

# ثبیت خاک

Pavement Engineering

## Soil Stabilization

دکتر محمدرضا احدی

استادیار، عضو هیئت علمی

[www.drahadi.ir](http://www.drahadi.ir)

[info@drahadi.ir](mailto:info@drahadi.ir)

# بارگذاری سنگین روی باند



بارگذاری سنگین روی باند





# بارگذاری سنگین روی باند و روسازی ضعیف





بارگذاری سنگین روی باند و روسازی ضعیف







حادثه ناشی از چاله و سطح ناهموار



# حادثة ناشی از چاله و سطح ناهموار



# تاریخچه

آغاز استفاده از سیمان بعنوان ماده  
تثبیت و تقویت کننده فرودگاههای  
نظامی در سال ۱۹۳۸

استفاده روزافزون از مواد تثبیت کننده در  
اقصى نقاط جهان

تثبیت بیش از ۶۰۰ میلیون مترمربع از  
سطح راههای اروپا تا به امروز





# هدف از تثبیت خاک

- کاهش تورم و انقباض خاک
- افزایش توان باربری خاک
- کاهش دامنه خمیری خاک
- کاهش ضخامت لایه های روسازی
- صرفه جویی در مصرف مصالح
- ایجاد لایه های اساس و زیر اساس با توان باربری بیشتر
- تسریع در اجرای عملیات



# مکانیسم تثبیت

مکانسیم شیمیایی

**Chemical**

مکانسیم مکانیکی

**Mechanical**





# مکانیسم تثبیت

## مکانیسم شیمیایی

شامل تثبیت با آهک  
یا سیمان

منجر به اصلاح  
خواص ذرات خاک

## مکانیسم مکانیکی

شامل استفاده توام  
آهک و سیمان و یا  
تثبیت با قیر

منجر به افزایش  
دوام و توان باربری  
لایه خاک



# تثبیت شیمیایی

## Chemical stabilization

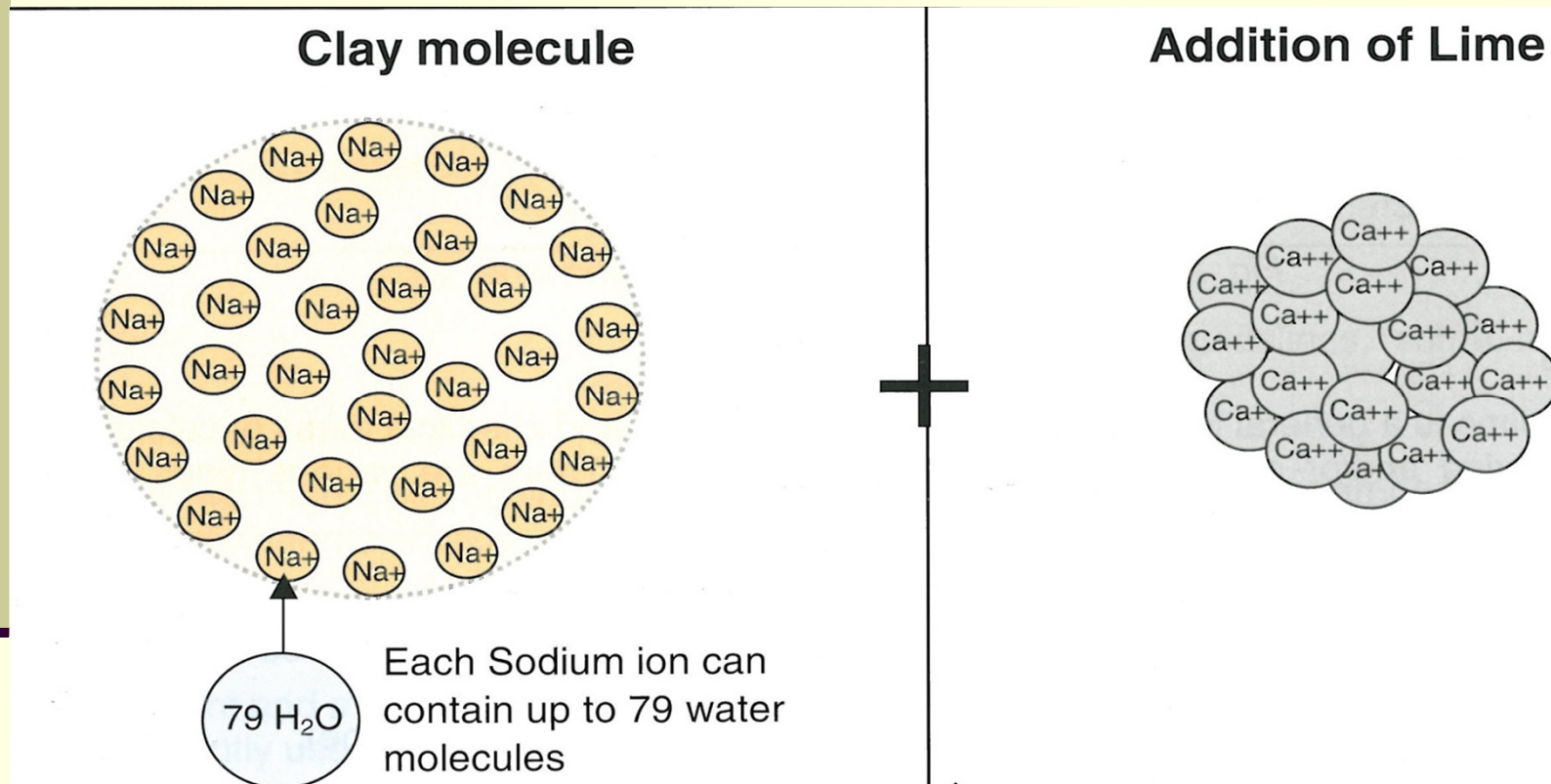
ترکیب شیمیایی یونهای کلسیم با خاک  
رس و کاهش خاصیت خمیری خاک

