

مهندسی روسازی

فصل دوم: زیرسازی و خاک بستری

علیرضا غنی زاده

دانشیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی سیرجان

کلیات

✓ خاک را می‌توان مخلوطی غیریکنواخت از مصالح موجود روی سطح زمین دانست که مابین آن‌ها را هوا یا آب پر کرده است و به شکل کلوخه‌های سست از کانی‌های معدنی، مواد آلی و انواع رسوبات در روی سنگ‌بستر یافت می‌شود.

✓ خاک‌ها بر اساس اندازه ذرات و دانه‌بندی به سه گروه طبقه‌بندی می‌شوند. این سه گروه عبارت‌اند از: خاک‌های درشت‌دانه یا سنگدانه‌ای (مخلوط‌های شن و ماسه‌ای)، خاک‌های ریزدانه یا چسبنده (خاک‌های رسی) و خاک‌های لای دار که بین این دو دسته قرار می‌گیرند.

Pavement Engineering

کلیات



- ✓ عامل مهم و تأثیرگذار در خاک‌های درشت‌دانه، جرم سنگدانه‌ها است و حضور آب تأثیر چندانی بر مشخصات این نوع خاک‌ها ندارد.
- ✓ این در حالی است که در خاک‌های ریزدانه نیروی الکتریکی و شیمیایی بین سنگدانه‌ها، رفتار این‌گونه خاک‌ها را تعیین می‌کند و حضور آب بین ذرات خاک در اندرکنش سنگدانه‌ها با یکدیگر بسیار مؤثر است.
- ✓ انواع دانه بندی در خاک‌های درشت دانه به صورت خوب‌دانه‌بندی شده، بد دانه‌بندی شده و دانه‌بندی میان تهی قابل تقسیم بندی است.
- ✓ کانی‌های رسی مهم عبارتند از کائولینیت، ایلیت و مونت‌موریلونیت

۳

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

کار در خانه؟



- ✓ مشخصات انواع کانی های رسی از نظر ساختار، اندازه ذره، سطح مخصوص و نوع پیوند را بنویسید.
- ✓ از این کانی ها کدامیک برای پروژه های راهسازی مشکل سازتر است؟ چرا؟
- ✓ چه راهکارهایی برای مقابله با چنین خاک هایی در پروژه های راهسازی می شناسید؟
- ✓ تورم پذیری خاک چگونه قابل تعیین است؟ (راهنمایی تعیین پارامتر فعالیت خاک).
- ✓ محدوده اندازه شن، ماسه، لای و رس در سیستم طبقه‌بندی اش تو و یونیفاید به چه صورت است؟

۴

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

Pavement Engineering

مشخصات مهم خاک بستر از دیدگاه راهسازی



- ✓ آزمایش الک؛
- ✓ وزن مخصوص؛
- ✓ حدود اتربرگ؛
- ✓ هم‌ارز ماسه؛
- ✓ جذب آب؛
- ✓ قابلیت تراکم؛
- ✓ پتانسیل یخ‌زدگی؛
- ✓ درصد رطوبت یخ‌زده؛
- ✓ مدول برجهندگی یا نسبت باربری کالیفرنیا.

۵

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

شناسایی خاک



- ✓ طبقه‌بندی نوع خاک بستر و قضاوت در مورد عملکرد آن‌ها، با استفاده از ضوابط اشتو یا ASTM انجام می‌شود.
- ✓ خاک‌های نباتی همچون خاک‌های تورب نباید در بستر روسازی استفاده شوند.
- ✓ هدف از آزمون‌هایی که بر روی خاک بستر انجام می‌شوند این است که خصوصیات لازم برای خاک بستر تعیین شود تا فرآیند طراحی بر مبنای آن انجام شود.
- ✓ همچنین به منظور پیش‌بینی عکس‌العمل‌های روسازی (تنش، کرنش و افت‌وخیز) در هنگام عبور ترافیک، نیاز به دانستن خصوصیات مکانیکی خاک بستر است.
- ✓ اولین گام در شناسایی خاک بستر، تهیه نقشه محل‌های نمونه‌گیری از خاک بستر است. در مرحله بعد، خصوصیات مختلف نمونه‌های اخذ شده باید در آزمایشگاه تعیین شود.

۶

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

Pavement Engineering

دانه بندی خاک



- ✓ دانه بندی خاک اولین گام جهت شناسایی نوع خاک و تناسب آن برای مصارف راهسازی است.
- ✓ دانه بندی خاک های درشت دانه (مانده روی الک نمبر ۲۰۰) با استفاده از روش الک انجام می شود.
- ✓ دانه بندی خاک های ریزدانه (عبوری از الک نمبر ۲۰۰) با استفاده از روش هیدرومتری انجام می شود.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \cdot D_{10}}$$

۷

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

نتایج آزمایش الک



شماره الک	اندازه الک (میلی متر)	وزن مانده روی الک (گرم)	درصد مانده روی الک	درصد تجمعی مانده روی الک	درصد عبوری
۱	۵۰	۰	۱۰۰	۰	۱۰۰
۲	۲۵	۴۰۰	۴۰	۴۰	۶۰
۴	۴/۷۵	۲۰۰	۲۰	۶۰	۴۰
۵۰	۰/۳	۲۵۰	۲۵	۸۵	۱۵
۲۰۰	۰/۰۷۵	۱۰۰	۱۰	۹۵	۵
	ریزتر	۵۰	۵	۱۰۰	۰
مجموع		۱۰۰۰	۱۰۰		

