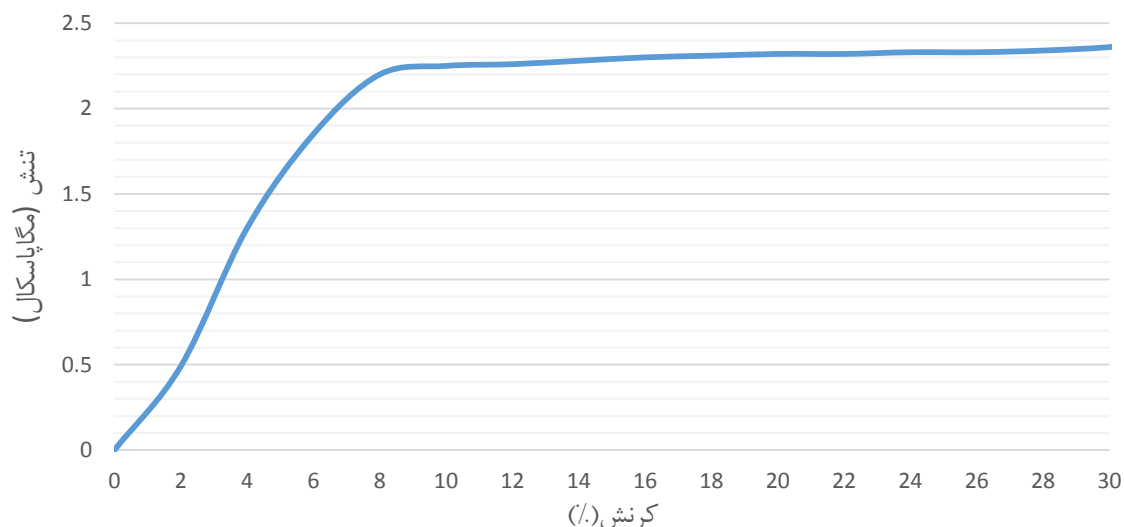
شکل ۳-۴: فوم با نسبت ۶۰ گرم ایزوسیانات به ۴۰ گرم پلی‌ال سخت

۳-۲-۴ ترکیب فوم با نسبت ۵۰٪ ایزوسیانات به ۵۰٪ پلی‌ال چوب

پلی‌ال سخت با توجه به دانسیته پایین مقاومت فشاری کمی دارد در نتیجه از پلی‌ال چوب که چگالی بالاتری دارد با نسبت ۵۰ - ۵۰ ایزوسیانات به پلی‌ال چوب فوم جدید ساخته می‌شود. ابتدا سطح قالب را به واکس جداکننده پلی‌یورتان آغشته کرده تا فوم به سطح قالب نچسبد و راحت بیرون بیاید. سپس ۵۰ گرم پلی‌ال چوب با ۵۰ گرم ایزوسیانات در قالب استوانه‌ای به مدت ۴۰ ثانیه با دستگاه همزن برقی با سرعت بالا مخلوط می‌شود و به مدت زمان ۲ دقیقه و ۱۰ ثانیه پس از شروع واکنش حالت کرمی و مایع دارند. در زمان ۴ دقیقه و ۳۰ ثانیه به مرحله ژل شدن و در زمان ۶ دقیقه به مرحله اتمام رشد می‌رسد. فوم چوب پلی‌یورتان تقریباً ۴ برابر اندازه خود منبسط می‌شود و نسبت به فوم سخت از رشد کمتری برخوردار است. دانسیته آزاد فوم ۱۱۵,۷ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد.

سپس با دستگاه یونیورسال آزمایش مقاومت فشاری نمونه را گرفته که نمودار تنش کرنش آن در شکل ۴-۴ آورده شده است. فوم پلی‌یورتان در نمودار تنش - کرنش ابتدا حالت الاستیک دارد سپس با افزایش کرنش

تنش ثابت مانده و در انتها با افزایش کرنش تنش نیز افزایش می‌یابد (شکل ۴،۴).



شکل ۴-۴: فوم با نسبت ۵۰ گرم ایزوسیانات به ۵۰ گرم پلی‌ال چوب

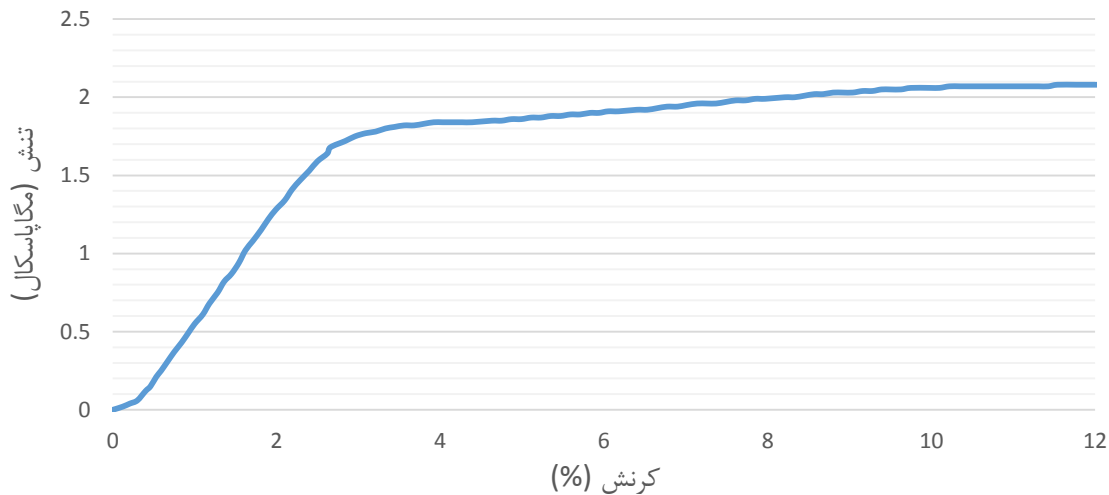
با توجه به شکل ۴-۴ مقاومت فشاری بیشینه آن در حالت الاستیک ۲,۲ مگاپاسکال هست.

۴-۲-۴ ترکیب فوم با نسبت ۵۰٪ ایزوسیانات به ۴۷,۵٪ پلی‌ال چوب و ۲,۵٪ پلی‌ال

سخت

در آزمایش قبل با اینکه پلی‌ال چوب مقاومت خوبی داشت ولی آن‌چنان رشدی نکرد به همین دلیل درصدی از پلی‌ال سخت را با پلی‌ال چوب مخلوط می‌شود تا به نتیجه مطلوب برسد. در این آزمایش از نسبت ۲,۵ درصد پلی‌ال سخت ۴۷,۵ درصد پلی‌ال چوب و ۵۰ درصد ایزوسیانات استفاده می‌شود؛ مانند آزمایش‌های قبل ابتدا سطح قالب را به واکس جداکننده آغشته کرده تا فوم به سطح قالب نچسبد و راحت بیرون بیاید. ۲,۵ گرم پلی‌ال سخت را با ۴۷,۵ گرم پلی‌ال چوب در قالب استوانه‌ای به مدت ۲۰ ثانیه با دستگاه همزن برقی با سرعت بالا مخلوط می‌شود. سپس ۵۰ گرم ایزوسیانات را درون قالب ریخته و به‌خوبی مخلوط می‌شود. در انتها فوم تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار داده و نمودار تنش کرنش آن

مطابق شکل ۵-۴ رسم می‌شود.



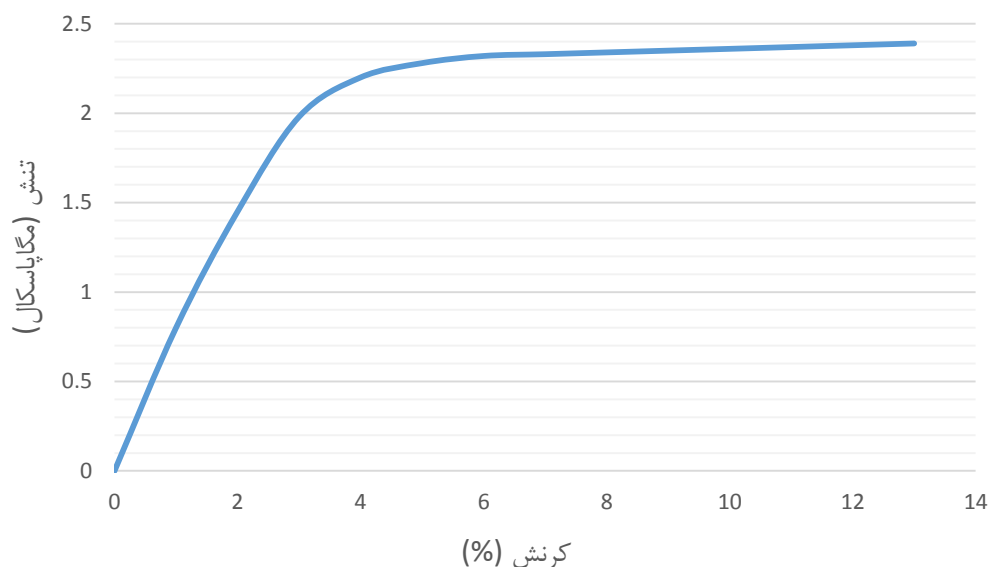
شکل ۵-۴: فوم با نسبت ۵۰ گرم ایزوسیانات به ۴۷,۵ گرم پلی‌ال چوب و ۲,۵ گرم پلی‌ال سخت

نتایج حاصل از نمودار شکل ۵-۴ نشان می‌دهد که مقاومت فشاری بیشینه آن در حالت الاستیک ۱,۶۸ مگاپاسکال هست.

۵-۲-۴ ترکیب فوم با نسبت ۵۰٪ ایزوسیانات به ۴۶,۲۵٪ پلی‌ال چوب و ۳,۷۵٪ پلی‌ال

سخت

در این آزمایش در صد پلی‌ال سخت را افزایش داده و با نسبت ۳,۷۵ در صد پلی‌ال سخت، ۴۶,۲۵ در صد پلی‌ال چوب و ۵۰ در صد ایزوسیانات فوم جدید ساخته می‌شود؛ ۳,۷۵ گرم پلی‌ال سخت را با ۴۶,۲۵ گرم پلی‌ال چوب در قالب استوانه‌ای به مدت ۲۰ ثانیه با دستگاه همزن برقی با سرعت بالا مخلوط کرده سپس ۵۰ گرم ایزوسیانات را درون قالب ریخته و به‌خوبی با همزن مکانیکی سرعت بالا مخلوط می‌شود. سپس با دستگاه یونیور سال آزمایش مقاومت فشاری فوم انجام می‌شود که نمودار تنش کرنش آن در شکل ۶-۴ آورده شده است.



شکل ۴-۶: فوم با نسبت ۵۰ گرم ایزوسیانات به ۴۶,۲۵ گرم پلی‌ال چوب و ۳,۷۵ گرم پلی‌ال سخت

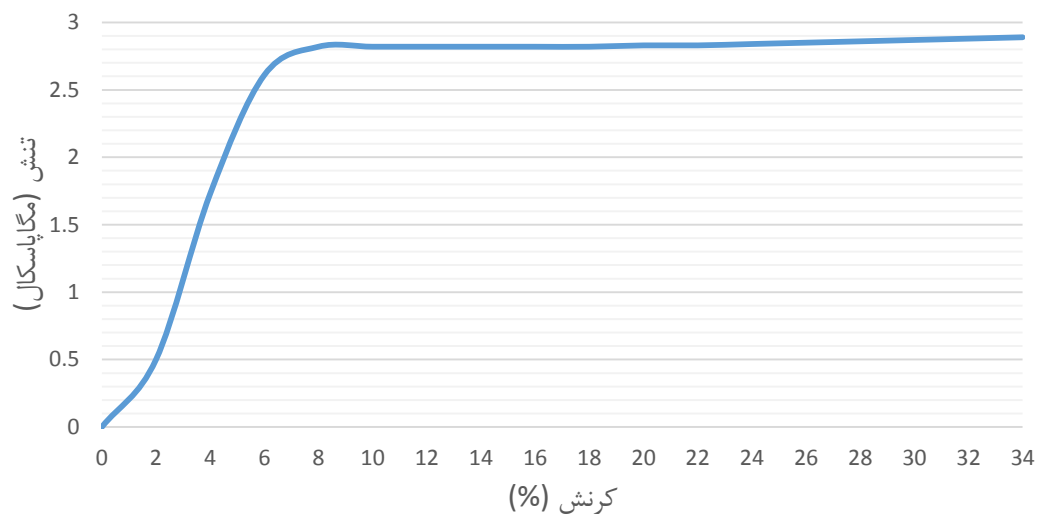
در نمودار شکل ۴-۶ مقاومت فشاری بیشینه آن در حالت الاستیک ۲ مگاپاسکال هست.

