

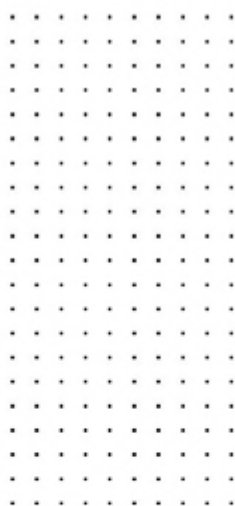
بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

آنالیز و طراحی

# روسازی

YANG H. HUANG

ویرایش دوم



مترجمان:

مهندس مصطفی نخعی ■ مهندس امین دولت پور  
کارشناس ارشد راه و ترابری دانشگاه تهران ■ کارشناس ارشد راه و ترابری دانشگاه تهران

سرشناسه	: هوانگ، یانگ هسین، ۱۹۲۷ - م. (Huang, Yang H. Yang Hsien)
عنوان و نام پدیدآور	: آنالیز و طراحی روسازی / [تالیف یانگ هسین هوانگ]: مترجمین مصطفی نخعی، امین دولت پور.
مشخصات نشر	: تهران: نوآور، ۱۳۹۲.
مشخصات ظاهری	: ۶۸۸ ص.
شابک	: ۹۷۸-۶۰۰-۱۶۸-۱۲۶-۴
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا
یادداشت	: عنوان اصلی: Pavement analysis and design, 2nd. ed, c2004.
موضوع	: روسازی -- طرح و ساختمان
موضوع	: سازه، تجزیه و تحلیل
شناسه افزوده	: نخعی، مصطفی، ۱۳۶۸ - مترجم
شناسه افزوده	: دولت پور، امین، ۱۳۶۸ - مترجم
رده بندی کنگره	: ۱۳۹۲ الف ۶۹ / TE۲۵۱
رده بندی دیویی	: ۶۲۵/۸
شماره کتابشناسی ملی	: ۳۳۹۱۰۸۲

## آنالیز و طراحی روسازی

مهندس مصطفی نخعی - مهندس امین دولت پور

نوآور

۱۰۰۰ نسخه

محمدرضا نصیرنیا

۹۷۸-۶۰۰-۱۶۸-۱۲۶-۴

مترجمین:

ناشر:

شمارگان:

ناظر چاپ:

نوبت چاپ:

شابک:



### نمایشگاه دائمی و مرکز فروش:

نوآور: تهران - خ انقلاب، خ فخرآزی، خ شهدای ژاندارمری  
نرسیده به خ دانشگاه ساختمان ایرانیان، پلاک ۵۸، طبقه دوم، واحد ۶  
۹۲-۱۹۱۶۴۸۴۶۶۴-۰۹۱۲۳۰۷۶۷۴۸

www.noavarpub.com

فروشگاه ۱: تهران خ انقلاب، نبش خ ۱۲ فروردین پلاک ۱۳۱۰، کتابفروشی الیاس تلفن: ۶۶۴۰۵۰۸۴ - ۶۶۹۵۵۸۷۸  
فروشگاه ۲: تهران خ انقلاب، بین خ ۱۲ فروردین و اردیبهشت، پلاک ۱۳۱۲، کتابفروشی صانعی تلفن: ۶۶۴۰۹۹۲۴ - ۶۶۴۰۵۳۸۵  
فروشگاه ۳: تهران خ انقلاب، مقابل دانشگاه تهران، جنب بانک ملت، پلاک ۱۲۱۲، کتابفروشی گوتنبرگ تلفن: ۶۶۴۰۲۵۷۹ - ۶۶۴۱۳۹۹۸  
فروشگاه ۴: اصفهان، م انقلاب، خ چهار باغ عباسی ابتدای خ سید علی خان، کتابفروشی مهرگان تلفن: ۰۳۱۱۲۲۱۲۷۵۱