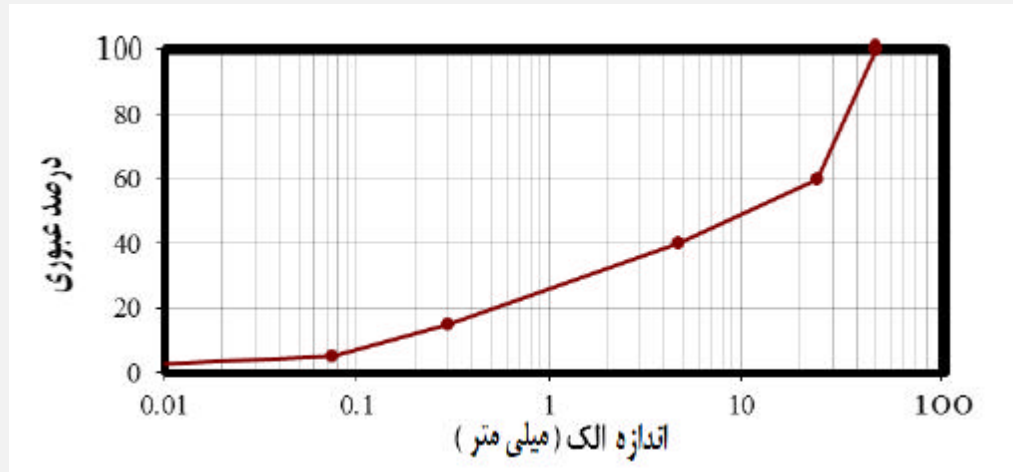
۸

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

Pavement Engineering

نمودار دانه‌بندی

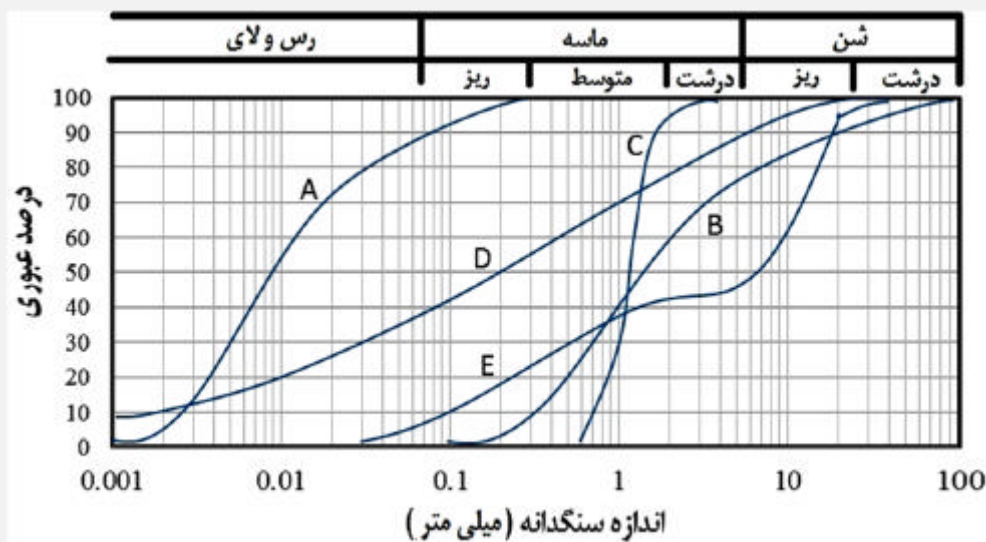


۹

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

انواع دانه‌بندی خاک



۱۰

مهندسی روسازی

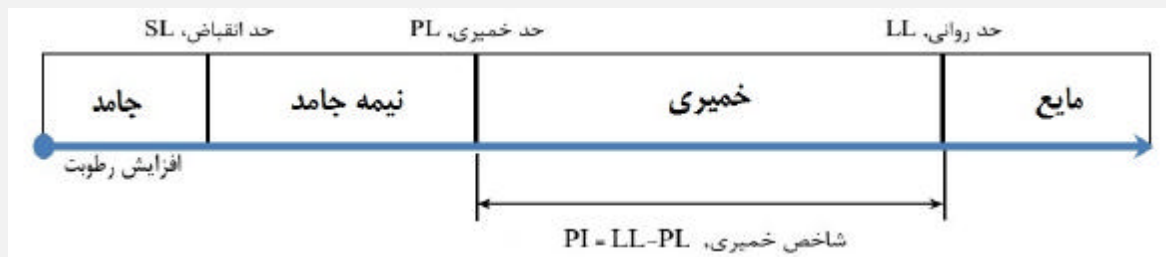
دانشگاه صنعتی سیرجان

Pavement Engineering

حدود خمیری (حدود اتربرگ)



- ✓ پارامترهای حدود اتربرگ که شامل حد انقباض، حد روانی و حد خمیری هستند، حساسیت خاک در برابر رطوبت را نشان می‌دهند.
- ✓ حدود اتربرگ برای بخش عبوری از الک شماره ۴۰ تعیین می‌شود.



۱۱

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

حدود اتربرگ



- ✓ حد انقباض درصد رطوبتی است که با کاهش رطوبت به کمتر از آن تغییری در حجم خاک اتفاق نمی‌افتد. حد انقباض بر اساس استاندارد AASHTO T 92 یا ASTM D4318 تعیین می‌شود.
- ✓ حد خمیری درصد رطوبتی است که در آن خاک از حالت نیمه جامد به حالت خمیری تبدیل می‌شود. از لحاظ آزمایشگاهی، حد خمیری حداکثر رطوبتی است که خاک وقتی به صورت یک فتیله ۳/۲ میلی‌متری در می‌آید، دچار ترک شود. حد خمیری بر اساس استاندارد AASHTO T 90 یا ASTM D4318 تعیین می‌شود.
- ✓ حد روانی (LL) درصد رطوبت متناظر با تغییر رفتار بین حالت‌های مایع و خمیری لای یا رس است. در استاندارد AASHTO T 89 یا ASTM D4318 نحوه انجام این آزمایش به طور کامل بیان شده است.

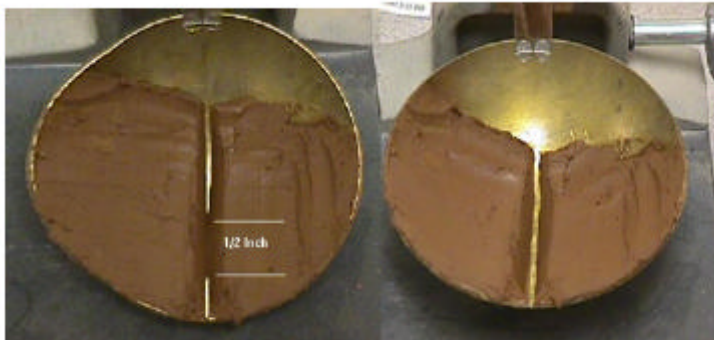
۱۲

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

Pavement Engineering

تعیین حد مایع خاک



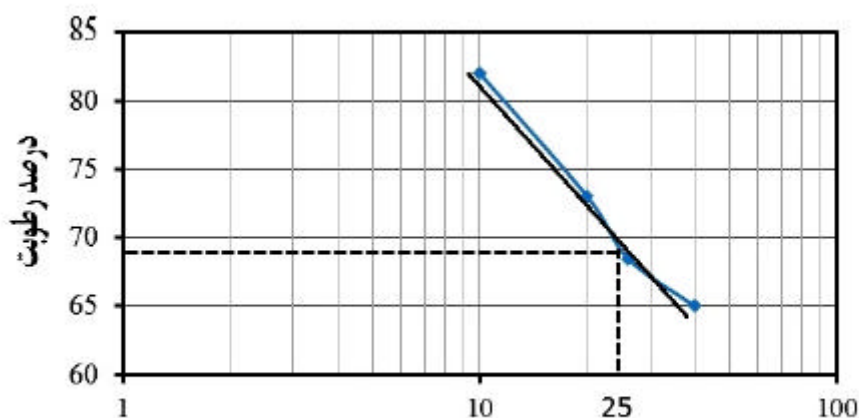
شکل ۲-۷: راست: دستگاه و جام کاساگرانده، وسط: پر کردن جام با خاک و ایجاد شیار در آن، چپ: بسته شدن شیار به اندازه ۰/۵ در اثر اعمال ضربه.

۱۳

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

تعیین حد مایع خاک



تعداد ضربات منجر به بسته شدن ۰/۵ اینچ شیار (لگاریتمی)

$$PI = LL - PL$$

$$LI = \frac{[W - PL]}{PI}$$

۱۴

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

Pavement Engineering

انواع روش‌های طبقه بندی خاک



روش اشتو (AASHTO) ✓

روش متحد (Unified) ✓

۱۵

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

طبقه بندی خاک به روش اشتو



✓ در این روش دو گروه اصلی مصالح، یعنی درشت‌دانه و ریزدانه قابل تفکیک می‌باشند که تفاوت بین این دو گروه در عبور ۳۵٪ از وزن خاک موردنظر از الک شماره ۲۰۰ است.

✓ بر اساس این دسته‌بندی هرچه از سمت خاک A-1 که بهترین نوع خاک بوده و بخش عمده آن را درشت‌دانه تشکیل داده است، به سمت خاک A-8 که بخش اعظم آن را ریزدانه تشکیل داده است برویم، کیفیت خاک برای اجرای زیرسازی کاهش می‌یابد.

✓ به منظور تعیین دقیق کیفیت خاک به عنوان بستر راه از پارامتری تحت عنوان نشانه گروه استفاده می‌شود.

