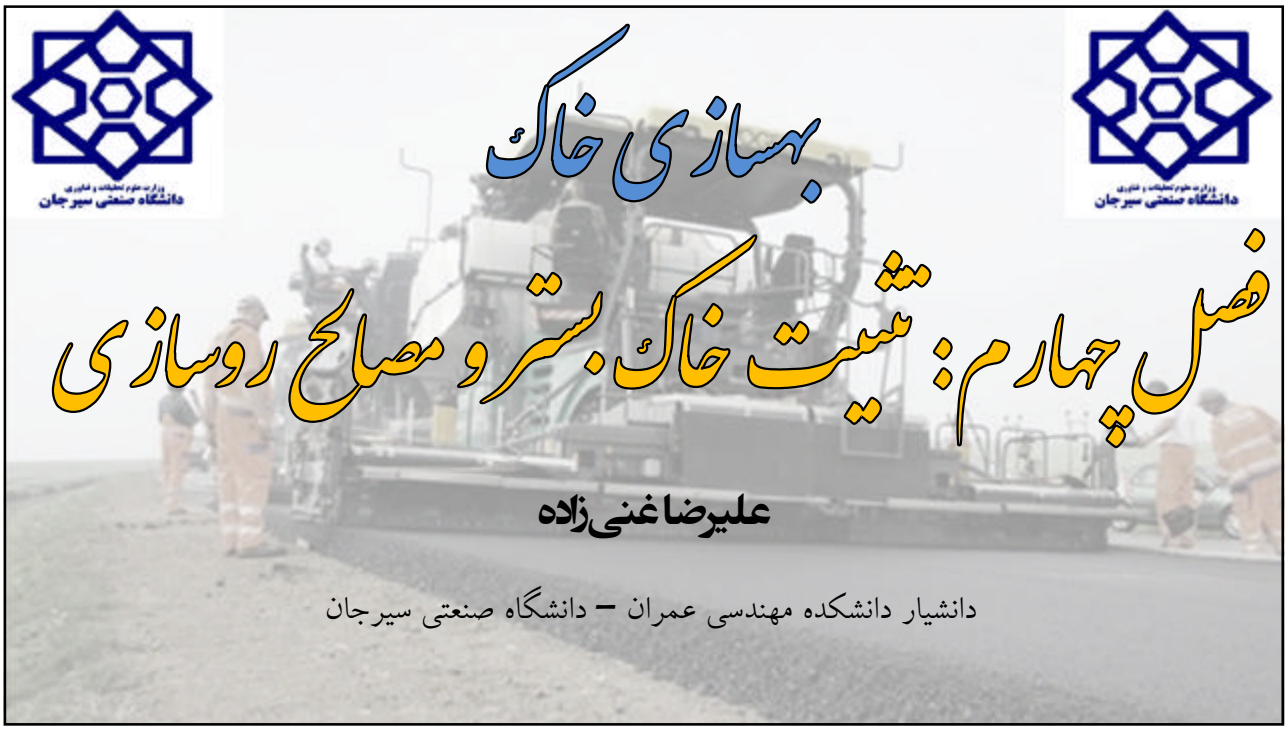
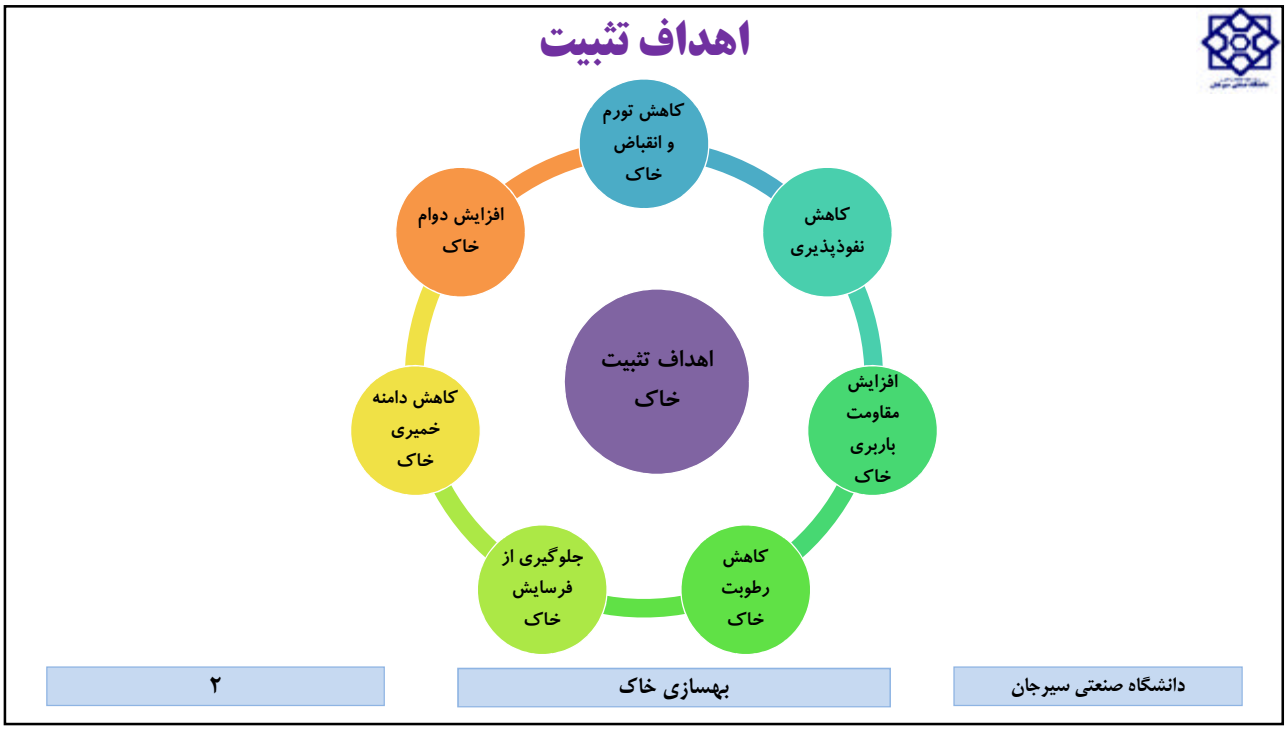
Pavement Engineering





Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D | ghanizadeh@sirjantech.ac.ir
Associate Professor, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Pavement Engineering

مزایای تثبیت خاک

انواع مواد تثبیت کننده

- ✓ **آهک**
- ✓ **سیمان**
- ✓ خاکستر بادی
- ✓ سرباره
- ✓ قیر
- ✓ کف قیر
- ✓ کف قیر+ سیمان
- ✓ کلرور سدیم
- ✓ کلرور کلسیم

Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D | ghanizadeh@sirjantech.ac.ir
Associate Professor, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Pavement Engineering

انواع مواد تثبیت کننده

درصد عبوری از الک ۲۰۰	نشانه خمیری	تثبیت‌کننده	مصالح سنگ‌دانه‌ای							مصالح لای و رس				
			GW	GP	GM	GC	SW	SP	SM	SC	ML	CL	OL	MH	CH
			A-1-a	A-1-a	A-1-b	A-1-b or A-2-6	A-1-b	A-3 or A-1-b	A-2-4 or A-2-5	A-2-6 or A-2-7	A-4 or A-5	A-6	A-4	A-5 or A-7-5	A-7-6
<12	<6	کلرید کلسیم	■	■		■	■								
<25	<6	قیر	■	■	■	■	■								
	<10	سیمان	■	■	■	■	■	■	■	■					
	>10	آهک								■					
>25	<10	سیمان				■			■	■	■				
	10-30	آهک								■		■		■	■
	>30	آهک+ سیمان								■		■		■	■

تثبیت با آهک

Lime Stabilization

Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D | ghanizadeh@sirjantech.ac.ir

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Pavement Engineering

تثبیت با آهک

انواع آهک جهت تثبیت خاک

- آهک شکفته
- آهک زنده
- دوغاب آهک

آهک شکفته دولومیتی $(Mg(oH)_2$ or $ca(oH)_2)$

آهک زنده (CaO)

آهک شکفته $(Ca(OH)_2)$

آهک زنده دولومیتی (caO+MgO)

عوامل موثر در تثبیت خاک با آهک

- جنس، دانه بندی و حدود اتربرگ خاک
- نحوهٔ استفاده از آهک
- شرایط جوی
- میزان استفاده از آهک حدود ۰/۵ الی ۸ درصد وزنی خاک است

Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D | ghanizadeh@sirjantech.ac.ir

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Pavement Engineering

تثبیت با آهک

هنگامی‌که آهک به خاک رس افزوده می‌شود، واکنش‌های متعددی انجام می‌شود که شامل مراحل زیر است:

- ✓ واکنش‌های تبادل کاتیونی یا کوتاه‌مدت
- ✓ واکنش‌های پوزولانی یا درازمدت
- ✓ واکنش‌های کربناسیون

واکنش تبادل کاتیونی

در تبادل کاتیونی، کاتیون‌های خاک رس با کاتیون‌های آهک جایگزین می‌شوند.