کلیه حقوق چاپ و نشر این کتاب مطابق با قانون حقوق مؤلفان و مصنفان مصوف سال ۱۳۴۸ برای ناشر محفوظ و منحصراً متعلق به نشر نوآور می باشد. لذا هر گونه استفاده از کل یا قسمتی از این کتاب (از قبیل هر نوع چاپ، فتوکپی، اسکن، عکس برداری، نشر الکترونیکی، هر نوع انتشار به صورت اینترنتی، سی دی، دی وی دی، فیلم فایل صوتی یا تصویری و غیره بدون اجازه کتبی از نشر نوآور ممنوع بوده و شرعاً حرام است و متخلفین تحت پیگرد قانونی قرار می گیرند.

## فهرست مطالب

### مقدمه

#### فصل اول: مقدمه‌ای بر طراحی روسازی

- ۱-۱- تاریخچه
  - ۱-۲- انواع روسازی
  - ۱-۳- آزمایش‌های راه
  - ۱-۴- فاکتورهای طراحی
  - ۱-۵- روسازی راه، فرودگاه و راه آهن
- خلاصه  
مسائل

#### فصل دوم: تنش‌ها و کرنش‌ها در روسازی انعطاف‌پذیر

- ۲-۱- خاک همگن
  - ۲-۲- سیستم‌های لایه‌ای
  - ۲-۳- حل ویسکوالاستیک
- خلاصه  
مسائل

#### فصل سوم: برنامه کامپیوتری KENLAYER

- ۳-۱- پیشرفت‌های تئوری
  - ۳-۲- شرح برنامه
  - ۳-۳- مقایسه با راه حل‌های موجود
  - ۳-۴- تحلیل حساسیت
- خلاصه  
مسائل

تلفن: ۶۶۴۸۴۱۹۱ - ۲

نشر نوآور

## فصل چهارم: تنش‌ها و کرنش‌ها در روسازی صلب

۴-۱- تنش ناشی از تاب خوردگی

۴-۲- تنش‌ها و کرنش‌ها ناشی از بارگذاری

۴-۳- تنش‌های ناشی از اصطکاک

۴-۴- طراحی داوول‌ها و درزه‌ها

خلاصه

مسائل

## فصل پنجم: برنامه‌ی کامپیوتری KENSLABS

۵-۱- پیشرفت‌های تئوری

۵-۲- شرح برنامه

۵-۳- مقایسه با جواب‌های موجود

۵-۴- تحلیل حساسیت

خلاصه

مسائل

## فصل ششم: بار و حجم ترافیکی

۶-۱- روش طراحی

۶-۲- بار معادل چرخ تکی (ESWL)

۶-۳- ضریب بار محور هم ارز

۶-۴- آنالیز ترافیک

خلاصه

مسائل

## فصل هفتم: مشخصات مصالح

۷-۱- مدول برجهندگی

۷-۲- مدول دینامیکی مخلوط قیری

۷-۳- خصوصیات خستگی

تلفن: ۰۲-۶۶۴۸۴۱۹۱

۷-۴- پارامترهای تغییر شکل دائم

۷-۵- سایر خصوصیات

خلاصه

مسائل

### فصل هشتم: طراحی زهکش

۸-۱- نگرش کلی

۸-۲- مصالح زهکش

۸-۳- فرایند طراحی

خلاصه

مسائل

### فصل نهم: عملکرد روسازی

۹-۱- خرابی

۹-۲- قابلیت سرویس دهی

۹-۳- اصطکاک سطح

۹-۴- آزمایش نشست غیر مخرب (NDT)

۹-۵- عملکرد روسازی

خلاصه

مسائل

### فصل دهم: قابلیت اطمینان

۱۰-۱- مفاهیم آماری

۱۰-۲- روش های احتمالی

۱۰-۳- تغییر پذیری

۱۰-۴- روش روزنبلوٹ

خلاصه

مسائل

۶۶۴۸۴۱۹۱ - تلفن ۲

### فصل یازدهم: طراحی روسازی انعطاف پذیر

۱۱-۱- روش طراحی مکانیستی کالیبره شده

۱۱-۲- روش اتحادیه آسفالت

۱۱-۳- روش آشتو

۱۱-۴- طراحی شانه‌های روسازی انعطاف پذیر

خلاصه

مسائل

### فصل دوازدهم: طراحی روسازی صلب

۱۲-۱- روش طراحی مکانیستی کالیبره شده

۱۲-۲- روش انجمن سیمان پرتلند (PCA)