۱۶

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

Pavement Engineering

طبقه‌بندی خاک به روش اش‌تو



$$GI = (F - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01(F - 15)(PI - 10) \quad (20-2)$$

در این رابطه:

F = درصد وزنی خاک عبوری از الک شماره ۲۰۰

LL = حد روانی

PI = شاخص خمیری

جدول ۲-۴ - تعیین کیفیت خاک بستر بر اساس شاخص گروه خاک.

کیفیت خاک بستر	شاخص گروه
عالی	۰
خوب	۱ تا ۰
متوسط	۴ تا ۲
ضعیف	۹ تا ۵
خیلی ضعیف	۲۰ تا ۱۰

۱۷

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

طبقه‌بندی خاک به روش اش‌تو



جدول ۲-۳: طبقه‌بندی انواع خاکها بر اساس AASHTO M-145

مصالح لای و رسی (بیش از ۳۵٪ وزنی آنها از الک شماره ۲۰۰ عبور کند)				مصالح سنگ‌دانه‌ای (کمتر از ۳۵٪ وزنی آنها از الک شماره ۲۰۰ عبور کند)				طبقه‌بندی کلی		طبقه‌بندی گروهی	تحلیل نتایج دانه‌بندی، درصد وزنی عبوری الک شماره ۱۰ (۲ میلی‌متر) الک شماره ۴۰ (۰.۴۲۵ میلی‌متر) الک شماره ۲۰۰ (۰.۰۷۵ میلی‌متر) خصوصیات بخش عبوری از الک ۴۰ حد روانی شاخص خمیری نوع سنگ‌دانه‌های غالب در خاک کیفیت به‌کارگیری به‌عنوان خاک بستر NP: Non Plastic، غیر خمیری	
A-7	A-6	A-5	A-4	A-2		A-3	A-1					
A-7-5	A-7-6			A-2-7	A-2-6	A-2-5	A-2-4	A-1-b	A-1-a			
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	$50 \geq$...	
...	...	...	...	...	...	...	...	$51 \geq$	$50 \geq$	$40 \geq$...	
$36 \geq$	$36 \geq$	$36 \geq$	$36 \geq$	$35 \geq$	$35 \geq$	$35 \geq$	$35 \geq$	$10 \geq$	$25 \geq$	$15 \geq$...	
$41 \geq$	$40 \geq$	$41 \geq$	$40 \geq$	$41 \geq$	$40 \geq$	$41 \geq$	$40 \geq$	...	...	...	...
$11 \geq$	$11 \geq$	$10 \geq$	$10 \geq$	$11 \geq$	$11 \geq$	$10 \geq$	$10 \geq$	NP	$6 \geq$	...	...
خاک‌های رسی				شن و ماسه رسی با لای نازک				ماسه ریز		تکه سنگ، شن و ماسه		تکه سنگ‌دانه‌های غالب در خاک
متوسط تا ضعیف				عالی تا خوب								کیفیت به‌کارگیری به‌عنوان خاک بستر

برای زیرگروه A-7-5، باید $PI \leq LL-30$ و برای زیرگروه A-7-6، باید $PI \geq LL-30$ باشد.

۱۸

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

Pavement Engineering

طبقه‌بندی خاک به روش یونیفاید



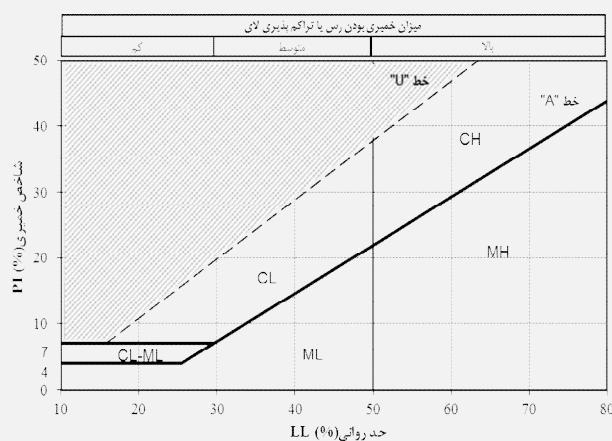
- ✓ اولین قدم در طبقه‌بندی خاک به روش یونیفاید یا متحد این است که تعیین گردد که آیا خاک مورد بررسی جزو خاک‌های آلی است یا خیر.
- ✓ بر اساس درصد وزنی عبوری از الک‌های ۷۶ میلی‌متر، ۴/۷۶ میلی‌متر (شماره ۴) و ۰/۰۷۵ میلی‌متر (شماره ۲۰۰)، میزان شن، ماسه و ریزدانه موجود در خاک به دست می‌آید.
- ✓ اگر بیش از ۵ درصد خاک از الک ۲۰۰ عبور کند، آنگاه باید حد روانی و حد خمیری خاک محاسبه شود.
- ✓ اگر بیش از ۵۰ درصد خاک از الک ۲۰۰ عبور کند، باید دستورالعمل مربوط به خاک‌های ریزدانه مد نظر قرار گیرد و در غیر این صورت باید روند مربوط به خاک‌های درشت‌دانه در نظر گرفته شود.

۱۹

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

طبقه‌بندی خاک به روش یونیفاید



بخش اول	بخش دوم
M: لای	L: خاصیت خمیری کم
C: رسی	H: خاصیت خمیری بالا
O: آلی	

بخش اول	بخش دوم
S: ماسه‌ای	P: بد دانه‌بندی شده
G: شنی	W: خوب دانه‌بندی شده
	M: لای‌دار
	C: رس‌دار

۲۰

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

Pavement Engineering

کنترل تراکم خاک



۱- تعیین درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثر در آزمایشگاه

- آزمایش پروکتور استاندارد
- آزمایش پروکتور اصلاح شده
- منحنی‌های تراکم اهایو

۲- تعیین وزن مخصوص خشک کارگاهی

- روش مخروط ماسه
- روش بالن لاستیکی
- روش هسته‌ای

۳- تعیین درصد تراکم

$$R.C. = \frac{\gamma_{d,field}}{\gamma_{d,max}} \times 100\%$$

۲۱

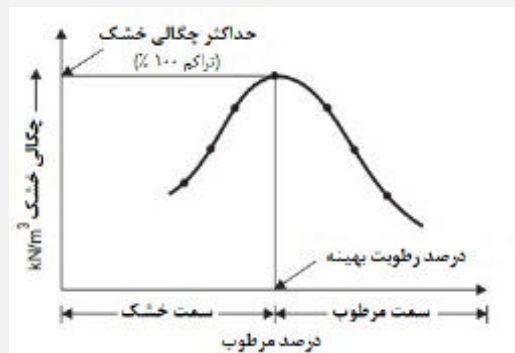
مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

تعیین رطوبت بهینه و چگالی خشک حداکثر در آزمایشگاه



- ✓ متداول‌ترین و ساده‌ترین روش برای افزایش توان باربری خاک‌ها تراکم است.
- ✓ با افزودن آب به خاک در حین عملیات تراکم، ذرات خاک راحت‌تر جابه‌جا شده و امکان تراکم بهتر خاک فراهم می‌شود.



۲۲

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

Pavement Engineering

تعیین رطوبت بهینه و چگالی خشک حداکثر در آزمایشگاه



- ✓ دو استاندارد مختلف برای انجام آزمایش پروکتور وجود دارد.
- ✓ یکی استاندارد AASHTO T 99 است که در آن رابطه بین رطوبت و چگالی با استفاده از یک چکش ۲/۵ کیلوگرمی که از فاصله ۳۰۵ میلی متری رها می شود، به دست می آید.
- ✓ استاندارد دوم نیز AASHTO T 180 است که در آن چکش ۴/۵۴ کیلوگرمی از فاصله ۴۵۷ میلی متری رها می شود.