$Al^{3+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > NH_4^{+} > K^{+} > Na^{+} > Li^{+}$

بر پایه سری فوق هر کاتیون جایگزین یون سمت راست می‌شود. برای مثال یون کلسیم می‌تواند جایگزین یون‌های سدیم و پتاسیم رس شود.

این عمل بلافاصله پس از افزودن آب و آهک به خاک انجام‌گرفته و باعث کاهش پلاستیسیته و تورم خاک، افزایش کارآیی و مقاومت نسبی آن و همچنین تغییر ساختمان خاک به حالت مجتمع می‌شود. درواقع براثر واکنش، بافت خاک رس ازنظر فیزیکی تغییر کرده و مانند لای و ماسه عمل می‌کند و درنتیجه عملاً ذرات رس تمایل به جفت شدن با یکدیگر و تشکیل ذرات بزرگ‌تر را دارند

Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D | ghanizadeh@sirjantech.ac.ir
Associate Professor, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Pavement Engineering

واکنش پوزولانی

- واکنش پوزولانی باعث افزایش قابل‌توجه مقاومت در ترکیب خاک و آهک می‌شود. با اضافه کردن مقدار کافی آهک به خاک، pH مخلوط افزایش می‌یابد و به بیش از ۱۲ می‌رسد.
- افزایش pH باعث حل شدن سیلیکات و آلومینات موجود در خاک شده و با آزاد شدن این ترکیب‌ها از خاک رس، ترکیب آن‌ها با کلسیم ممکن می‌شود. ترکیب آلومینات و سیلیکات با آهک تشکیل آلومینات و سیلیکات کلسیم را می‌دهداین مواد پوزولانی- کریستالی مشابه سیمان هستند.
- واکنش‌های پوزولانی تابع زمان بوده و تا هنگامی‌که آلومینات و سیلیکات در خاک وجود دارند، ادامه می‌یابند و کریستال‌های جدید را به وجود می‌آورند. این واکنش‌ها به‌صورت زیر انجام می‌شوند.

$$CaO + Al_2O_3 + n\,H_2O \rightarrow CaAl_2O_3 + n\,HOH$$ آلومینات کلسیم

$$CaO + SiO_2 + n\,H_2O \rightarrow CaSiO_3 + n\,HOH$$ سیلیکات کلسیم

واکنش کربناتاسیون

کربناتاسیون یک پدیده نامطلوب است که درنتیجه عدم انجام واکنش خاک با آهک به وجود می‌آید. در طی این واکنش، آهک با گازکربنیک هوا ترکیب‌شده و باعث ایجاد یک ماده چسبنده ضعیف (پلاستیک بالا) و بازگشت آهک به حالت غیرفعال سنگ‌آهک می‌شود.

$$CaO + CO_2 \rightarrow CaCO_3$$

ازآنجایی‌که کربناتاسیون در زمان مخلوط کردن خاک و آهک (در هنگام ساخت و اجرا) نیز می‌تواند انجام شود، باید زمان این اختلاط را به کمترین حد ممکن رساند. درواقع کربناتاسیون، یک واکنش زیان‌آور برای خاک و آهک است (بهنیا و طباطبایی، ۱۳۷۳). نوع دیگری از واکنش کربناتاسیون وجود دارد که در زمان استفاده از آهک هیدراته اتفاق می‌افتد. حاصل این واکنش تولید اسیدکربنیک است که پس از واکنش آن با هیدروکسید کلسیم، کربنات کلسیم تولید می‌شود.

$$H_2O + CO_2 \rightarrow H_2CO_3$$

$$H_2CO_3 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + 2\,H_2O$$

لذا چنانچه مقدار رس کافی نباشد و یا آهک بیش‌ازحد به خاک اضافه شود به علت ایجاد $CaCO_3$، بهسازی خاک با آهک ناکارآمد می‌شود. لذا لازم است که درصد بهینه آهک و رطوبت بهینه طرح اختلاط با انجام آزمایش تعیین شود.

Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D | ghanizadeh@sirjantech.ac.ir

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Pavement Engineering

خاک های مناسب برای تثبیت با آهک

- ✓ خاک‌های با دامنه خمیری بیش از ۱۰
- ✓ خاک‌های رسی خیلی خمیری با دامنه خمیری بیش از ۳۵
- ✓ نا مناسب برای تثبیت خاک‌های با بیش از ۲ درصد مواد آلی یا نیم درصد سولفات محلول در آب
- ✓ با افزودن کچ به میزان ۲۰ درصد وزنی خاک به آهک می‌توان خاک‌های آلی را نیز تثبیت کرد.

