



تحلیل و طراحی پیشرفته روسازی

فصل 6. تغییر مشخصات مصالح روسازی

Time, t دکتر علیرضا غنی زاده

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سیرجان

تقسیم‌بندی مصالح راهسازی

- ✓ مصالح آسفالتی
- ✓ خاک و مصالح سنگدانه‌ای
- ✓ مصالح تثبیت شده با سیمان، آهک و ...
- ✓ بتن

وزارت علوم تحقیقات و فناوری
دانشگاه صنعتی سیرجان

دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۲

مهمترین مشخصات مصالح از دیدگاه مهندسی روسازی



✓ **سختی مصالح** (مدول عکس‌العمل، مدول ارتجاعی، مدول برجهندگی یا مدول دینامیک)

✓ **ضریب پواسن مصالح**

✓ **مقاومت خستگی**

✓ **مقاومت در برابر تغییر شکل‌های ماندگار (شیارشده‌گی)**

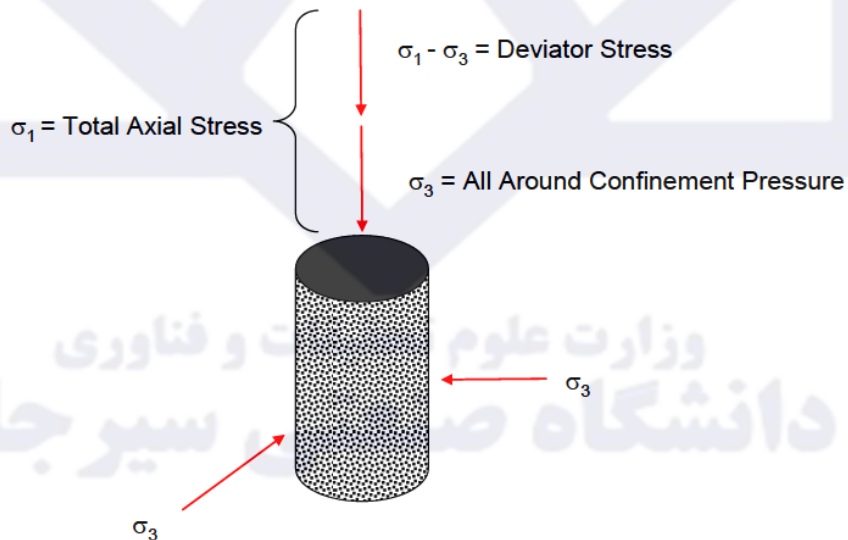
✓ **مدول گسیختگی**

دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۳

بارگذاری سه محوری

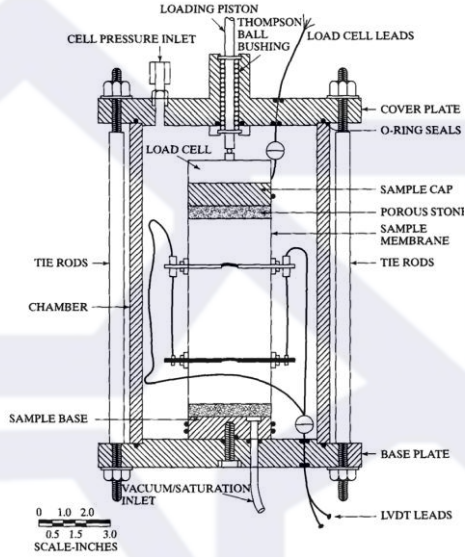


دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۴

مدول بر جهندگی مصالح سنگدانه‌ای



دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۵

مدول بر جهندگی مصالح سنگدانه‌ای



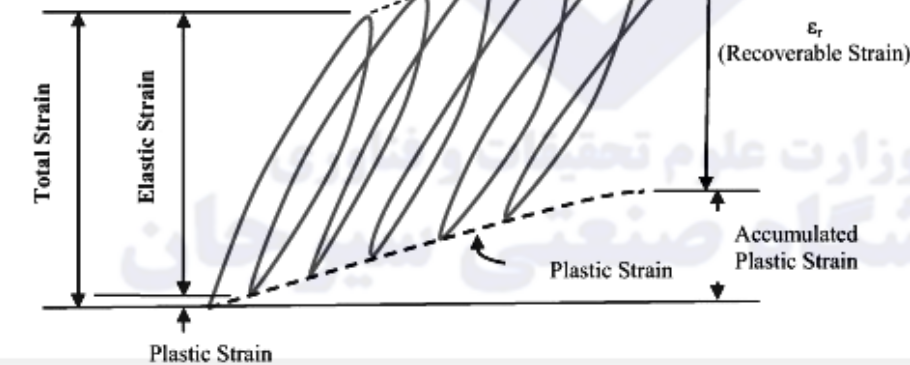
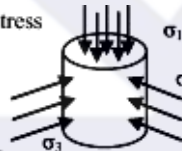
$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_d =$ Deviator Stress

$\sigma_1 =$ Major Stress

$\sigma_3 =$ Confining Stress

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$

$M_R =$ Resilient Modulus



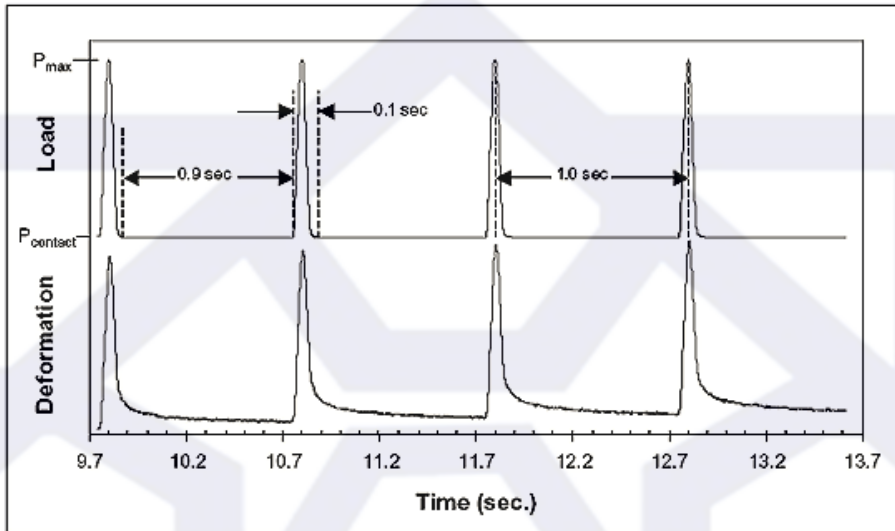
$$M_R = \frac{P(\nu + 0.2734)}{\delta t}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۶

مدول بر جهندگی مصالح سنگدانه‌ای



دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

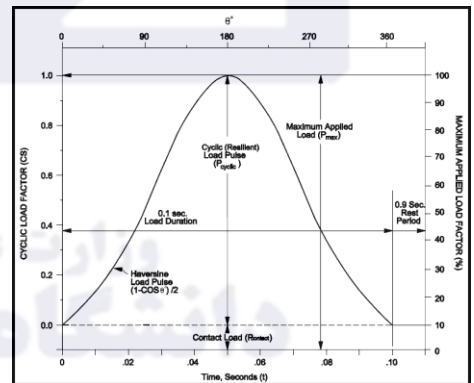
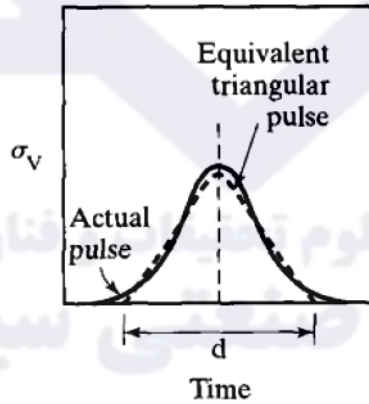
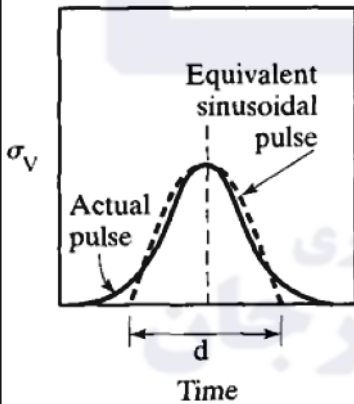
۷

شکل موج تنش در روسازی



$$\sigma_v = \sigma_{max} \sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi t}{d}\right)$$

$$\sin^2\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi t}{d}\right)$$

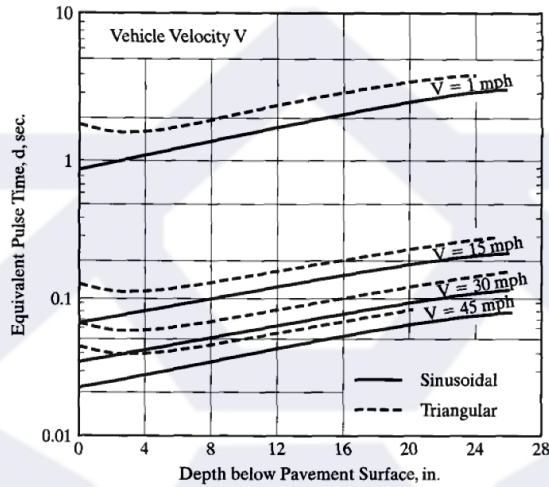


دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

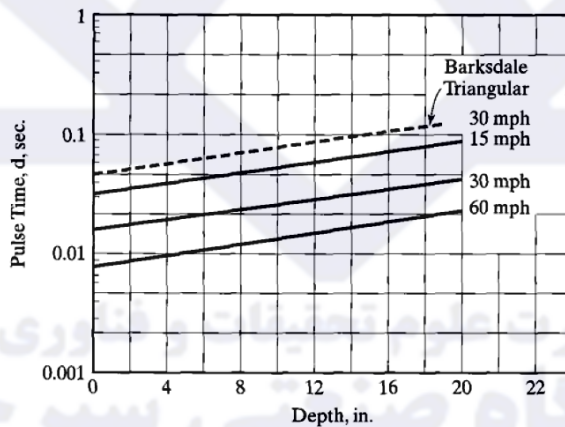
۸

زمان پالس بارگذاری با فرض بار مثلثی و نیم سینوسی



Vertical stress pulse time under haversine or triangular loading (1 in. = 25.4 mm. 1 mph = 1.6 km/h). (After Barksdale (1971).)