۴-۲-۶ ترکیب فوم با نسبت ۵۰٪ ایزوسیانات به ۴۵٪ پلی‌ال چوب و ۵٪ پلی‌ال سخت

با افزایش درصد پلی‌ال سخت فوم جدید تولید شده و از نسبت ۵ درصد پلی‌ال سخت ۴۵ درصد پلی‌ال چوب و ۵۰ درصد ایزوسیانات استفاده می‌شود. سپس ۵ گرم پلی‌ال از نوع سخت را با ۴۵ گرم پلی‌ال چوب در قالب استوانه‌ای به مدت ۲۰ ثانیه با دستگاه همزن برقی با سرعت بالا مخلوط کرده سپس ۵۰ گرم ایزوسیانات را درون قالب ریخته و به مدت ۴۰ ثانیه با همزن مکانیکی سرعت بالا مخلوط می‌شود و در زمان ۱ دقیقه و ۴۰ ثانیه به زمان کرمی شدن می‌رسد و در زمان ۳ دقیقه و ۲۰ ثانیه به مرحله ژل شدن می‌رسد و در زمان ۵ دقیقه و ۱۰ ثانیه مرحله رشد فوم به اتمام می‌رسد. این فوم تقریباً ۸ برابر اندازه خود منبسط می‌شود و دانسیته آزاد فوم ۱۰۳ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد.

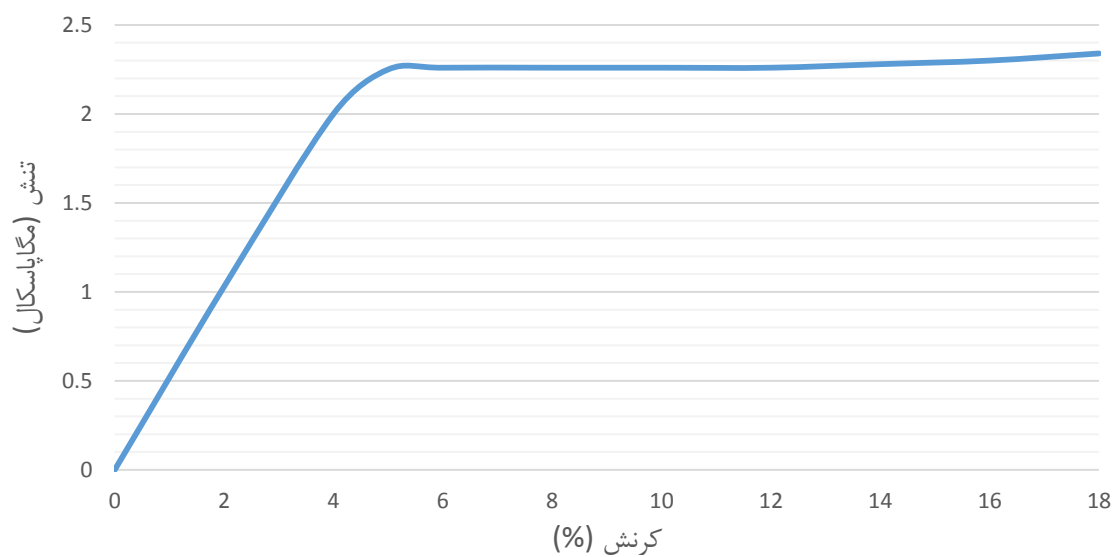
سه نمونه فوم با همین نسبت ساخته می‌شود ولی به علت تفاوت قطر قالب‌ها نسبت طول به قطر نمونه تغییر می‌کند و پس از انجام آزمایش مقاومت فشاری این گونه دریافت می‌شود که هرچه این نسبت کوچک‌تر باشد مقاومت فشاری نمونه بیشتر است. نمودارهای تنش کرنش آن‌ها در شکل ۴-۷ و ۴-۸ و ۴-۹ آورده

شده است.



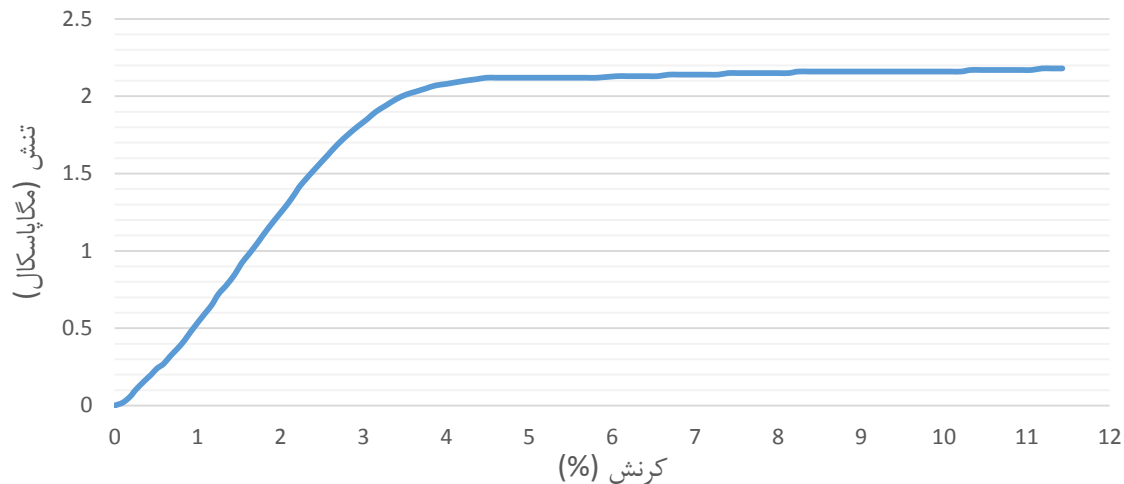
شکل ۴-۷: فوم با نسبت ۵۰ گرم ایزوسیانات به ۴۵ گرم پلی‌ال چوب و ۵ گرم پلی‌ال سخت

در شکل ۴-۷ نسبت طول به قطر فوم ۱,۱۳ می‌باشد. مقاومت فشاری بیشینه آن در حالت الاستیک ۲,۶۸ مگاپاسکال هست.



شکل ۴-۸: فوم با نسبت ۵۰ گرم ایزوسیانات به ۴۵ گرم پلی‌ال چوب و ۵ گرم پلی‌ال سخت

در شکل ۴-۸ نسبت طول به قطر ۱,۷۱ می‌باشد. مقاومت فشاری بیشینه آن در حالت الاستیک ۲,۲ مگاپاسکال نشان داده می‌شود.



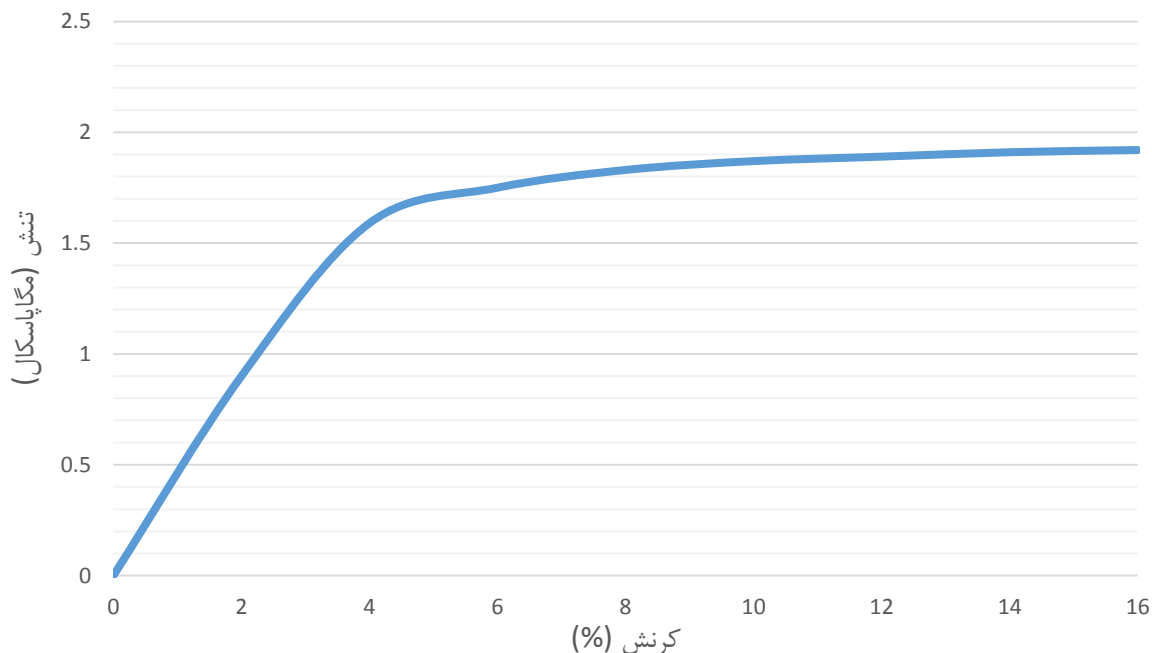
شکل ۴-۹: فوم با نسبت ۵۰ گرم ایزوسیانات به ۴۵ گرم پلی‌ال چوب و ۵ گرم پلی‌ال سخت

در شکل ۴-۹ نسبت طول به قطر ۱,۹۸ می‌باشد. مقاومت فشاری بیشینه آن در حالت الاستیک ۲ مگاپاسکال هست.

۴-۲-۷ ترکیب فوم با نسبت ۵۰٪ ایزوسیانات به ۴۲,۵٪ پلی‌ال چوب و ۷,۵٪ پلی‌ال

سخت

درصد ترکیب ۵ درصد پلی‌ال سخت و ۴۵ درصد پلی‌ال چوب و ۵۰ درصد ایزوسیانات از نظر مقاومت و حجم انبساط مناسب هست ولی برای اطمینان درصد پلی‌ال سخت را کمی افزایش داده و با نسبت ۷,۵ درصد پلی‌ال سخت ۴۲,۵ درصد پلی‌ال چوب و ۵۰ درصد ایزوسیانات فوم ساخته می‌شود. ۷,۵ گرم پلی‌ال از نوع سخت را با ۴۲,۵ گرم پلی‌ال چوب در قالب استوانه‌ای به مدت ۲۰ ثانیه با دستگاه همزن برقی با سرعت بالا مخلوط کرده سپس ۵۰ گرم ایزوسیانات را درون قالب ریخته و به خوبی با همزن مکانیکی سرعت بالا مخلوط می‌شود. سپس با دستگاه یونیورسال آزمایش مقاومت فشاری نمونه را گرفته که نمودار تنش کرنش آن در شکل ۴-۱۰ آورده شده است.