بطور کلی خاکهائیکه در طبقه بندی یونیفاید در گروههای SW-SC , SM , SC , SM-SC ,
و یـا در طبقـه‌بنـدی اشـتو SP-SC , CH- , CL , MH , GW-GC , GP-GC , GM-GC

طبقه‌بندی خاک‌ها از نظر واکنش با آهک

خاک‌های با واکنش: خاک‌هایی که پس از تثبیت با آهک و عمل‌آوری با آهک به مدت ۲۸ روز در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد بیش از ۳/۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع افزایش مقاومت از خود نشان می‌دهند.

خاک‌های بدون واکنش: خاک‌هایی که پس از تثبیت با آهک و عمل‌آوری با آهک به مدت ۲۸ روز در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد کمتر از ۳/۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع افزایش مقاومت از خود نشان می‌دهند.

Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D | ghanizadeh@sirjantech.ac.ir
Associate Professor, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Pavement Engineering

خصوصیات فنی خاک تثبیت شده با آهک

تراکم: حداکثر وزن مخصوص خشک کمتر و درصد رطوبت بهینه بیشتر است.

خصوصیات خمیری: کاهش دامنه خمیری و حد مایع

پتانسیل تورم‌پذیری: کاهش پتانسیل تورم‌پذیری

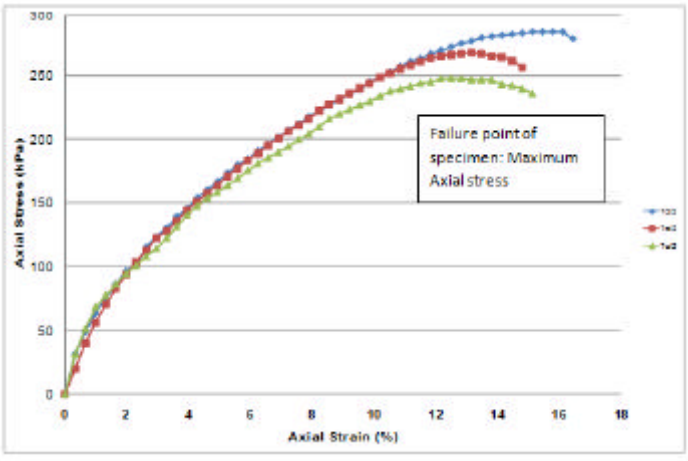
مقاومت: به دو دسته مقاومت آنی و مقاومت دراز مدت قابل تقسیم است.

تنش وتغییر شکل نسبی: تنش کسیختگی افزایش و تغییر شکل نهایی کاهش می‌یابد

خستگی: به دلیل جسبنده بودن این مصالح در آنها مکانیزم خرابی خستگی دیده می‌شود.

دوام: خاک‌های تثبیت شده با آهک با قرار گیری در معرض یخبندان و ذوب بخشی از مقاومت خود را از دست می‌دهند.

آزمایش مقاومت فشاری تک محوری (UCS)



Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D | ghanizadeh@sirjantech.ac.ir
Associate Professor, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Pavement Engineering

روش‌های طرح تثبیت خاک با آهک

- ✓ روش pH (pH=12.4)
- ✓ روش دامنه خمیری
- ✓ روش CBR
- ✓ روش اشتو
- ✓ روش مقاومت فشاری
- ✓ روش اصولی طرح تثبیت خاک

روش‌های طرح تثبیت خاک با آهک

روش حدود خمیری

در این روش خاک با آهک و آب خوب مخلوط می‌شود بطوریکه مخلوط، رنگ یکنواختی پیدا کند. سپس حد روانی و دامنه خمیری مخلوط تعیین می‌شود. این آزمایش با درصدهای مختلف آهک تکرار می‌گردد. سپس منحنی تغییرات حد روانی و دامنه خمیری بر حسب درصدهای مختلف آهک مصرفی رسم شده و درصد آهک بهینه از روی منحنی‌های مذکور نسبت به وزن مصالح خشک برای دامنه خمیری یا حد روانی موردنظر به دست می‌آید.

روش سی بی آر

در این روش ابتدا خاک را با آهک خوب مخلوط کرده، طوری که رنگ آن یکنواخت شود. سپس به مقدار مناسب آب اضافه نموده و خوب مخلوط می‌کنند. مخلوط حاصل را تحت آزمایش سی بی آر قرار می‌دهند. این عمل با درصدهای مختلف آهک تکرار شده و منحنی تغییر سی بی آر را برحسب درصد آهک ترسیم می کنند.