زمان پالس بارگذاری با فرض بار مربعی

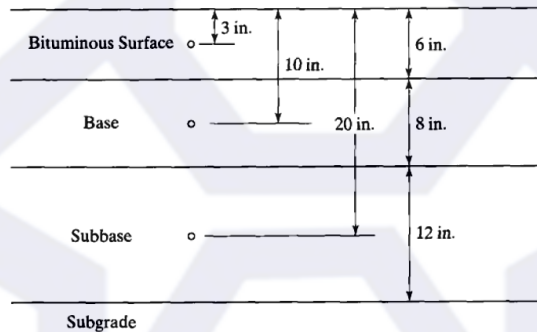


Vertical stress pulse time under square wave form (1 in. = 25.4 mm, 1 mph = 1.6 km/h). (After McLean (1974).)

مثال ۱



مطابق شکل زیر، از آزمایش بارگذاری تکرارشونده فشاری جهت تعیین مدول برجهندگی رویه، اساس و زیراساس در روسازی انعطاف پذیر استفاده شده است. از نقطه وسط هر لایه برای تعیین زمان پالس تنش استفاده می‌شود. اگر سرعت وسیله نقلیه $40\text{mph}(64\text{km/h})$ باشد، آنگاه زمان بارگذاری به شکل نیم‌سینوسی و مربعی برای هر کدام از مصالح چقدر خواهد بود؟



دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۱۱

ادامه مثال ۱



Material	Bituminous surface	Base course	Subbase course
Depth (in.)	3	10	20
Haversine wave	0.028 s	0.041 s	0.064 s
Square wave	0.014 s	0.020 s	0.031 s

Note. 1 in. = 25.4 mm.

دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۱۲

ترتیب بارگذاری برای تعیین مدول برجهنگی مصالح ریزدانه و درشتدانه



Test Sequence	SUBGRADE			SUBBASE/BASE		
	Confining Pressure (psi)	Deviator (Axial) Stress (psi)	Bulk Stress (psi)	Confining Pressure (psi)	Deviator (Axial) Stress (psi)	Bulk Stress (psi)
0	6	4	22.0	15	15	60.0
1	6	2	20.0	3	3	12.0
2	6	4	22.0	3	6	15.0
3	6	6	24.0	3	9	18.0
4	6	8	26.0	5	5	20.0
5	6	10	28.0	5	10	25.0
6	4	2	14.0	5	15	30.0
7	4	4	16.0	10	10	40.0
8	4	6	18.0	10	20	50.0
9	4	8	20.0	10	30	60.0
10	4	10	22.0	15	10	55.0
11	2	2	8.0	15	15	60.0
12	2	4	10.0	15	30	75.0
13	2	6	12.0	20	15	75.0
14	2	8	14.0	20	20	80.0
15	2	10	16.0	20	40	100.0

دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۱۳

مدول برجهنگی



Confining pressure σ_3 (psi)	Deviator stress σ_d (psi)	Recoverable deformation (0.001 in.)	Recoverable strain $\epsilon_r (\times 10^{-3})$	Resilient modulus $M_R (\times 10^3 \text{ psi})$	Stress invariant θ (psi)
20	1	0.264	0.066	15.2	61
	2	0.496	0.124	16.1	62
	5	1.184	0.296	16.9	65
	10	2.284	0.571	17.5	70
	15	3.428	0.857	17.5	75
	20	4.420	1.105	18.1	80
15	1	0.260	0.065	15.4	46
	2	0.512	0.128	15.6	47
	5	1.300	0.325	15.4	50
	10	2.500	0.625	16.0	55
	15	3.636	0.909	16.5	60
	20	4.572	1.143	17.5	65
10	1	0.324	0.081	12.3	31
	2	0.672	0.168	11.9	32
	5	1.740	0.435	11.5	35
	10	3.636	0.909	11.0	40
	15	3.872	0.968	15.5	45
5	1	0.508	0.127	7.9	16
	2	0.988	0.247	8.1	17
	5	2.224	0.556	9.0	20
	10	3.884	0.971	10.3	25
	15	5.768	1.442	10.4	30
1	1	0.636	0.159	6.3	4
	2	0.880	0.220	9.1	5
	5	2.704	0.676	7.4	8
	7.5	3.260	0.815	9.2	10.5
	10	4.444	1.111	9.0	13

Note: 1 psi = 6.9 kPa, 1 in. = 25.4 mm.

جدول زیر نتایج آزمایش مدول برجهنگی روی مصالح سنگدانه‌ای را نشان می‌دهد. در این آزمایش فاصله بین LVDTها برابر با ۴ اینچ می‌باشد. میانگین تغییر شکل‌های برگشت پذیر اندازه گیری شده توسط دو LVDT بعد از ۲۰۰ تکرار برای هر تنشی انحرافی در جدول نمایش داده شده است. ضرایب مدل $K-\theta$ را تعیین نمایید.

$$\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3 = \sigma_d + 3\sigma_3$$

$$M_R = \frac{P(v + 0.2734)}{\delta t}$$

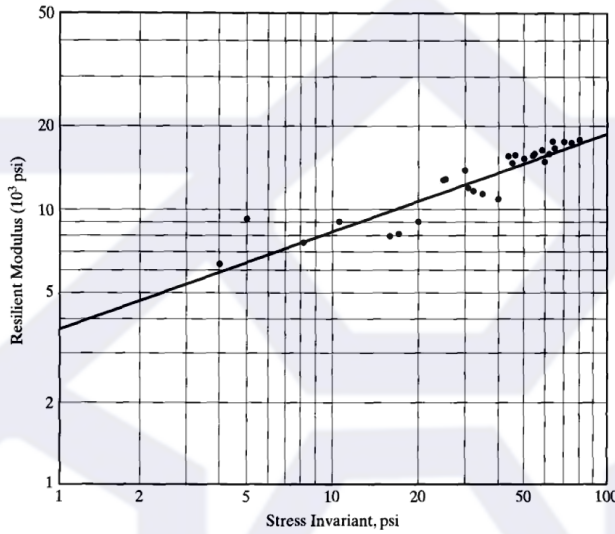
دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۱۴