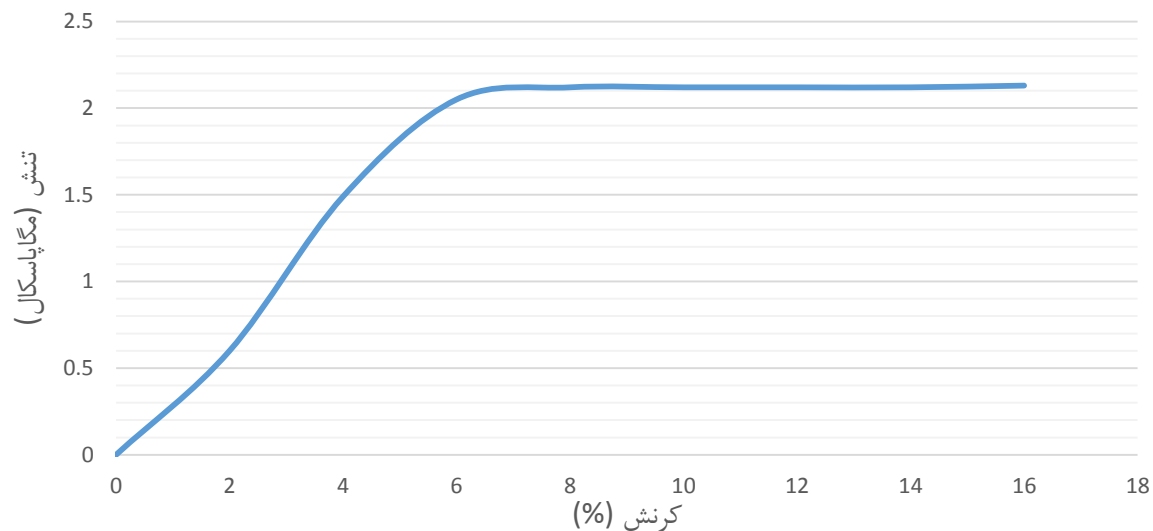
شکل ۴-۱۰: فوم با نسبت ۵۰ گرم ایزوسیانات به ۴۲,۵ گرم پلی‌ال چوب و ۷,۵ گرم پلی‌ال سخت

در شکل ۴-۱۰ مقاومت فشاری بیشینه آن در حالت الاستیک ۱,۶ مگاپاسکال هست.

۴-۲-۸ ترکیب فوم با نسبت ۶۰٪ ایزوسیانات به ۳۶٪ پلی‌ال چوب و ۴٪ پلی‌ال سخت

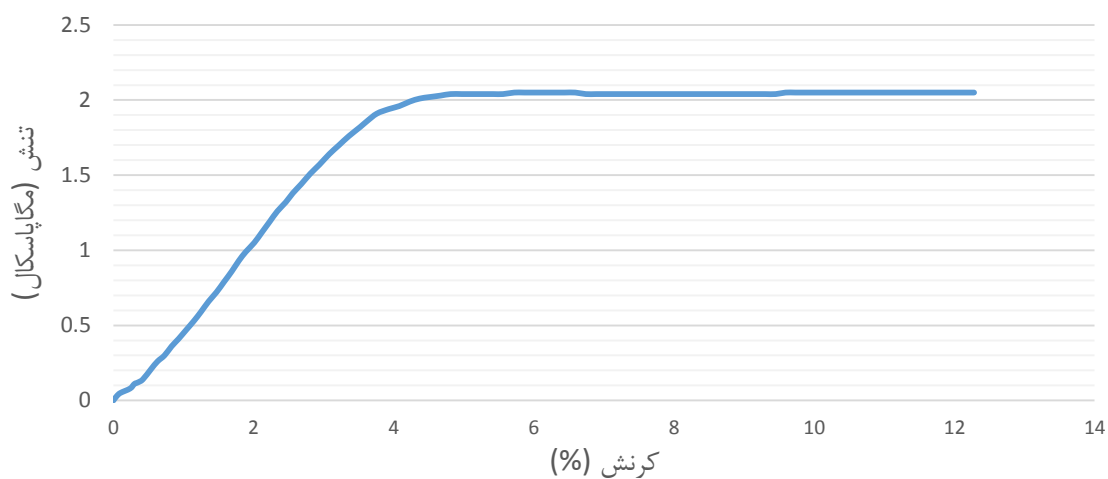
در این آزمایش درصد ایزوسیانات را کمی بیشتر کرده و با نسبت ۴ درصد پلی‌ال سخت ۳۶ درصد پلی‌ال چوب و ۶۰ درصد ایزوسیانات فوم جدید تولید می‌شود. ۴ گرم پلی‌ال از نوع سخت را با ۳۶ گرم پلی‌ال چوب در قالب استوانه‌ای به مدت ۲۰ ثانیه با دستگاه همزن برقی با سرعت بالا مخلوط کرده سپس ۶۰ گرم ایزوسیانات را درون قالب ریخته و به خوبی با همزن مکانیکی سرعت بالا مخلوط می‌شود. به دلیل کاهش نسبت پلی‌ال سخت فوم از رشد کمتری برخوردار هست.

دو نمونه فوم با همین نسبت ساخته می‌شود ولی به علت تفاوت قطر قالب‌ها و وزن آن‌ها نسبت طول به قطر نمونه تغییر می‌کند. سپس آزمایش مقاومت فشاری روی این فوم‌ها انجام می‌شود که نمودارهای تنش کرنش آن‌ها در شکل ۴-۱۱ و ۴-۱۲ آورده شده است.



شکل ۴-۱۱: فوم با نسبت ۶۰ گرم ایزوسیانات به ۳۶ گرم پلی‌ال چوب و ۴ گرم پلی‌ال سخت

در شکل (۴-۱۱) نسبت طول به قطر ۰,۹۳ می‌باشد. مقاومت فشاری بیشینه آن در حالت الاستیک ۱,۹۹ مگاپاسکال هست.

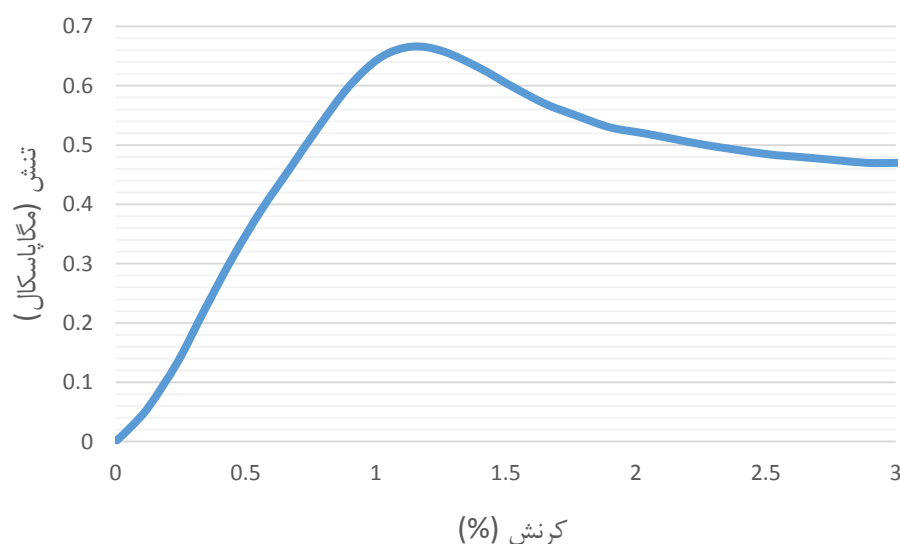


شکل ۴-۱۲: فوم با نسبت ۶۰ گرم ایزوسیانات به ۳۶ گرم پلی‌ال چوب و ۴ گرم پلی‌ال سخت

در شکل (۴-۱۲) نسبت طول به قطر ۱,۴۷ می‌باشد. مقاومت فشاری بیشینه آن در حالت الاستیک ۱,۹۱ مگاپاسکال هست.

۹-۲-۴ ترکیب فوم با نسبت ۶۸٪ ایزوسیانات به ۵۰٪ پلی‌ال چوب و ۱۵٪ پلی‌ال سخت

در این آزمایش فوم به نسبت جرم مولی مواد با هم ترکیب می‌شوند. جرم مولی پلی‌ال سخت ۱۵۰ گرم، پلی‌ال چوب ۵۰۰ گرم و جرم مولی ایزوسیانات ۳۴۰ گرم که برای برابری تعداد مول ایزوسیانات با پلی‌ال ۲ مول از ایزوسیانات استفاده می‌شود. ابتدا سطح قالب را به واکس جداکننده آغشته کرده تا فوم به سطح قالب نچسبد و راحت بیرون بیاید. سپس ۱۵ گرم پلی‌ال سخت را با ۵۰ گرم پلی‌ال چوب در قالب استوانه‌ای به مدت ۲۰ ثانیه با دستگاه همزن برقی با سرعت بالا مخلوط کرده سپس ۶۸ گرم ایزوسیانات را درون قالب ریخته و به‌خوبی با همزن مکانیکی سرعت بالا مخلوط می‌شود. سپس با دستگاه یونیورسال آزمایش مقاومت فشاری نمونه را انجام داده و نمودار تنش کرنش آن در شکل ۴-۱۳ آورده شده است.



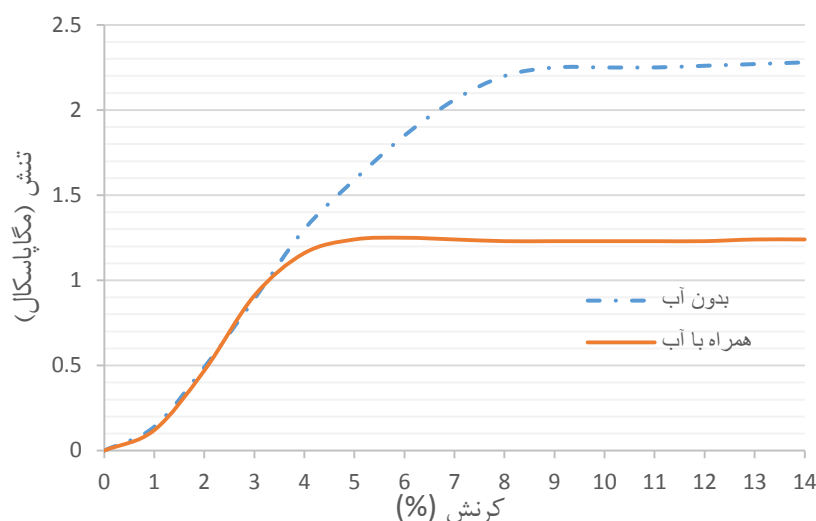
شکل ۴-۱۳: فوم با نسبت ۶۸ گرم ایزوسیانات به ۵۰ گرم پلی‌ال چوب و ۱۵ گرم پلی‌ال سخت

در شکل (۴-۱۳) مقاومت فشاری بیشینه آن در حالت الاستیک ۰,۶۵ مگاپاسکال هست.

۱۰-۲-۴ ترکیب فوم با نسبت ۵۰٪ ایزوسیانات به ۵۰٪ پلی‌ال چوب و آب

در این آزمایش از آب به‌عنوان کاتالیز و افزایش‌دهنده حجم فوم استفاده می‌شود. آب با ایزوسیانات ترکیب شده و تولید گاز کربن دی‌اکسید می‌کند [۴۲]. برای انجام آزمایش به‌اندازه سه قطره (۰,۱ گرم) آب با

قطره‌چکان در ۲۴,۹ گرم پلی‌ال چوب ریخته و به‌خوبی با همزن برقی مخلوط می‌شود. سپس ۲۵ گرم ایزوسیانات به ترکیب اضافه کرده و به‌خوبی مخلوط می‌شود. پس از آزمایش مقاومت فشاری مشخص می‌شود که مقاومت فوم به‌شدت کاهش یافته و در مقایسه با فوم بدون آب حدود یک مگاپاسکال کاهش مقاومت داشته است.