۱۲-۳- روش آشتو

۱۲-۴- روسازی‌های بتنی مسلح پیوسته

۱۲-۵- طراحی شانه‌های روسازی صلب

خلاصه

مسائل

### فصل سیزدهم: طراحی روکش

۱۳-۱- انواع روکش

۱۳-۲- روش‌های طراحی

۱۳-۳- روش مؤسسه آسفالت

۱۳-۴- روش انجمن سیمان پرتلند (PCA)

۱۳-۵- روش آشتو

خلاصه

مسائل

تلفن: ۲-۶۶۴۸۴۱۹۱

## مقدمه

کتاب تحلیل و طراحی روسازی نوشته هوانگ یک کتاب مرجع برای تمامی دانشجویان مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد می‌باشد. این کتاب در ۱۳ فصل جمع‌بندی شده است که به تحلیل و طراحی روسازی به روش مکانیستی-تجربی، شرح نرم‌افزارهای کامپیوتری، آزمایش‌های روسازی و روش‌های تجربی طراحی روسازی (آشتو و ...) می‌پردازد.

با توجه به حجم بالای کتاب و اهمیت این درس، صلاح دانستیم با ترجمه این کتاب گامی در جهت ارتقا سطح علمی دانشجویان برداشته باشیم. در این کتاب برخی اصطلاحات تخصصی به فارسی برگردان شد که معادل لاتین آنها در پاورقی آورده شده است تا دانشجویانی که قصد مطالعه بیشتر دارند از این کلید واژه‌ها استفاده نمایند. لازم به ذکر است که در کتاب لاتین پیوست‌هایی نیز وجود دارد که به علت عدم نیاز و افزایش حجم کتاب از ترجمه این بخش اجتناب شد.

در ترجمه کتاب سعی شده است از ترجمه تحت اللفظی جملات اجتناب شود تا با ارائه ترجمه‌ای روان، مفاهیم موجود به خوبی بیان شوند. با وجود تلاش‌های فراوان برای شیوایی مفاهیم متن، به علت حجیم بودن کتاب امکان وجود مشکلات نگارشی و مفهومی وجود دارد. لذا از دانشجویان محترم تقاضا می‌نماییم تا نقص‌های کتاب را از طریق ایمیل زیر به ما متذکر شوند:

از جناب آقای دکتر فرزانه استاد گران‌قدر دانشگاه تهران که با علم و تسلط کامل بر مفاهیم کتاب و تدریس کامل کتاب کمکی شایان در ترجمه این کتاب به ما نمودند کمال تشکر و قدردانی را می‌نماییم. همچنین از جناب آقای دکتر بهنیا مدیر گروه محترم راه و ترابری دانشکده فنی دانشگاه تهران که بستری مناسب جهت رشد علمی و ارتقاء سطح کیفی دانشجویان فراهم نمودند نیز کمال تشکر و قدردانی را می‌نماییم.

همچنین از اساتید گران‌قدر جناب آقای مهندس حسین خدنگی و جناب آقای دکتر محمد حسن میرابی مقدم که نقشی اساسی در تقویت بنیه علمی ما داشتند نیز کمال تشکر و قدردانی را می‌نماییم.

