

****

**دانشگاه صنعتی سیرجان**

**دانشکده­ی مهندسی عمران**

**پایان­نامه کارشناسی ارشد**

**رشته­ی مهندسی عمران – گرایش ژئوتکنیک**

**ارزیابی مقاومت فشاری و مدول برجهندگی خاک ماسه‌بادی تثبیت­شده با ژئوپلیمر بر پایه ضایعات صنعتی**

**نگارش**

**نازنین احمدی**

**استاد راهنما**

**دکتر علیرضا غنی زاده**

**استاد مشاور**

**دکتر سمیه بختیاری**

**شهریور 1403**

|  |
| --- |
| اينجانب نازنین احمدی دانش آموختة كارشناسي ارشد رشتة مهندسي عمران گرايش ژئوتکنیک دانشـكدة مهندسي عمران دانشـگاه صنعتي سيرجان پديدآور پایان‌نامه با عنوان ارزیابی مقاومت فشاری و مدول برجهندگی خاک ماسه‌بادی تثبیت­شده با ژئوپلیمر بر پایه ضایعات صنعتی باراهنمایی جناب آقای دکتر علیرضا غنی زاده گـواهي و تعهد می‌کنم كه بر پایه قوانين و مقررات، ازجمله «دستورالعمل نحو بررسـي تخلفـات پژوهشـي» و همچنین «مصـاديق تخلفات پژوهشي» مصوب وزارت علوم، تحقيقات و فناوري (٢٥ اسفند 1393):* اين پایان‌نامه با عنوان ارزیابی مقاومت فشاری و مدول برجهندگی خاک ماسه‌بادی تثبیت­شده با ژئوپلیمر بر پایه ضایعات صنعتی دستاورد پژوهش اينجانب و محتواي آن از درستي و اصالت برخوردار است؛
* حقوق معنوي همة كساني را كه در به دست آمدن نتايج اصلي پايان­نامه تأثيرگذار بوده­انـد، رعايـت كـرده­ام و هنگام كاربرد دستاورد پژوهش‌های ديگران در آن، با دقت و به درستي به آنها استناد كرده­ام؛
* اين پایان‌نامه/ رساله و محتواي آن را تاكنون اينجانب يا كس ديگري براي دريافت هیچ‌گونه مدرك يا امتيـازي در هيچ­جا ارائه نكرده­ايم؛
* همة حقوق مادي اين پايان نامه با عنوان ارزیابی مقاومت فشاری و مدول برجهندگی خاک ماسه‌بادی تثبیت­شده با ژئوپلیمر بر پایه ضایعات صنعتی از آن دانشـگاه صنعتي سيرجان اسـت و آثـار برگرفتـه از آن بـا وابسـتگي سـازماني دانشگاه صنعتي سيرجان منتشر خواهد شد؛
* در همة آثار برگرفته از اين پايان­نامه با عنوان ارزیابی مقاومت فشاری و مدول برجهندگی خاک ماسه‌بادی تثبیت­شده با ژئوپلیمر بر پایه ضایعات صنعتی، نام استاد (ان) راهنما و اگر استاد راهنماي نخست تشخيص دهد، نـام استاد (ان) مشاور و نشاني رايانامة سازماني آنان را مي­آورم؛
* در همة گام­هاي انجام اين پايان­نامه با عنوان ارزیابی مقاومت فشاری و مدول برجهندگی خاک ماسه‌بادی تثبیت­شده با ژئوپلیمر بر پایه ضایعات صنعتی، هرگاه به اطلاعـات شخصـي افـراد يـا اطلاعـات سازمان‌ها دسترسـي داشته يا آن‌ها را به‌کاربرده‌ام، رازداري و اخلاق پژوهش را رعايت كرده­ام.

 **تاريخ 06/06/1403 امضا** |
| حقوق: دانشگاه صنعتي سيرجان، ١٣71 اين گزارش و همة حقوق مادي و محصولات آن (مقاله ها، كتاب­ها، پروانه­هاي اختراع، برنامه­هاي رايانهاي، نرم­افزارها، تجهيزات ساخته شده و مانند آن‌ها) بر پاية «قانون حمايت حقوق مؤلفان و مصنفان و هنرمندان» مصوب سال ١٣٤٨ و اصلاحيه­هاي بعدي آن و همچنين آيين­نامه­هاي اجرايي اين قانون» از آن دانشگاه صنعتي سيرجان است و هرگونه استفاده از همه يا پارهاي از آن شامل نقل‌قول، تكثير، انتشار، كاربرد نتايج، تكميل و مانند آن‌ها به­صورت چاپي، الكترونيكي يا وسايل ديگر، تنها با اجازة نوشتاري دانشگاه صنعتي سيرجان شدني است. نقل‌قول محدود در انتشارات علمي مانند كتاب و مقاله يا پايان­نامه­ها و رساله­هاي ديگربا نوشتن اطلاعات كامل كتاب­شناختي، نيازي به مجوز دانشگاه صنعتي سيرجان ندارد. |

**تقدیم اثر**

پدر و مادر عزیزم، بابت این‌که سالیان سال برای من زحمت بی‌دریغ کشیدید و در برابر این زحمات از من هیچ نخواستید از شما متشکریم. یقیناً باوجود تلاش‌ها و زحمات شما بوده که من توانسته‌ام خود را به این درجه از زندگی برسانم و اگر شما لحظه‌ای توجهتان را از من برمی‌داشتید شاید زندگی بر من آن‌قدر که باید آسان نمی‌گرفت و مرا به حال خود رها نمی‌کرد. از شما متشکرم که به‌مانند سپر بلایی در برابر تمام حوادث روزگار شدید و موفقیت و خوشبختی مرا تضمین کردید. دوستتان دارم.