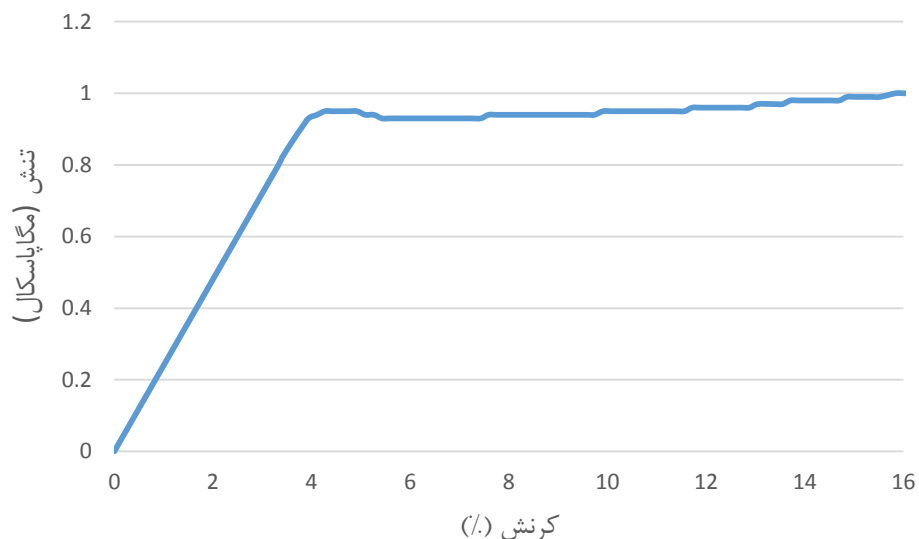


شکل ۴-۱۴: مقایسه فوم پلی‌یورتان چوب با نسبت ۵۰-۵۰ با و بدون حضور آب

مقاومت فشاری بیشینه آن در حالت الاستیک ۱,۱۵ مگاپاسکال هست (شکل ۴-۱۴).

۴-۲-۱۱ ترکیب فوم با نسبت ۶۰٪ ایزوسیانات به ۴۰٪ پلی‌ال چوب و آب

در این آزمایش نیز از آب به‌عنوان کاتالیزور با نسبت ترکیب ۶۰ درصد ایزوسیانات به ۴۰ درصد پلی‌ال ترکیب کرده و برای انجام آزمایش به‌اندازه سه قطره (۰,۱ گرم) آب با قطره‌چکان در ۲۰ گرم پلی‌ال چوب ریخته و به‌خوبی با همزن برقی مخلوط می‌شود. سپس ۳۰ گرم ایزوسیانات به ترکیب اضافه کرده و به‌خوبی مخلوط می‌شود. پس از آزمایش مقاومت فشاری مشخص می‌شود که مقاومت فوم به‌شدت کاهش می‌یابد.



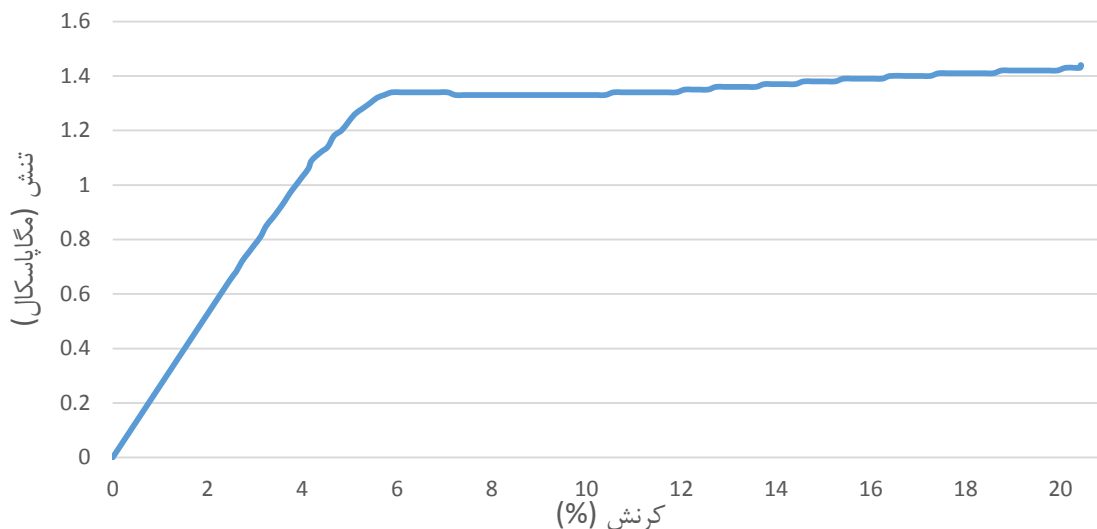
شکل ۴-۱۵: فوم با نسبت ۳۰ گرم ایزوسیانات به ۲۰ گرم پلی‌ال چوب و ۰,۱ گرم آب

مقاومت فشاری بیشینه آن در حالت الاستیک ۰,۹۴ مگاپاسکال هست (شکل ۴-۱۵).

۴-۲-۱۲ ترکیب فوم با نسبت ۵۰٪ ایزوسیانات به ۴۷,۵٪ پلی‌ال چوب و ۲,۵٪ پلی‌ال

سخت و آب

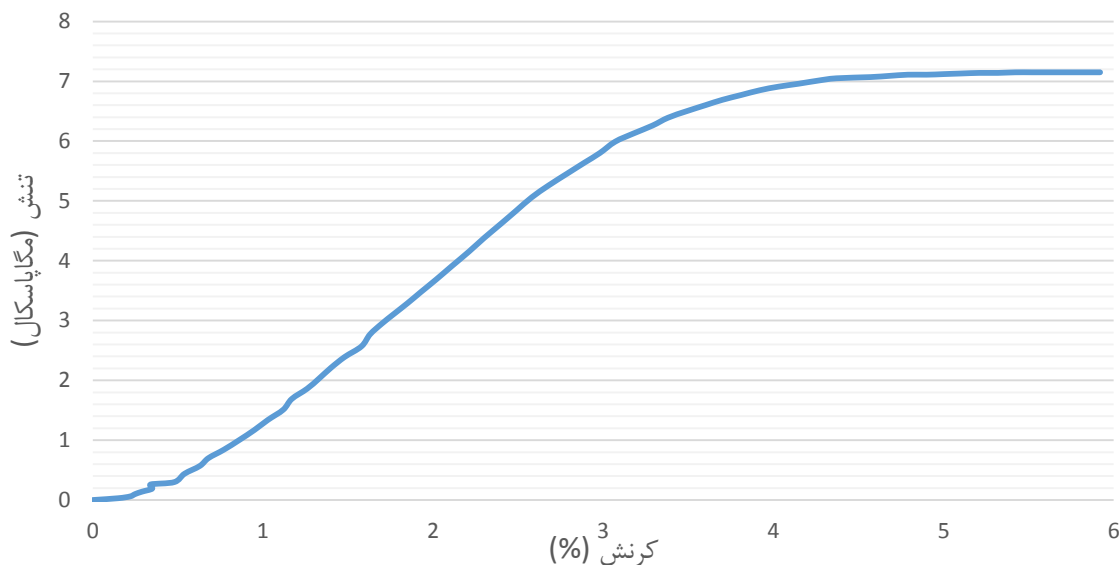
در این آزمایش نیز از آب به‌عنوان کاتالیزور با نسبت ترکیب ۵۰ درصد ایزوسیانات به ۴۷,۵ درصد پلی‌ال چوب و ۲,۵ درصد پلی‌ال سخت ترکیب می‌شود. برای انجام آزمایش به‌اندازه سه قطره (۰,۱ گرم) آب با قطره‌چکان در ۲۳,۷۵ گرم پلی‌ال چوب و ۱,۲۵ گرم پلی‌ال سخت ریخته و به‌خوبی با همزن برقی مخلوط می‌شود. سپس ۲۵ گرم ایزوسیانات به ترکیب اضافه کرده و به‌خوبی مخلوط می‌شود.



شکل ۴-۱۶: فوم با نسبت ۲۵ گرم ایزوسیانات به ۲۳,۶۵ گرم پلی‌ال چوب و ۱,۲۵ گرم پلی‌ال سخت و ۰,۱ گرم آب پس از انجام آزمایش مقاومت فشاری و رسم نمودار تنش کرنش مقاومت فشاری بیشینه آن در حالت الاستیک ۱,۳۲ مگاپاسکال هست (شکل ۴,۱۶).

۴-۲-۱۳ ترکیب فوم با نسبت ۵۰٪ ایزوسیانات به ۵۰٪ پلی‌ال چوب با دانسیته ۳۰۰

در این آزمایش از ایزوسیانات و پلی‌ال با دانسیته ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب با نسبت ۵۰ درصد ایزوسیانات به ۵۰ درصد پلی‌ال با یکدیگر ترکیب کرده و با همزن مکانیکی با سرعت بالا مخلوط می‌شود. این فوم زمان کرمی شدن و ژل شدن بیشتری نسبت به فوم آزمایش‌های قبلی دارد و همچنین دارای مقاومت فشاری بالا است. مطابق شکل ۴-۱۷ نتایج آزمایش مقاومت فشاری نشان می‌دهد که مقاومت فشاری بیشینه در حالت الاستیک ۶,۲۶ مگاپاسکال هست.

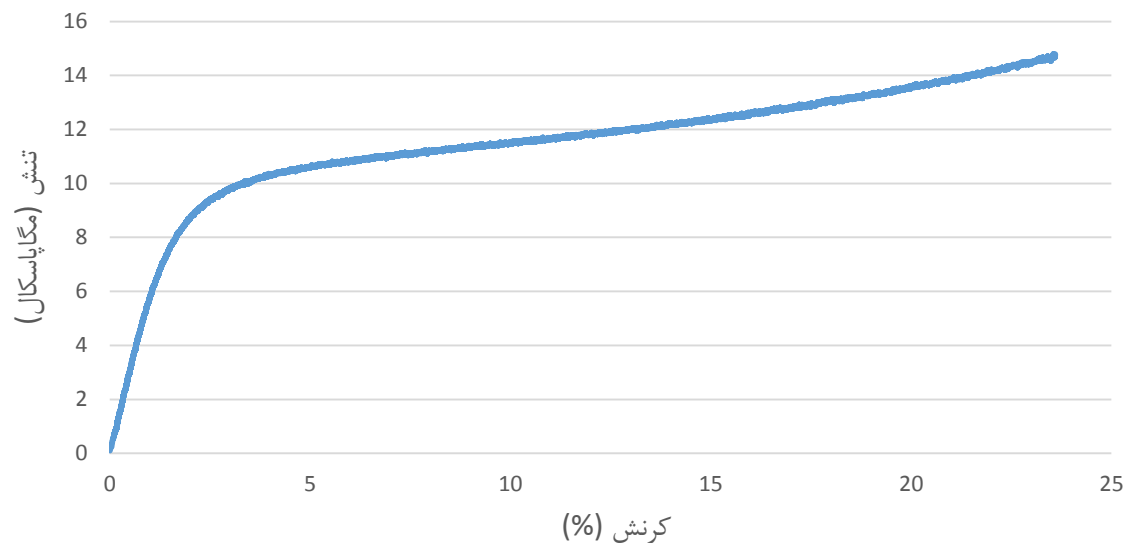


شکل ۴-۱۷: فوم با نسبت ۱۰۰ گرم ایزوسیانات به ۱۰۰ گرم پلی‌ال چوب با دانسیته ۳۰۰

۴-۲-۱۴ ترکیب فوم با نسبت ۵۰٪ ایزوسیانات به ۵۰٪ پلی‌ال چوب با دانسیته ۵۶۰

در این آزمایش از ایزوسیانات و پلی‌ال با دانسیته ۵۶۰ کیلوگرم بر متر مکعب با نسبت ۵۰ درصد ایزوسیانات به ۵۰ درصد پلی‌ال با یکدیگر ترکیب کرده و با همزن مکانیکی با سرعت بالا مخلوط می‌شود. این فوم به دلیل دانسیته بالا درصد رشد پایین و مقاومت فشاری بالاتری نسبت به فوم آزمایش‌های قبلی دارد.