۲۳

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

مشخصات کلی استانداردهای مختلف برای انجام آزمایش تراکم



جدول ۲-۷: نحوه انجام انواع مختلف آزمایش پروکتور

آزمایش	ابعاد قالب (قطر × ارتفاع)	حجم قالب (cm ³)	وزن چکش (N)	ارتفاع ضربه (m)	تعداد ضربه (هر لایه)	تعداد لایهها	مجموع لژی عملی
پروکتور استاندارد	۱۱۶/۴ × ۱۰۱/۶	۹۴۴	۲۴/۵	۰/۳۰۴۸	۲۵	۳	۶۰۰ ≈ ۵۹۳
ASTM D698 Method C	۱۱۶/۴ × ۱۵۲/۴	۲۱۲۴	۲۴/۵	۰/۳۰۴۸	۵۶	۳	۶۰۰ ≈ ۵۹۱
ASTM D1557, AASHTO T 180 Method A	۱۱۶/۴ × ۱۰۱/۶	۹۴۴	۴۴/۵	۰/۴۵۷۲	۲۵	۵	≈ ۲۶۹۴ ۲۷۰۰
ASTM D1557 Method C AASHTO T 180 Method D	۱۱۶/۴ × ۱۵۲/۴	۲۱۲۴	۴۴/۵	۰/۴۵۷۲	۵۶	۵	≈ ۲۶۸۲ ۲۷۰۰

$$E = \sum [W \times \frac{h}{V}]$$

$$= ۰/۲۴ \text{ N} \times ۰/۳۰۴۸ \text{ m} \times ۳ \text{ لایه} \times ۲۵ \text{ مرتبه} + (۹۴۴ \times ۱۰^{-۶})$$

$$= ۵۹۴ \text{ KN.m/m}^2 \sim ۶۰۰ \text{ KN.m/m}^2$$

$$\gamma_t = (1+w) \frac{G_s \gamma_w}{1+e} = (1+w) \times \gamma_d$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_t}{1+w}$$

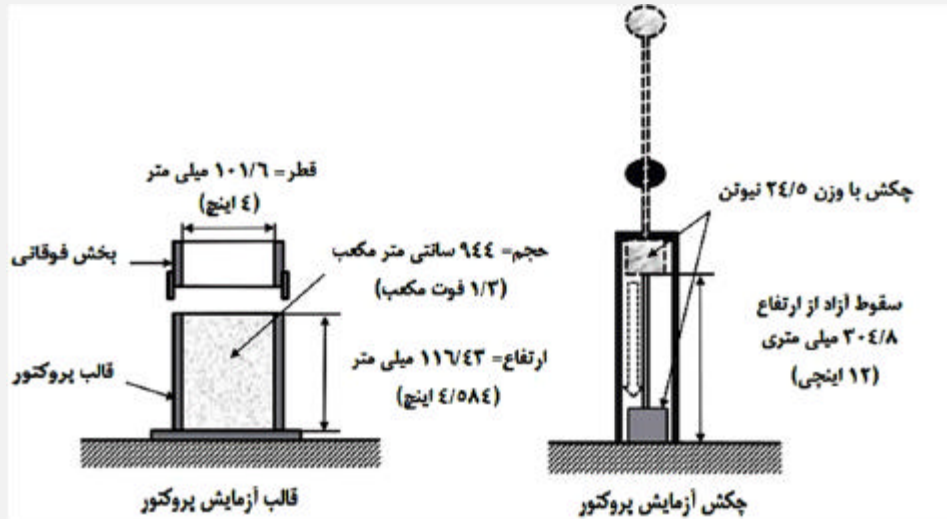
۲۴

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

Pavement Engineering

قالب و چکش پروکتور استاندارد

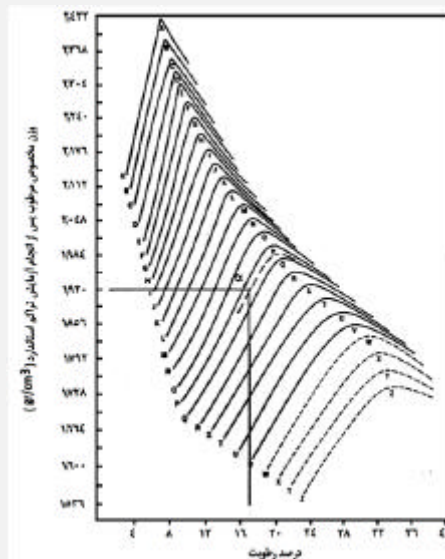


۲۵

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

تعیین تقریبی رطوبت بهینه و چگالی خشک حداکثر (منحنی‌های اوهایو)




۲۶

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

Pavement Engineering



کنترل تراکم

مطابق مشخصات فنی و عمومی راهها (نشریه ۱۰۱)، درصد تراکم بستر روسازی در دو یا یک قشر نهایی، هر یک به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر، به ترتیب در خاکریز یا کف برش‌های خاکی و یا سنگی بر حسب درجه راه و نوع مصالح درشت‌دانه یا ریزدانه مصرفی باید طبق مشخصات جدول (۲-۹) باشد. تراکم آزمایشگاهی مصالح بر اساس روش اشتر اصلاح‌شده I 180 (طریقه D) اندازه‌گیری می‌شود. در راه‌های فرعی درجه دو، به‌جای دو لایه ۱۵ سانتی‌متری، می‌توان از یک لایه به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر استفاده نمود.

جدول ۲-۹: درصد تراکم بستر روسازی در دو لایه نهایی.

میزان تراکم لایه‌ها		درجه راه
خاک ریزدانه (A-4 تا A-7)	خاک درشت‌دانه (A-1 تا A-3)	
۹۵	۱۰۰	آزادراه، بزرگراه‌ها و راه‌های اصلی و فرعی درجه یک
۹۰	۹۵	راه‌های فرعی درجه دو و راه‌های روستایی