خارج شدن یون سدیم از آهک و  
جایگزینی آن با کلسیم

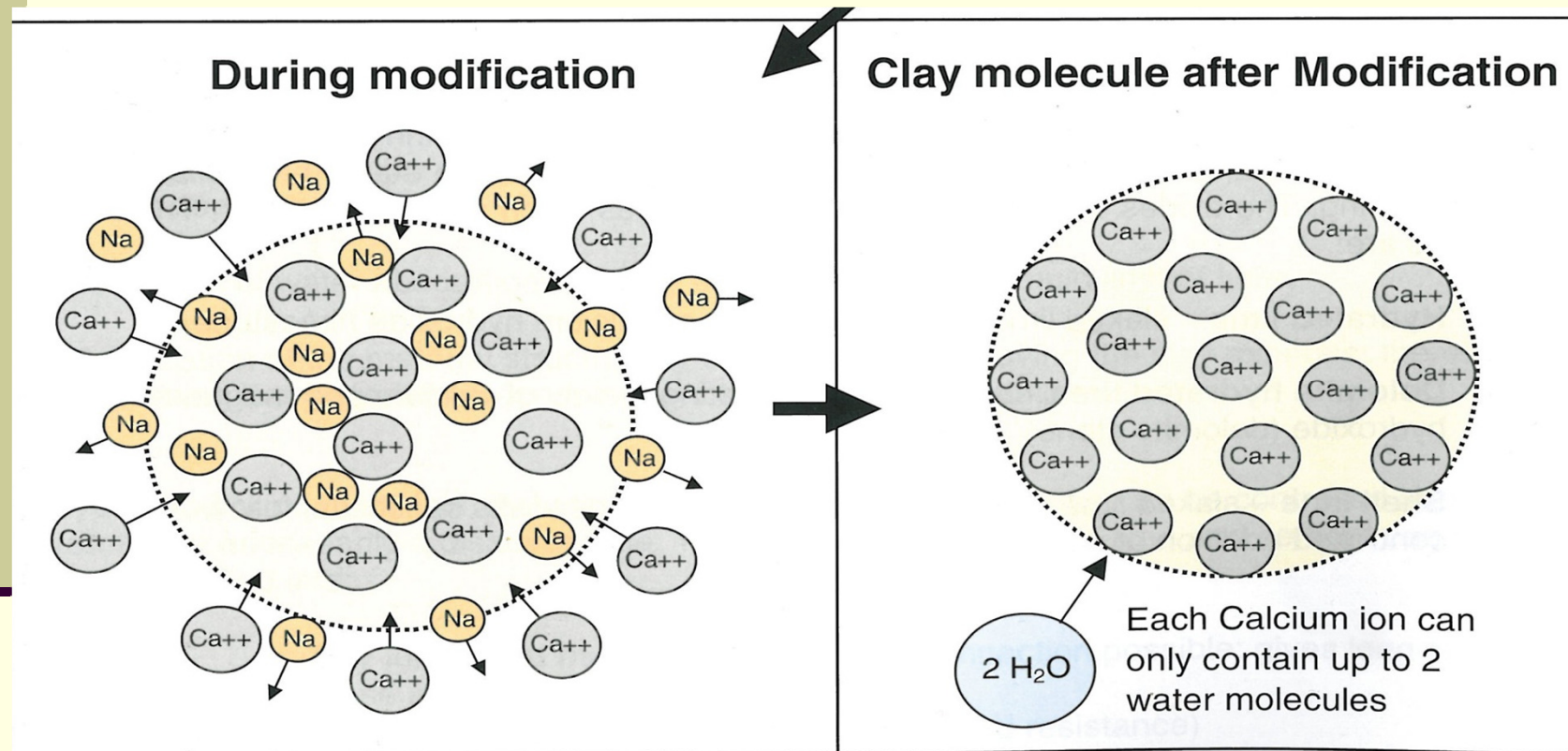
قابلیت جذب حداکثر ۲ مولکول آب در  
یونهای کلسیم (سدیم ۷۹ مولکول آب  
جذب می کند)



# ترکیب آهک با خاک رس



# جایگزینی مولکولهای کلسیم با سدیم



# تثبیت مکانیکی Mechanical Stabilization

۱- به تبع تثبیت شیمیایی توانایی جذب آب پائین آمده و در نتیجه قابلیت تراکم پذیری بیشتر می شود.

۲- بدلیل خاصیت چسبندگی ماده تثبیت کننده ذرات خام بهم متصل شده و باعث استحکام و افزایش توان باربری خاک می شود.





# روشهای تثبیت خاک

■ تثبیت خاک با مصالح شنی و آهک

■ تثبیت خاک با سیمان

■ تثبیت خاک با قیر

■ تثبیت خاک با خاکستر (Fly Ash)

■ تثبیت با پوسته برنج (Rice Husk Ash)



# تثبیت خاک با مصالح شنی

■ در راهسازی برای کیفیت مصالح بکار می رود





## تثبیت خاک با مصالح شنی به منظور

- اصلاح خاک های نرم و کم مقاومت
- بهبود مشخصات فنی خاک ها و مصالح شنی
- ایجاد لایه های اساس و زیراساس با قابلیت باربری نسبتا زیاد
- بازسازی روسازی های فرسوده با استفاده از مصالح موجود
- کاهش گرد و خاک و رطوبت



# تثبیت خاک و مصالح شنی با آهک

■ بدلیل مشخصات فنی نامطلوب خاک در راه سازی که در اغلب موارد منجر به تغییر مسیر و یا تعویض خاک می شود بدین دلیل از انواع آهک با درجات خلوص مختلف برای تثبیت خاک با آهک استفاده می شود.