نتایج آزمایش مقاومت فشاری در شکل ۴-۱۸ نشان می‌دهد که مقاومت فشاری بیشینه در حالت الاستیک ۸,۴۳ مگاپاسکال هست. این فوم به دلیل اینکه رشد دو برابری دارد و سرعت رشد نسبت به بقیه پایین‌تر می‌باشد مورد مناسب نیست. دانسیته آزاد فوم ۴۵۷ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد.



شکل ۴-۱۸: فوم با نسبت ۱۰۰ گرم ایزوسیانات به ۱۰۰ گرم پلی‌ال چوب با دانسیته ۵۶۰



شکل ۴-۱۹: دستگاه مقاومت فشاری بزرگ مقیاس

همه آزمایش‌های انجام شده با فوم پلی‌یورتان در جدول (۴-۱) نشان داده شده‌اند. با توجه به آزمایش‌های انجام شده فوم پلی‌یورتان با نسبت ۵ درصد پلی‌ال سخت، ۴۵ درصد پلی‌ال چوب و ۵۰ درصد ایزوسیانات دارای بیشترین مقاومت فشاری و بالاترین انبساط است.

جدول ۴-۱: آزمایش‌های مقاومت فشاری فوم پلی‌یورتان

آزمایش	ایزوسیانات	وزن (گرم)		تنش (مگاپاسکال)	کرنش (درصد)	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	قطر ضخامت
		پلی‌ال چوب	پلی‌ال سخت				
۱	۲۵	۰	۲۵	۰,۴۲	۵,۵	۸,۰۷	۱,۳۲
۲	۳۰	۰	۲۰	۰,۷۴	۱۱,۸	۶,۳	۱,۶۹
۳	۵۰	۵۰	۰	۲,۲	۸	۲۸,۴	۱,۱۶
۴	۵۰	۴۷,۵	۲,۵	۱,۶۸	۲,۷	۶۳,۱۵	۲,۰۲
۵	۵۰	۴۶,۲۵	۳,۷۵	۲,۰۳	۳,۲	۶۳,۴	۱,۷۵
۶	۵۰	۴۵	۵	۲,۶۸	۶,۵	۴۳,۷	۱,۱۳
۷	۵۰	۴۵	۵	۲,۲	۳,۶۸	۵۹,۸	۱,۷۱
۸	۵۰	۴۵	۵	۲,۰۱	۳,۵	۵۸,۴	۱,۹۸
۹	۵۰	۴۲,۵	۷,۵	۱,۶	۴,۲	۳۹,۲	۱,۸۳
۱۰	۳۰	۱۸	۲	۱,۹۹	۵,۷	۳۵,۲	۰,۹۳
۱۱	۶۰	۳۶	۴	۱,۹۱	۳,۸	۵۰,۸	۱,۴۷
۱۲	۶۸	۵۰	۱۵	۰,۶۵	۱,۰۲	۶۳	۱,۷۳
۱۳	۲۵	۲۴,۹	۰	۱,۱۵	۳,۹	۲۹,۷	۱,۱۶
۱۴	۳۰	۲۰	۰	۰,۹۴	۳,۹	۲۳,۹	۱,۳۹
۱۵	۲۵	۲۳,۷۵	۱,۲۵	۱,۳۲	۵,۶	۲۴,۳	۱,۴۰
۱۶	۱۰۰	۱۰۰	۰	۶,۲۶	۳,۳	۱۹۵,۱	۱,۶۴
۱۷	۱۰۰	۱۰۰	۰	۸,۴۳	۱,۸۵	۴۵۵,۵	۱,۷۱

با توجه به نتایج آزمایش‌ها فوم با نسبت ترکیب ۵۰ درصد ایزوسیانات ۴۵، درصد پلی‌ال چوب و ۵ درصد پلی‌ال سخت بهترین ترکیب از نظر مقاومت فشاری و افزایش رشد دارد لذا با همین ترکیب آزمایش تحکیم انجام می‌شود.

۳-۴ محاسبه پارامترهای تحکیم تک بعدی

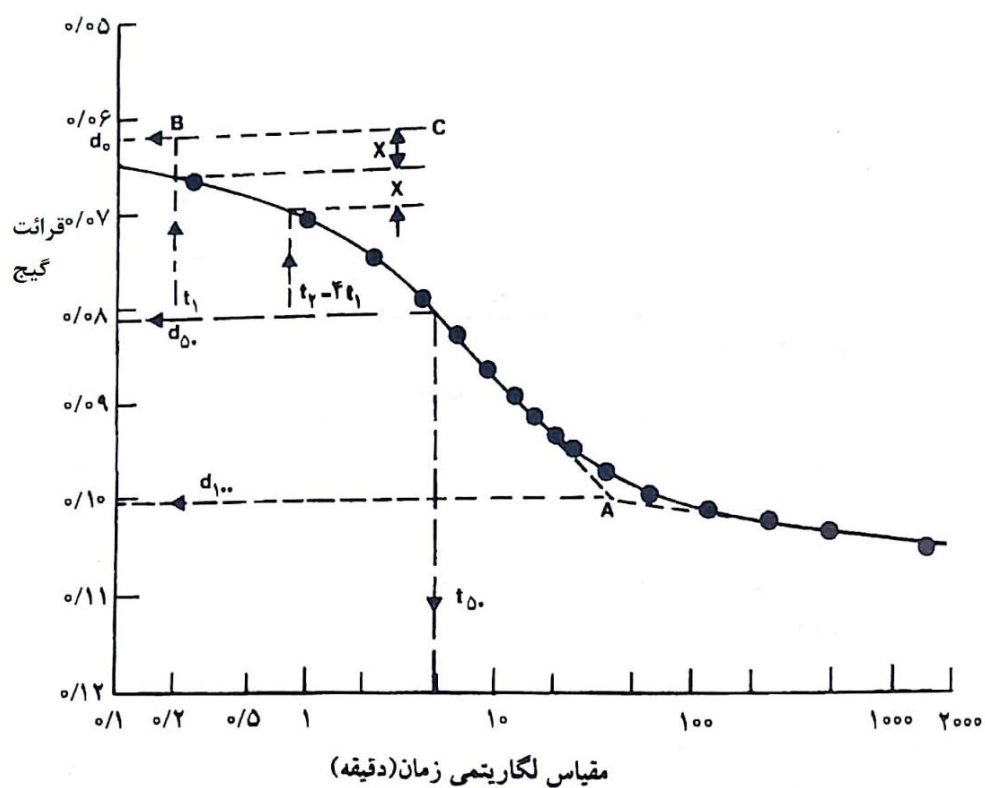
۱-۳-۴ شاخص ضریب تحکیم (C_v)

برای به دست آوردن ضریب تحکیم ابتدا باید زمان مربوط به ۵۰ درصد تحکیم را به دست آورده شود. زمان ۵۰٪ تحکیم (t_{50}) را از تغییرات زمان نسبت به قرائت گیج قائم تعیین می شود. شکل ۴-۲۰ نشان داده شده در دستگاه مختصات نیمه لگاریتمی (محور قرائت گیج دارای شاخص حسابی و محور زمان لگاریتمی است) رسم شده است.

قسمت خطی منحنی تحکیم اولیه ادامه داده تا خط مماس بر قسمت مربوط به تحکیم ثانویه همان منحنی را در نقطه A قطع کند. قرائت گیج مربوط به این نقطه d_{100} (قرائت گیج در ۱۰۰٪ تحکیم) نام گذاری می شود. روی محور افقی t_1 و t_2 به نحوی انتخاب می شود که $t_2 = 4t_1$ باشد t_1 و t_2 باید در ناحیه مربوط به بخش ابتدای منحنی واقع شده باشند. از t_1 و t_2 به سمت بالا حرکت کرده تا منحنی را قطع کنند. فاصله عمودی محل برخورد آن ها با منحنی X نامیده می شود. به همین مقدار به سمت بالا حرکت کرده و سپس خط BC را رسم کرده تا محور عمودی را قطع کند که آن را d گویند (قرائت گیج مربوط به صفر درصد تحکیم). قرائت گیج مربوط به ۵۰ درصد تحکیم اولیه نمونه به صورت زیر به دست می آید:

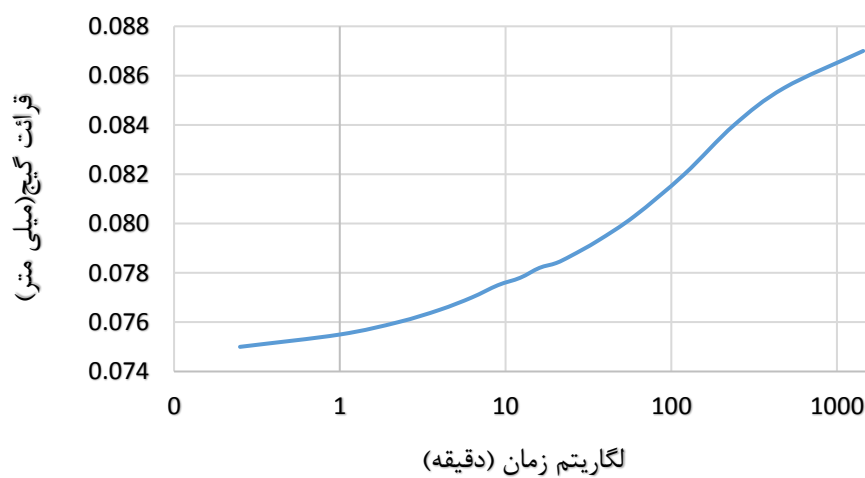
$$d_{50} = \frac{d_{100} + d_{0}}{2} \quad (4-1)$$

زمان مربوط به d_{50} از منحنی تحکیم، t_{50} است. این روش را که کاساگرانده در سال ۱۹۴۰ به وجود آورد روش لگاریتم زمان می نامند [۳۴].

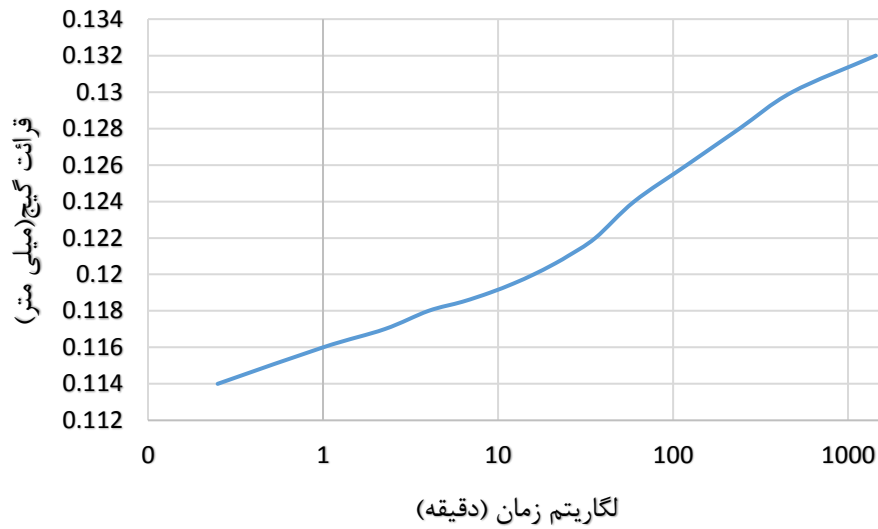


شکل ۴-۲۰: روش لگاریتم زمان کاساگرانده [۴۳]

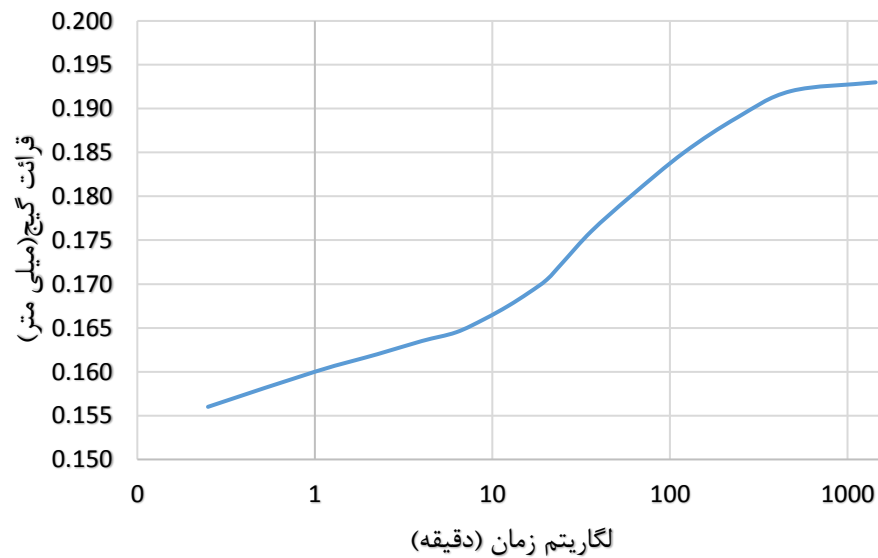
نمودارهای تغییرات ضخامت در طول زمان برای هر مرحله بارگذاری در شکل‌های (۴-۲۱) تا (۴-۲۶) آورده شده است.