از روی منحنی بدست آمده درصد آهک مربوط به سی بی آر موردنظر تعیین می شود. حداقل سی بی آر قابل قبول برای زیراساس آهکی ۳۰ درصد می‌باشد.

Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D | ghanizadeh@sirjantech.ac.ir
Associate Professor, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Pavement Engineering

روش‌های طرح تثبیت خاک با آهک

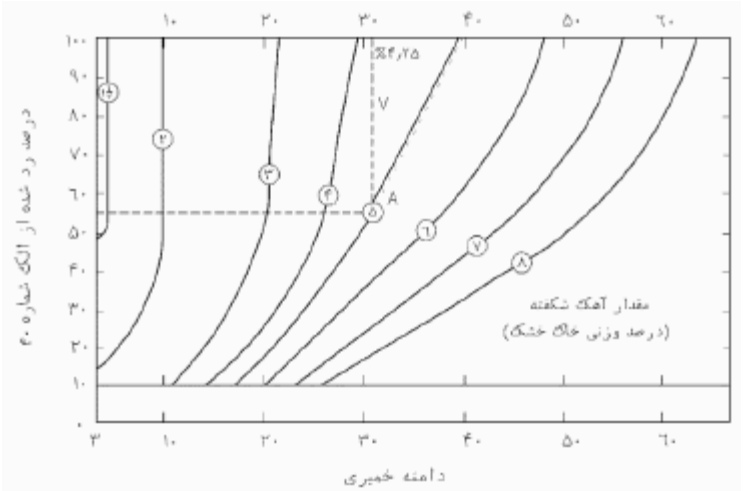
روش مقاومت فشاری تک محوری

در این روش خاک را با درصدهای مختلف آهک خوب مخلوط می‌کنند. سپس به مقدار مناسب آب اضافه نموده و براساس آزمایش آشتو اصلاح شده ۱۸۰-T آشتو، مخلوط را کوبیده و متراکم می‌کنند.

نمونه‌های کوبیده شده با درصدهای مختلف آهک را تحت آزمایش فشاری تک محوری قرار می‌دهند. پس از به دست آوردن نتایج آزمایش، منحنی تغییرات مقاومت فشاری برحسب تغییرات درصد آهک ترسیم می‌گردد. از منحنی حاصل میزان درصد آهک برای مقاومت موردنظر به دست می‌آید. مقاومت فشاری برای قشر زیراساس تثبیت شده با آهک به کل ضخامت لایه‌های روسازی روی قشر زیراساس بستگی دارد که باید در مشخصات فنی خصوصی طرح قید شود.

روش‌های طرح تثبیت خاک با آهک

روش منحنی AASHTO (نشریه ۲۳۴)

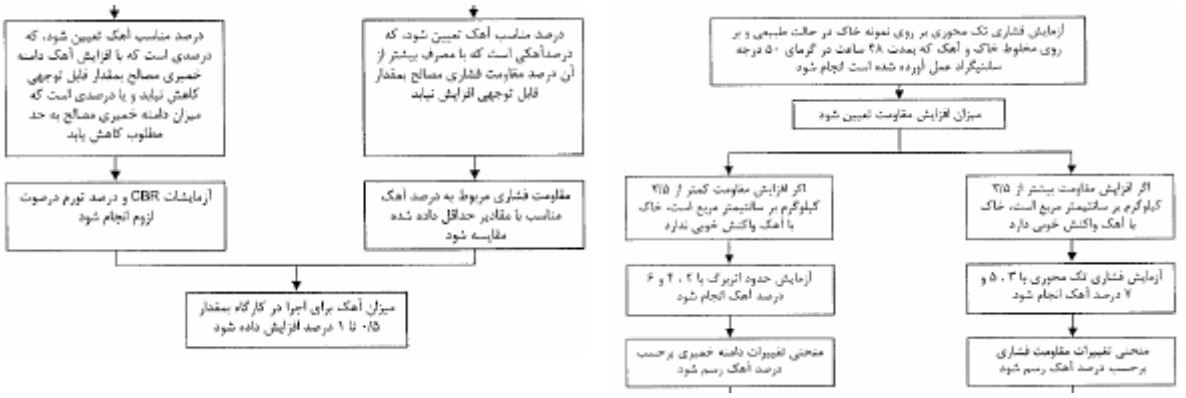


Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D | ghanizadeh@sirjantech.ac.ir
Associate Professor, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Pavement Engineering