**تشکر و سپاس­گزاری**

از جناب آقای دکتر علیرضا غنی زاده که یافتن موضوع موردعلاقه و دلخواه خود را در نقطه اوج بحران مدیون همکاری‌ها و راهنمایی‌های بی‌دریغ ایشان هستم و نمی‌دانم که با چه زبانی و با کدامین واژگان محبتشان را ارج نهم بی‌نهایت سپاسگزارم و به‌راستی انجام این پایان‌نامه بدون نظرهای صائب، پیگیری‌های دلسوزانه و تشویق‌های امیدبخش ایشان میسّر نبود. لطف و مهربانی بی‌شائبه‌شان  همیشه در خاطرم خواهد ماند.

از استاد گرامیم سرکار خانم دکتر سمیه بختیاری به دلیل یاری ها و راهنمایی‌های بیکران ایشان که بسیاری از سختی هارا برای من آسان نمودند، کمال تشکر و قدردانی رادارم. به‌راستی‌که بدون راهنمایی‌های ایشان تهیه این پایان‌نامه میسر نبود.

**چکیده:**

در بیابان‌ها، ماسه‌های بادی به دلیل کمبود آب، بادهای شدید و تغییرات دما به وجود می‌آید و به‌طور طبیعی استحکام و ظرفیت باربری کمی دارند. این نوع خاک‌ها به دلیل ویژگی‌های فیزیکی خاص خود، به‌ویژه برای استفاده در پروژه‌های ساخت‌وساز، نیاز به بهسازی از جمله تثبیت با استفاده از انواع افزودنی‌ها دارند. روش‌های سنتی تثبیت، مانند تثبیت با سیمان یا آهک، به دلیل هزینه بالا و اثرات نامطلوب زیست‌محیطی ، به‌عنوان گزینه‌های مناسب شناخته ‌نشده‌اند. در سال‌های اخیر، ژئوپلیمرها به دلیل کاهش انتشار CO2 و مصرف کمتر انرژی نسبت به سیمان و آهک، به‌عنوان گزینه‌ای سبز و مقرون‌به‌صرفه توسعه یافته‌اند.

**کلیدواژه:** ماسه‌بادی، ژئوپلیمر، مدول برجهندگي، مقاومت فشاری، ضایعات صنعتی

**فهرست**

[**فصل اول 1**](#_Toc178326609)

[**مقدمه و کلیات 1**](#_Toc178326610)

[1-1. مقدمه 1](#_Toc178326611)

[2-1. اهمیت و ضرورت انجام تحقیق 3](#_Toc178326612)

[3-1. اهداف مشخص تحقیق 4](#_Toc178326613)

[4-1. جنبه جدید بودن و نوآوري در تحقیق 5](#_Toc178326614)

[5-1. ساختار پایان‌نامه 5](#_Toc178326615)

[**فصل دوم 7**](#_Toc178326616)

[**پیشینه تحقیق 7**](#_Toc178326617)

[1-2. مقدمه 7](#_Toc178326618)

[2-2. روش‌های بهسازي خاك بستر 8](#_Toc178326619)

[3-2. تثبیت خاك بستر 8](#_Toc178326620)

[1-3-2. روش‌ها و انواع تثبيت‌کننده‌های خاك بستر 9](#_Toc178326621)

[2-3-2. انواع افزودنی‌های شيمياِيی 10](#_Toc178326622)

[3-3-2. اهداف و مزاياي تثبيت 11](#_Toc178326623)

[4-2. ژئوپلیمر 12](#_Toc178326624)

[1-4-2. تاريخچه استفاده از ژئوپليمر 13](#_Toc178326625)

[2-4-2. مزايای ژئوپليمر 14](#_Toc178326626)

[5-2. پوزولان 15](#_Toc178326627)

[1-5-2. پوزولان طبيعی 15](#_Toc178326628)

[2-5-2. پوزولان مصنوعی 15](#_Toc178326629)

[6-2. فعال‌کننده‌ها 16](#_Toc178326630)

[1-6-2. سيليکات سديم و سديم هيدروکسيد 17](#_Toc178326631)

[7-2. مطالعات انجام‌شده درزمینۀ خاک‌های تثبیت‌شده با ژئوپلیمر 17](#_Toc178326632)

[8-2. مدول برجهندگی 23](#_Toc178326633)

[1-8-2. عوامل مؤثر بر مدول برجهندگی 24](#_Toc178326634)

[2-8-2. مطالعات انجام‌شده در زمینۀ مدول برجهندگی 25](#_Toc178326635)

[9-2. نتيجه‌گيری 26](#_Toc178326636)

[**فصل سوم 29**](#_Toc178326637)

[**مواد و روش ها 29**](#_Toc178326638)

[1-3. مقدمه 29](#_Toc178326639)

[2-3. مواد و مصالح 29](#_Toc178326640)

[1-2-3. خاک 29](#_Toc178326641)

[2-2-3. سيليكات سديم 30](#_Toc178326642)

[3-2-3. پودر ضايعات کاشی سراميک 31](#_Toc178326643)

[4-2-3. سديم هيدروکسيد 31](#_Toc178326644)

[3-3. استانداردها و روش‌های آزمایشگاهی 32](#_Toc178326645)

[1-3-3. آناليزهای دستگاهی 33](#_Toc178326646)