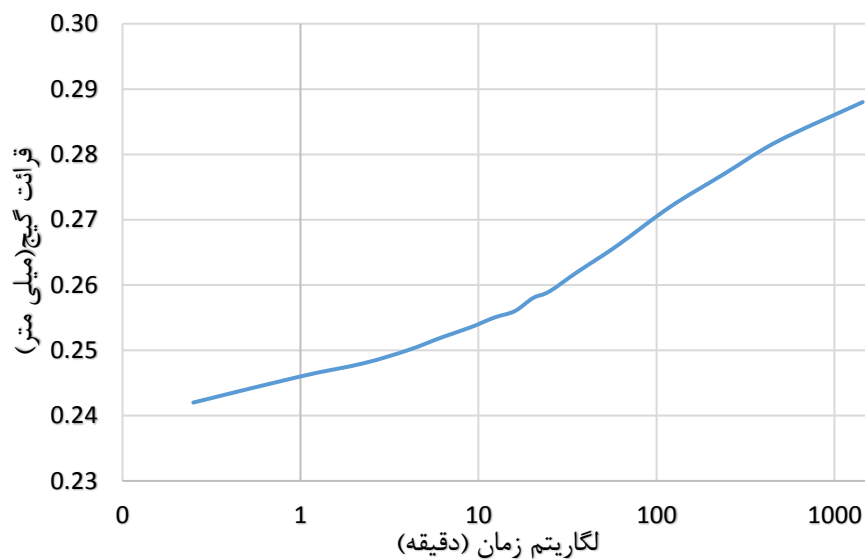
شکل ۴-۲۱: منحنی تغییرات قرائت گیج قائم نسبت به لگاریتم زمان برای بارگذاری ۰.۵ کیلوگرم



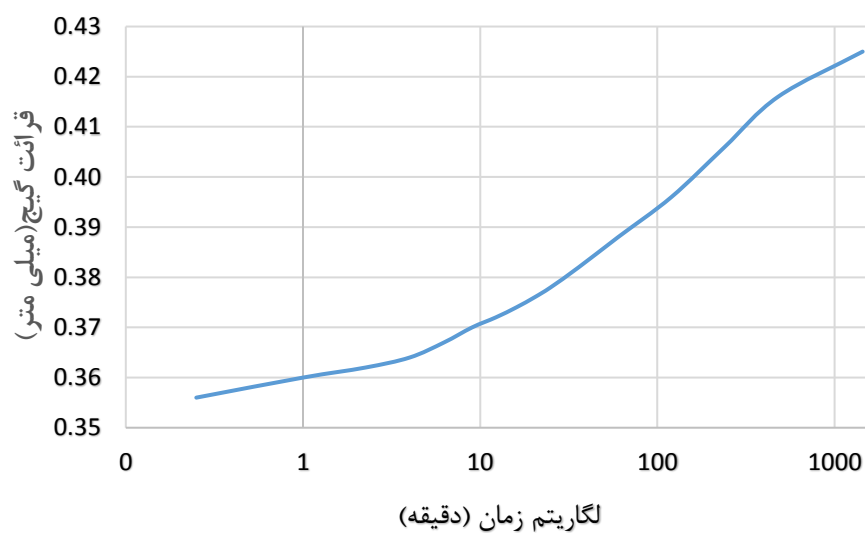
شکل ۴-۲۲: منحنی تغییرات قرائت گنج فائده نسبت به لگاریتم زمان برای بارگذاری ۱ کیلوگرم



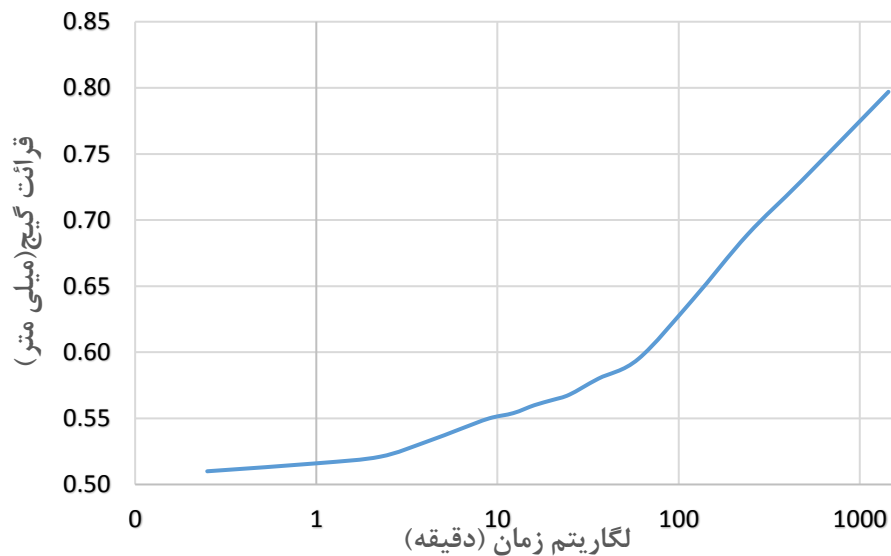
شکل ۴-۲۳: منحنی تغییرات قرائت گنج فائده نسبت به لگاریتم زمان برای بارگذاری ۲ کیلوگرم



شکل ۴-۲۴: منحنی تغییرات قرائت گيج قائم نسبت به لگاریتم زمان برای بارگذاری ۴ کیلوگرم



شکل ۴-۲۵: منحنی تغییرات قرائت گيج قائم نسبت به لگاریتم زمان برای بارگذاری ۸ کیلوگرم



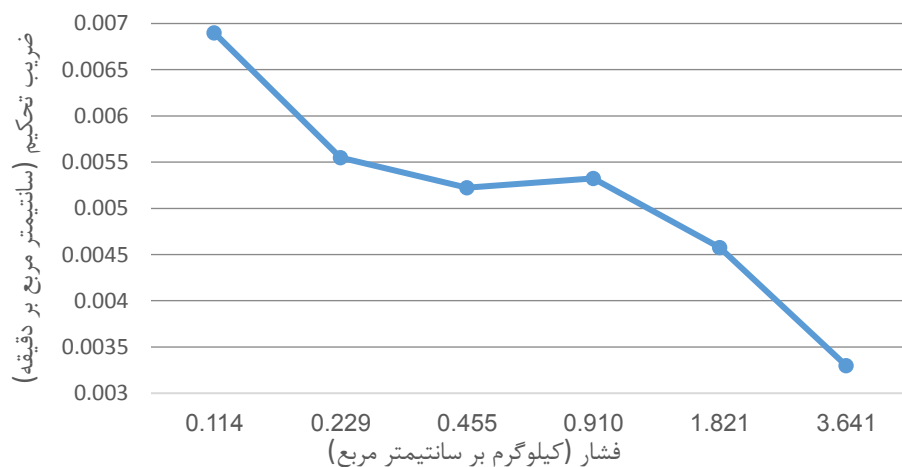
شکل ۴-۲۶: منحنی تغییرات قرائت گیج قائم نسبت به لگاریتم زمان برای بارگذاری ۱۶ کیلوگرم

سپس ضریب تحکیم برای t_{50} با فرمول (۴-۲) به دست می‌آید [۳۹].

H = طولانی‌ترین مسیر زهکشی است که به دلیل زهکشی دوطرفه بر ۲ تقسیم می‌شود.

$$Cv = \frac{0.197 * \left(\frac{H}{2}\right)^2}{t_{50}} \quad (4-2)$$

شکل (۴-۲۷) میانگین ضریب تحکیم ۴ نمونه تحکیم انجام شده در هر مرحله بارگذاری می‌باشد.



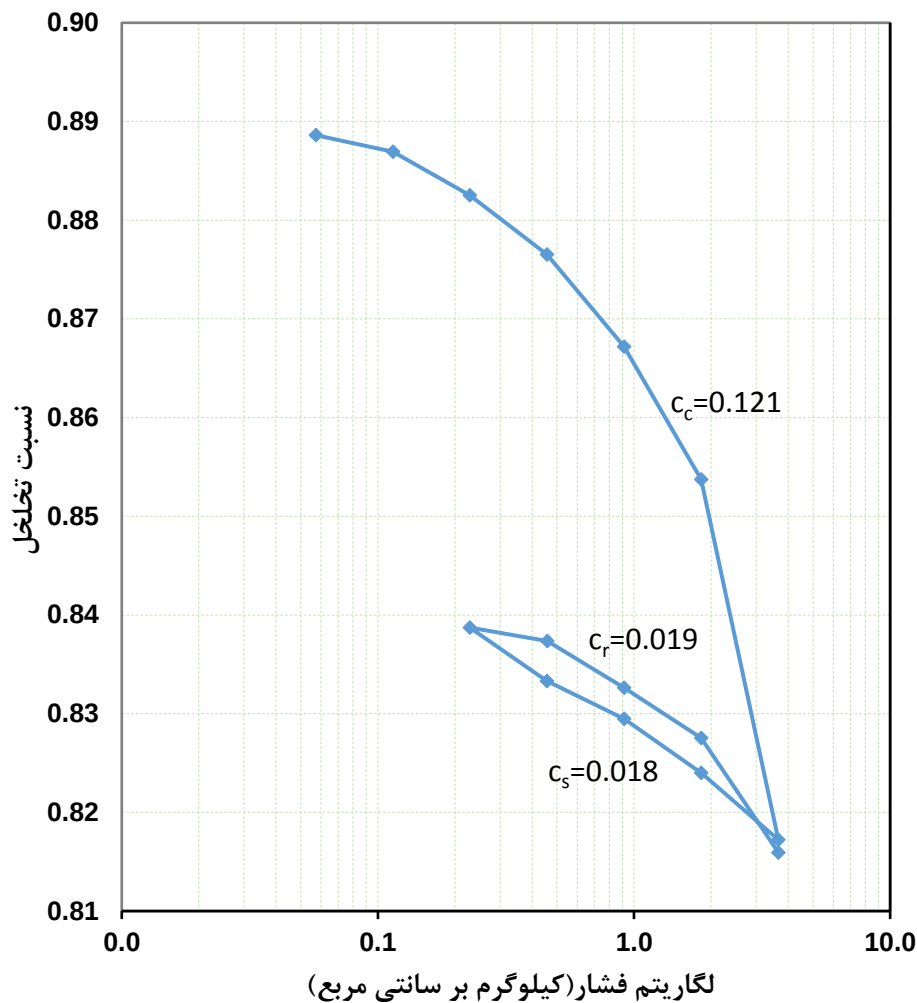
شکل ۴-۲۷: منحنی تغییرات ضریب تحکیم نسبت به فشار

نتایج حاصل از نمودار نشان می‌دهد که هرچه فشار افزایش می‌یابد ضریب تحکیم کاهش می‌یابد.