■ متداولترین این مواد **آهک شکفته** و **آهک شکفته دولومیتی**، **آهک زنده** و **آهک زنده دولومیتی** است.





# تثبیت خاک و مصالح شنی با آهک

- آهک زنده ماده ای سفید رنگ است که دارای وزن مخصوص حدود  $2/3$  کیلوگرم بر مترمکعب می باشد.
- آهک شکفته در مقایسه با آهک زنده قابلیت جذب آب کمتری دارد بهمین دلیل کاربرد آن ساده بوده و به راحتی انبار می شود.

## خصوصیات فنی و ویژگی های خاک تثبیت شده با آهک

■ بطور کلی تمام خاک های ریزدانه پس از اختلاط با آهک دارای کیفیت بهتری از نظر خصوصیات خمیری می شوند. لیکن اضافه کردن آهک به هر خاکی ممکن است سبب افزایش قابل ملاحظه مقاومت آن نشود.



## خاک های مناسب جهت تثبیت با آهک

■ خاکهایی که دامنه خمیری آنها بزرگتر از ۱۰ و

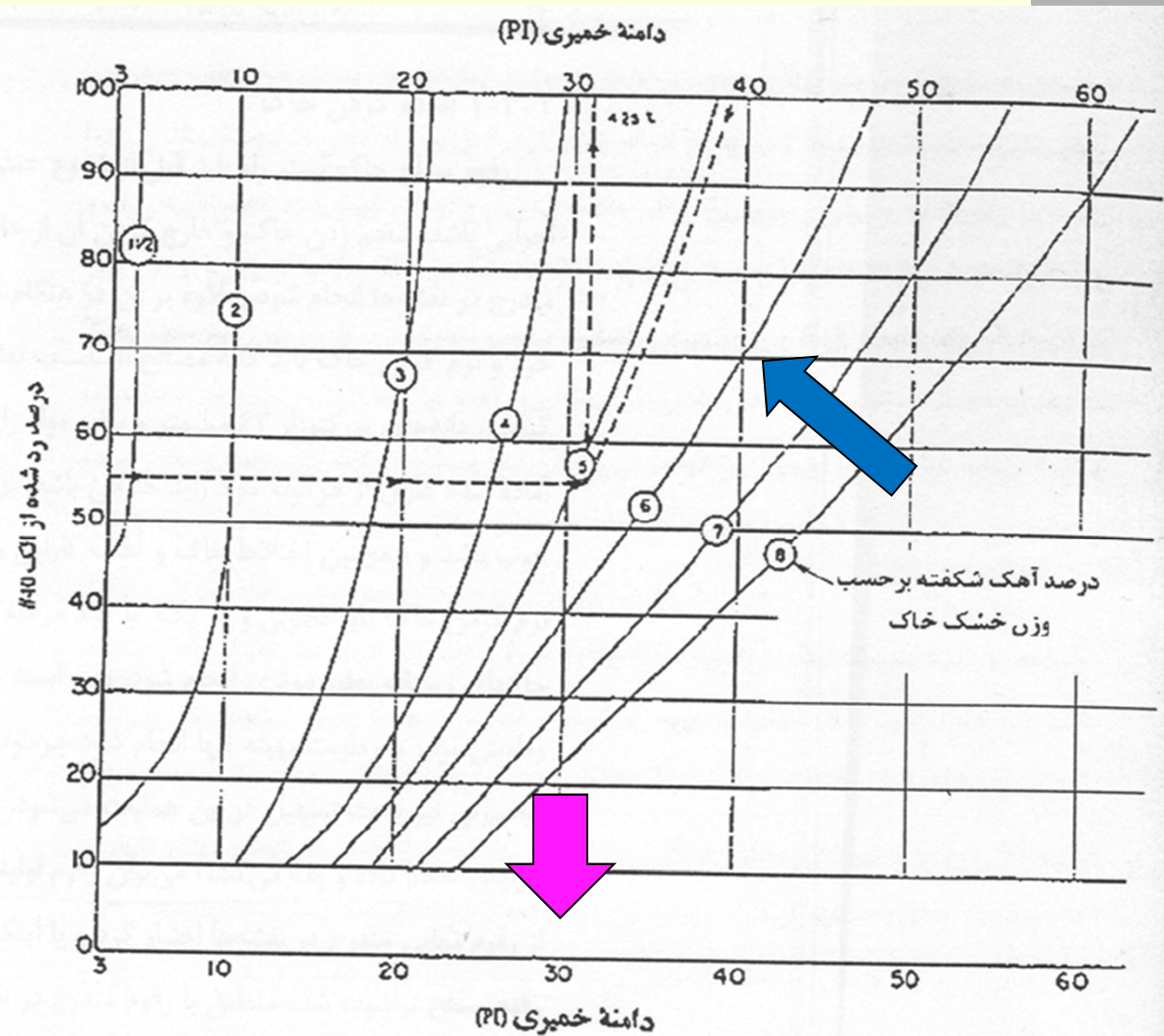
خاکهای رسی بسیار خمیری که  $PI > 35$  دارند مناسب است.

■ برای خاکهایی که مواد آلی آنها بیش از ۲ %

باشد و برای خاکهای سولفاته مناسب نیست.