[2-3-3. دانه‌بندی 34](#_Toc178326647)

[3-3-3. آزمایش وزن مخصوص 34](#_Toc178326648)

[4-3-3. آزمایش تراکم 36](#_Toc178326649)

[4-3. مقاومت فشاری تک‌محوری 37](#_Toc178326650)

[1-4-3. ساخت نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری 37](#_Toc178326651)

[2-4-3. روش انجام آزمايش مقاومت فشاری تک‌محوری 38](#_Toc178326652)

[5-3. آزمايش مدول برجهندگی 40](#_Toc178326653)

[1-5-3. ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های آزمايش مدول برجهندگی 40](#_Toc178326654)

[2-5-3. نحوه قرارگيری نمونه‌های مدول برجهندگی 40](#_Toc178326655)

[3-5-3. نحوه انجام آزمايش مدول برجهندگی 42](#_Toc178326656)

[4-5-3. مدل‌های غيرخطی 44](#_Toc178326657)

[1-5-4-3. مدل k-$θ$ 45](#_Toc178326658)

[2-5-4-3. مدل Bilinear 46](#_Toc178326659)

[3-5-4-3. مدل Uzan 46](#_Toc178326660)

[4-5-4-3. مدل Universal 46](#_Toc178326661)

[5-5-5-3. مدل MEPDG 47](#_Toc178326662)

[6-5-4-3. مدل NCHRP1-28 47](#_Toc178326663)

[7-5-4-3. مدل Semi-Log 47](#_Toc178326664)

[**فصل چهارم 49**](#_Toc178326665)

[**نتایج و بحث 49**](#_Toc178326666)

[1-4. مقدمه 49](#_Toc178326667)

[2-4. نتایج آزمایش‌های شناسایی 49](#_Toc178326668)

[1-2-4. نتایج آزمایش طیف‌سنجی فلورسانس پرتوایکس (XRF) 49](#_Toc178326669)

[3-4. آزمایش دانه‌بندی با الک 50](#_Toc178326670)

[4-4. نتايج آزمايش وزن مخصوص ذرات 51](#_Toc178326671)

[5-4. حدود اتربرگ 51](#_Toc178326672)

[6-4. نتایج آزمایش تراکم 51](#_Toc178326673)

[7-4. نتايج آزمايش مقاومت فشاری تک‌محوری 53](#_Toc178326674)

[1-7-4. تأثير افزودن نسبت‌های مختلف سيليکات سديم به سديم هيدروکسيد بر مقاومت فشاری 53](#_Toc178326675)

[2-7-4. تأثير افزودن درصدهای مختلف پودر ضايعات کاشی سراميک بر مقاومت فشاری 63](#_Toc178326676)

[3-7-4. تأثير افزودن مولاريته‌های مختلف سديم هيدروکسيد بر مقاومت فشاری 68](#_Toc178326677)

[4-7-4. نسبت‌های مقاومت فشاری در زمان‌های مختلف عمل‌آوری نسبت به ۷ روزه. 72](#_Toc178326678)

[5-7-4. حداقل مقاومت فشاری برای لايه‌های روسازی 73](#_Toc178326679)

[6-7-4. الگوی شکست نمونه‌های مقاومت فشاری تک‌محوری 74](#_Toc178326680)

[8-4. نتايج آزمايش‌های مدول برجهندگی 74](#_Toc178326681)

[1-8-4. تأثیر تنش انحرافی، تنش محدودکننده و تنش حجمی بر مدول برجهندگی 74](#_Toc178326682)

[2-8-4. کالیبراسیون مدل‌های غیرخطی 82](#_Toc178326683)

[9-4. نتايج تحلیل پرتو اشعه ايکس (XRD) 84](#_Toc178326684)

[10-4. نتایج تحلیل میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) 86](#_Toc178326685)

[11-4. نتِيجه‌گيری 90](#_Toc178326686)

[**فصل پنجم** 93](#_Toc178326687)

[**نتیجه‌گیری و پیشنهادات** 93](#_Toc178326688)

[1-5. مقدمه 93](#_Toc178326689)

[2-5. نتیجه‌گیری 93](#_Toc178326690)

[3-5. پیشنهادات 95](#_Toc178326691)

[**منابع** 97](#_Toc178326692)

**فهرست شکل‌ها**

[شکل 2- 1. انتخاب افزودنی براي خاك بستر با توجه به شاخص خمیري خاك 8](#_Toc178763816)

[شکل 3- 1. تصویر محل برداشت خاک ماسه‌بادی از روستای فخر‌آباد سیرجان، استان کرمان 10](#_Toc178763817)

[شکل 3- 2. خاک ماسه‌بادی مورداستفاده. 10](#_Toc178763818)

[شکل 4- 1. منحنی دانه‌بندی خاک ماسه‌بادی 14](#_Toc178763819)

[شکل 4- 2. نمودار تراكم حاوی درصدهای مختلف ضایعات کاشی و سرامیک 15](#_Toc178763820)

**فهرست جدول‌ها**

[جدول 3 - 1. استاندارهای مربوط به آزمایش‌ها 11](#_Toc178763821)