۴-۳-۲ شاخص فشردگی (C_c) و شاخص تورم (C_s)

در این بخش آزمایش‌های مربوط به پارامترهای شاخص فشردگی و شاخص تورم ارائه می‌گردد برای محاسبه نسبت تحکیمی خاک معمولاً ضریب فشردگی حاصل از نمودار نسبت تخلخل e بر حسب لگاریتم فشار ($\log P$) به دست می‌آید. نسبت تخلخل بر اساس شرایط نمونه اولیه و مقدار فشردگی تحت نمونه بار فعلی به دست می‌آید.

نمونه فرم ترکیب ۵۰ در صد ایزوسیانات و ۴۵ در صد پلی‌ال چوب ۵ در صد پلی‌ال سخت ترکیب کرده و به اندازه قطر داخل قالب نمونه فوم را تولید می‌شود. به اندازه قطر نمونه ۷,۵ سانتیمتر ارتفاع ۱,۹ سانتی‌متر از وسط فوم برش داده و داخل حلقه تحکیم قرار داده می‌شود. سپس طبق استاندارد ASTM D2435 آزمایش‌های تحکیم یک بعدی را انجام می‌شود. پس از انجام آزمایش‌ها محاسبات مربوط به تعیین نسبت تخلخل در هر دوره بارگذاری با استفاده از نرم‌افزار کامپیوتری اکسل انجام گردیده و نتایج بدست آمده در نمودارهای نیمه لگاریتمی نسبت تخلخل بر حسب لگاریتم سربار رسم گردید (شکل ۴-۲۸) و شیب بخش تقریباً خطی نمودار تحکیم به عنوان ضریب فشردگی و شیب نمودار باربرداری به عنوان نشانه تورم محاسبه می‌گردد. ضریب فشردگی (C_c) برابر ۰,۱۲۱ و شاخص تورم (C_s) برابر ۰,۰۱۸ و شاخص بارگذاری مجدد (C_r) برابر ۰,۰۱۹ است.



شکل ۴-۲۸: منحنی تغییرات نسبت تخلخل به لگاریتم فشار

در جدول (۲-۴) مقادیر شاخص تراکم برای انواع خاک‌ها نشان داده شده است. مطابق جدول (۲-۴) فوم پلی‌یورتان مشابه رس سخت (کائولینیت) در محدوده ۰,۱ تا ۰,۲۵ است.

جدول ۴-۲: مقادیر شاخص تراکم برای خاک‌های مختلف [۴۱]

مقدار C_c	نوع خاک
۰,۰۱-۰,۱	ماسه
۰,۱-۰,۲۵	رس سخت (کائولینیت)
۰,۲۵-۰,۸	رس متوسط
۰,۸-۲,۵	رس شل (موننت موریلونیت)

۴-۴ درصد رطوبت طبیعی فوم

آزمایش تعیین درصد رطوبت طبیعی فوم طبق استاندارد ASTM D2216 انجام گردید. نمونه در گرمخانه تا اندازه خشک می شود که وزن آن ثابت شود. کاهش وزن نمونه مربوط به از دست دادن آب است درصد رطوبت به صورت نسبت وزن آب در نمونه به وزن نمونه خشک محاسبه می شود. برای جلوگیری از خطا و دقت محاسبات این آزمایش بر روی سه نمونه انجام گرفته است. نتایج حاصل از آزمایش در جدول ۳-۴ ارائه می گردد. با توجه به نتایج آزمایش ها فوم مورد نظر دارای درصد رطوبت کمتر از ۲ درصد می باشد.

جدول ۳-۴: درصد رطوبت طبیعی فوم پلی یورتان

شماره نمونه	وزن اولیه فوم (گرم)	وزن خشک فوم (گرم)	درصد رطوبت (%)
۱	۹,۴۳۸	۹,۲۹۷	۱,۵۱
۲	۹,۶۰۲	۹,۴۲۵	۱,۸۸
۳	۸,۲۸۸	۸,۱۵۲	۱,۶۷
میانگین			۱,۶۹

۴-۵ چگالی ویژه فوم

هدف از این آزمایش تعیین نسبت بین واحد حجم دانه های فوم در دمای مشخص به وزن حجم آب مقطر در همان دما می باشد. این آزمایش بر روی ۲ نمونه فوم انجام گردیده که میانگین آن برابر ۰,۲۰۳ گرم بر سانتی متر مکعب می باشد (جدول ۴-۴).

جدول ۴-۴: چگالی ویژه فوم پلی یورتان

شماره نمونه	۱	۲	میانگین
چگالی ویژه فوم (گرم بر سانتی متر مکعب)	۰,۱۹۷	۰,۲۰۹	۰,۲۰۳

۴-۶ نیرو و تنش بالا زدگی فوم پلی یورتان

نیروی بالا زدگی فوم با استفاده از نیروسنج دستگاه مقاومت فشاری به دست می آید. ابتدا در ظرف استوانه‌ای ته بسته به قطر ۷۰ میلی‌متر فوم با نسبت ۵ گرم پلی‌ال سخت، ۴۵ گرم پلی‌ال چوب را به خوبی با استفاده از همزن برقی مخلوط کرده و ۵۰ گرم ایزوسیانات به آن اضافه کرده و به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط می‌شود. سپس قبل از آنکه به مرحله ژل شدن برسد شفت استوانه‌ای از به اندازه قطر نمونه تهیه و روی فوم قرار داده می‌شود که مشابه حالت پیستون دربیاید. آنگاه استوانه را زیر گیج دستگاه قرار داده و زمانی که عدد روی گیج متوقف شد عدد قرائت می‌شود (شکل ۴-۲۹).

جهت اطمینان از صحت آزمایش از استوانه‌ای با قطر متفاوت (۵۹,۵ میلی‌متر) آزمایش تکرار می‌شود.



شکل ۴-۲۹: آزمایش نیروی بالا زدگی فوم با دستگاه تک محوری

۴-۶-۱ محاسبات و نتیجه گیری

۱. برای استوانه به قطر ۷۰ میلی متر عدد گیج روی ۲۳,۵ متوقف می شود. دقت گیج ۰,۰۰۲ میلی متر و

ضریب رینگ دستگاه که در فصل سوم محاسبه شده است تنش فوم به دست می آید.

$$F = (14715000 * 23.5 * 0.002 * 0.001) + 49.05 = 740.655 N$$

$$\sigma = \frac{740.655}{\frac{\pi}{4} * 0.07^2} = 192455 pa$$

۲. برای استوانه دیگر به قطر ۵۹,۵ میلی متر عدد گیج روی ۱۶,۵ متوقف می شود. تنش فوم برای این

استوانه به دست می آید.

$$F = (14715000 * 16.5 * 0.002 * 0.001) + 49.05 = 534.645 N$$

$$\sigma = \frac{534.645}{\frac{\pi}{4} * 0.0595^2} = 192238 pa$$

در نتیجه تنشی که فوم در هنگام منبسط شدن اعمال می کند برابر ۱۹۲,۳ کیلو پاسکال (۱,۹۶ کیلوگرم بر

سانتی متر مربع) می باشد.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱ مقدمه

روش تزریق فوم پلی‌یورتان یکی از راه‌های جلوگیری از نشست ساختمان و افزایش ظرفیت باربری فونداسیون می‌باشد. در این روش با حفر گمانه‌هایی در فواصل معین توسط دستگاه حفار و پر کردن این گمانه‌ها توسط ماشین‌آلات تزریق فوم پلی‌یورتان باعث فشرده شدن خاک‌ها اطراف گمانه و پر کردن درزها و شکاف‌ها آن‌ها می‌شوند به‌طوری‌که در اثر آن نفوذپذیری لایه‌ها کم، مقاومت لایه‌ها زیاد و تغییرات شکل‌پذیری آن‌ها کم می‌شود. انتخاب نوع ماده تزریقی، غلظت و دانسیته آن و فشار تزریق بستگی به اقتصاد پروژه و نوع خاک، روش اجرایی تزریق، عمق عملیاتی و شعاع تأثیر آن دارد. در پژوهش حاضر به جهت معرفی مواد پلی‌یورتان و کاربرد تزریق این مواد در سازه‌های مختلف مانند پی، مترو، جاده‌های بتنی و آسفالتی، آزمایش‌های متعددی برای سنجش مقاومت فشاری انجام شده و تحکیم خواص پلی‌یورتان، شناسایی شد. بدین منظور مقاومت فشاری تک محوری فوم پلی‌یورتان با دانسیته‌های متفاوت برای یافتن بهترین درصد اختلاط ایزوسیانات و پلی‌ال از نظر مقاومت فشاری و مقدار انبساط مورد آزمایش قرار گرفت و نمودارهای تنش و کرنش آن‌ها رسم شد. نتایج بدست آمده نیز نشان داد که بهترین ترکیب جهت ساخت فوم پلی‌یورتان با نسبت ۵ درصد پلی‌ال سخت و ۴۵ درصد پلی‌ال چوب و ۵۰ درصد ایزوسیانات است که مقاومت فشاری ماکزیمم در حالت الاستیک برابر ۲ مگاپاسکال را حاصل نمود. سپس با همین نسبت آزمایش تحکیم برای بررسی پارامترهای تحکیم یک بعدی انجام شد که در نتیجه آن ضریب فشردگی (Cc) برابر ۰,۱۲۱، ضریب تورم (Cs) برابر ۰,۰۱۸ و شاخص بارگذاری مجدد (Cr) برابر ۰,۰۱۹ به دست آمد. با مقایسه ضریب فشردگی اینگونه نتیجه‌گیری می‌شود که فوم پلی‌یورتان با انواع خاک‌ها رفتاری مشابه خاک رس سفت دارد و بنابراین می‌تواند به عنوان جایگزین مناسبی برای خاک دچار نشست شده استفاده شود.

۵-۲ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

➤ فوم پلی‌یورتان در نمودار تنش - کرنش ابتدا حالت الاستیک دارد سپس با افزایش کرنش تنش ثابت

مانده و در انتها با افزایش کرنش تنش نیز افزایش می‌یابد.

➤ هرچه ایزوسیانات بیشتر باشد فوم سخت‌تر و هرچه پلی‌ال بیشتر باشد فوم نرم‌تر می‌شود.

➤ هرچه نسبت طول به قطر نمونه کوچک‌تر باشد مقاومت فشاری نمونه بیشتر است.

➤ استفاده از آب به‌عنوان کاتالیست و افزایش‌دهنده حجم فوم برای فوم‌های نرم مناسب می‌باشد ولی به

دلیل کاهش شدید مقاومت فشاری نمی‌توان در فوم‌های سخت استفاده کرد و باید از ماده پف‌دهنده

تری‌کلروفلوئورمتان (R-۱۱) استفاده کرد.

➤ فوم با نسبت ترکیب ۵۰ درصد ایزوسیانات، ۴۵ درصد پلی‌ال چوب و ۵ درصد پلی‌ال سخت‌بهترین

ترکیب از نظر مقاومت فشاری و افزایش رشد دارد که با نسبت طول به قطر ۲ مقاومت فشاری بیشینه

آن در حالت الاستیک ۲ مگاپاسکال هست.

➤ ضریب فشردگی فوم پلی‌یورتان مشابه رس سخت (کائولینیت) در محدوده ۰,۱ تا ۰,۲۵ است.