۲۷

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان



روش‌های تعیین چگالی خشک گارگاهی

- ✓ روش مخروط ماسه
- ✓ روش بالن لاستیکی
- ✓ روش هسته ای

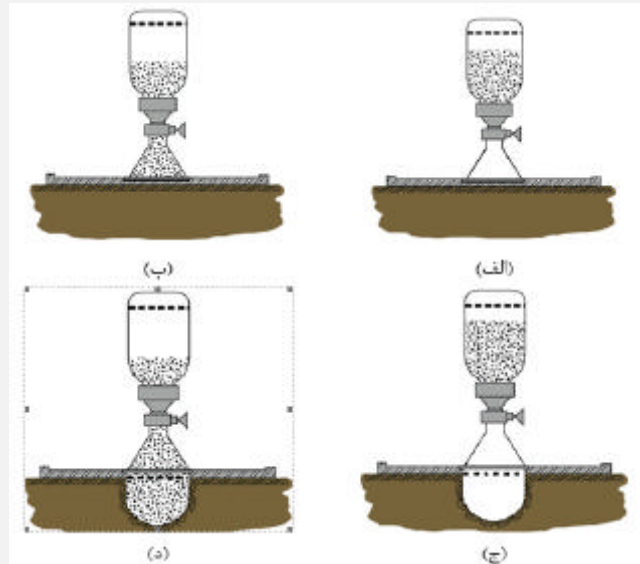
۲۸

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

Pavement Engineering

روش مخروط ماسه

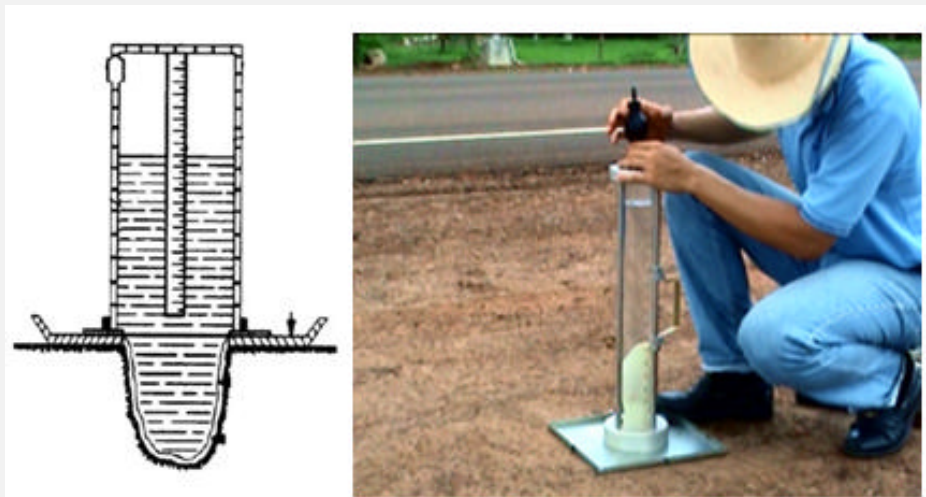


۲۹

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

روش بالن لاستیکی



۳۰

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

Pavement Engineering

کار در خانه!



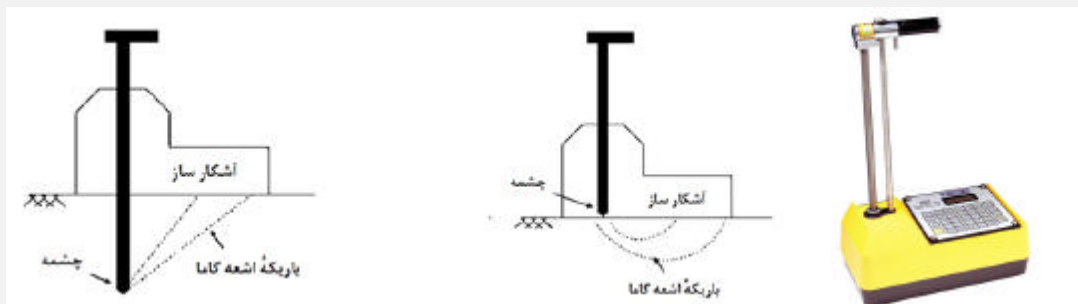
- ✓ رطوبت طبیعی یک خاک برابر با ۹ درصد و وزن مخصوص مرطوب آن برابر با $1/98$ گرم بر سانتی متر مکعب است؟ مطلوبست تعیین حداکثر وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت این خاک با استفاده از روش اهایو؟
- ✓ نحوه انجام آزمایش تراکم پروکتور برای تعیین درصد رطوبت و حداکثر وزن مخصوص خشک خاک را با ذکر یک مثال عددی شرح دهید.
- ✓ نحوه انجام آزمایش مخروط ماسه را جهت تعیین وزن مخصوص کارگاهی به طور کامل شرح دهید.
- ✓ هدف تراکم دو قشر آخر یک لایه خاکریز مربوط به یک راه اصلی است که خاک آن از جنس A-5 تعیین شده است. درصد تراکم قابل قبول برای نظارت بر کار پیمانکار چه مقدار است؟

۳۱

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

روش هسته‌ای



- ✓ برای اندازه گیری چگالی خاک، منبع رادیواکتیو دستگاه، فوتون‌های اشعه گاما را به داخل خاک گسیل می‌کند.
- ✓ هنگامی که اشعه گاما در داخل خاک حرکت می‌کند، با از دست دادن بخشی از انرژی خود که ناشی از برخورد با الکترون‌های خاک است، بازتاب می‌کنند.
- ✓ بدین ترتیب آشکار ساز دستگاه، فوتون‌های ساطع شده از منبع را دریافت و ثبت می‌کند. تعداد فوتون‌ها با چگالی خاک رابطه عکس دارد.

۳۲

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

Pavement Engineering

روش های تراکم خاک



۳۳

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

روش‌ها و تجهیزات تراکم خاک



توصیف خاک	طبقه‌بندی یونیفایید	تراکم‌پذیری	تجهیزات پیشنهادی
ماسه‌ای و یا مخلوط شن و ماسه (خالص از لای و رس)	GP, GW, SP, SW	خوب	غلتک چرخ فولادی ویرنه یا غلتک چرخ لاستیکی ویرنه
ماسه و یا مخلوط شن و ماسه لای‌دار	GM, SM	خوب	غلتک چرخ فولادی ویرنه یا غلتک چرخ لاستیکی ویرنه
ماسه و یا مخلوط شن و ماسه رسی	GC, SC	متوسط تا خوب	غلتک چرخ لاستیکی ویرنه یا غلتک پاچه‌بزی ویرنه
لای یا خمیری کم	ML	ضعیف تا خوب	غلتک چرخ لاستیکی ویرنه یا غلتک پاچه‌بزی ویرنه
لای یا خمیری زیاد	MH	ضعیف تا متوسط	غلتک چرخ لاستیکی ویرنه یا غلتک پاچه‌بزی ویرنه
رس یا خمیری کم	CL	متوسط تا خوب	غلتک چرخ لاستیکی ویرنه یا غلتک پاچه‌بزی ویرنه
خاک تپاتی	Pt, OH, OL, CH	ضعیف، تا متوسط (برای خاکریزی سازمان مناسب نیست)	

۳۴

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

Pavement Engineering

پدیده یخبندان خاک بستر

تورم ناشی از یخ زدگی

ناحیه نفوذ یخ

معدسی های یخی

صعود آب به واسطه موئینگی

سطح آب زیرزمینی

- ✓ بروز تورم و بالا آمدگی ناشی از یخبندان در مناطقی که در فصل زمستان دمای هوا به زیر صفر کاهش می‌یابد، یکی از پدیده‌های رایج در این نواحی است.
- ✓ یخ‌های ایجاد شده در شروع فصل بهار آب می‌شوند که به دلیل افزایش رطوبت خاک بستر سبب کاهش مقاومت خاک بستر می‌شوند.
- ✓ اصلی‌ترین علت بروز این خرابی، شرایط آب‌وهوایی و خاک موجود در لایه‌های زیرین سازه روستازی است.

۳۵

مهندسی روستازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

خاک های حساس به یخبندان

- ✓ روند بروز موئینگی زمانی شروع می‌شود که سفره آب زیرزمینی نزدیک به سطح زمین قرار داشته باشد.
- ✓ خاکی همچون لای توانایی نسبتاً بالایی در مکش آب به سمت بالا دارد، به طوری که ارتفاع صعود موئینگی در خاک لای بین ۰/۹ تا ۹ متر است. این مقدار در خاک‌های ماسه‌ای حدوداً ۰/۱۵ متر است.
- ✓ همچنین نفوذپذیری خاک لای نیز نسبتاً بالاست (نفوذپذیری آب در خاک لای ۰/۹ متر در روز است که نسبت به نفوذپذیری ۰/۰۰۰۹ متر در روز برای خاک رس بسیار بیش‌تر است).
- ✓ بنابراین لای یکی از مستعدترین خاک‌ها برای یخبندان است. چنین خاک‌هایی آب را از سفره‌های آب زیرزمینی می‌مکند.