فصل اول

مقدمه و کلیات

## 1-1. مقدمه

در بیابان‌ها[[1]](#footnote-1)، فقدان آب، تشکیل خاک‌ها را از طریق اثرات فرسایش[[2]](#footnote-2)، بادهای شدید[[3]](#footnote-3)، رسوب‌گذاری[[4]](#footnote-4) و تغییرات مهم دما بین روز و شب تحت تأثیر قرار می‌دهد که منجر به تجزیه سنگ‌ها به ماسه‌بادی[[5]](#footnote-5) می‌شود( Li et al., 2009). ماهیت ریزدانه، گرد گوشگی و صاف ماسه‌بادی، منجر به استحکام ضعیف آن‌ می‌شود(Amhadi Assaf, 2021). ماسه‌های بادی بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد خاک[[6]](#footnote-6) (USCS) به‌صورت SP یا SP-SM و بر اساس سیستم طبقه‌بندی[[7]](#footnote-7) AASHTO به‌صورت A-1 تا A-3 طبقه‌بندی می‌شوند(Elipe López-Querol, 2014). بسیاری از محققان به این نتیجه رسیده‌اند که ماسه‌های بادی واقع در مکان‌های مختلف جهان دارای خواص و ویژگی‌های فیزیکی مشابهی هستند(Padmakumar et al., 2012; Seif, 2013). شکل گرد معمولی دانه‌های ماسه‌بادی بر قفل و بست مکانیکی[[8]](#footnote-8) بین سنگ‌دانه‌ها تأثیر می‌گذارد(Neumann Curbach, 2018)؛ بنابراین، ماسه‌بادی اغلب الزامات فنی را برآورده نمی‌کند و نمی‌تواند بدون تثبیت به‌عنوان بستر روسازی استفاده شود(Abderrahmane Ratiba, 2013). این وضعیت ممکن است با بهبود خواص ساختاری، فیزیکی، شیمیایی-فیزیکی[[9]](#footnote-9)، مکانیکی و ژئوتکنیکی خاک بستر اصلاح شود(Onyelowe et al., 2019). در طی چند دهه گذشته، ماسه‌های بادی پس از تثبیت با افزودنی‌های مختلف برای بهبود خواص ژئوتکنیکی و تأمین الزامات و مشخصات مهندسی، در اهداف ساخت‌وساز موردبررسی و استفاده قرارگرفته‌اند (Shalabi et al., 2019). ماسه‌بادی را می‌توان با استفاده از انواع مواد پوزولانی[[10]](#footnote-10) و صنعتی ازجمله آهک، خاکستر بادی[[11]](#footnote-11)، دوده سیلیسی[[12]](#footnote-12)، سیمان و بنتونیت[[13]](#footnote-13) تثبیت کرد(Rahman et al., 2021). سیمان پرتلند ازجمله تثبیت‌کننده‌های کارآمد در بهبود خواص پایین خاک‌های ماسه‌ای است (AlKarni ElKholy, 2012). بااین‌حال، برخی از مقامات راهداری به دلیل محدودیت بودجه تمایلی به سرمایه‌گذاری در ژئوسنتتیک‌ها[[14]](#footnote-14) و تثبیت‌کننده‌های سنتی مانند سیمان برای تثبیت خاک ندارند. علاوه بر این، تولید سیمان حدود 7 درصد از دی‌اکسید کربن جهان را تولید می‌کند (Chen et al., 2021; Disu & Kolay, 2021; Jalal et al., 2020; Pourakbar & Huat, 2017)؛ بنابراین، مقامات راهداری مایل به استفاده از محصولات جانبی صنایع هستند که دارای خواص پوزولانی و ارزان‌تر هستند(Al-Naje et al., 2020).

## 1-2. اهمیت و ضرورت انجام تحقیق

در ساخت راه‌ها و فرودگاه‌ها امکان برخورد با بسترهای ماسه‌بادی وجود دارد. این خاک‌ها به دلیل عدم وجود چسبندگی و دانه‌بندی یکنواخت، ظرفیت باربری بالایی ندارند و به‌خوبی متراکم نمی‌شوند. در این پژوهش، خاک ماسه‌بادی با استفاده از ژئوپلیمر تثبیت‌شده و تأثیر پارامترهای مختلف بر مدول برجهندگی خاک مورد ارزیابی قرارگرفته است. با توجه به اینکه تاکنون تحقیقات بسیار محدودی بر روی مدول برجهندگی خاک‌های تثبیت‌شده با ژئوپلیمر انجام‌شده است، نتایج این تحقیق می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای تخمین مدول برجهندگی این مصالح و تحلیل و طراحی مکانیستیک-تجربی روسازی‌های احداث‌شده بر روی این نوع مصالح مورداستفاده قرار گیرد.

## 1-3. اهداف مشخص تحقیق

1. ارزیابی تأثیر مولاریته‌های مختلف سدیم هیدروکسید بر مقاومت فشاری و مدول برجهندگی خاک ماسه‌بادی تثبیت‌شده
2. تأثیر میزان استفاده از پودر ضایعات کاشی سرامیک بر مشخصات تراکمی خاک ماسه‌بادی
3. تأثیر درصد پودر ضایعات کاشی سرامیک برافزايش مقاومت فشاري خاک ماسه‌بادی در زمان‌های عمل‌آوری مختلف
4. تأثیر درصد پودر ضایعات کاشی سرامیک برافزايش مدول برجهندگی خاک ماسه‌بادی
5. تأثیر میزان پودر ضایعات کاشی سرامیک و میزان استفاده از فعال‌کننده قلیايی بر مقاومت فشاري خاک ماسه‌بادی تثبیت‌شده.
6. توسعه و مقایسه مدل‌های غیرخطی مختلف به‌منظور مدل‌سازی رفتار غیرخطی ماسه‌بادی تثبیت‌شده با پودر ضایعات کاشی سرامیک
7. تعیین درصد بهینه پودر ضایعات کاشی سرامیک، نسبت بهینه سیلیکات سديم به سديم هیدروکسید و مولا ريته بهینه سديم هیدروکسید براي تثبیت خاک ماسه‌بادی
8. انجام آنالیزهای زیرساختاری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی[[15]](#footnote-15) (SEM)، فلورسانس اشعه ایکس[[16]](#footnote-16) (XRF)، و پراش اشعه ایکس[[17]](#footnote-17) (XRD).