# میزان درصد آهک مصرفی با توجه به دامنه خمیری





## خصوصیات اصلی خاک تثبیت شده با آهک

- تراکم
- خصوصیات خمیری
- تغییر حجم
- مقاومت آنی و مقاومت در درازمدت
- تنش تغییر شکل نسبی
- خستگی
- دوام



# تراکم Compaction

■ پارامترهای مهم در تراکم عبارتند از:

■ حداکثر وزن مخصوص

■ درصد رطوبت بهینه.







## خصوصیات خمیری

■ اضافه نمودن آهک به خاک سبب کاهش  
خصوصیات خمیری (کاهش دامنه خمیری و  
حد روانی) آن می شود.

■ خاک هایی که دارای مقدار بیشتری رس  
هستند نیاز بیشتری به آهک دارند.



## تغییر حجم

■ اصلاح خاک های رسی با آهک سبب می شود که بطور قابل ملاحظه ای از قابلیت تورم این نوع خاک ها کم شود.

■ علت این کاهش، میل به جذب آب توسط دانه های رس اشباع شده از آهک و بوجود آمدن یک استخوان بندی از مواد cement است (چسبندگی) که در برابر افزایش حجم مصالح و در اثر رطوبت مقاومت می کند.



## ارزیابی مقاومت خاک های تثبیت شده با آهک

■ آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا  
(CBR)

■ تک محوری (Axial test)

■ آزمایش کشش مستقیم (IDT)،

■ سه محوری (Tri-Axial test)،

CBR هرچه کم باشد  
خاک مقاومت کمی دارد

# CBR Classification

CBR	کیفیت	مورد استفاده
0-3	خیلی بد	خاک بستر روسازی
3-7	بد	خاک بستر روسازی
7-20	متوسط	لایه زیر اساس
20-50	خوب	زیر اساس و اساس
>50	عالی	اساس





## مقاومت آنی

■ معمولاً بلافاصله بعد از اضافه کردن آهک به خاک، مقاومت و استقامت خاک به میزان محسوسی افزایش می یابد.

■ افزایش آنی مقاومت، انجام عملیات اجرایی بر روی خاک های چسبنده و خمیری از نظر حرکت ماشین آلات تسهیل و سبب بهبود کیفیت خاک جهت اجرای روسازی می شود.



## مقاومت در دراز مدت

- خاکها پس از اختلاط **5%** آهک و عمل آوردن به مدت **۷۵** روز در گرمای **۲۰** درجه، مقاومت متوسطی برابر با **۱۱۰ کیلو گرم بر سانتی متر مربع** را داشته اند.
- نتایج بیانگر آن است که افزایش مقاومت خاک های تثبیت شده با آهک با گذشت زمان ادامه می یابد و در برخی موارد این افزایش تا بیش از **۱۰ سال** نیز طول می کشد.



## تنش تغییر شکل نسبی

- خاک های تثبیت شده با آهک، استقامت نهایی بیشتر و تغییر شکل نهایی کمتری نسبت به خاک های اصلی دارند.
- با اضافه کردن **۵٪** آهک به یک نمونه خاک و سپس عمل آوردن مصالح به مدت **۴۸** ساعت در دمای **۲۰** درجه به منحنی تنش – تغییر شکل نسبی نشان داده می شود.



## خستگی

■ مقاومت خاک های تثبیت شده با آهک باگذشت زمان و گرمای محیط افزایش می یابد . اگر تنش های بوجود آمده در این مصالح در هر بارگذاری مقدار ثابتی باشد، نسبت این تنش ها به مقاومت نهایی مصالح با گذشت زمان کاهش می یابد و در نتیجه تعداد دفعات بارگذاری که برای خسته کردن مصالح لازم، افزایش می یابد.





# دوام

- خاک های تثبیت شده با آهک در اثر یخبندان، ذوب یخ، قسمتی از مقاومت خود را از دست می دهند.
- هر اندازه مقاومت فشاری مصالح اولیه بیشتر باشد، مقاومت آنها در برابر یخبندان و ذوب یخ بیشتر خواهد شد.
- تعداد دفعات یخبندان – ذوب یخ بر روی کاهش مقاومت مصالح تاثیر زیادی دارد و با افزایش دفعات یخبندان – ذوب یخ از مقاومت مصالح بیشتر کاسته می شود.



## طرح خاک تثبیت شده با آهک

■ گروه اول : شامل روش هایی است که هدف از تثبیت از خاک، کاهش خواص خمیری، کاهش تورم و یا افزایش آنی مقاومت است.

◀ گروه دوم : شامل روش هایی است هدف از تثبیت خاک، افزایش مقاومت و دوام مصالح است.



## روش PH

■ در این روش باید آن قدر به خاک مورد نظر آهک اضافه شود تا آنکه میزان PH مخلوط به  $12.4\%$  که مقدار لازم برای شروع واکنش پوزولانی است برسد



## مزیت و نقص روش PH

این یک روش سریع و سالم برای تعیین درصد آهک است.

ولی این روش مشخص نمی کند که خاک دارای واکنش خوبی با آهک است یا خیر و مقاومت مصالح تثبیت شده چه مقدار خواهد بود.





## روش دامنه خمیری ( PI )

■ ابتدا خاک و آهک با آب بخوبی مخلوط شده و پس از ۱ ساعت به همان حالت شل خود رها شده تا واکنش های آنی بوقوع بپیوندد و تحت آزمایش اتربرگ قرار گیرد. این آزمایش با درصدهای مختلف آهک تکرار می شود و سپس منحنی تغییرات دامنه خمیری بدست می آید.

■ درصد آهک مناسب: درصدی است که بکار بردن درصد آهک بیشتر سبب کاهش قابل ملاحظه دامنه خمیری نگردد و دامنه خمیری را تا حد مورد نظر کاهش دهد.