مدول بر جهندگی

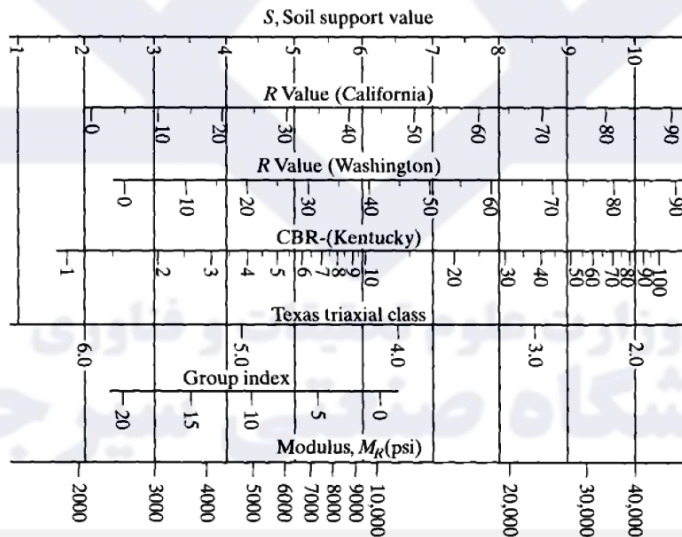


دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۱۵

تعیین مدول بر جهندگی خاک بستر بر اساس نتایج سایر آزمایش‌ها

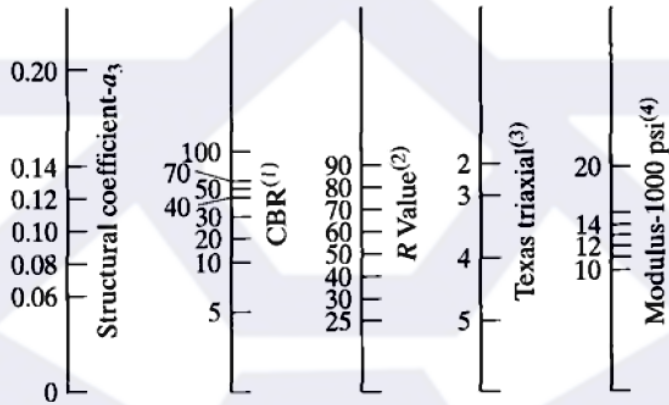


دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۱۶

تعیین مدول برجهندگی زیراساس سنگدانه‌ای بر اساس نتایج سایر آزمایش‌ها

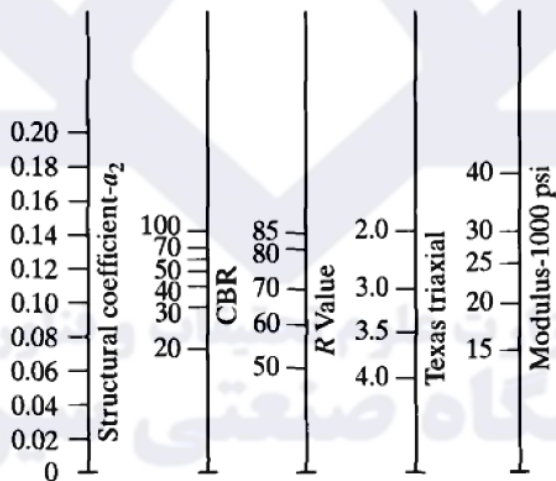


دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۱۷

تعیین مدول برجهندگی اساس سنگدانه‌ای بر اساس نتایج سایر آزمایش‌ها



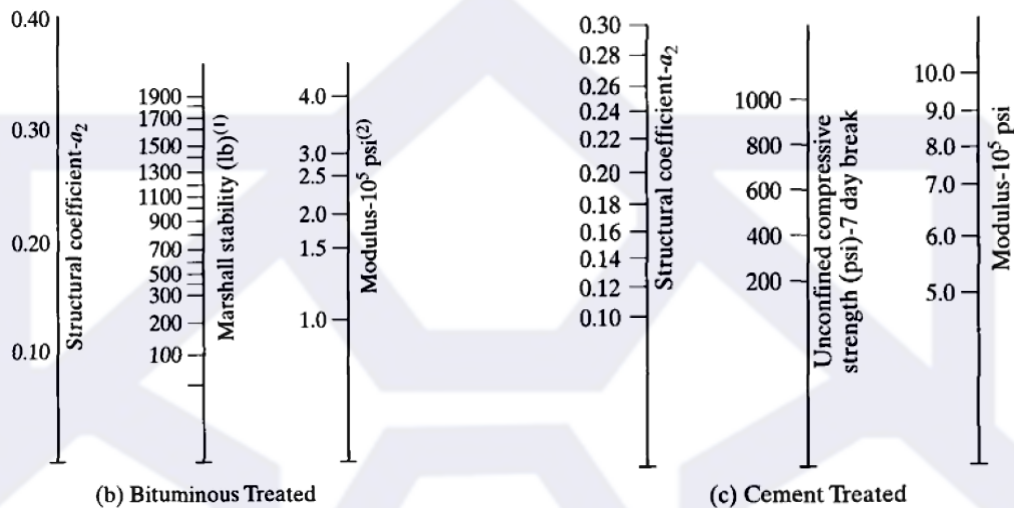
(a) Untreated

دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۱۸

تعیین مدول برجهندگی اساس تثبیت شده با قیر و سیمان



دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۱۹

مقاومت مارشال مخلوط‌های آسفالتی



ابتدا نمونه های استوانه ای شکل بتن آسفالتی به مدت ۲۰ تا ۳۰ دقیقه در آب با درجه حرارت ۶۰ درجه گذاشته شده و سپس آن را خارج می کنند و بین رکاب های دستگاه مارشال قرار می دهند تا تحت فشار گسیخته شود.

حداکثر نیروی لازم جهت گسیخته شدن نمونه بتن آسفالتی بر حسب کیلوگرم اندازه گیری شده که استقامت مارشال نامیده می شود. مقدار تغییر شکل قطری نمونه در موقع شکست نمونه بر حسب میلیمتر اندازه گیری شده که به روانی بتن آسفالتی موسوم است.

لازم به ذکر است، آزمایش مارشال فقط در مورد بتن های آسفالتی که اندازه بزرگترین دانه آنها از ۲/۵ سانتی متر کوچک تر است، قابل استفاده می باشد.

دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

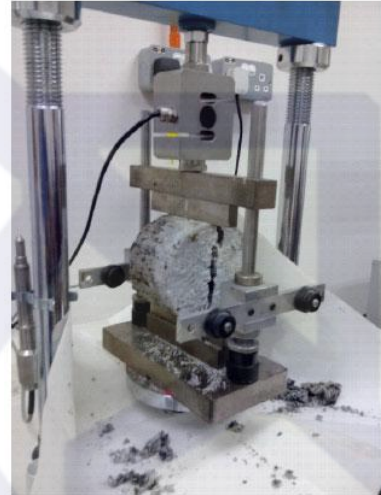
۲۰

مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط‌های آسفالتی



$$S_t = \frac{2000 \times P}{\pi \times t \times D}$$

S_t : the indirect tensile strength (kPa);
 P : the ultimate applied load (N),
 t : the thickness of specimen (mm), and
 D : the diameter of specimen (mm).

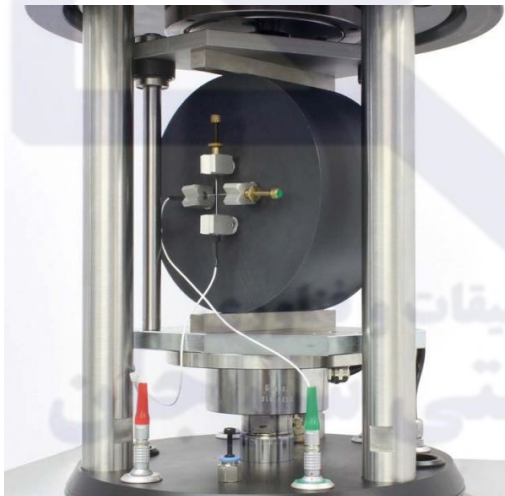


دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۲۱

مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی

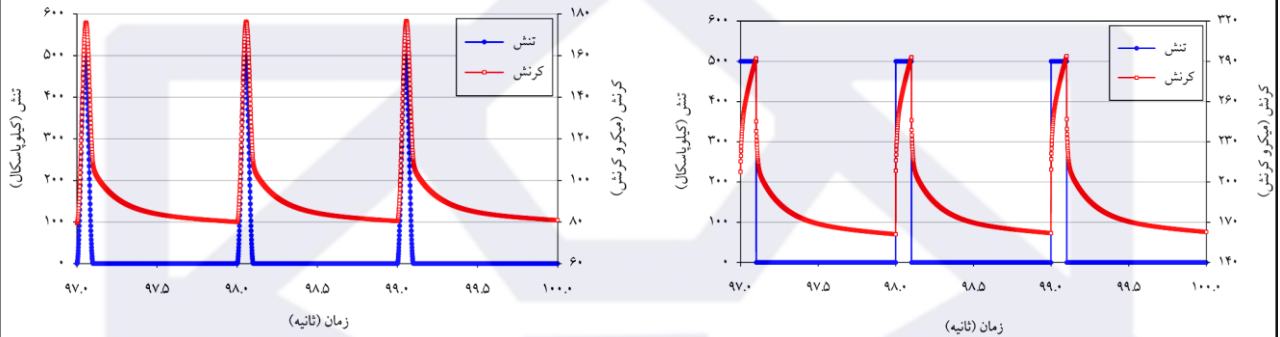


دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۲۲

مدول بر جهندگی مخلوط‌های آسفالتی



دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۲۳

مدول بر جهندگی مخلوط‌های آسفالتی



The resilient modulus test, in accordance with AASHTO TP31, assumed the maximum applied load at temperatures of 5, 25 and 40 °C as 30,15 and 5 percent of the ITS of a mix at the temperature of 25 °C

$$M_r = \frac{P \times (v + 0.27)}{t \times \Delta H}$$

Mr is the resilient modulus (MPa);

P is repeated load (N);

v is Poisson's ratio;

t is the thickness of specimen (mm) and

ΔH is recoverable horizontal deformation (mm).

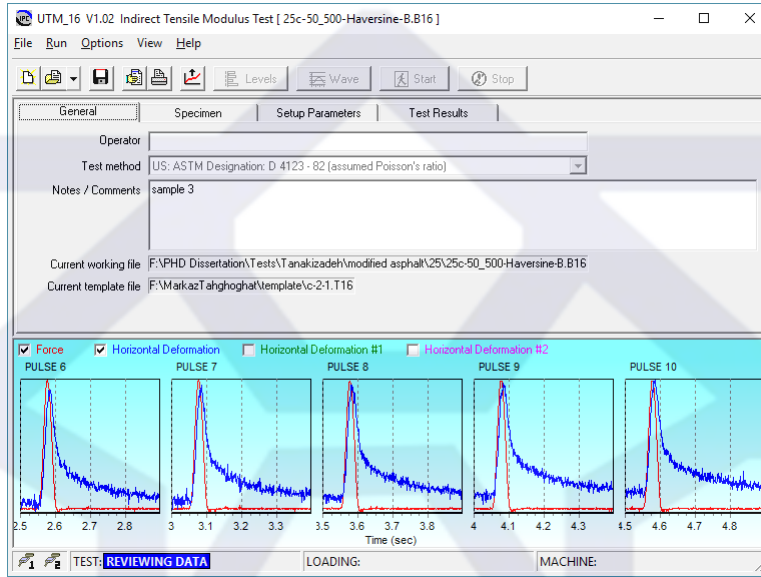
The **Poisson's ratio** was selected according to the test temperature.

دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۲۴

مدول برجهنگی مخلوط‌های آسفالتی

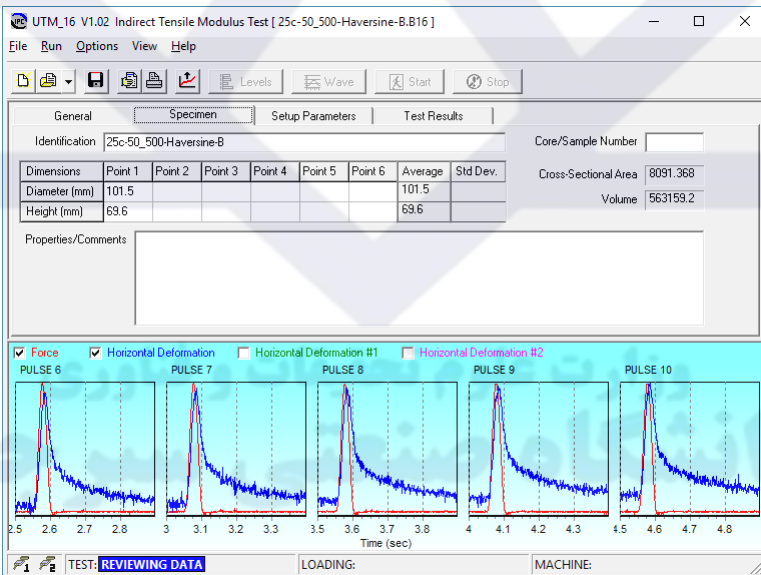


دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۲۵

مدول برجهنگی مخلوط‌های آسفالتی

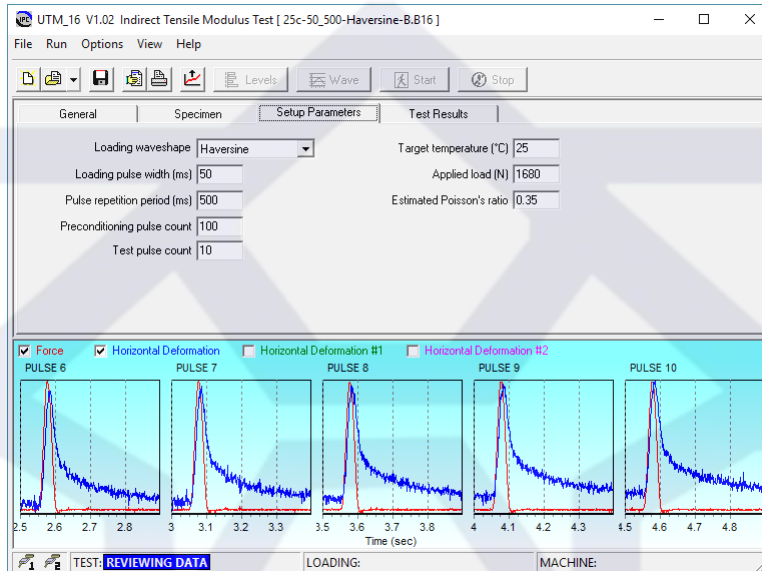


دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۲۶

مدول بر جهندگی مخلوط‌های آسفالتی

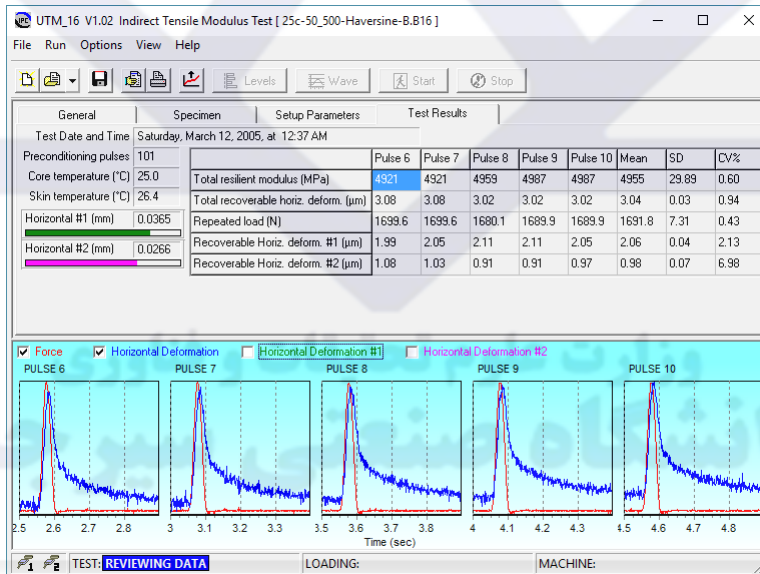


دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۲۷

مدول بر جهندگی مخلوط‌های آسفالتی



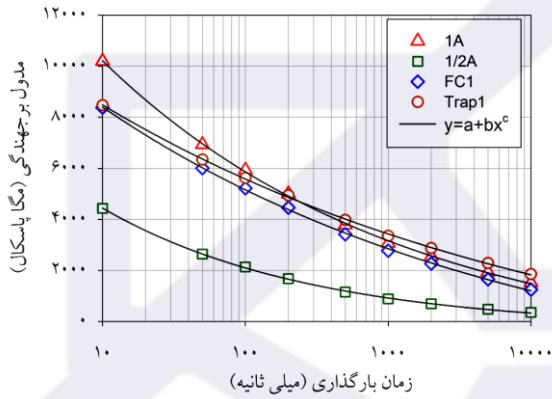
دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

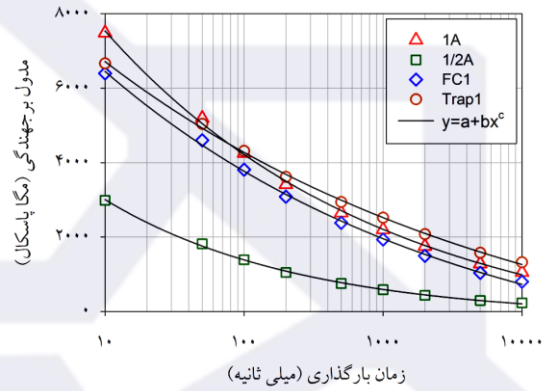
۲۸



عوامل مؤثر بر مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی



نیم سینوسی



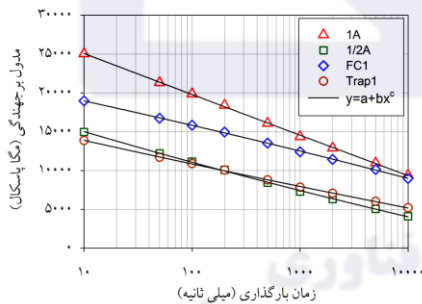
مربعی

دانشگاه صنعتی سیرجان

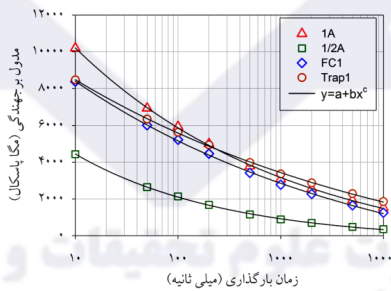
تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۲۹

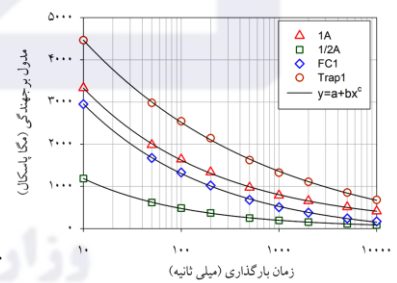
عوامل مؤثر بر مدول برجهندگی مخلوط‌های آسفالتی



۵ درجه سانتی‌گراد



۲۵ درجه سانتی‌گراد



۴۰ درجه سانتی‌گراد

دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۳۰

عوامل مؤثر بر مدول بر جهندگی مخلوط‌های آسفالتی



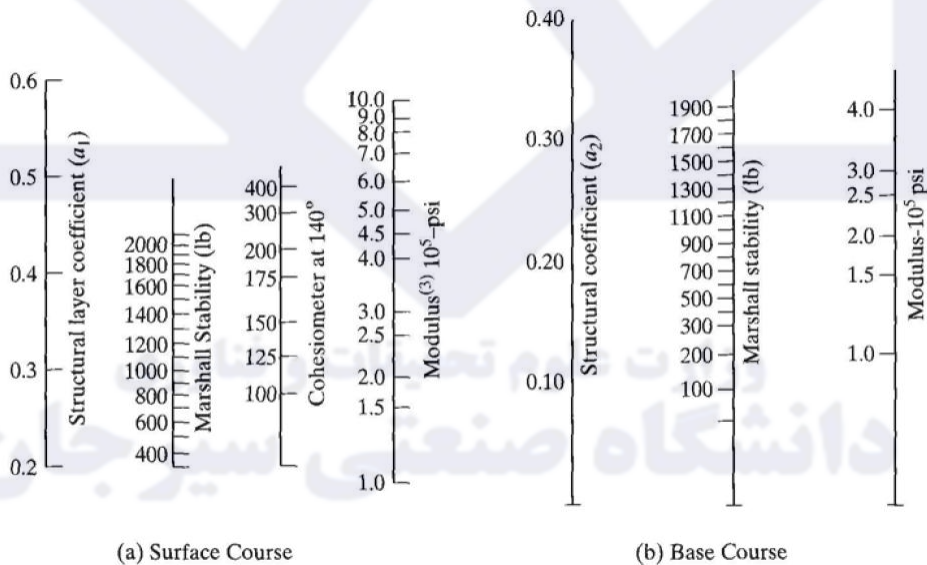
- ✓ زمان استراحت
- ✓ اندازه نمونه
- ✓ تعداد سیکل‌های پیش بارگذاری

دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۳۱

تعیین مدول بر جهندگی مخلوط‌های آسفالتی بر اساس استقامت مارشال

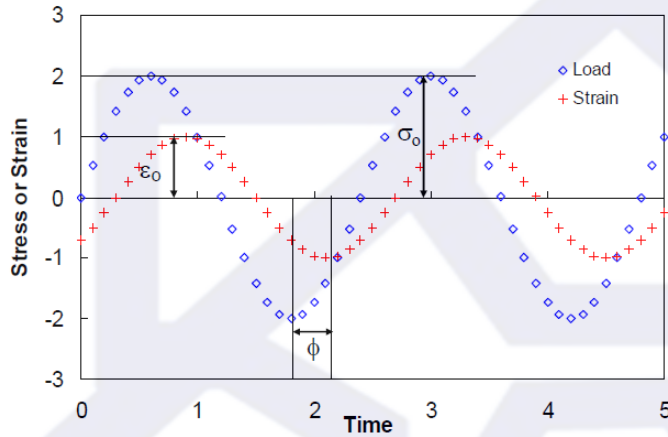


دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۳۲

مدول دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی

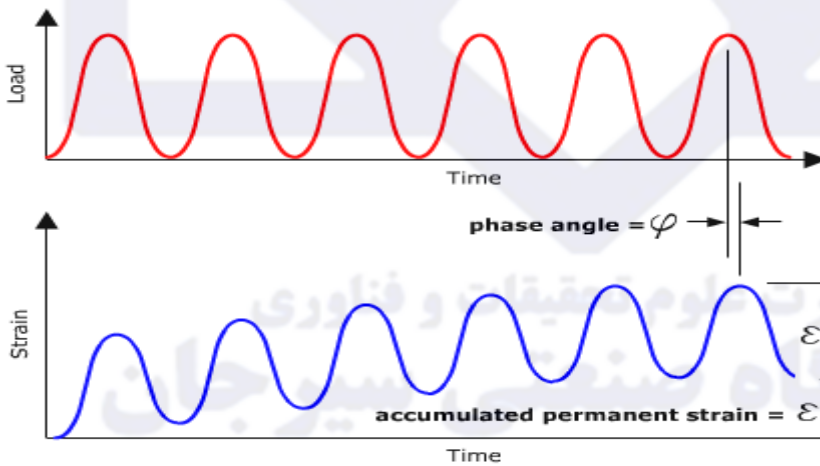


دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۳۳

مدول دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی



Specimen Schematic



دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۳۴

مدول دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی



1. Differences in dynamic modulus are generally insignificant or relatively small among tension, tension-compression, and compression tests for temperatures ranging from 40 to 70°F (4 to 21°C) and loading frequencies from 1 to 16 Hz.
2. Differences in dynamic modulus are significant between the tension or tension-compression test and the compression test at a frequency of 1 Hz and temperatures ranging from 70 to 100°F (21 to 38°C). Under these conditions, the dynamic modulus in tension or tension-compression averages about one-half to two-thirds of that in compression.
3. Differences in phase angle are pronounced between tension and compression and are less pronounced between tension-compression and compression.
4. The phase angle is greatest in tension, least in compression, and intermediate in tension-compression. On the average, the phase angle in tension exceeds that in compression by about 50%, and the phase angle in tension-compression exceeds that in compression by about 25%.

دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۳۵

مدول دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی



The complex modulus, E^* , is represented as follows:

$$E^* = E' + iE'' ,$$

where

$$|E^*| = \text{magnitude of } E^* ;$$

$$E' = \text{storage modulus} = |E^*| \cos \phi ;$$

$$E'' = \text{loss modulus} = |E^*| \sin \phi .$$

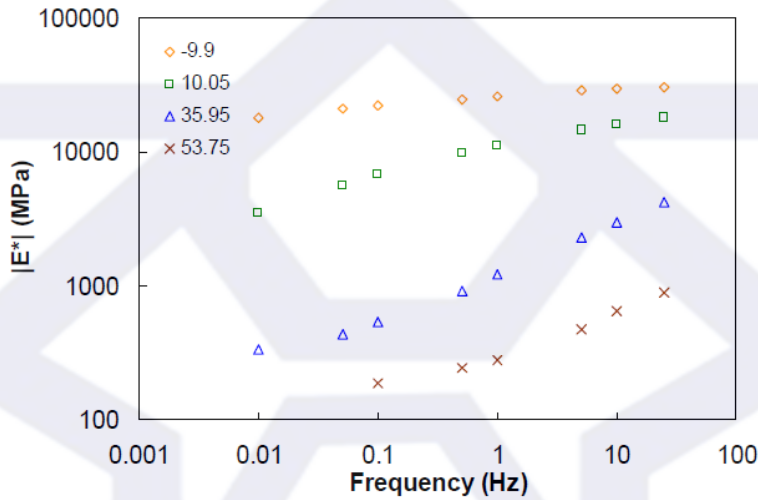
دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۳۶



مدول دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی



دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۳۷



منحنی مرجع دینامیکی

$$\log |E^*| = a + \frac{b}{1 + \frac{1}{e^{c+d \cdot \log(f_r)}}}$$

where

a, b, c, d = constants; and

f_r = reduced frequency.

$$f_r = a_T f$$

where

f = frequency (Hz); and

f_r = reduced frequency.

$$\log(a_T) = a_1 T^2 + a_2 T + a_3$$

where

$a_1, a_2,$ and a_3 = coefficients; and

T = temperature.

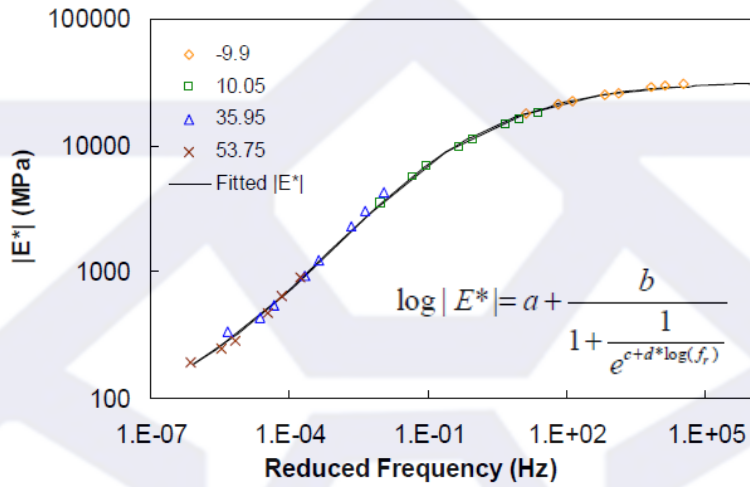
دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۳۸



منحنی مرجع مدول دینامیکی



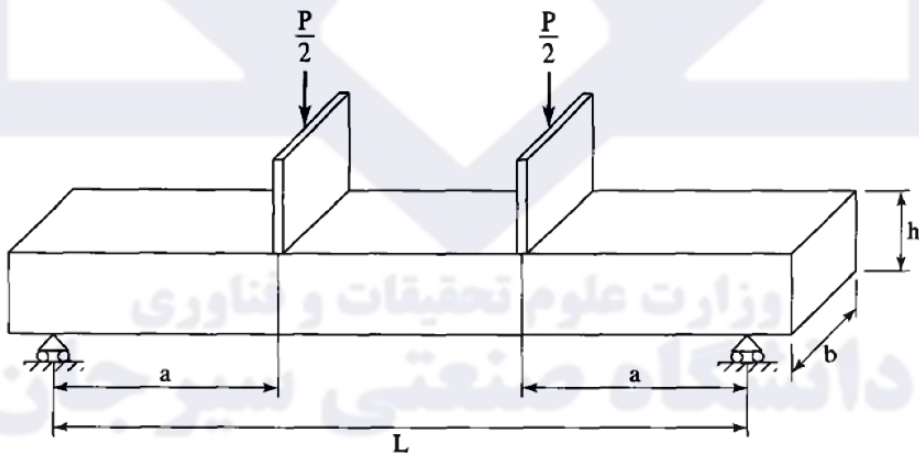
دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۳۹



مدول سختی دینامیکی



دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۴

مدول سختی دینامیکی



$$\sigma = \frac{3aP}{bh^2}$$

$$E_s = \frac{Pa(3L^2 - 4a^2)}{4bh^3\Delta}$$

$$\epsilon_t = \frac{\sigma}{E_s} = \frac{12h\Delta}{3L^2 - 4a^2}$$

$a = L/3$

$$E_s = \frac{23PL^3}{108bh^3\Delta}$$

considering the shear deformation

$$E_s = \frac{23PL^3}{108bh^3\Delta} \left[1 + \frac{216h^2(1 + \nu)}{115L^2} \right]$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۴۱

مثال



A beam with a span length of 12 in. (305 mm) and a width and depth of 3 in. (76 mm) is subjected to a dynamic load of 300 lb (1.34 kN) at third points. The dynamic deflection measured at the center of the beam is 6.25×10^{-4} in. (0.016 mm). Determine the extreme fiber stress and the stiffness modulus by Eqs. 7.12 and 7.13. In applying Eq. 7.13, a Poisson ratio of 0.35 may be assumed.

Solution: Given $P = 300$ lb (1.34 kN), $a = 4$ in. (102 mm), and $b = h = 3$ in. (76 mm), from Eq. 7.9, $\sigma = 3 \times 4 \times 300 / (3 \times 9) = 133.3$ psi (920 kPa). Given $L = 12$ in. (305 mm) and $\Delta = 0.000625$ in. (0.016 mm), from Eq. 7.12, $E_s = 23 \times 300 \times (12)^3 / (108 \times 3 \times 27 \times 0.000625) = 2.18 \times 10^6$ psi (15 GPa), and from Eq. 7.13, $E_s = 2.18 \times 10^6 \times 1.16 = 2.53 \times 10^6$ psi (17.5 GPa).

دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۴۲

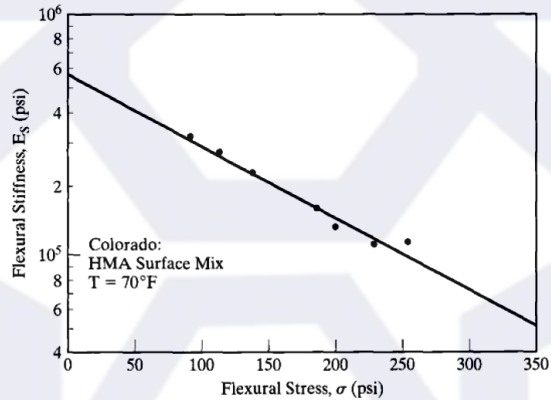
مدول سختی دینامیکی



$$E_s = E_0 A_1^\sigma$$

E_0 is the stiffness modulus when $\sigma = 0$,

A_1 is a regression constant depending upon the particular mix and test temperature



دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۴۳

رابطه مدول سختی دینامیکی و مدول دینامیکی



To define the relationship between E_0 and $|E^*|$, a regression analysis was conducted by Witczak and Root (1974) on the laboratory results of 17 different asphalt mix and temperature combinations that had been tested by both procedures. The loading used for determining the dynamic modulus was haversine in compression and that for the stiffness modulus was 0.1 s haversine and 0.5 s rest period.