۳۶

مهندسی روستازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

Pavement Engineering

خاک های حساس به یخبندان



گروه بندی	نوع خاک	درصد وزنی عبوری از الک ۲۰۰	طبقه بندی خاک
FG-1	خاک های شنی	۳ تا ۱۰	GW, GP, GW-GM, GP-GM
FG-2	خاک های شنی و ماسه ای	۱۰ تا ۱۵	GM, GW-GM, GP-GM, SW, SP, SM, SW-SM, SP-SM
FG-3	خاک های شنی	بیش از ۲۰	GM, GC
	ماسه، بجز ماسه لای دار ریز رس یا شاخص خمیری بالای ۱۲	بیش از ۱۵	SM, SC CL, CH
FG-4	ماسه لای دار ریز	بیش از ۱۵	SM
	انواع لای		ML, MH
	رس یا شاخص خمیری ۱۲ و کمتر انواع رس ها		CL, CL-ML CL, CH, ML, SM

۳۷

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

شاخص یخبندان (FI)



- ✓ منظور از شاخص یخبندان، اندازه گیری مدت زمانی است که درجه هوا زیر صفر است.
- ✓ لازم به ذکر است برای محاسبه این شاخص، متوسط دمای روزانه باید استفاده شود. به عنوان مثال، اگر دمای هوا در ۱۰ روز ۱۲- درجه فارنهایت باشد، آنگاه شاخص یخبندان برای این حالت، $۱۲ \times ۱۰ = ۱۲۰$ است.
- ✓ در حقیقت شاخص یخبندان ۱۲۰ روز-درجه فارنهایت نشان می دهد که در ۱۲۰ روز متوالی دمای هوا ۱- درجه فارنهایت بوده و یا در یک روز دمای هوا ۱۲۰- درجه فارنهایت بوده است. این دو تعبیر عمق یخبندان یکسانی را در خاک ایجاد می کنند.


۳۸

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

Pavement Engineering

عمق نفوذ یخبندان




چگالی خاک (گرم بر سانتی متر مکعب)				شاخص یخبندان (روز-درجه فارنهایت)
۳/۴	۲	۱/۸۵	۱/۶	
۶۴/۷۷	۶۰/۴۵	۵۴/۶۱	۵۲/۰۷	۲۰۰
۹۷/۷۹	۸۹/۶	۷۷/۴۷	۶۹/۸۵	۴۰۰
۱۲۵/۴۴	۱۱۳/۰۳	۹۶/۵۲	۸۷/۰۴	۶۰۰
۱۵۱/۰۴	۱۳۸/۲۴	۱۱۳/۰۳	۱۰۲/۴	۸۰۰
۱۷۶/۶۴	۱۵۸/۷۲	۱۳۰/۵۶	۱۱۵/۲	۱۰۰۰
۲۸۹/۲۸	۲۶۱/۱۲	۲۰۲/۲۴	۱۷۶/۵۳	۲۰۰۰
۳۹۹/۳۶	۳۵۸/۴	۲۶۸/۸	۲۳۵/۵۲	۳۰۰۰
۵۲۴/۸	۴۵۳/۱۲	۳۳۲/۸	۲۹۴/۴	۴۰۰۰
۵۷۶	۵۰۴/۳۲	۳۷۱/۲	۳۲۰	۴۵۰۰

۳۹

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

تورم پذیری خاک



✓ خاک‌هایی که از کانی مونت‌موریلونیت تشکیل شده باشند با جذب رطوبت به میزان قابل توجهی متورم می‌شوند.

✓ به همین جهت حضور این نوع کانی در بستر راه، می‌تواند عاملی برای بروز تغییر شکل، ناهمواری و ترک خوردگی در سطح راه باشد.

✓ طول موج غالب در راه‌هایی که به این دلیل دچار ناهمواری می‌شوند، معمولاً بین ۳ تا ۱۰ متر است.

۴۰

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

Pavement Engineering

پتانسیل تورم پذیری خاک



بروز این نوع تورم به دو عامل اصلی شامل درصد وزنی رس در خاک و شاخص خمیری خاک بستگی دارد و از رابطه (۳۱-۲) قابل محاسبه است (Gisi and Bandy, 1980).

$$S = aA^b C^{2/44} \quad (31-2)$$

که در این رابطه:

S = پتانسیل تورم پذیری خاک، درصد

A = پارامتر مربوط فعالیت خاک است که از رابطه زیر به دست می آید:

۴۱

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

فعالیت خاک



$$A = \frac{PI}{C - 5} \quad (32-2)$$

که در این رابطه:

PI - شاخص خمیری خاک

C = درصد وزنی مصالح عبوری از الک شماره ۲۰۰

دو پارامتر a و b نیز به شاخص خمیری خاک وابسته هستند و به صورت زیر در نظر گرفته می شوند:

$$PI \leq 20, \quad a = 3/28 \times 10^{-5} \quad \text{و} \quad b = 2/259$$

$$20 \leq PI \leq 30, \quad a = 2/4 \times 10^{-5} \quad \text{و} \quad b = 2/573$$

$$30 \leq PI \leq 40, \quad a = 1/14 \times 10^{-5} \quad \text{و} \quad b = 2/559$$

$$40 \leq PI, \quad a = 0/72 \times 10^{-5} \quad \text{و} \quad b = 2/669$$

۴۲

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

Pavement Engineering

تعیین پتانسیل تورم پذیری خاک با استفاده از آزمایش CBR



- ✓ پتانسیل تورم‌پذیری را از طریق اندازه‌گیری درصد تغییر حجم در ازای آب جذب شده هنگام انجام آزمایش CBR و یا پروکتور نیز می‌توان به دست آورد.
- ✓ در این حالت نمونه خاک با رطوبت بهینه درون قالب آزمایش پروکتور متراکم می‌شود و سپس درحالی‌که سرباری معادل ۱ پوند بر اینچ مربع (psi) روی آن قرار دارد و در داخل آب مستغرق است، میزان تورم آن اندازه‌گیری می‌شود.
- ✓ این آزمایش در دو رطوبت بهینه به‌علاوه ۳ درصد (سمت مرطوب) و رطوبت بهینه منهای ۳ درصد (سمت خشک) نیز انجام گرفته و از میانگین نتایج، درصد تورم در رطوبت بهینه محاسبه می‌شود.

۴۳

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

بهبودی خاک‌های متورم شونده



- ✓ در حالت کلی برای خاک‌هایی که بیش از ۳ درصد (بر مبنای استاندارد CBR، ASTM D1883) متورم شوند باید راهکارهای کنترلی در نظر گرفت.

جدول ۲-۱۵: پیشنهاد سازمان هوانوردی فدرال برای بهسازی انواع خاک‌های متورم شونده (FAA 2016)

بهبودی پیشنهادی	پتانسیل جذب رطوبت	درصد تورم اندازه‌گیری شده (ASTM D1883)	پتانسیل تورم (بر مبنای تجربه)
تراکم بستر در رطوبت بهینه به‌اضافه ۵٪ یا درصد تراکم ۹۰ درصد	کم	۳ تا ۵	کم
تثبیت خاک تا عمق ۱۵ سانتی‌متر	زیاد	۶ تا ۱۰	متوسط
تثبیت خاک تا عمق ۳۰ سانتی‌متر	کم	بیش از ۱۰	زیاد
تثبیت خاک تا عمق ۳۰ سانتی‌متر	کم	بیش از ۱۰	زیاد
تثبیت تا عمق ۹۰ سانتی‌متر یا تعویض خاک برای خاک‌های رسی عمق تثبیت تا ۱۵۰ سانتی‌متر افزایش یابد	زیاد	بیش از ۱۰	زیاد

۴۴

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

مقاومت خاک بستر



- ✓ مقاومت برشی
- ✓ آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)
- ✓ آزمایش مدول برجهندگی
- ✓ آزمایش نفوذ مخروط دینامیکی
- ✓ آزمایش بارگذاری صفحه

۴۵

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا



- ✓ آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا یا CBR متداولترین آزمایشی است که جهت تعیین ظرفیت باربری خاک بستر مورد استفاده قرار می گیرد.
- ✓ این روش با وجود داشتن نقاط ضعف فراوان، متداولترین روش برای ارزیابی ظرفیت باربری خاک بستر روسازی راهها و فرودگاهها و همچنین تعیین ظرفیت باربری مصالح سنگی است.
- ✓ با استفاده از نتایج این آزمایش می توان ظرفیت باربری خاک بستر و کلیه لایه های روسازی از قبیل زیراساس و اساس را تعیین و بر طبق آن ضخامت این لایه ها را به دست آورد.