## روش CBR

■ در این روش خاک تثبیت شده با آهک و آب با یکدیگر مخلوط شده و پس از مدت معینی تحت آزمایش CBR قرار می گیرد.

■ درصد آهک مناسب : مقدار آهکی است که در میزان رطوبت مورد نظر CBR خاک را به مقدار معینی افزایش دهد .

■ هر چه CBR کم باشد، خاک مقاومت کمتری خواهد داشت.



# مراحل اجرای تثبیت خاک

- آماده کردن خاک
- پخش آهک
- اختلاط و آب پاشی
- کوبیدن، تسطیح و به عمل آوردن



# روش های آماده سازی خاک

■ روش اختلاط در محل

■ روش اختلاط در کارخانه

■ روش تزریق





# روش اختلاط در محل

- آهک با خاکی که جزئی از روسازی بوده و یا در حریم راه واقع است ، مخلوط می شود.
- آهک با خاکی که از محل قرضه بدست می آید، مخلوط شده و سپس به محل مصرف حمل می شود.
- آهک با خاکی که از محل قرضه بدست آمده و به محل مصرف حمل شده، مخلوط می شود.



## روش اختلاط در کارخانه

در این روش خاک مورد نظر به یک کارخانه مرکزی تهیه خاک تثبیت شده با آهک حمل شده، در این محل خاک با آهک و آب به طور یکنواخت مخلوط شده و سپس به محل مصرف حمل می شود .

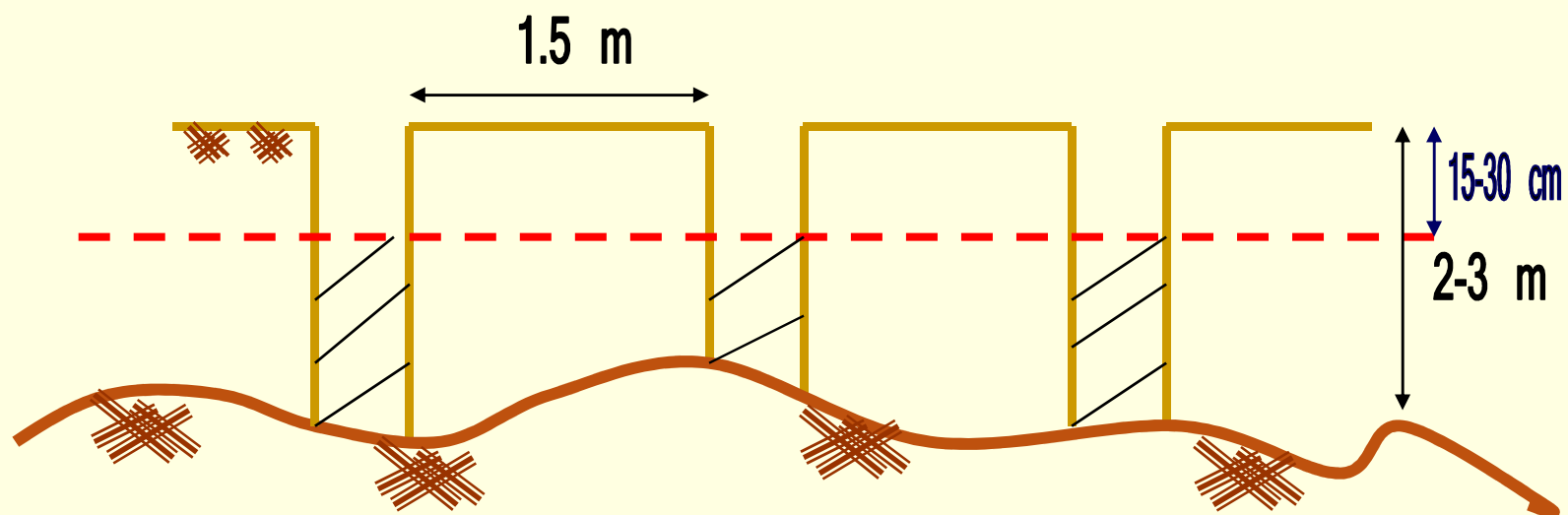


## روش تزریق با فشار

- تزریق خاک با دوغاب آهک تحت فشار، معمولاً به منظور کاهش قابلیت تورم و پایداری کردن خاک در راهسازی بکار می رود. در این روش دوغاب آهک به عمق 2-3 m در خاک تزریق می شود.
- معمولاً فاصله بین نقاط تزریق شده 1.5 m است. پس از تزریق آب با آهک، لایه ای به ضخامت 15-30 cm از سطح بالایی خاک بطور کامل با استفاده از روش های معمول تثبیت می شوند.



# روش تزریق با فشار







# روش های اختلاط خاک و آهک

## Mixing

- اختلاط با استفاده از تیغه گریدر
- اختلاط با استفاده از مخلوط کن دوار
- اختلاط یک مرحله ای
- اختلاط دو مرحله ای
- شامل اختلاط اولیه خاک و آهک ، عمل آوردن مخلوط به مدت 24 – 48 hr و سپس اختلاط نهایی در مرحله اول ، اختلاط آهک پخش شده سبب جا افتادن خاک می شود و در مرحله دوم با استفاده از تیغه گریدر یا مخلوط کن دوار استفاده می گردد .