۳-۵ پیشنهادها

همانطور که پیش‌تر نیز اشاره شد، نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داد از آنجایی که فوم پلی‌یورتان

رفتار مشابهی با انواع خاک‌رس سفت دارد، می‌توان از آن برای تزریق در جهت بهبود وضعیت نشست

خاک استفاده کرد. با این حال، علیرغم بهبود دینامیک مقاومت خاک پس از تزریق رزین پلی‌یورتان، میزان

بهبود بر اساس عوامل مختلفی مانند نوع خاک، عمق تزریق، فشار تزریق، میزان رزین تزریق شده و لایه

خاک نیز بستگی دارد.

بنابراین پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده با در نظر گرفتن هر یک از این عوامل بصورت مجزا،

آزمایش‌هایی را در جهت ارزیابی رفتار خاک پس از تزریق رزین پلی‌یورتان، انجام دهند.

همچنین، پیشنهاد می‌شود آزمایش بر روی اندازه بزرگتر از نمونه انتخابی با رزین پلی‌یورتان و تراکم

مشابه بررسی حاضر انجام شود تا نتایج حاصل از جامعیت و کاربرد گسترده‌تری برخوردار شود.

علاوه براین، مواردی مانند تست های قابلیت اشتعال برای نوع رزین انتخابی ضروری هستند چرا که نوع گازهای منتشر شده در طول سوخت باید مشخص شود. همچنین، مسئله به صرفه بودن از اهمیت ویژه ای در پروژه هایی با مقیاس بالا و کاربرد فوم پیشنهادی در پروژه های عظیم ساخت و ساز برخوردار است. بنابراین پیشنهاد می شود که در پژوهش های آتی، مواد و ترکیب های مختلف پلی یورتان از لحاظ کارایی، هزینه های نگهداری، زیرلایه و تسهیلات زه کشی مورد ارزیابی قرار گیرد.

مراجع

1. Buzzi O. & Fityus, Stephen & Sloan, Scott. (2010) "*Use of expanding polyurethane resin to remediate expansive soil foundations*" **Canadian Geotechnical Journal**.pp. 623-634.
2. Komurlu E, Kesimal A.(2014) "*Improved performance of rock bolts using sprayed polyurea coating*" **Rock Mechanics and Rock Engineering**.
3. Alakbari, Fahd & Mohyaldinn, Mysara & Muhsan, Ali & Hasan, Nurul & Ganat, Tarek. (2020) "*Chemical Sand Consolidation*" From **Polymers to Nanoparticles**.
4. Favaretti, M., Germanino, G., Pasquetto, A., and Vinco, G. (2004) "*Consolidation interventions of the foundation soils of a bell tower with resin injections at high expansion pressure. In Proceedings of XXII National Geotechnical Convention*", **Italian Geotechnical Association**, Rome. pp. 1–19.
5. Pro, O. (2005) "*Water control using polyurethane resins. In Proceedings of the 9th International Mine Water Congress*", **Springer**, Berlin–Heidelberg, Germany. pp. 289–293.
6. Jin Liu, Zezhuo Song, Yuxia Bai, Zhihao Chen, Jihong Wei, Ying Wang, Wei Qian, (2018) "*Laboratory Tests on Effectiveness of Environment-Friendly Organic Polymer on Physical Properties of Sand*", **International Journal of Polymer Science**.
۷. عاطفی فرد م، سن زادا، خیری م، بهنیا س، (۱۳۹۴)، "مروری بر روش‌های تزریق دوغاب سیمانی و گروت در بستر"، کنفرانس ملی مهندسی عمران و محیط‌زیست، قزوین.
۸. دفتر مقررات ملی ساختمان ایران، (۱۳۹۲) "*مبحث هفتم پی و پی سازی*" ویرایش سوم، انتشارات نشر توسعه ایران، تهران، ص ۲۸.
9. Chang L., Xue Y. and Hsieh F. (2001) "*Comparative Study of Physical Properties of Water-Blown Rigid Polyurethane Foams Extended with Commercial Soy Flours*" pp. 10–19.
10. Liang Yu, Wang R. and Skirrow R. (2013) "*The application of polyurethane grout in roadway settlements issues*" **Geo Montreal**, Edmonton, Canada.
11. Saunders J.H. (1962) "*Polyurethanes: chemistry and technology*" **interscience**, vol I.
12. Bayer O. (1959) "*Plastics, Farbenfabriken Bayer*" leverkusen, 2nd edition, pp. 23
13. Buist J.M. (1969) "*Design engineering series*" **Rubber Handbook**, pp.157
۱۴. باریکانی م (۱۳۸۶) "*فوم‌های سخت پلی‌یورتان*" انتشارات انجمن علوم و مهندسی پلیمر ایران، تهران، ص ۵
15. Smith P.A.S., (1946), "*The curtius reaction in organic reactions*" Vol 3, New York.

۱۶. جورج وودز (۱۳۸۰) "اسفنج‌های پلی‌یورتان منعطف (مواد اولیه)" ترجمه میرمحمد صادقی گ، انتشارات دلفین، تهران.

17. Bayer Aktiengesellschaft (1976), "Baer Polyurethanes" Germany.

18. Ryan J.D., (1971), "Moca, a diamine curing agent for isocyanate containing polymers" **Elastomers Bulletin**, No 3.

19. Wright P. and Cumming A.P.C. (1969), "Solid polyurethane elastomers", **Maclaren and Sons**, London.

20. Syed E.A., (1978), "The effect of diols as chain extension agents on the properties of polyurethane elastomer", MSc Thesis, Loughborough University of Technology, UK.

21. Saunders K.J., (1973), "Organic polymer chemistry", **Chapman and Hall**, London.

۲۲. باریکانی م (۱۳۸۵) "پلی‌یورتان شیمی، خواص، کاربرد، زمان‌بندی" چاپ اول، انتشارات پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی، ایران، تهران، ص ۲۱-۲۷.

۲۳. امیری م ص (۱۳۹۰) "عوامل پف دهنده فوم سازگار با محیط زیست" انتشارات سازمان همکاری‌های بین‌المللی آلمان.

24. Weaver, K.D., Bruce, D.A., (2007) "Dam foundation grouting" **ACSE Publications**, Reston, VA, pp.473.

25. Aksoy C.O. (2008) "Chemical injection application at tunnel service shaft to prevent ground settlement induced by groundwater drainage: a case study", **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 45, pp. 376-383.

26. Chen D.-H., Won M. and Hong F. (2009) "Investigation of settlement of a jointed concrete pavement" **Journal of Performance of Constructed Facilities**, Vol.23, No.6, pp. 440-446.

27. Gaspard K. and Zhang Z. (2010) "Mitigating transverse joint faulting in jointed concrete pavement with polyurethane foam" **Transportation Research Record**, No.2154, pp.3-11.

28. Sidek N, Mohamed K, Jais I B M and Bakar I A A (2015) "Strength Characteristics of Polyurethane (PU) With Modified Sand" **Mechanics and Materials**.

29. Wei Y., et al., (2017) "Microstructure and fatigue performance of polyurethane grout materials under compression" **Journal of Materials in Civil Engineering**.

30. Fakhar, A. and Asmaniza A. (2016) "Road maintenance experience using polyurethane (PU) foam injection system and geocrete soil stabilization as ground rehabilitation" **Soft Soil Engineering International Conference**, MALAYSIA.

31. Saleh, S., et al. (2018) "Stabilization of marine clay soil using polyurethane." in **MATEC Web of Conferences**. EDP Sciences.

32. Smith J., Gräpel C., Skirrow R., Oad S., Reynolds N. and Moroschan, C. (2011) "Foam column injection to a highway embankment foundation – results of a full scale pilot study", **Annual Conference of the Transportation Association of Canada**, Edmonton, Alberta, pp.19.

33. Buzzi O., Fityus S., Sasaki Y., Sloan S. (2008) "Structure and properties of expanding polyurethane foam in the context of foundation remediation in expansive soil", **Mechanics of Materials** **40**, pp. 1012-1021.
34. Komurlu E. and Kesimal A. (2015) "Experimental study of polyurethane foam reinforced soil used as a rock-like material" **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, pp. 566-572, Trabzon, Turkey.
35. Assadollahi H., Sharma L.K., Dinh A., and Tharaud B. (2018) "A New in Situ Measurement Technique for Monitoring the Efficiency of Expansive Polyurethane Resin Injection Under Shallow Foundations on Clayey Soils". In **Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering**, France, pp. 668-671.
۳۶. سهرابی شکفتی س، اسکندری ع و موسوی جهرمی ح، (۱۳۹۲) "بررسی اثر مواد پلیمری بر روی شاخص رمبندگی خاک‌های رمبده" **اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک**، اردبیل.
۳۷. کوره پزان مفتخر م (۱۳۹۰) "دنیای پلی‌یورتان‌ها" انتشارات رشد.
۳۸. شرکت آذین بسپار سپاهان (۱۳۸۶) "فوم چوب پلی‌یورتان" www.apspolymer.com
۳۹. غنی زاده ع، (۱۳۹۷) "نشست و تحکیم خاک" **دانشگاه صنعتی سیرجان**، ص ۲۰
40. Jais, I.B.M., D.C. Lat, and T.N.D.T. Endut, (2019) "Compressibility of peat soil improved with polyurethane." **Malaysian Journal of Civil Engineering**.
۴۱. بهنیا ک، طباطبایی ا م (۱۳۹۲) "مکانیک خاک" **جلد اول**، چاپ شانزدهم، انتشارات دانشگاه تهران، ص ۲۱۳
42. Kaushiva, Bryan D. (1999), "Structure-property relationships of flexible polyurethane foams", *Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University*.
۴۳. بازیار م ح و صالح زاده ح (۱۳۹۲) "آزمایشگاه مکانیک خاک" **چاپ نهم**، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ص ۱۰۲

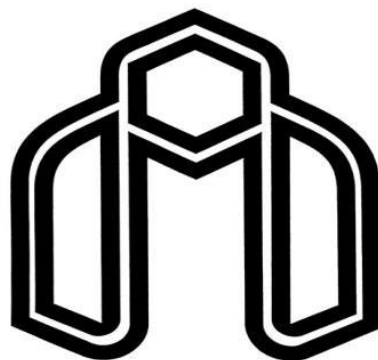
Abstract

Polyurethane foam injection is one of the ways to control building settlement. The method is to drill boreholes at regular distances by the boring machine and fill these wells with fluid material accordingly these materials penetrate with different absorption systems and create pressure in the intended ground, this method is expensive and in special cases such as soil bed stabilization is used for soil improvement. The urethane bond is formed by the reaction between a chain diisocyanate and a polyol. Application of polyurethane foams in industry includes soft foam (in furniture and chair foam), hard foam (in wall and ceiling insulation), thermoplastic foam (in medical equipment), shoe soles, sealant and elastomer foam (in flooring and auto parts).

In this study, the compressive strength of polyurethane foam with different densities is tested to find the best mixture percentage of isocyanate and polyurethane in terms of compressive strength and amount of expansion and their stress and strain diagrams are drawn. Then, with the compressive strength machine, the rising stress of polyurethane foam is obtained.

The results show that the best mixture for making polyurethane foam is with the ratio of 5% hard polyol, 45% wood polyol and 50% isocyanate, which maximum compressive strength of 2 MPa is obtained in the elastic state. Then, with the same ratio, the consolidation test was performed to investigate the parameters of one-dimensional consolidation, which compression index (C_c) equal to 0.121, swelling index (C_s) equal to 0.018 and recompression index (C_r) equal to 0.019 was obtained. By comparing the compaction coefficient of polyurethane foam with different types of soils, it behaves similarly to hard clay, which can be a suitable alternative to settlement soil. The stress applied by polyurethane foam during expansion is 192.3 kPa.

Keywords: Polyurethane foam, Soil stabilization, Consolidation, Compressive strength



Shahrood University of Technology

Faculty Civil Engineering

**Investigation of the effect of surcharge on settlement of stabilized soil with
polyurethane**

Milad Mohseni Namaghi

Supervisor:

Dr Amir Bazrafshan Moghaddam

October 2020