## 1-4. جنبه جدید بودن و نوآوري در تحقیق

با توجه به بررسي پيشينه تحقيق تاکنون تحقیقات محدودی در خصوص مدول برجهندگی خاک ماسه‌بادی تثبیت‌شده با استفاده از ژئوپلیمر مبتنی بر ضایعات صنعتی مانند پودر ضایعات کاشی سرامیک انجام‌شده است.

## 1-5. ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه در پنج فصل تنظیم‌شده است. در فصل اول، ابتدا مقدمه‌ای در موردپژوهش حاضر ارائه‌شده و درباره ضرورت انجام تحقیق، اهداف و نوآوری‌های آن توضیح داده‌شده است. فصل دوم به بررسی پیشینه تحقیق پرداخته است. فصل سوم شامل معرفی مواد و روش‌های آزمایش است. در فصل چهارم، تحلیل و بررسی نتایج آزمایش‌های فصل سوم انجام‌شده و این نتایج با دیگر تحقیقات مرتبط مقایسه شده است. فصل پنجم به نتیجه‌گیری نهایی از پژوهش و پیشنهاد‌هایی برای تحقیقات آینده در این حوزه اختصاص دارد.

**فصل دوم**

پیشینه تحقیق

## 2-1. مقدمه

در بسیاري از پروژه‌ها، خاک محل پروژه ازنظر مهندسین ژئوتکنیک، مناسب نیست. مهندسین تلاش مي‌کنند تا حد امکان از خاک مسئله‌دار اجتناب کرده و در صورت امکان، محل ديگري را براي پروژه خود انتخاب نمايند و يا خاک مسئله‌دار را با خاک مناسب‌تر جايگزين نمايند. در دهه‌هاي اخیر با توسعه صنعت و شهرها، با توجه به محدوديت در مکان و زمان و هزينه، نیاز به احداث شالوده‌ها و يا راه‌ها بر روي بسترهاي نامناسب و مسئله‌دار زمین شديداً احساس مي‌شود. ازاين‌رو مهندسین ژئوتکنیک همواره تلاش بر اصلاح و بهبود مشخصات خاک محل پروژه براي رسیدن به عملکرد مهندسي مناسب‌تر دارند. از راهکارهاي پیشنهادشده براي بهبود وضعیت محل پروژه می‌توان به جايگزيني خاک مسئله‌دار با خاک مناسب، طراحي شالوده‌هاي عمیق[[18]](#footnote-18) و يا استفاده از شیوه‌هاي تثبیت[[19]](#footnote-19) خاک اشاره کرد (کمالي، 1362؛ عابدي، 1391). بهسازی خاك با روش‌های گوناگونی مانند روش‌های مکانیکی، فیزیکی، بیولوژیکی، الکتریکی و شیمیایی قابل انجام است. انتخاب روش مناسب برای بهسازی خاك به نوع، جنس خاك و علاوه بر آن به هدف از بهسازی خاك بستگی دارد (دفتر تدوین ضوابط و معیارهای فنی، 1382). بدون تثبیت، روسازی‌ها باید در لایه‌های ضخیم‌تری طراحی شوند تا بارهای واردشده به لایه زیرین ضعیف‌تر را جبران کنند که این‌یک عمل پرهزینه خواهد بود. حتی اگر خاک بستر ظرفیت باربری کافی را داشته باشد(Terrel Epps, 1979). خاک بستر را می‌توان قبل از ساخت لایه‌های روسازی تثبیت[[20]](#footnote-20) کرد، تا کرنش‌های ناشی از ترافیک به حداقل برسد و درنتیجه عمر خستگی و شیار شدگی بهبود یابد(Terrel Epps, 1979). طی چند سال گذشته، تثبیت خاک به‌عنوان ابزاری برای افزایش کیفیت خاک محل برای تأمین نیازهای فنی، محبوبیت بیشتری پیداکرده است (Yaghoubi et al., 2021). تثبیت خاک عبارت از اصلاح یک یا چند ویژگی خاک از طریق روش‌های شیمیایی یا مکانیکی برای تولید مصالح خاک بهتر حاوی خواص مهندسی مطلوب است(Onyelowe Ken Okafor, 2006). نوع تثبیت‌کننده مناسب باید بر اساس هزینه، نوع خاک و عملکرد موردنیاز انتخاب شود(Selvi, 2015). مزایای فرآیند تثبیت شامل افزایش مقاومت، کاهش انعطاف‌پذیری، کاهش نفوذپذیری و کاهش ضخامت روسازی و کاهش حمل‌ونقل یا جابه‌جایی مواد حفاری‌شده است. تثبیت خاک‌های بستر تغییرات احتمالی در حجم خاک و تورم را کنترل می‌کند و مقاومت خاک را بهبود می‌بخشد(Khadka et al., 2020). تثبیت‌کننده‌های زیادی ازجمله آهک[[21]](#footnote-21)، سیمان،[[22]](#footnote-22) آنزیم‌ها، خاکستر بادی[[23]](#footnote-23) و سایر مواد شیمیایی وجود دارند که می‌توانند مقاومت سازه‌ای خاک را بهبود بخشند. مطالعات آزمایشگاهی پیشین نشان داده است که پاسخ‌های ارتجاعی یا الاستیک مصالح سنگدانه‌‌ای موجود در اساس و زیراساس و خاك بستر، از یک رفتار غیرخطی وابسته به تنش تحت بارگذاری مکرر پیروی می‌کند(Brown et al., 1985).