# کنترل کیفیت خاک تثبیت شده با آهک

- ضخامت لایه
- خرد و نرم شدن
- میزان آهک پخش شده
- میزان آهک در دوغاب آهک ( وسیله اندازه گیری آن ، هیدرومتر نام دارد )
- درصد آهک استفاده شده بوسیله **AASHTO** یا **ASTM**
- وزن مخصوص با استفاده از روش هسته ای
- درصد رطوبت
- راندمان اختلاط



# تثبیت خاک با سیمان

■ از هر نوع سیمانی برای تثبیت خاک می توان استفاده نمود اما معمولاً سیمان پرتلند بیشترین استفاده را دارد. سیمان دارای اکسیدهای آهک ( $\text{CaO}$ )، سیلیس ( $\text{SiO}_2$ )، آلومینیوم ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )، اکسید آهن ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )، می باشد.

■ از میان سیمانهای پرتلند، از پرتلند نوع I برای تثبیت با سیمان استفاده می شود. البته در مواد بسیار خاص مانند حالتی که بیش از ۱۰٪ سولفات در خاک موجود باشد نیز خاک موجود باشد می توان از سیمان پرتلند نوع II نیز استفاده نمود.



## تثبیت خاک با سیمان

■ مشخصات فنی خاک های تثبیت شده با سیمان بستگی به جنس خاک ، مقدار سیمان ، وزن مخصوص خاک تثبیت و کوبیده شده ، کیفیت اختلاط سیمان و خاک ، شرایط عمل آوری مخلوط و زمان دارد.

■ مقاومت خاک های تثبیت شده با سیمان ، نظیر بتن سیمانی در اثر مرور زمان افزایش می یابد. این افزایش مقاومت در روزهای اول با سرعت بیشتری انجام می پذیرد و سپس با گذشت زمان از سرعت زیاد مقاومت کاسته می شود.



## عملیات اجرایی تثبیت خاک با سیمان

■ راه به قطعات کوچک تا حداکثر ۵۰۰ متر تقسیم می شود تا کل عملیات اجرایی شامل آماده سازی خاک، پخش سیمان، اختلاط، آبپاشی، پروفیله کردن و کوبیدن در زمان مورد نظر که کوتاه تر از زمان گیرش سیمان است انجام شود.

■ عملیات اجرایی را نباید در هوای سرد انجام داد زیرا گیرش سیمان دچار اختلال می شود و در حالت یخ زدگی غیر ممکن بوده و اختلاط خاک با سیمان انجام نمی شود. حداقل دمای هوا برای اختلاط تثبیت ۷ درجه سانتیگراد می باشد.





## عملیات اجرایی تثبیت خاک با سیمان

- عملیات اجرایی را نباید در هوای سرد انجام داد زیرا گیرش سیمان دچار اختلال شده و اختلاط خاک با سیمان انجام نمیشود.
- حداقل دمای هوا برای اختلاط تثبیت ۷ درجه سانتیگراد می باشد.





## روش درجا

در این روش کلیه عملیات اجرایی تثبیت در روی بستر انجام می شود بدین معنی که ابتدا خاک مورد نظر شخم زده و آماده سازی می شود سپس سیمان به میزان مورد نظر که در طرح اختلاط ارائه شده است بر روی مسیر پخش می شود. پخش سیمان می تواند بصورت دستی و یا با استفاده از ماشین آلات خاص این کار انجام گیرد همچنین سیمان را می توان بصورت دوغاب نیز روی مسیر توسط ماشین آلات خاص پخش نمود.







## روش درجا

پس از پخش سیمان لازم است که سیمان و خاک مخلوط شده و مقدار آب مشخص که در طرح اختلاط ارائه شده است به آن اضافه شود. در سالیان گذشته این عمل با گریدر و تانکر آبپاش انجام می شد اما در حال حاضر ماشین آلاتی موجود است که همه این عملیات را همزمان انجام می دهد





## روش کارخانه ای

- در این روش که به روش کارخانه ای نیز شناخته می شود ، مخلوط خاک تثبیت شده با سیمان در یک سایت آماده شده و به طول مسیر جهت پخش حمل می گردد.
- در این روش پروسه تولید کاملاً تحت کنترل است البته تثبیت با این روش برای خاک بستر، کمتر رایج است.
- این روش بیشتر برای لایه های اساس و زیر اساس و زمانی است که قرار است مصالح از یک منبع قرضه تأمین شود، مورد استفاده قرار می گیرد.



## تسطیح و کوبیدن

■ در هر دو روش تثبیت با سیمان سطح نهایی پروفیله شده و کوبیده می شود. لایه تثبیت شده با سیمان نیز همانند لایه تثبیت شده با آهک می بایست با غلطکهای ویبره سنگین کوبیده شود. حداکثر ضخامت لایه جهت کوبیدن می بایست ۲۰ سانتیمتر باشد. کوبیدگی نهایی سطح می بایست به اندازه ۱۰۰ درصد وزن مخصوص خشک آزمایشگاهی باشد.