۴۶

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

Pavement Engineering

آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا



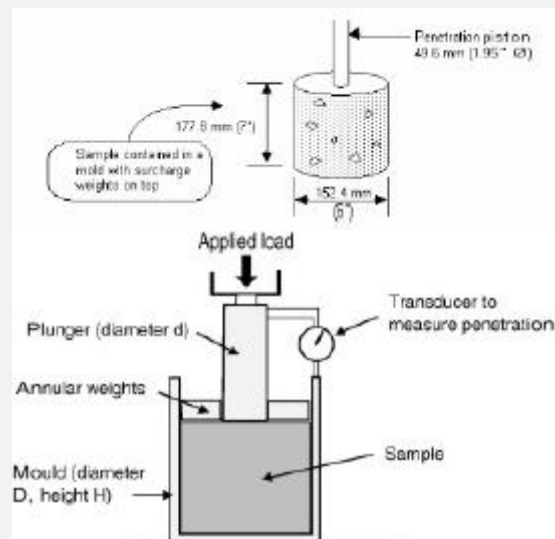
- ✓ آزمایش CBR، مطابق شکل (۲-۲۹)، در واقع یک نوع آزمایش نفوذ است که در آن یک پیستون با قطر ۵۰ میلی‌متر با سرعت ۱/۲۵ میلی‌متر بر دقیقه به داخل نمونه خاک نفوذ می‌کند.
- ✓ آنگاه بار اعمالی (برحسب کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع) هنگامی که پیستون در عمق‌های مشخصی که معمولاً ۲/۵ میلی‌متر و ۵ میلی‌متر است، ثبت می‌گردد.
- ✓ عدد CBR برای خاک مورد بررسی از تقسیم نیروهای ثبت‌شده به ۷۰ و ۱۰۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع که به ترتیب، نیروهای لازم برای نفوذ ۲/۵ و ۵ میلی‌متری همین پیستون در مصالح سنگ شکسته با کیفیت است به دست می‌آید.

۴۷

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

تجهیزات آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا



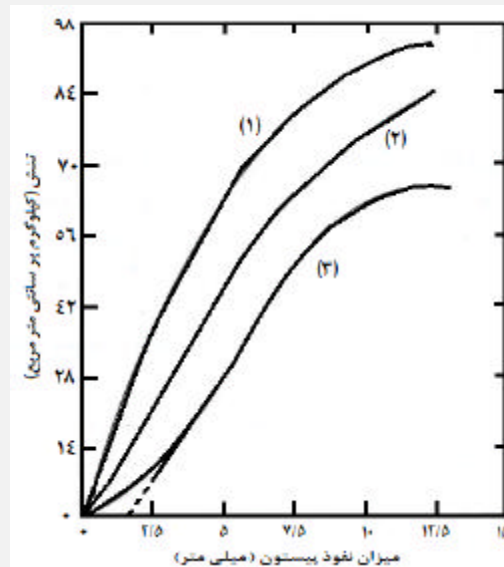
۴۸

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

Pavement Engineering

تصحیح نتایج آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا

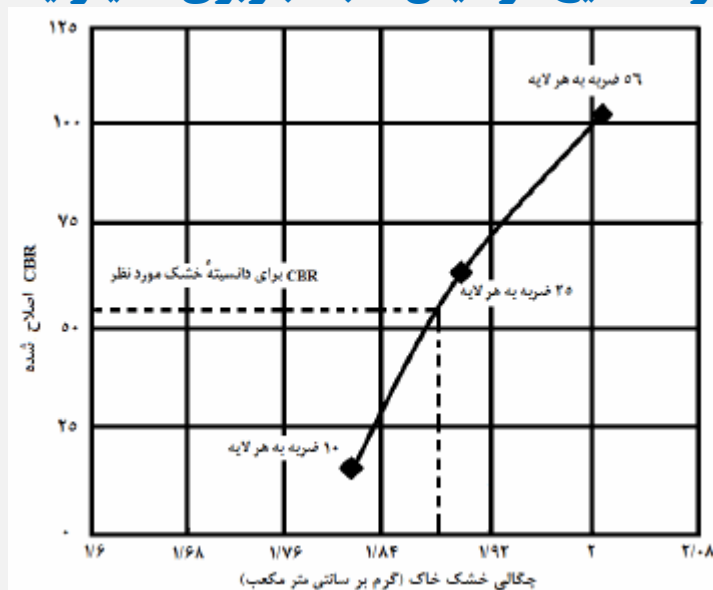


۴۹

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

ارائه نتایج آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا



۵۰

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

Pavement Engineering

آزمایش مدول برجهندگی



✓ اصلی ترین کاستی اغلب آزمایش‌های تعیین مقاومت خاک این است که بار اعمالی در این آزمایش‌ها به صورت آبی و یا استاتیک به نمونه وارد می‌شود؛ اما در شرایط واقعی بار ناشی از ترافیک عبوری به صورت تدریجی یا دینامیکی به خاک اعمال می‌شود.

✓ دیگر عیب وارد به این آزمایش‌ها این است که نمونه خاکی که در معرض تنش قرار می‌گیرد، دقیقاً همان شرایطی که در محل پروژه دارد را ندارد، زیرا میزان تنش اعمال شده در محل پروژه آن قدر کم است که در اغلب موارد مصالح موردنظر به حد گسیختگی نمی‌رسد. تفاوت‌های موجود بین شرایط آزمایشگاهی و شرایط واقعی، عملاً تخمین مقادیر واقعی کرنش و تغییرشکل را با مشکل روبرو می‌سازد.

۵۱

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

روش کلی آزمایش مدول برجهندگی خاک



✓ در آزمایش استاندارد مدول برجهندگی، نمونه خاک تحت ۱۶ تنش مختلف قرار می‌گیرد که در هر کدام میزان تنش محوری و انحرافی عددی معلوم و ثابت است.



✓ نرم‌افزاری که مسئول اندازه‌گیری عکس‌العمل خاک است، ابتدا از یک سطح تنش آزمایش را شروع کرده و مرحله به مرحله جلو می‌رود تا در هر ۱۶ سطح تنش مختلف مقدار مدول مشخص گردد.

✓ حسگرها و نرم‌افزار دستگاه آزمایش، هم‌زمان با اعمال هر تنش، تغییرشکل‌های محوری نمونه را اندازه‌گیری می‌کنند.

۵۲

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان



نکات اجرایی

۵۳

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

آماده‌سازی بستر در خاکریزی



جدول ۱-۲- درصد تراکم بستر روسازی در دو لایه نهایی

میزان تراکم لایه ها		درجه راه
خاک ریزدانه	خاک درشت دانه	
A-4 تا A-7	A-1 تا A-3	آزادراهها، بزرگراهها و راههای اصلی و فرعی درجه یک
۹۵	۱۰۰	راههای فرعی درجه دو و راههای روستایی
۹۰	۹۵	

✓ دو قشر نهایی خاکریز با ضخامت حداقل ۳۰ سانتی‌متر از خاک‌هایی که در طبقه‌بندی اشتو A-1 تا A-7 قرار گرفته‌اند انتخاب و در تمام عرض راه پخش می‌شود و پس از آب پاشی و شیب بندی طبق با درصد تراکم مشخص متراکم می‌شوند.