تلفن: ۲-۶۶۴۸۴۱۹۱

# فصل اول

## مقدمه‌ای بر طراحی روسازی

### ۱-۱- تاریخچه

گرچه طراحی روسازی بتدریج از هنر به علم تبدیل گشت اما هنوز هم تجربه نقش مهمی را در آن ایفا می‌کند. قبل از دهه‌ی ۱۹۲۰ طراحی ضخامت روسازی کاملاً براساس تجربه بود و ضخامت مشابهی برای تمامی مقاطع راه حتی برای خاک‌های بسیار متفاوت، استفاده می‌شد. با توجه به تجارب بدست آمده روش‌های متعددی جهت تعیین ضخامت روسازی توسط آژانس‌های مختلف بوجود آمد. در این فصل از برخی اصطلاحات تخصصی استفاده شده است زیرا فرض بر این است که دانشجویانی که این کتاب را مطالعه می‌کنند دانشجویان کارشناسی ارشد و مقاطع بالاتر هستند و واحدهایی را در مهندسی راه و ترابری و مهندسی عمران گذرانده‌اند و آشنا به این اصطلاحات می‌باشند.

### ۱-۱-۱- روسازی انعطاف‌پذیر

روسازی‌های انعطاف‌پذیر از قیر و مصالح دانه‌ای ساخته می‌شوند. اولین راه آسفالتی در سال ۱۸۷۰ در ایالات متحده و در ایالت نیوجرسی ساخته شد. اولین ورقه‌های آسفالتی با مخلوط قیر خالص گرم با مصالح زاویه‌دار و ماسه‌های دانه‌ای و فیلرهای معدنی در سال ۱۸۷۶ در خیابان پنسیلوانیا در واشینگتن اجرا شد که قیر آن از دریاچه ترینیداد تهیه شده بود. مطابق گزارش FHWA تا سال ۲۰۰۱، ۲/۵ میلیون مایل راه روسازی شده در ایالات متحده ساخته شده است که ۹۴٪ آن آسفالتی است.

### روش‌های طراحی

روش‌های طراحی روسازی انعطاف‌پذیر را می‌توان به ۵ گروه تقسیم کرد: روش‌های تجربی با و



بدون آزمایش مقاومت خاک، روش محدود کردن شکست برشی، روش محدود کردن نشست، روش‌های رگرسیونی مبتنی بر عملکرد روسازی و آزمایش راه و روش مکانیستی - تجربی.

**روش‌های تجربی:** استفاده از روش‌های تجربی بدون انجام آزمایش مقاومت خاک به تاریخ توسعه سیستم طبقه‌بندی خاک راه‌های عمومی<sup>۱</sup> باز می‌گردد (هوگنتوگر و ترزاقی، ۱۹۲۹) که در آن خاک بستر به صورت یکنواخت از A-۱ تا A-۸ و غیر یکنواخت از B-۱ تا B-۳ طبقه‌بندی شده بود. این سیستم بعدها توسط هیئت تحقیقات راه در سال ۱۹۴۵ اصلاح گردید که در آن خاک‌ها از A-۱ تا A-۸ گروه‌بندی شدند و شاخص گروه نیز برای تمایز خاک‌ها در هر گروه بکار گرفته شد. استیل در سال ۱۹۴۵ در مورد بکار بستن طبقه‌بندی هیئت تحقیقات و شاخص گروه در تعیین ضخامت زیر اساس و کل ضخامت روسازی بدون بکار بردن آزمایش‌های مقاومت، تحقیقاتی انجام داد.

روش‌های تجربی با انجام آزمایش مقاومت اولین بار توسط سازمان راه‌های کالیفرنیا در سال ۱۹۲۹ (پورتر<sup>۲</sup> ۱۹۵۰) انجام شد. ضخامت روسازی متناسب با نسبت باربری کالیفرنیا<sup>۳</sup> (CBR) در نظر گرفته شد. CBR مقاومت خاک بستر در برابر نفوذ نسبت به مقاومت مصالح سنگی شکسته استاندارد در برابر نفوذ تعریف می‌شود. مطالعات گسترده‌ای توسط گروه مهندسين ارتش آمریکا<sup>۴</sup> در طول جنگ جهانی دوم در زمینه طراحی براساس CBR انجام گردید و این روش بعد از جنگ مورد توجه بسیاری از طراحان قرار گرفت.