روش‌های طرح تثبیت خاک با آهک

روش اصولی طرح اختلاط خاک و آهک



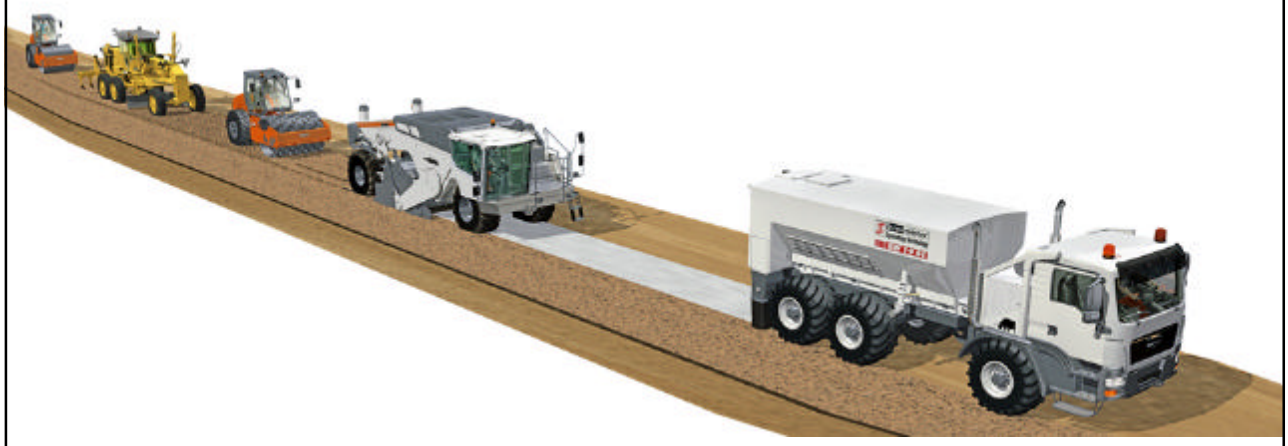
مراحل تثبیت خاک با آهک

- ✓ آماده کردن خاک
- ✓ پخش آهک
- ✓ مخلوط کردن خاک و آهک
- ✓ آب‌پاشی
- ✓ تراکم
- ✓ عمل‌آوری
- ✓ کنترل کیفیت مخلوط

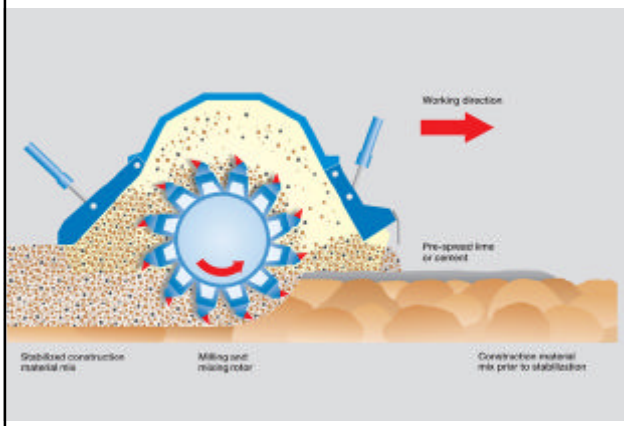
Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D | ghanizadeh@sirjantech.ac.ir
Associate Professor, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

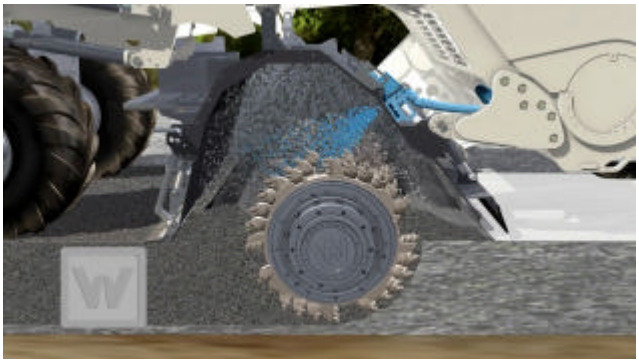
Pavement Engineering

مراحل تثبیت خاک با آهک



اختلاط با دستگاه WR 2500





Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D | ghanizadeh@sirjantech.ac.ir
Associate Professor, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Pavement Engineering

تثبیت با سیمان پرتلند

Portland cement Stabilization

خاک های مناسب برای تثبیت با سیمان

سیمان، حاوی اکسیدهای آهک (CaO)، سیلیس (SiO_2)، آلومینیوم (AL_2O_3)، اکسید آهن (Fe_2O_3) و اکسیدهای دیگر است. انواع مختلف سیمان پرتلند عبارت‌اند از :