✓ برای ترافیک سنگین ($ESAL > 10^7$) سه قشر نهایی با ضخامت حداقل ۴۵ سانتی‌متر از نوع خاک A-1 و A-2 انتخاب شود و یا مصالح موجود با استفاده از آهک، سیمان و یا قیر تثبیت و حداقل در دو لایه به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر تقویت شود.

۵۴

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

آماده سازی بستر در خاکریزی



✓ در محلهایی که **خاک مناسب** جهت مصرف در دو قشر نهایی خاکریز بستر روسازی راه در دسترس نبوده و یا حمل آن مقرون به صرفه نباشد، می توان از تثبیت خاک با آهک و یا مواد ترکیبات شیمیائی استفاده شود.

خاک های نامناسب:

- خاک های که میزان مواد آلی آنها بیش از ۱۰ درصد باشد.
- خاک های نمکی و گچی که میزان نمک (NaCl) و گچ (CaSO₃) قابل حل در آب آنها به ترتیب بیش از ۵ و ۱۰ درصد باشد.
- خاک های مارنی و رسی که دامنه خمیری آنها بیش از ۵۰ درصد باشد.
- خاک هایی که حداکثر وزن مخصوص خشک آنها طبق AASHTO T 180 طبقه D کمتر از ۱/۵۵ تن در متر مکعب باشد.

✓ تشخیص نامناسب بودن خاک با دستگاه نظارت و تأیید کارفرما است.

۵۵

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

آماده سازی بستر در خاکبرداری



✓ برش های خاکی (همانند خاکریزی)

✓ برش های سنگی

- در برش های سنگی معمولاً کف برش ها دارای مقاومت کافی است.
- به دلیل ناهمواری حاصل و غیر قابل نفوذ بودن سنگ بستر راه، در صورت مرغوب بودن برش سنگی یک قشر خاکریز از مصالح منتخب (A-1 یا A-2) به ضخامت ۱۵ سانتی متر
- در صورت نامرغوب بودن برش سنگی (مانند مارن یا گچ)، دو لایه خاکریز هر یک به ضخامت ۱۵ سانتی متر از مصالح منتخب (A-1 یا A-2)
- بنابراین در برش های سنگی مرغوب و مقاوم، کف برش حداقل به میزان ۱۵ سانتی متر اضافه بر رقوم تعیین شده برای پی روسازی، برداشته و با مصالح منتخب خاکریزی، آب پاشی و کوبیده می شود تا همواری و مقاومت لازم برای سطح بستر روسازی حاصل گردد.

۵۶

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

Pavement Engineering

الزامات تراکم



درصد تراکم بستر روسازی در دو یا یک قشر نهائی، هر یک به ضخامت ۱۵ سانتیمتر، به ترتیب در خاکریز یا کف برش‌های خاکی و یا سنگی برحسب درجه راه و نوع مصالح درشت دانه یا ریزدانه مصرفی باید طبق مشخصات مندرج در جدول (۱-۲) باشد. تراکم آزمایشگاهی مصالح براساس روش آستو اصلاح شده ۱۸۰-T (طریقه D) اندازه‌گیری می‌شود.

در راه‌های فرعی درجه دو، به جای دو لایه ۱۵ سانتیمتری، می‌توان از یک لایه به ضخامت ۲۰ سانتیمتر استفاده نمود.

جدول ۱-۲ - درصد تراکم بستر روسازی در دو لایه نهایی

میزان تراکم لایه ها		درجه راه
خاک ریزدانه A-۴ تا A-۷	خاک درشت دانه A-۳ تا A-۱	
۹۵	۱۰۰	ازادامه: بزرگراهها و راههای اصلی و فرعی درجه یک
۹۰	۹۵	راههای فرعی درجه دو و راههای روسازی

■ خاک با پتانسیل تورم بالا باید در محدوده یک تا دو درصد بیشتر از رطوبت بهینه متراکم شوند.

■ خاکهای چسبنده باید در محدوده یک تا دو درصد کمتر از رطوبت بهینه متراکم شوند.

۵۷

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

انتخاب ضریب برجهنگی برای طراحی روسازی



- ✓ برای طراحی روسازی، راه به قطعات طرح تقسیم می‌گردد.
- ✓ هر قطعه طرح، قسمتی از طول راه است که تقریباً دارای شرایط مشابهی از نظر جنس خاک، شرایط آب و هوایی و میزان ترافیک بوده و تغییرات فاحشی در طول قطعه مشاهده نمی‌شود.
- ✓ در یک قطعه برحسب شرایط و نوع و اهمیت راه، فواصل نمونه‌گیری معمولاً بین ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر تعیین می‌شود.
- ✓ حداقل ۶ تا ۸ نتیجه آزمایش برای تعیین ضریب برجهنگی یا CBR خاک بستر قطعه طرح مورد نیاز است.
- ✓ نمونه‌گیری برای این آزمایش باید حداقل معرف ۶۰ سانتیمتر از خاک لایه‌های بستر روسازی و لایه زیرین آن باشد.

۵۸

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

Pavement Engineering

تعیین ضریب برجهندگی در قطعه طرح



$$Cov = \frac{S}{\bar{Mr}} \times 100$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Mri - \bar{Mr})^2}{n-1}}$$

$$\bar{Mr} = \frac{\sum_{i=1}^n Mri}{n} \quad n > 6$$

Cov = ضریب تغییرات (درصد)

S = انحراف استاندارد

n = تعداد آزمایش

Mri = ضریب برجهندگی نمونه‌های آزمایش

\bar{Mr} = میانگین حسابی ضریب برجهندگی

■ ضریب برجهندگی طرح، میانگین حسابی ضرایب برجهندگی در قطعه طرح می باشد، مشروط بر آنکه ضریب تغییرات نتایج آزمایش بیشتر از ۱۵ درصد نباشد.

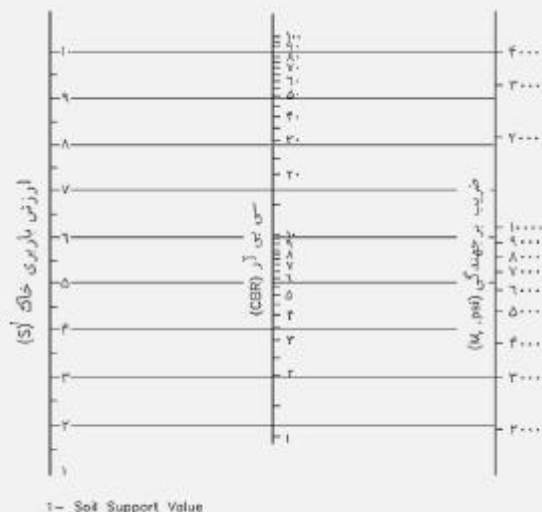
■ در شرایط وجود خاک های ناهمگن، قطعاتی که در آنها این ضریب از ۱۵ درصد تجاوز کند به قطعات کوچکتر تقسیم می‌شوند یا کمترین ضریب برجهندگی خاک یا سی بی آر، ملاک طراحی قرار می گیرد.

۵۹

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

تبدیل CBR به Mr



شکل ۱۱-۲- نمودار تعیین ضریب برجهندگی خاک بستر روسازی با استفاده از مقادیر CBR

۶۰

مهندسی روسازی

دانشگاه صنعتی سیرجان

Pavement Engineering