عیب روش‌های تجربی در این است که می‌توان آن را تنها در شرایط محیطی، مصالح و بارگذاری معلوم استفاده کرد. و اگر این شرایط تغییر کند، طراحی دیگر اعتباری ندارد و بایستی با سعی و خطا روش جدیدی برای سازگاری با این شرایط بوجود آورد.

**روش محدود کردن شکست برشی:** روش محدود کردن شکست برشی برای تعیین ضخامت روسازی به نحوی مورد استفاده قرار می‌گیرد که شکست برشی اتفاق نیافتد. چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی اصلی‌ترین خصوصیات اجزای روسازی و خاک بستر هستند که بایستی مورد توجه قرار گیرند. باربر<sup>۵</sup> در سال ۱۹۴۶ از فرمول باربری ترزاقی جهت تعیین ضخامت روسازی استفاده نمود. مک لود<sup>۶</sup> در سال ۱۹۵۳ استفاده از اسپیرال لگاریتمی را جهت تعیین ظرفیت باربری روسازی پیشنهاد داد. این روش‌ها در کتاب یودر<sup>۷</sup> در سال ۱۹۵۹ با عنوان مبانی طراحی روسازی آورده شدند ولی در ویرایش دوم این کتاب اشاره‌ای به آنها نشد که این امر عجیبی نیست زیرا با چنین افزایشی در سرعت و حجم ترافیک، روسازی بایستی برای رانندگی راحت طراحی شود نه برای جلوگیری از اندکی شکست برشی.

**روش‌های محدود کردن نشست:** روش محدود کردن نشست برای تعیین ضخامت روسازی به نحوی مورد استفاده قرار می‌گیرد که نشست قائم از یک حد مجاز تجاوز نکند. کمیته راه‌های ایالتی کانزاس در سال ۱۹۴۱ معادله بوسینسک را اصلاح کرد و نشست خاک بستر را به  $0.1 \text{ in. (2.54 mm)}$  محدود کرد. نیروی دریایی آمریکا نیز در سال ۱۹۵۳ تئوری دو لایه‌ای برمیستر را اعمال و نشست سطح

۱. Public roads (PR)

۲. Porter, 1950

۳. California Bearing Ratio

۴. Us. Corps of Engineers

۵. Barber, 1946

۶. Mcleod, 1953

۷. Yoder, 1959

را به (۶/۳۵mm). (۰/۲۵in.) محدود کرد. استفاده از معیار نشست در طراحی این مزیت را دارد که به راحتی در محل قابل اندازه‌گیری می‌باشد ولی متأسفانه شکست روسازی نه به علت نشست بلکه به علت تنش‌ها و کرنش‌های بیش از حد اتفاق می‌افتد.

**روش‌های رگرسیون مبتنی بر کارایی روسازی و یا آزمایش‌های راه:** یک مثال مناسب برای استفاده از معادلات رگرسیونی در طراحی، روش آشتو می‌باشد که مبتنی بر نتایج آزمایش‌های راه است. عیب این روش در این است که معادلات طراحی قابل اعمال بر شرایط محلی هستند و برای شرایط دیگر اصلاحاتی مبتنی بر تئوری و آزمایش مورد نیاز است. معادلات رگرسیونی را می‌توان از عملکرد راه‌های موجود مانند سیستم ارزیابی روسازی COPEs (دارتر و همکارانش، ۱۹۸۵) و EXPEAR (هال و همکارانش، ۱۹۸۹) اقتباس نمود. متأسفانه روسازی‌هایی که در معرض آزمایش راه قرار داشتند اطلاعات مراحل ساخت و مصالح آنها به خوبی جمع‌آوری نشد و پراکندگی زیاد همراه با خطای استاندارد بالایی داشتند و به علت این عدم قطعیت‌های موجود استفاده از آنها در طراحی روسازی کاهش یافت.