## 2-2. روش‌های بهسازي خاك بستر

مفاهیم پایه بهسازی خاک شامل عملیات خاکی (خاکبرداری و خاکریزی)، متراکم سازی، فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی با استفاده از مواد افزودنی و اختلاط با خاک، مسلح سازی (داخلی و خارجی) و روش‌های هیدرولیکی است. روش‌های مختلفی برای بهسازی خاک بستر وجود دارد که انتخاب هر یک از آن‌ها به عوامل مختلفی ازجمله نوع خاک، درصد ریزدانه، مساحت، عمق بهسازی، مقاومت و تراکم‌پذیری خاک بستگی دارد (قیاسی و والی‌رستی، 1398).

 بهسازی سطحی زمین[[24]](#footnote-24): بهسازی سطحی زمین معمولاً تنها جهت بهسازی عمق 1 تا 3 فوت از سطح بستر کاربرد دارد. این فناوری‌ها معمولاً فرض می‌کنند که در اعماق بیشتر بستر شرایط مناسب خاک وجود دارد یا با استفاده از فناوری‌های مناسب می‌توان هرگونه شرایط ضعیف را برطرف کرد. بهسازی سطحی زمین برای روسازی‌ها در شرایط نامناسب خاک شامل تثبیت خاک بستر با استفاده از سیمان، آهک و خاکستر بادی، جایگزینی مصالح بستر نامناسب و استفاده از ژئوتکستایل و سایر محصولات پیش‌ساخته است. این فناوری‌ها نسبتاً سریع اجرا می‌شوند و ساخت روسازی معمولاً پس از انجام بهسازی آغاز می‌شود.(Ward et al., 2017)



شکل 2- 1. انتخاب افزودنی براي خاك بستر با توجه به شاخص خمیري خاك

**فصل سوم**

مواد و روش­ها

## 3-1. مقدمه

در فصل گذشته، پیشینه‌ای در مورد تثبیت خاک و انواع مصالح استفاده‌شده برای تثبیت خاک (به‌ویژه ژئوپلیمر) ارائه شد. در این فصل، جزئیات مربوط به مصالح مورداستفاده و همچنین روش‌های آزمایشگاهی به‌کاررفته در تحقیق معرفی خواهند شد.

## 3-2. مواد و مصالح

### 3-2-1. خاک

خاک ماسه‌بادی مورداستفاده در این تحقیق از روستای فخرآباد سیرجان در استان کرمان تهیه‌شده است (شکل 3-1). این خاک به دلیل ظرفیت باربری پایین، به‌عنوان یک خاک مسئله‌دار شناخته می‌شود. در ایران، بسیاری از مناطق کویری دارای خاک‌هایی با ویژگی‌های مشابه هستند؛ بنابراین، بهسازی این نوع خاک‌ها می‌تواند بهبود قابل‌توجهی در ساخت‌وساز در این مناطق ایجاد کند (شکل 3-2).6/3 کیلومتر از کمربندی سیرجان به سمت جاده خیرآباد موقعیت جغرافیایی (364779= X و 3259753=Y) به این صورت است.



شکل 3- 1. تصویر محل برداشت خاک ماسه‌بادی از روستای فخر‌آباد سیرجان، استان کرمان



**شکل 3- 2. خاک ماسه‌بادی مورداستفاده**.

جدول 3 - 1. استاندارهای مربوط به آزمایش‌ها

|  |  |
| --- | --- |
| استانداردها | آزمایش‌ها |
| ASTM D422 | دانه‌بندی |
| ASTM D854 | وزن مخصوص |
| ASTM D4318 | حدود اتربرگ |
| ASTM D698 | تراکم |
| ASTM D2166 | مقاومت فشاری تک‌محوری |
| AASHTO T 307 | مدول برجهندگی |

**فصل چهارم**

نتایج و بحث

## 4-1. مقدمه

این پایان‌نامه حاصل نتایج مطالعات آزمایشگاهی تثبیت ماسه‌بادی با استفاده از ضایعات کاشی و سرامیک و نسبت‌های مختلف سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید در مولاریته‌های متفاوت سدیم هیدروکسید به‌عنوان فعال‌کننده قلیایی برای کاربردهای عمرانی است. برای بررسی تأثیر این مواد، آزمایش‌های تراکم، مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول برجهندگی انجام‌شده است. به‌منظور تحلیل نتایج به‌دست‌آمده، آنالیزهای ریزساختاری XRD و SEM بر روی برخی از نمونه‌ها انجام‌شده است. در ادامه، تأثیر عوامل مختلف نظیر درصد ضایعات کاشی و سرامیک، مولاریته سدیم هیدروکسید (سود)، نسبت سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید و زمان عمل‌آوری بر روس مشخصات خاک تثبیت‌شده موردبررسی قرارگرفته است که در این فصل به آن‌ها پرداخته‌شده است.