- سیمان پرتلند معمولی یا نوع I
- سیمان پرتلند معمولی اصلاح‌شده یا نوع II
- سیمان پرتلند تندگیر یا نوع III
- سیمان پرتلند با حرارت زایی کم یا نوع IV
- سیمان پرتلند ضد سولفات یا نوع V

Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D | ghanizadeh@sirjantech.ac.ir
Associate Professor, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Pavement Engineering

خاک های مناسب برای تثبیت با سیمان

- خاک‌های با دامنهٔ خمیری کمتر از ۳۰
- نامناسب برای خاک‌های با بیش از ۲ درصد مواد آلی یا PH کمتر از ۵/۳
- مناسبترین ماده برای تثبیت شن و ماسه خوب دانه‌بندی شده
- با افزودن کچ به میزان ۲۰ درصد وزنی خاک به آهک می‌توان خاک‌های آلی را نیز تثبیت کرد.

خاک های مناسب برای تثبیت با سیمان

از نقطه نظر فنی و اقتصادی خاکهائیکه اندازه درشت‌ترین دانه آنها کوچکتر از ۵۰ میلیمتر است و حداقل ۵۵ درصد وزنی آنها از الک شماره ۴ و حداقل ۳۵ درصد وزنی آنها از الک شماره ۱۰ عبور می‌کند و دارای ۱۰ تا ۳۵ درصد اجزاء کوچکتر از ۰/۰۷۵ میلیمتر هستند بهترین گزینه برای ثبیت با سیمان محسوب می‌شوند. خاکهائیکه در طبقه‌بندی اشتو در گروههای A-۱ تا A-۷ قرار می‌گیرند قابلیت تثبیت شدن با سیمان را دارند. خاکهای A-۱، A-۲ و A-۳ که کمتر از ۳۵ درصد وزنی آنها از الک شماره ۲۰۰ عبور می‌کند مناسبترین خاکها برای تثبیت با سیمان محسوب می‌شوند. در حالیکه خاکهای آلی به هیچ وجه برای تثبیت با سیمان مناسب نیستند زیرا وجود این مواد در خاک (بر حسب نوع و درصد آنها)باعث کند شدن فرایند هیدراسیون سیمان و در نتیجه مانع سخت شدن مخلوط خاک و سیمان می‌شود.

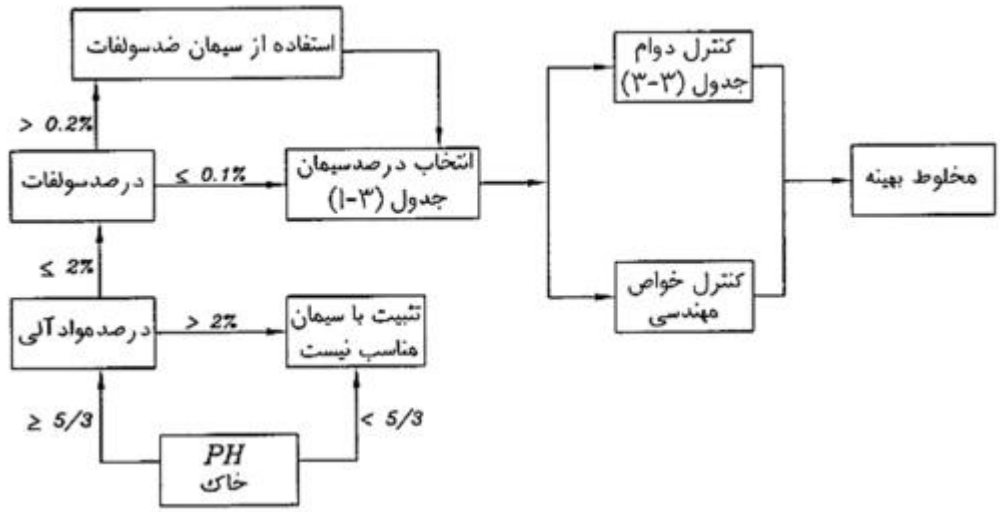
Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D | ghanizadeh@sirjantech.ac.ir
Associate Professor, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Pavement Engineering