**روش‌های مکانیستی - تجربی:** روش مکانیستی - تجربی طراحی مبتنی بر مکانیک مصالح است که یک ورودی مانند بار چرخ را به یک خروجی مانند تنش و یا کرنش مرتبط می‌سازد و از مقدار پاسخ، برای پیش‌بینی خرابی‌ها در آزمایش‌های آزمایشگاهی و اطلاعات عملکرد میدانی استفاده می‌کند. استفاده از اطلاعات مشاهده شده در مورد عملکرد روسازی ضروری است زیرا تنها تئوری برای طراحی واقعی کفایت نمی‌کند. کرخوون و دورمون<sup>۲</sup> در سال ۱۹۵۳ استفاده از کرنش فشاری قائم روی سطح بستر را به عنوان معیار خرابی جهت کاهش تغییر شکل دائمی پیشنهاد دادند. همچنین سال و پل در سال ۱۹۶۰ برای کم کردن ترک‌های ناشی از خستگی، استفاده از کرنش کششی در زیر لایه آسفالتی را به عنوان معیار خرابی مطرح کردند. این موارد در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. استفاده از مفاهیم فوق برای اولین بار در ایالات متحده جهت طراحی روسازی توسط دورمون و مت کاف<sup>۳</sup> در سال ۱۹۶۵ مطرح شد. استفاده از کرنش فشاری قائم جهت کنترل تغییر شکل دائم مبتنی بر این حقیقت است که کرنش پلاستیک متناسب با کرنش الاستیک در روسازی می‌باشد. بنابراین با کنترل کرنش الاستیک روی بستر، کرنش الاستیک در سایر نقاط بالای خاک بستر نیز کنترل می‌شود و در واقع بزرگی تغییر شکل دائم در سطح روسازی نیز کنترل خواهد شد. این دو معیار تغییر شکل توسط مؤسسه بین‌المللی نفتی شل (کلاسن و همکارانش<sup>۴</sup> در سال ۱۹۷۷) و مؤسسه آسفالت (شوگ و همکارانش<sup>۵</sup> در سال ۱۹۸۲) در طراحی به روش مکانیستی - تجربی این مؤسسات مورد استفاده قرار گرفت. مزیت‌های استفاده از این روش عبارتند از: بهبود قابلیت اطمینان طراحی، قابلیت پیش‌بینی خرابی‌ها و امکان برون‌یابی از اندک اطلاعات آزمایشگاهی و محلی.

عبارت "Hot Mix Asphalt" در شکل ۱-۱ مترادف با بتن آسفالتی (AC)<sup>۶</sup> است. بتن آسفالتی

۱. Darter et al., 1985

۲. Hall et al., 1989

۳. Kerkhoven and Dorman, 1953

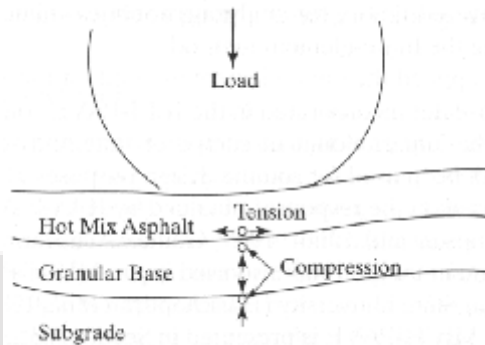
۴. Dorman anol met calf, 1965

۵. Claussen et al., 1977

۶. Shook et al., 1982

۷. Asphalt Concreate (Ac)

مخلوطی از قیر و سنگ دانه است که در مخلوط کن تولید شده و بایستی در دمای بالا مخلوط، پخش و متراکم گردد. برای اجتناب از اشتباه بین روسازی بتنی<sup>۱</sup> (pcc) و بتن آسفالتی، عبارت مخلوط آسفالتی گرم (HMA) در این کتاب به جای بتن آسفالتی استفاده می‌شود.