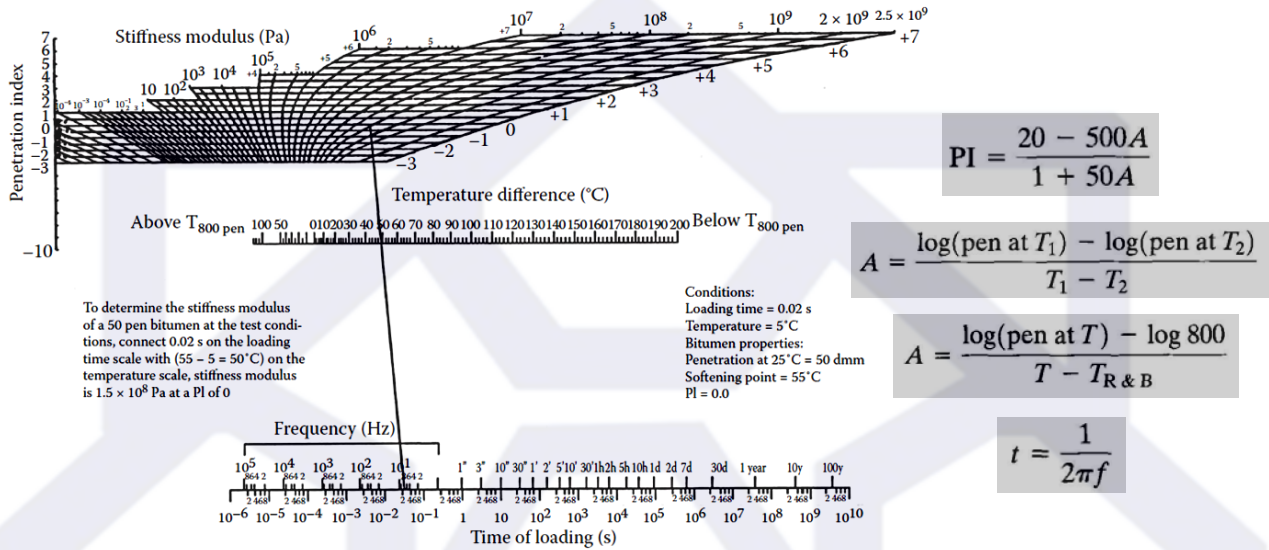
$$|E^*| = 0.18089 f^{2.1456} E_0^{(14.6918/f^{0.01} - 13.5739)}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۴۴

پیش بینی مدول سختی مخلوط آسفالتی با استفاده از نمودار گرام شل

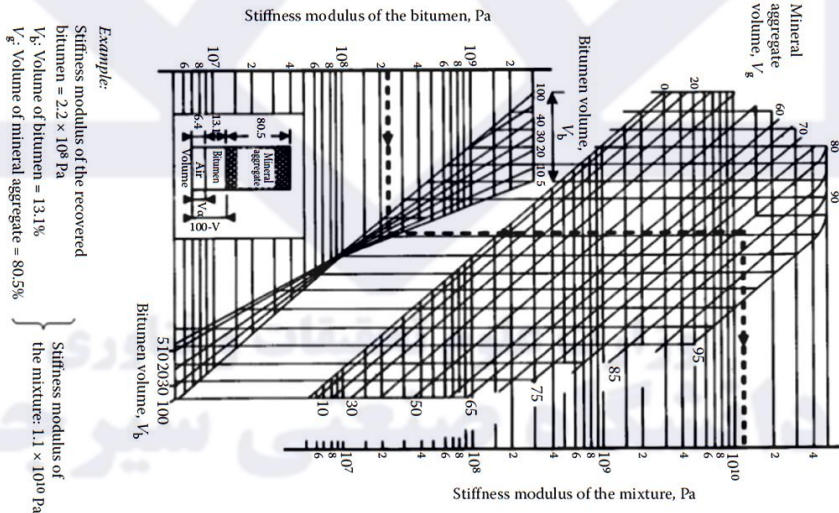


دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۴۵

پیش بینی مدول سختی مخلوط آسفالتی با استفاده از نمودار گرام شل



دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۴۶

پیش‌بینی مدول سختی مخلوط آسفالتی با استفاده از روش Bonnaure



$$\beta_1 = 10.82 - \frac{1.342(100 - V_g)}{V_g + V_b}$$

$$\beta_2 = 8.0 + 0.00568V_g + 0.0002135V_g^2$$

$$\beta_3 = 0.6 \log\left(\frac{1.37V_b^2 - 1}{1.33V_b - 1}\right)$$

$$\beta_4 = 0.7582(\beta_1 - \beta_2)$$

For 725 psi < S_b < 145,000 psi,

$$\log S_m = \frac{\beta_4 + \beta_3}{2}(\log S_b - 4.1612) + \frac{\beta_4 - \beta_3}{2}|\log S_b - 4.1612| + \beta_2 - 3.8383$$

For 145,000 psi < S_b < 435,000 psi,

$$\log S_m = \beta_2 + \beta_4 + 2.0959(\beta_1 - \beta_2 - \beta_4)(\log S_b - 5.1612) - 3.8388$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۴۷

مثال



TABLE 7.6 Stiffness Modulus of Mixtures with Various Compositions

Case no.	S_b (N/m ²)	V_b (%)	V_g (%)	S_m (N/m ²)	
				Equation	Nomograph
1	6×10^6	5	80	1.5×10^9	1.3×10^9
2	6×10^6	10	85	1.8×10^9	1.7×10^9
3	6×10^6	40	60	8.3×10^7	9.0×10^7
4	1×10^8	5	80	6.6×10^9	6.9×10^9
5	1×10^8	10	85	1.1×10^{10}	1.1×10^{10}
6	1×10^8	40	60	1.3×10^9	1.3×10^9
7	2×10^9	5	80	2.8×10^{10}	2.7×10^{10}
8	2×10^9	10	85	3.6×10^{10}	4.8×10^{10}
9	2×10^9	40	60	1.5×10^{10}	1.7×10^{10}

Note. 1 psi = 6900 N/m².

دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۴۸

پیش‌بینی مدول سختی مخلوط آسفالتی با استفاده از روش انستیتو آسفالت



$$|E^*| = 100,000 \times 10^{\beta_1}$$

$$\beta_1 = \beta_3 + 0.000005 \beta_2 - 0.00189 \beta_2 f^{-1.1}$$

$$\beta_2 = \beta_4^{0.5} T^{\beta_5}$$

$$\beta_3 = 0.553833 + 0.028829 (P_{200} f^{-0.1703}) - 0.03476 V_a \\ + 0.070377 \lambda + 0.931757 f^{-0.02774}$$

$$\beta_4 = 0.483 V_b$$

$$\beta_5 = 1.3 + 0.49825 \log f$$

$$\lambda = 29,508.2 (P_{77^\circ F})^{-2.1939}$$

f فرکانس بار بر حسب هرتز

T درجه حرارت بر حسب درجه $^{\circ}F$

P_{200} درصد وزنی مصالح سنگی عبوری از الک شماره ۲۰۰

V_a درصد حجمی فضای خالی آسفالت

λ ویسکوزیته قیر در دمای $70^{\circ}F$ بر حسب میلیون پواز، و

V_b درصد حجمی قیر در مخلوط آسفالتی است

دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۴۹

پیش‌بینی مدول دینامیکی با استفاده از معادله Witezak



$$\log_{10} |E^*| = -1.249937 + 0.02923 p_{200} - 0.001767 (p_{200})^2 - 0.002841 p_4 - 0.05809 V_a \\ - 0.082208 \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} + \frac{3.871977 - 0.0021 p_4 + 0.003958 p_{3/8} - 0.000017 (p_{3/8})^2 + 0.00547 p_{3/4}}{1 + \exp(-0.603313 - 0.313351 \log f - 0.393532 \log \eta)}$$

p_{200} = Percentage of aggregate passing #200 sieve.

p_4 = Percentage of aggregate retained in #4 sieve.

$p_{3/8}$ = Percentage of aggregate retained in $3/8$ -inch (9.56-mm) sieve.

$p_{3/4}$ = Percentage of aggregate retained in $3/4$ -inch (19.01-mm) sieve.

V_a = Percentage of air voids (by volume of mix).

V_{beff} = Percentage of effective asphalt content (by volume of mix).

f = Loading frequency (hertz).

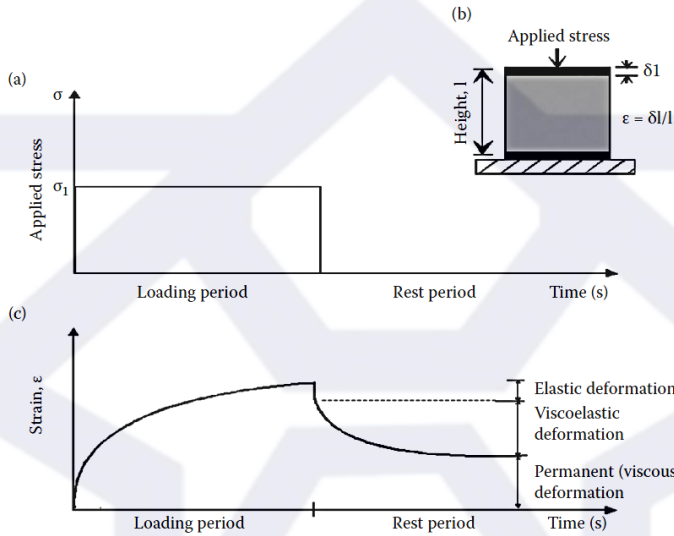
η = Binder viscosity at temperature of interest (10^6 P (10^5 Pas)).

دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۵۰

آزمایش خزش استاتیکی

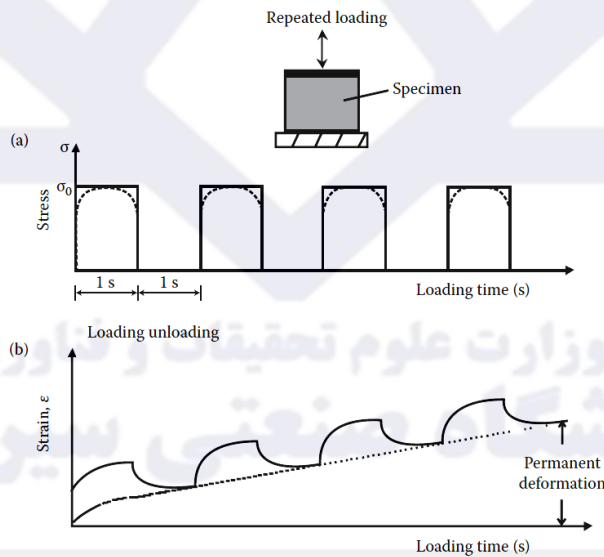


دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۵۱

آزمایش خزش دینامیکی

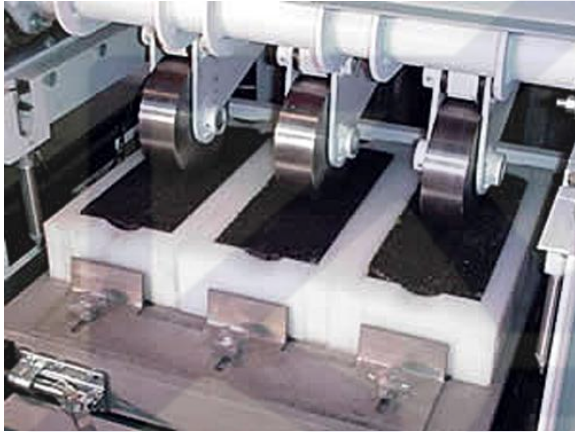


دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۵۲

آزمایش‌های شیارشدگی کوچک مقیاس (Wheel Tracking)



دانشگاه صنعتی سیرجان

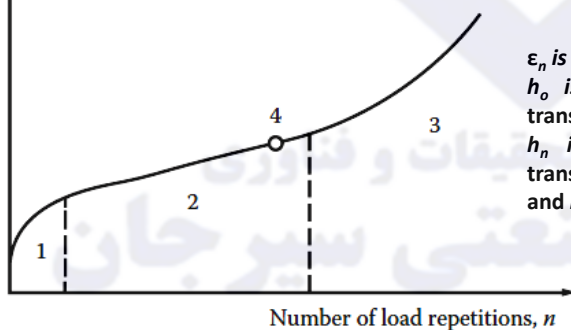
تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۵۳

تفسیر نتایج آزمایش‌های تغییر شکل ماندگار



- ϵ_n
- 1 = 1st stage, the slope of the curve increases rapidly
 - 2 = 2nd stage, the slope of the curve is quasi constant
 - 3 = 3rd stage, the slope of the curve increases again rapidly and the curve becomes concave
 - 4 = Turning (inflection) point



$$\epsilon_n = 100 \times [(h_o - h_n)/h_o]$$

ϵ_n is the cumulative axial strain after n load applications (%),
 h_o is the average height as measured by displacement transducers after pre-load of the specimen (mm),
 h_n is the average height as measured by displacement transducers after n load applications of the specimen (mm) and n is the number of load applications.

creep rate $f_c = (\epsilon_{n1} - \epsilon_{n2}) / (n_1 - n_2)$,

creep modulus $E_{n-c} = (\sigma / \epsilon_n) \times 1000$,

دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۵۴

آزمایش خستگی مخلوط‌های آسفالتی



✓ آزمایش خستگی به روش تیرچه خمشی چهار نقطه‌ای (4PBB)

✓ آزمایش خستگی به روش کشش غیر مستقیم (IDT)

✓ آزمایش بارگذاری سه نقطه‌ای

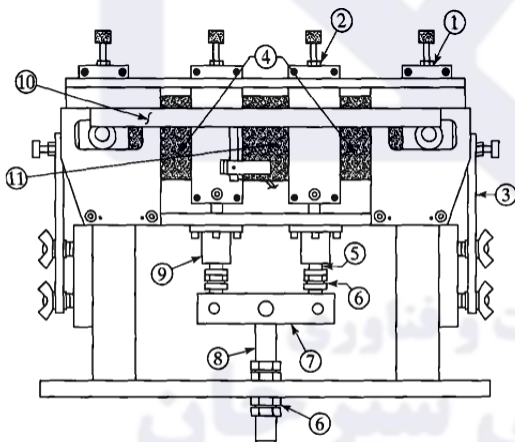
✓ آزمایش خمش دونقطه‌ای

دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۵۵

آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای



- | | | |
|-------------------|----------------|-----------------|
| 1. Reaction Clamp | 5. Loading Rod | 9. Ball Bushing |
| 2. Load Clamp | 6. Stop Nuts | 10. LVDT Holder |
| 3. Restrainer | 7. Load Bar | 11. LVDT |
| 4. Specimen | 8. Piston Rod | |



$$\sigma = \frac{3aP}{bh^2}$$

$$E_s = \frac{Pa(3L^2 - 4a^2)}{4bh^3\Delta}$$

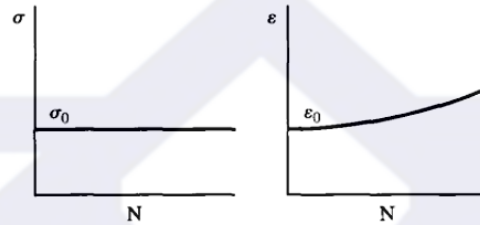
$$\epsilon_t = \frac{\sigma}{E_s} = \frac{12h\Delta}{3L^2 - 4a^2}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

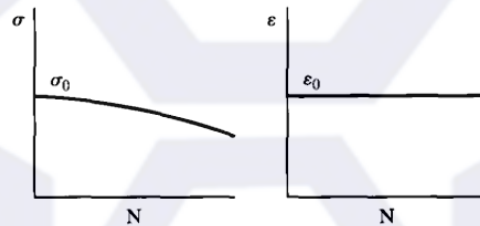
تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۵۶

آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای



CONSTANT STRESS TEST



CONSTANT STRAIN TEST

دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۵۷

آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای



✓ در آزمایش تنش ثابت، مقدار تنش ثابت می ماند ولی کرنش با افزایش بارگذاری افزایش می یابد.

✓ در آزمایش کرنش ثابت، کرنش ثابت می ماند ولی بار و تنش با افزایش تکرار کاهش می یابد.

✓ از آزمایش تنش ثابت جهت تحلیل روسازی‌های ضخیم تر که ضخامت لایه آسفالتی بیشتر از 6in(152mm) می باشد استفاده می کنند.

دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۵۸

آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای



✓ آزمایش کرنش ثابت قابل اعمال در روسازی هایی با ضخامت کمتر از 2 in (51mm) می باشد زیرا کرنش در لایه آسفالتی تحت تأثیر لایه زیرین است و با کاهش سختی HMA تأثیر نمی پذیرد.

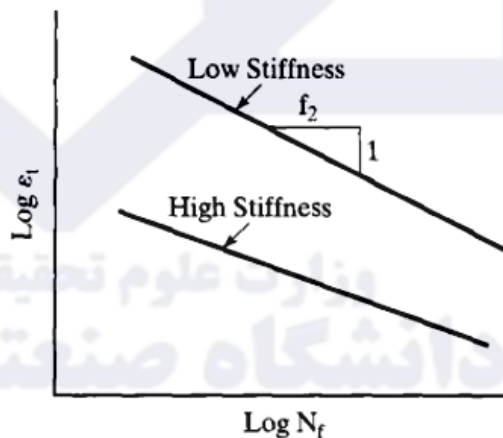
✓ برای ضخامت های بین این دو مقدار روش ترکیب تنش ثابت و کرنش ثابت استفاده می گردد.

آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای



$$N_f = c_2(\epsilon_t)^{-f_2}$$

$$N_f = c_1(\epsilon_t)^{-f_2}(E_s)^{-f_3}$$



آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای



Fatigue tests were performed on 3-in. \times 3-in. (75-mm \times 75-mm) beams by the third-point loading with a span of 12 in. (305 mm). The deflection at the center of beam Δ and the number of repetitions to failure N_f are shown in Table 7.8. Develop an equation relating the number of repetitions to failure and the tensile strain.

TABLE 7.8 Results of Fatigue Tests on HMA Specimens

	Test no.							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Δ (0.001 in.)	12.9	8.03	8.24	6.03	4.42	2.81	1.97	1.48
N_f	1110	3140	4115	6010	30,625	89,970	289,110	915,060

Note. 1 in. = 25.4 mm.

دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۶۱

آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای



Solution: The tensile strain for each test can be determined from Eq. 7.11, or $\epsilon_t = 12 \times 3 \times \Delta / (3 \times 144 - 4 \times 16) = 0.0978\Delta$. The strains for the eight tests are 12.6, 7.85, 8.06, 5.90, 4.32, 2.75, 1.93, and 1.45×10^{-4} . Figure 7.25 is a plot of ϵ_t versus $\log N_f$.

The inverse slope of the straight line $f_2 = 3/\log(11.9/1.34) = 3.162$. The intercept c_1 when $\epsilon_t = 1$ can be obtained from a given point $(\log \epsilon_t, \log N_f)$ on the straight line by

$$f_2 = \frac{\log N_f - \log c_1}{\log 1 - \log \epsilon_t}$$

or

$$\log c_1 = \log N_f + f_2 \log \epsilon_t \quad (7.31)$$

Given $f_2 = 3.162$, $N_f = 1000$, and $\epsilon_t = 11.9 \times 10^{-4}$, from Eq. 7.31, $\log c_1 = \log(1000) + 3.162 \log(0.00119) = -6.247$ or $c_1 = 5.66 \times 10^{-7}$. Therefore, the fatigue equation is

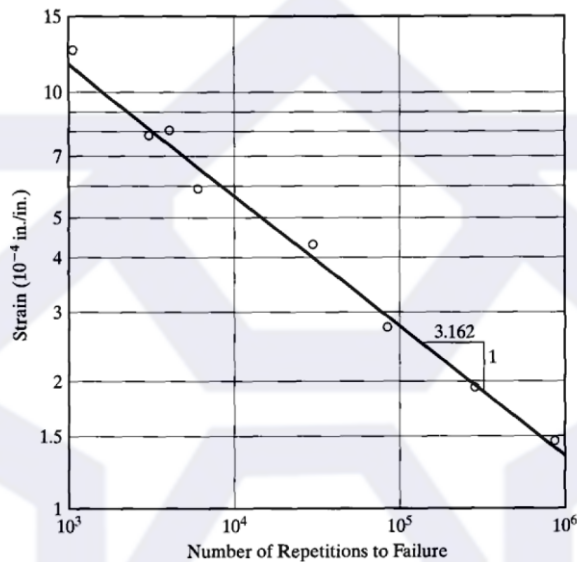
$$N_f = 5.66 \times 10^{-7} (\epsilon_t)^{-3.162}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۶۲

آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای



دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۶۳

آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای



$$N_f = 0.00432C\epsilon_t^{-3.291}|E^*|^{-0.854}$$

$$C = 10^M$$

$$M = 4.84 \left(\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.69 \right)$$

Note that, for a standard mix with an asphalt volume V_b of 11% and an air void volume of 5%, $M = 0$ or $C = 1$. This standard mix is used by the Asphalt Institute in the ninth edition of the design manual (AI, 1981a). After multiplying by a factor of 18.4 to account for the differences between laboratory and field conditions, the fatigue failure criterion becomes

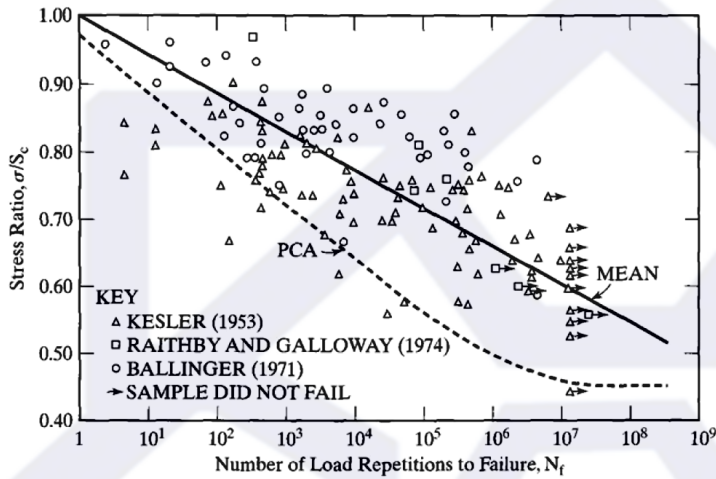
$$N_f = 0.0796\epsilon_t^{-3.291}|E^*|^{-0.854}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۶۴

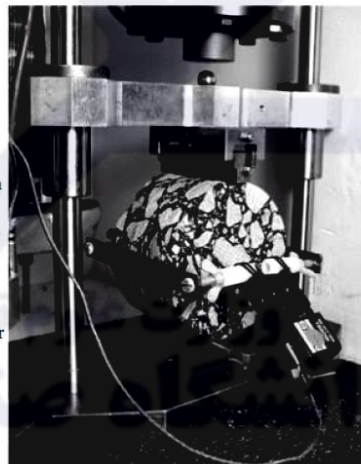
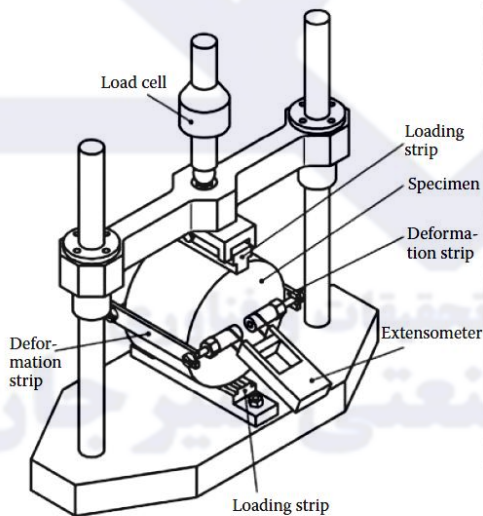
خستگی بتن



$$\log N_f = 17.61 - 17.61 \left(\frac{\sigma}{S_c} \right)$$

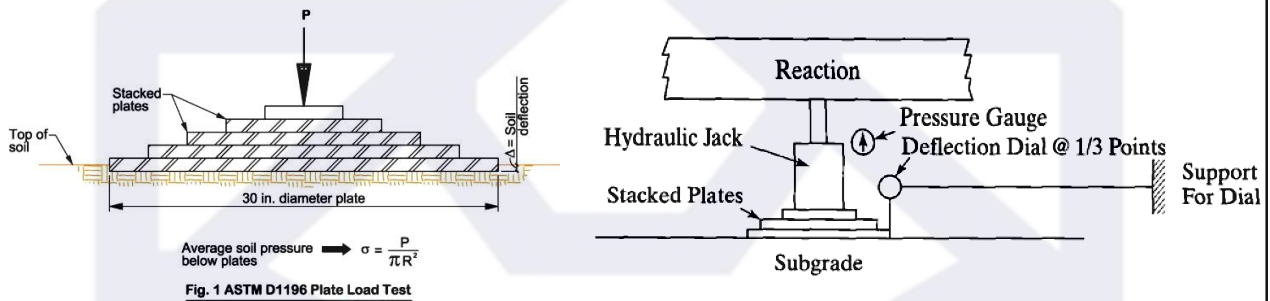
Note that the above equation is the same as fatigue equation asphalt mixes with $f_1 = 17.61$ and $f_2 = 17.61$. In the design of zero-maintenance pavements, Darter and Barenberg (1977) recommended the reduction of f_1 by one order of magnitude, to 16.61.

آزمایش خستگی به روش کشش غیر مستقیم



Specimen in place

مدول عکس العمل خاک بستر



دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۶۷

مدول عکس العمل خاک بستر



✓ در این آزمایش نیرو با نرخ مشخص به صفحه اعمال می‌شود تا مقدار آن به ۱۰ پوند بر اینچ مربع (۶۹ کیلوپاسکال) برسد.

✓ سپس منتظر می‌مانیم تا نرخ نشست به کمتر از ۰/۰۰۱ اینچ (۰/۰۲۵ میلیمتر) در هر دقیقه کاهش یابد.

✓ سپس با توجه به مقدار نیرو (۱۰ پوند بر اینچ مربع) و نشست مدول عکسالعمل به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$k = \frac{P}{\Delta}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۶۸

مدول عکس العمل خاک بستر



✓ در صورتی که قصد داشته باشیم تا در سایر رطوبت ها مدول عکس العمل خاک بستر را تعیین نماییم، می توان از رابطه زیر استفاده نمود.

$$k_s = \frac{d_u}{d_s} k_u$$

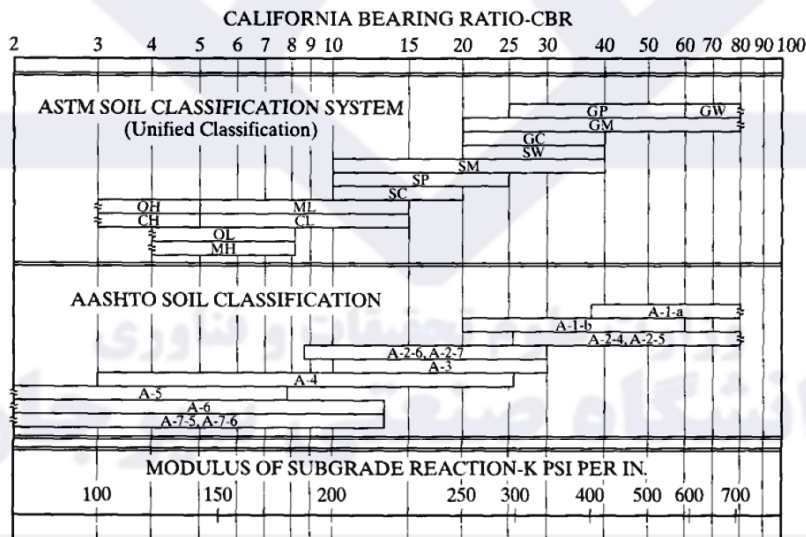
✓ d_u مقدار نشست به ازاء رطوبت میدانی و d_s نشست به ازاء رطوبت مورد نظر که با استفاده از آزمایش خزش یا تحکیم تحت بار ۱۰ پوند بر اینچ مربع تعیین می شود.

دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۶۹

مدول عکس العمل خاک بستر



دانشگاه صنعتی سیرجان

تحلیل و طراحی روسازی پیشرفته

۷۰

مدول الاستیسیته



TABLE 7.9 Elastic Moduli for Different Materials

Material	Range	Typical
Portland cement concrete	3×10^6 to 6×10^6	4×10^6
Cement-treated bases	1×10^6 to 3×10^6	2×10^6
Soil cement materials	5×10^4 to 2×10^6	1×10^6
Lime-flyash materials	5×10^5 to 2.5×10^6	1×10^6
Stiff clay	7600 to 17,000	12,000
Medium clay	4700 to 12,300	8000
Soft clay	1800 to 7700	5000
Very soft clay	1000 to 5700	3000

Note. Modulus in psi, 1 psi = 6.9 kPa.

ضریب پواسن



TABLE 7.10 Poisson Ratios for Different Materials

Material	Range	Typical
Hot mix asphalt	0.30-0.40	0.35
Portland cement concrete	0.15-0.20	0.15
Untreated granular materials	0.30-0.40	0.35
Cement-treated granular materials	0.10-0.20	0.15
Cement-treated fine-grained soils	0.15-0.35	0.25
Lime-stabilized materials	0.10-0.25	0.20
Lime-flyash mixtures	0.10-0.15	0.15
Loose sand or silty sand	0.20-0.40	0.30
Dense sand	0.30-0.45	0.35
Fine-grained soils	0.30-0.50	0.40
Saturated soft clays	0.40-0.50	0.45

مشخصات مکانیکی بتن



American Concrete Institute

مدول گسیختگی بتن

$$S_c = 8\sqrt{f'_c} \text{ to } 10\sqrt{f'_c}$$

مقاومت کششی غیرمستقیم

$$f_t = 6.5\sqrt{f'_c}$$

مدول الاستیسیته

$$E_c = 57,000 \sqrt{f'_c}$$

The coefficient of thermal expansion ranges from 3 to $8 \times 10^{-6}/^\circ\text{F}$ (5.4 to $14.4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$), with $5 \times 10^{-6}/^\circ\text{F}$ ($9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) as typical. The coefficient of drying shrinkage ranges from 0.5 to 2.5×10^{-4} , with 1×10^{-4} as typical.