## 2-4. نتایج آزمایش‌های شناسایی

## 4-2-1. نتایج آزمایش طیف‌سنجی فلورسانس پرتوایکس (XRF)

آزمایش فلورسانس پرتوایکس یک روش تحلیلی برای تعیین ترکیب شیمیایی مواد است که بر اساس جابه‌جایی الکترون‌های اتم در اوربیتال‌ها و آزاد شدن انرژی کار می‌کند. نتایج آزمایش تجزیه شیمیایی ضایعات کاشی و سرامیک در جدول (4-1) نمایش داده‌شده است. ترکیبات اصلی پودر ضایعات کاشی و سرامیک شامل اکسید سیلیسم به مقدار 548/65 درصد و اکسید آلومینیوم به مقدار 646/16 درصد شناسایی شدند.



شکل 4- 1. منحنی دانه‌بندی خاک ماسه‌بادی

## 4-4. **نتايج آزمايش وزن مخصوص ذرات**

با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته و رابطه داده‌شده در استاندار، مقدار وزن مخصوص برابر 76/2 است.

## 4-5. **حدود اتربرگ**

خاک ماسه‌بادی و پودر ضایعات کاشی و سرامیک حد روانی و خمیری ندارد و غیر پلاستیک تشخیص داده شدند.

## 6-4. نتایج آزمایش تراکم

 نتایج آزمایش تراکم در شکل (4-2) به نمایش درآمده است. این آزمایش برای درصدهای مختلف ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی ضایعات کاشی و سرامیک نسبت به ماسه‌بادی انجام شد.



شکل 4- 2. نمودار تراكم حاوی درصدهای مختلف ضایعات کاشی و سرامیک

**فصل پنجم**

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

## 5-1. مقدمه

در این تحقیق پس از شناسایی اولیه مشخصات خاک ماسه‌بادی و سایر مصالح مورد استفاده، خاک ماسه‌بادی با درصدهای مختلف ضایعات کاشی و سرامیک (0، 10، 20 و 30 درصد) با فعال کننده قلیایی (سه نسبت سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید 1، 2 و 4 و با سه غلظت سدیم هیدروکسید 8 ، 10 و 12 مولار) تثبیت‌شد. آزمایش تراکم بر روی خاک ماسه‌بادی حاوی درصدهای مختلف پودر کاشی و سرامیک انجام شد. همچنین بر روی نمونه‌های تثبیت‌شده در چهار زمان عمل‌آوری 7، 28، 56 و 91 روزه آزمایش مقاومت فشاری تکمحوری و بر روی نمونه‌های تثبیت شده 28 روزه آزمایش مدول برجهندگی با استفاده از تجهیزات سه محوری تکراری انجام شد. در انتها بر روی نمونه‌های منتخب تحلیل XRD و SEM انجام شد. نتایج حاصل از این تحقیق در ادامه آورده شده است.

## 5-2. نتیجه‌گیری

* با افزایش درصد پودر ضایعات کاشی و سرامیک، درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر افزایش می‌یابد.
* در نسبت ۱ سیلیکات سدیم به سدیم هیدروکسید با غلظت‌های ۱۰ و ۱۲ مولار، نمونه‌ها دچار تورم شدند. این تورم ممکن است به دلیل عدم تعادل در نسبت ترکیبات و واکنش‌های شیمیایی ناپایدار بوده باشد؛ بنابراین، تنظیم دقیق‌تر نسبت‌ها برای جلوگیری از تورم و بهبود خواص مکانیکی ضروری است.

## 5-3. پیشنهادات

* ارزیابی عملکرد ژئوپلیمر در شرایط محیطی مختلف (دما و رطوبت) و تأثیر آن بر مقاومت فشاری و مدول برجهندگی
* ارزیابی دوام خاک تثبیت‌شده با ژئوپلیمر در برابر عوامل محیطی نظیر انجماد و ذوب، فرسایش و حملات شیمیایی
* ارزیابی تأثیر درصد رطوبت اولیه بر مقاومت فشاری و مدول برجهندگی خاک تثبیت‌شده

**منابع**

الماسی، ع.، اسدی، فمحمدی، م.، فرهادی، ف.، عطافر، ز.، خاموطیان، ر. و محمدی، ا. 1392. بررسی میزان آلاینده‌های خروجی از دودکش کارخانه سیمان سامان کرمانشاه در سال 91-1390. فصلنامه بهداشت در عرصه دانشگاه علوم پزشکی شهید پزشکی- دانشکده بهداشت، 1(2)، 36-43.

برزگری دهجی، ع،. 1395. مطالعه آزمایشگاهی امکان‌سنجی ژئوپلیمر پوزولان تفتان براي تثبیت خاك، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته.

شهریار، ک.، فروهر، ف. و شریف، ن. 1382. آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از عملیات استخراج در معادن سنگ‌آهک سعیدی. در پنجمین همایش ایمنی، بهداشت و محیط‌زیست در معادن و صنایع معدنی، شرکت معدنی و صنعتی چادرملو، کرمان.

حق شنو، ح.، عربانی، م. 1387. اثر ضایعات الیاف پلیمري بر خصوصیات مقاومتی ماسه تثبیت‌شده باسیمان. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران.

Abderrahmane, G., & M.-K. Ratiba. (2013). Stabilized dune sand for road foundation layers-case of the dune sand of the region of Djelfa (Algeria). *Applied Mechanics and Materials, 319*, 263-277.

Al-Naje, F. Q., A. H. Abed, & A. J. Al-Taie. (2020). Improve geotechnical properties of soils using industrial wastes: a review. *Civ. Eng. Beyond Limits, 4*, 28-34.

AlKarni, A., & S. M. ElKholy. (2012). Improving geotechnical properties of dune sands through cement stabilization. *Journal of Engineering and Computer Sciences, 5*(1), 1-19.