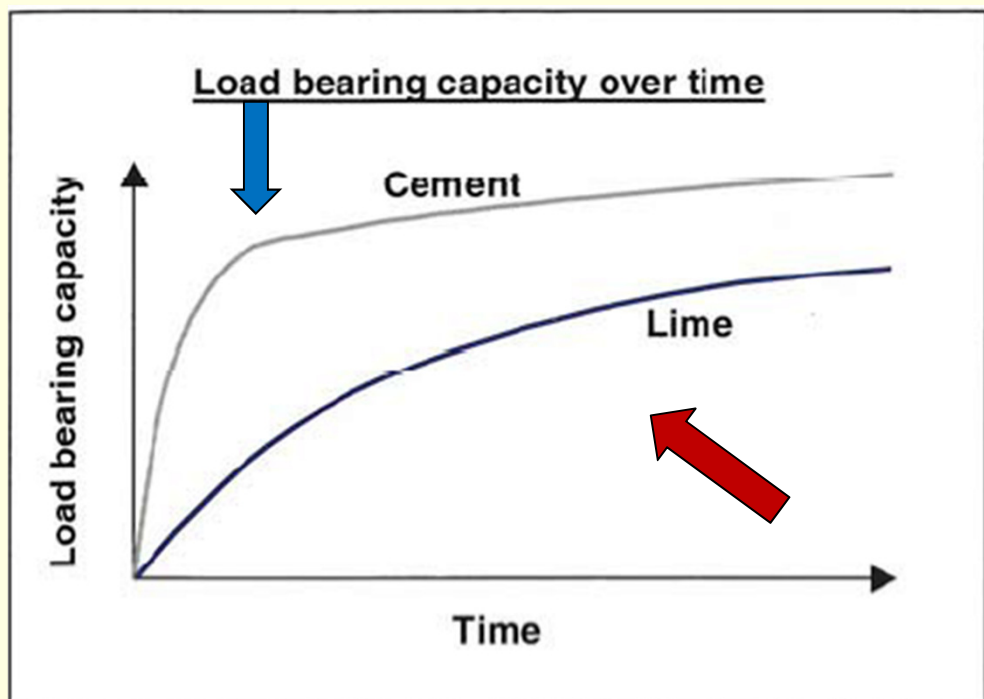






## مقایسه عملکردی تثبیت با سیمان و آهک

ظرفیت باربری آهک در مدت زمان بیشتری به حداکثر خود می رسد و سیمان در مدت زمان کمتری به حداکثر مقدار خود می رسد. در عین حالیکه بطور کلی ظرفیت باربری در مورد مخلوطهای سیمانی از مخلوطهای آهکی بیشتر است. آهک بیشتر برای بهبود وضعیت خاک جهت تراکم پذیری بهتر مورد استفاده است.





## مقایسه عملکردی تثبیت با سیمان و آهک

- جهت بهبود خواص ساختمانی خاک بهتر است از آهک استفاده شود که این عمل بیشتر برای خاک بستر راه می باشد که حداقل توان باربری آن مورد نظر است.
- برای لایه هایی که هدف آنها توان باربری بیشتر است (مانند لایه های زیر اساس و اساس) بهتر است از سیمان استفاده شود.

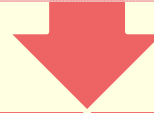


# تثبیت خاک با قیر

## Bitumen Stabilization

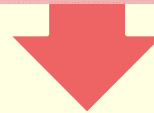
### تثبیت خاک با قیر

باعث داشتن خاصیت چسبندگی باعث اتصال دانه ها و ذرات خاک و افزایش مقاومت آن می شود



### تثبیت خاک با قیر

شامل قیر محلول، امولسیون و کف قیر است.



### تثبیت خاک با قیر

انتخاب نوع قیر با توجه به جنس و بافت خاک دارد



# خاکهای مناسب جهت تثبیت با قیر

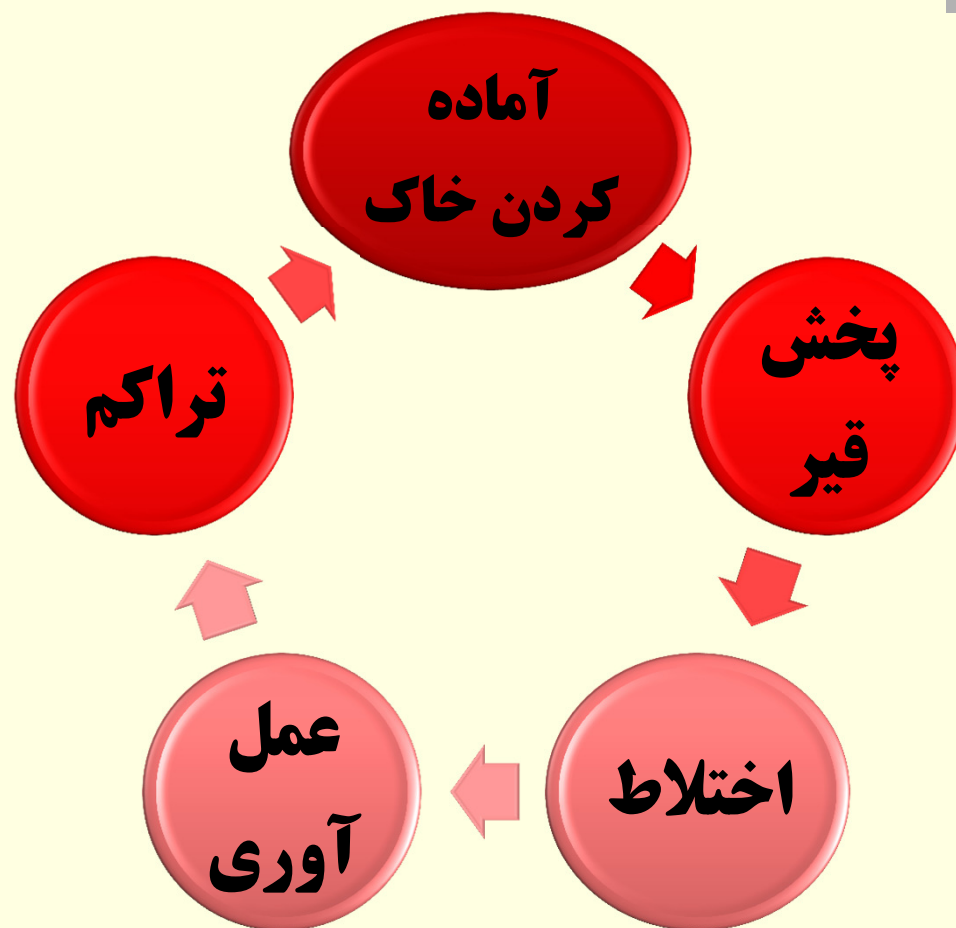
■ تثبیت خاک با قیر معمولاً مناسب خاک درشت دانه و شنی است .