درصد سیمان مناسب برای تثبیت خاک های مختلف

رده خاک		حدود معمول سیمان مورد نیاز		تخمین مقدارسیمان برای آزمایش وزن مخصوص-درصد رطوبت(درصد وزنی)	مقدار سیمان برای آزمایشهای تر و خشک شدن و یخبندان – ذوب (درصدوزنی)
اشتو	یونیفاید	درصدحجمی	درصد وزنی		
A-۱-a	GW, GP, GM, SW SP, SM	۵ – ۷	۳– ۵	۵	۳ – ۵ – ۷
A-۱-b	GM, GP, SM, SP	۷ – ۹	۵ – ۸	۶	۴ – ۶ – ۸
A-۲	GM, GC, SM, SC	۷ – ۱۰	۵ – ۹	۷	۵ – ۷ – ۹
A-۳	SP	۸ – ۱۲	۷ – ۱۱	۹	۷ – ۹ – ۱۱
A-۴	CM, ML	۸ – ۱۲	۷ – ۱۲	۱۰	۸ – ۱۰ – ۱۲
A-۵	ML, MH, CH	۸ – ۱۲	۸ – ۱۳	۱۰	۸ – ۱۰ – ۱۲
A-۶	CL, CH	۱۰ – ۱۲	۹ – ۱۵	۱۲	۱۰ – ۱۲ – ۱۴
A-۷	OH, MH, CH	۱۰ – ۱۲	۱۰ – ۱۶	۱۲	۱۱ – ۱۳ – ۱۵

مراحل طرح تثبیت خاک با سیمان



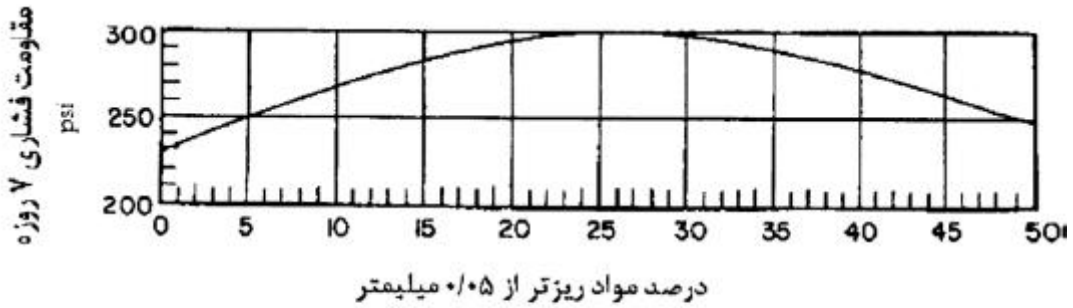
Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D | ghanizadeh@sirjantech.ac.ir
Associate Professor, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Pavement Engineering

دوام مورد نیاز برای خاک های تثبیت شده با سیمان

طبقه بندی خاک (آشتو M145)	حداکثر درصد افت وزن مجاز
A-1 , A-3 , A-2-4 , A-2-5	۱۴
A-2-6 , A-2-7 , A-4 , A-5	۱۰
A-6 , A-7	۷

مقاومت فشاری مورد نیاز برای خاک های تثبیت شده با سیمان

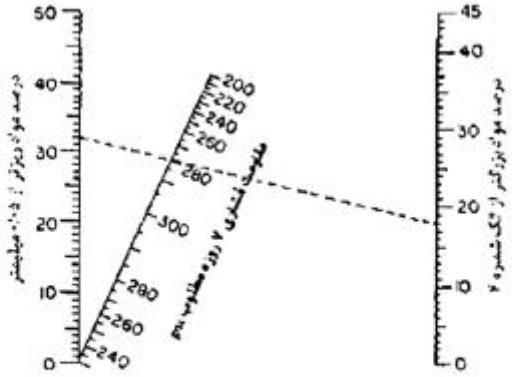


شکل (۳-۲) : حداقل مقاومت فشاری قابل قبول خاکهای تثبیت شده با سیمان که اندازه درشت ترین دانه آنها کوچکتر از ٤/٧٦ میلیمتر است

Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D | ghanizadeh@sirjantech.ac.ir
Associate Professor, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology

Pavement Engineering

مقاومت فشاری مورد نیاز برای خاک های تثبیت شده با سیمان



شکل (۳-۳) : حداقل مقاومت فشاری قابل قبول خاکهای تثبیت شده با سیمان که اندازه درشت ترین دانه انها بزرگتر از ٤/٧٦ میلیمتر است

مراحل تثبیت خاک با سیمان

- ✓ آماده کردن خاک
- ✓ پخش سیمان
- ✓ مخلوط کردن خاک و سیمان
- ✓ آب‌پاشی
- ✓ تراکم
- ✓ عمل‌آوری
- ✓ کنترل کیفیت مخلوط

Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D | ghanizadeh@sirjantech.ac.ir
Associate Professor, Department of Civil Engineering, Sirjan University of Technology