Amhadi, T. S., & G. J. Assaf. 2021. Improvement of pavement subgrade by adding cement and fly ash to natural desert sand. *Infrastructures, 6*(11), 151.

Elipe, M. G., & S. López-Querol. (2014). Aeolian sands: Characterization, options of improvement and possible employment in construction–The State-of-the-art. *Construction and building materials, 73*, 728-739.

Khadka, S. D., P. W. Jayawickrama, S. Senadheera, & B. Segvic. (2020). Stabilization of highly expansive soils containing sulfate using metakaolin and fly ash based geopolymer modified with lime and gypsum. *Transportation Geotechnics, 23*, 100327.

Li, D., & E. T. Selig. (1996). Cumulative plastic deformation for fine-grained subgrade soils. *Journal of Geotechnical Engineering, 122*(12), 1006-1013.

Li, Y., J. Cui, T. Zhang, T. Okuro, & S. Drake. (2009). Effectiveness of sand-fixing measures on desert land restoration in Kerqin Sandy Land, northern China. *Ecological Engineering, 35*(1), 118-127.

Neumann, F., & M. Curbach. (2018). *Thermal treatment of desert sand to produce construction material.* Paper presented at the MATEC Web of Conferences.

Onyelowe, K., C. Igboayaka, F. Orji, H. Ugwuanyi, & D. B. Van. (2019). Triaxial and density behaviour of quarry dust based geopolymer cement treated expansive soil with crushed waste glasses for pavement foundation purposes. *International Journal of Pavement Research and Technology, 12*, 78-87.

Onyelowe Ken, C., & F. Okafor. (2006). A comparative review of soil modification methods. *University of Nigeria*.

Padmakumar, G., K. Srinivas, K. Uday, K. Iyer, P. Pathak, S. Keshava, & D. Singh. (2012). Characterization of aeolian sands from Indian desert. *Engineering Geology, 139*, 38-49.

Rasul, J. M., M. P. Burrow, & G. S. Ghataora. (2016). Consideration of the deterioration of stabilised subgrade soils in analytical road pavement design. *Transportation Geotechnics, 9*, 96-109.

Seif, E.-S. S. A. (2013). Assessing the engineering properties of concrete made with fine dune sands: an experimental study. *Arabian Journal of Geosciences, 6*, 857-863.

Selvi, P. (2015). Fatigue and rutting strain analysis on lime stabilized subgrades to develop a pavement design chart. *Transportation Geotechnics, 2*, 86-98.

Shalabi, F. I., J. Mazher, K. Khan, M. Alsuliman, I. Almustafa, W. Mahmoud, & N. Alomran. (2019). Cement-stabilized waste sand as sustainable construction materials for foundations and highway roads. *Materials, 12*(4), 600.

**Abstract:**

In deserts, dune sands are formed due to a lack of water, strong winds, and temperature fluctuations, and they naturally have low strength and bearing capacity. Due to their specific physical properties, these soils require improvement, especially for use in construction projects, through stabilization methods with various additives. Traditional stabilization methods, such as using cement or lime, are not considered suitable options due to high costs and adverse environmental impacts. In recent years, geopolymers have been developed as a green and cost-effective alternative due to their reduced CO2 emissions and lower energy consumption compared to cement and lime. In this study, to improve the mechanical properties of dune sand, which has low bearing capacity due to its low density and weak structure against traffic loads and environmental factors, ceramic tile waste powder in various percentages (0%, 10%, 20%, and 30%) was used.

**Keywords**: Dune sand, Geopolymer, Modulus of Resilience, Compressive Strength, Industrial Waste

****

**Sirjan University of Technology**

**Faculty of Civil Engineering**

**Master's thesis**

**Civil Engineering - Geotechnical Engineering Specialization**

**Investigating of Compressive Strength and Resilient Modulus of Dune Sand Stabilized using Geopolymer Based on the Industrial Wastes**

**By**

**Nazanin Ahmadi**

**Supervisor**

**Dr. Alireza Ghanizadeh**

**Advisor**

**Dr. Somayeh Bakhtiari**

**September 2024**

1. Deserts [↑](#footnote-ref-1)
2. Erosion [↑](#footnote-ref-2)
3. Heavily blowing winds [↑](#footnote-ref-3)
4. Sedimentation [↑](#footnote-ref-4)
5. Dune sand [↑](#footnote-ref-5)
6. Unified Soil Classification System(USCS) [↑](#footnote-ref-6)
7. American Association of State Highway and Transportation Officials) AASHTO( [↑](#footnote-ref-7)
8. Mechanical interlock [↑](#footnote-ref-8)
9. Pozzolani [↑](#footnote-ref-9)
10. Physicochemica [↑](#footnote-ref-10)
11. fly ash [↑](#footnote-ref-11)
12. Silica fume [↑](#footnote-ref-12)
13. Bentonite [↑](#footnote-ref-13)
14. Geo synthetics [↑](#footnote-ref-14)
15. Scanning Electron Microscope (SEM) [↑](#footnote-ref-15)
16. X-ray Fluorescence (XRF) [↑](#footnote-ref-16)
17. X-ray Diffraction (XRD) [↑](#footnote-ref-17)
18. Deep foundations [↑](#footnote-ref-18)
19. Improvement [↑](#footnote-ref-19)
20. stabilization [↑](#footnote-ref-20)
21. lime [↑](#footnote-ref-21)
22. portland cement [↑](#footnote-ref-22)
23. flay ash [↑](#footnote-ref-23)
24. Shallow ground treatments [↑](#footnote-ref-24)