■ خاک های ریزدانه خمیری از آن جهت که اندود کردن ریزدانه با قیر دشوار است معمولاً با آهک انجام می شود . برای تثبیت خاک با قیر بیشتر از قیرهای مایع استفاده می شود .

■ تثبیت خاک های ریزدانه با قیر سبب کاهش خاصیت آب مکندگی خاک می شود ( جذب آب ) هر اندازه قیر مصرفی بیشتر باشد از خاصیت آب مکندگی خاک بیشتر کاسته می شود .



# نحوه اجرای تثبیت خاک با قیر







## آماده کردن خاک Preparation

■ ابتدا خاک بستر با گریدر شخم زده می شود و کلیه کلوخه های آن بوسیله تیغه های ماشین آلات یا هر وسیله دیگری خرد می شود. همه مواد زائد مثل ریشه درخت یا سنگهای درشت از آن خارج می شود.

■ سپس خاک موجود بوسیله گریدر یا قالب ریشه، بصورت ریشه های منظم در یک طرف مسیر، انباشته می شود تا برای پخش قیر آماده شود.



# اختلاط خاک و قیر

- قیر مصرفی برای تثبیت خاک را با توجه به شرایط محلی و منطقه ای می توان قیر محلول و یا امولسیون قیر (قیر آبه) را انتخاب نمود. پخش قیر بوسیله ماشینهای مخصوص قیر پاش انجام می شود.
- قیری که پاشیده می شود با توجه به نوع آن (قیر محلول یا امولسیون) باید دارای درجه حرارت معینی هنگام پخش باشد که این درجه حرارت به نوع مخلوط و شرایط محلی بستگی دارد.



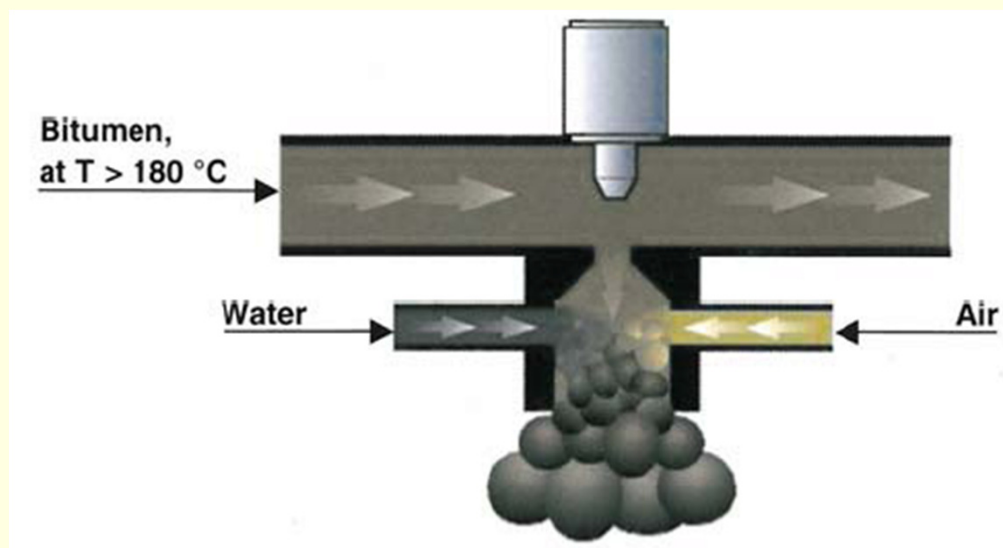
# عمل آوری Curing

- پس از اختلاط کامل خاک و قیر لازم است که مخلوط قیری عمل آوری شود.
- اگر از قیر محلول استفاده شده است می بایست مواد نفتی آن بخار شود.
- اگر از امولسیون قیر استفاده شده است می بایست آب موجود در آن تبخیر شود یا بعبارت دیگر امولسیون بشکند.



## تثبیت با کف قیر

چنانچه قیر داغ در یک محفظه تحت فشار با آب سرد ترکیب شود تولید کف می نماید که به آن کف قیر می گویند. در این عمل هیچگونه فعل و انفعال شیمیایی صورت نمی گیرد فقط ویسکوزیته قیر برای مدت کوتاهی کاهش می یابد.





## تثبیت با کف قیر

■ کف قیر قابلیت امتزاج خوبی با مصالح و خاک دارد و بصورت یک فیلم نازک سنگدانه ها را پوشش می دهد. بنابراین قبل از اینکه کف از بین برود می بایست با مصالح مخلوط شود.





## تثبیت با کف قیر

- عملیات تثبیت با کف قیر با روشها و ماشین آلات عمومی راهسازی امکانپذیر نمی باشد بلکه بوسیله ماشین آلات مخصوصی که دارای دستگاه ساخت کف قیر می باشند، انجام می گردد. در اجرای تثبیت خاک از کف قیر به تنهایی استفاده نمی شود بلکه بصورت ترکیبی با آهک و بیشتر از آن با سیمان کاربرد دارد.
- استفاده از کف قیر بوسیله ماشین آلات مدرن بیشتر برای بازیافت سرد آسفالت صورت می گیرد و بحث روی خواص مشخص آن در بحث بازیافت آسفالت است .



# خودرو WR جهت تثبیت



# Questions

---

[www.drahadi.ir](http://www.drahadi.ir)

[info@drahadi.ir](mailto:info@drahadi.ir)