شکل ۱-۱: کرنش‌های کششی و فشاری در روسازی انعطاف‌پذیر

### سایر پیشرفت‌ها

سایر پیشرفت‌ها در روسازی انعطاف‌پذیر شامل استفاده از برنامه‌های کامپیوتری، لحاظ کردن قابلیت سرویس‌دهی و قابلیت اطمینان و در نظر گرفتن بارگذاری دینامیکی می‌باشد.

**برنامه‌های کامپیوتری:** تاکنون برنامه‌های کامپیوتری متعددی مبتنی بر تئوری لایه‌ای برمیستر بوجود آمده است که اولین و مشهورترین آنها به نام CHEV توسط شرکت تحقیقات چورون (وارن و دیکمن<sup>۲</sup>، ۱۹۶۳) تولید شد. این برنامه که فقط برای مصالح الاستیک خطی قابل استفاده بود بعدها توسط موسسه آسفالت با عنوان برنامه DAMA اصلاح گردید تا برای مصالح غیرخطی نیز قابل استفاده باشد (هوانگ و ویتزاک، ۱۹۷۹). نرم‌افزار خوب دیگری که در این زمینه وجود دارد BISAR می‌باشد که توسط شل تولید شد که نه تنها بارهای قائم بلکه بارهای افقی را نیز در نظر می‌گیرد (دی جانگ و همکارانش<sup>۳</sup>، ۱۹۷۳). نرم‌افزار دیگری که توسط دانشگاه برکلی تولید شد ELSYM5 نام گرفت و برای سیستم‌های ۵ لایه تحت بار چرخ‌های چندگانه (کوپرمن<sup>۴</sup> و همکارانش، ۱۹۸۶) مورد استفاده قرار می‌گرفت. برنامه کامپیوتری به نام PDAMP با استفاده از تئوری لایه‌ای توسط فین و همکارانش<sup>۵</sup> در سال ۱۹۸۶ جهت پیش‌بینی ترک خستگی و شیارشدگی در آسفالت تولید شد. آنها دریافتند که پاسخ‌های بحرانی PDAMP با پاسخ‌های SAPIV (دیگر نرم‌افزار دانشگاه برکلی که براساس اجزاء محدود می‌باشد) جواب‌های نزدیک به هم دارند.

خازانویچ و لوانیدس<sup>۶</sup> در سال ۱۹۹۵ برنامه کامپیوتری به نام DIPLOMAT نوشتند که در آن سیستم چند لایه‌ای برمیسترگسترش یافت تا تعدادی صفحه‌ی الاستیک و بستر فندار را شامل شود. از این برنامه در شکل کنونی تنها می‌توان در مورد بارهای درونی و موارد محدودی استفاده نمود، زیرا یک لایه

۱. Portland cement concrete (pcc)  
 ۲. Warren and Dieckmann, 1963  
 ۳. Hwang and witzak, 1979  
 ۴. Kopperman et al., 1986  
 ۵. Finn et al., 1986  
 ۶. Khazanovich and Ioannides, 1995

صلب بتنی را می‌توان به عنوان یک لایه از چندین لایه در نظر گرفت که این موضوع در بخش ۹-۳-۵ آورده شده است و نیازی به این نیست که بتن را به عنوان یک صفحه جداگانه در نظر بگیریم مگر اینکه بار در نزدیکی گوشه و یا مرزهای ناپیوسته دال اعمال شود.

مهمترین اشکال تئوری لایه‌ای فرض همگن بودن هر لایه و خصوصیات مشابه در طول لایه می‌باشد. این فرضیات آنالیز سیستم‌های لایه‌ای متشکل از مصالح غیرخطی مانند اساس دانه‌ای تثبیت نشده را مشکل می‌سازد. مدول الاستیک این مصالح وابسته به تنش است و در طول لایه تغییر می‌کند بنابراین یک سؤال بلافاصله مطرح می‌شود: کدام نقطه در لایه غیر خطی بایستی انتخاب شود تا نماینده کل لایه باشد؟ اگر فقط بحرانی‌ترین نقطه تنش، کرنش و یا نشست مطلوب باشد می‌توان نقطه‌ای نزدیک به محل اعمال بار را انتخاب نمود ولی اگر تنش، کرنش و نشست در نقاط مختلف، دور و یا نزدیک از محل اعمال بار مطلوب باشد استفاده از تئوری لایه‌ای برای آنالیز مصالح غیرخطی مشکل خواهد بود. لازم به ذکر است که با استفاده از روش اجزای محدود می‌توان بر این مشکلات فایز آمد. دانگین و همکارانش<sup>۱</sup> در سال ۱۹۶۸ روش اجزای محدود برای آنالیز روسازی را برای اولین بار بکار بردند. این روش بعدها در نرم‌افزار ILLI - PAVE (راد و فیگورا، ۱۹۸۰) استفاده شد. نیاز به حجم حافظه زیاد و زمان طولانی اجرای این برنامه باعث شد که از آن برای محاسبات طراحی به صورت عمده استفاده نشود. البته تعدادی معادلات رگرسیونی مبتنی بر پاسخ، برای استفاده در طراحی در این نرم‌افزار وجود دارد (تامسون و البوت ۱۹۸۵؛ گومز و تامسون، ۱۹۸۶). روش غیرخطی اجزای محدود در نرم‌افزار MICH - PAVE که توسط دانشگاه میشیگان (هری‌چندران و همکارانش ۱۹۸۹) نوشته شد، استفاده شد. اطلاعات بیشتر در زمینه ILLI-PAVE و MICH-PAVE در بخش ۲-۳ موجود است.

**قابلیت سرویس‌دهی و قابلیت اطمینان:** براساس نتایج آزمایش بزرگ آشتو کری و اریک در سال ۱۹۶۰ مفاهیم عملکرد قابلیت سرویس‌دهی روسازی را مطرح کردند و خاطرنشان کردند که ضخامت روسازی بایستی وابسته به شاخص قابلیت سرویس‌دهی پایانی مورد نیاز باشد. لمر و معاون‌زاده<sup>۲</sup> در سال ۱۹۷۱ مفهوم قابلیت اطمینان را به عنوان یک فاکتور در طراحی روسازی ارائه کردند و نرم‌افزار مبتنی بر احتمال به نام VESYS توسط معاون‌زاده و همکارانش در سال ۱۹۷۷ برای آنالیز سیستم روسازی وسیکوالاستیک سه لایه نوشته شد. این نرم‌افزار مفاهیم قابلیت سرویس‌دهی و قابلیت اطمینان را دارا می‌باشد و توسط FHWA<sup>۳</sup> اصلاح گردید و نسخه‌های متعددی از آن تولید شد.<sup>۴</sup> همچنین مفهوم قابلیت اطمینان در سیستم طراحی روسازی انعطاف‌پذیر تک‌زاس (دارتر و همکارانش در سال ۱۹۷۳) و آیین نامه طراحی آشتو آورده شده است. اگرچه روش آشتو اساساً تجربی است اما با جایگذاری مدول بر جهندگی<sup>۵</sup> بستر به جای مقدار تجربی باربری خاک، گامی در جهت طراحی مکانیستی برداشته شد. مدول بر جهندگی همان مدول الاستیک تحت بار تکراری می‌باشد و با آزمایش‌های آزمایشگاهی قابل برآورد می‌باشد. جزئیات مدول بر جهندگی در بخش ۱-۷ و قابلیت سرویس‌دهی در بخش ۲-۹ و همچنین قابلیت اطمینان در بخش ۱۰ آورده شده‌اند.

۱. Kopperm et al., 1986

۲. Lemer and Moavenzadeh, 1971

۳. Federal Highway Administration

۴. Lai, 1977; Rauhut and jordahl, 1979; von Quintosetal. 1988; jordahl and Rouhut, 1983; Brademeyer, 1958.

۵. Resilient Modulus